

Міністерство освіти та науки України

Луцький національний технічний
університет

НАУКОВІ НОТАТКИ

Міжвузівський збірник наукових праць
(за галузями знань «Фізико-математичні
науки» та «Технічні науки»)

Випуск 73

Луцьк 2022

Міжвузівський збірник наукових праць «Наукові нотатки» за галузями знань «Фізико-математичні науки» та «Технічні науки».

Включено до категорії Б Переліку наукових фахових видань України (відповідно до Порядку формування Переліку наукових фахових видань України, затвердженого наказом МОН України від 15 січня 2018 року № 32, зареєстрованого в Мін'юсті України 06 лютого 2018 року за № 148/21600) за галузями знань «Фізико-математичні науки» та «Технічні науки» за науковими спеціальностями: 105 Прикладна фізика та наноматеріали; 131 Прикладна механіка; 132 Матеріалознавство; 133 Галузеве машинобудування – від 24.09.2020 р., Наказ МОН України № 1188 та за науковими спеціальностями 113 Прикладна математика, 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – від 26.11.2020 р., Наказ МОН України № 1471.

DOI 10.36910/6775.24153966.2022.73

В збірнику можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії

Веб-сайт збірника:

http://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi_notatky

Довідки за e-mail: naukovi_notatki@lutsk-ntu.com.ua

Рекомендовано до друку Вченою радою Луцького національного технічного університету, протокол № 10 від 26 травня 2022 р.

Свідоцтво Міністерства юстиції України про державну реєстрацію:
Серія КВ №15901-4373ПР від 13.11.2009 р.

ISSN: 24-15-39-66

© Луцький національний технічний університет, 2022 р.

РЕДАКЦІЙНИЙ ШТАТ

Головний редактор:

Рудь Віктор Дмитрович д.т.н., проф., професор кафедри матеріалознавства Луцького національного технічного університету

Заступник головного редактора:

Шимчук Сергій Петрович к.т.н., доц., доцент кафедри галузевого машинобудування Луцького національного технічного університету

Відповідальний секретар:

Клименко Олександр Дмитрович к.т.н., доц., доцент кафедри галузевого машинобудування Луцького національного технічного університету

Редакційна колегія:

Жигуц Юрій Юрійович д.т.н., проф., завідувач кафедри технології машинобудування Ужгородського національного університету;

Каплун Павло Віталійович д.т.н., доц., професор кафедри трибології, автомобілів та матеріалознавства, Хмельницького національного університету;

Клименко Сергій Анатолійович д.т.н., проф., заступник директора з наукової роботи Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України;

Майстренко Анатолій Львович д.т.н., проф., завідувач відділу Комп'ютерного матеріалознавства надтвердих композиційних матеріалів для породоруйнівних інструментів Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України;

Стельмах Олександр Устимович д.т.н., с.н.с., професор Пекінського технологічного університету (Китай);

Заболотний Олег Васильович к.т.н., доц., проректор з науково-педагогічної роботи та досліджень Луцького національного технічного університету;

Сомов Дмитро Олександрович к.т.н., доц., доцент кафедри прикладної механіки Луцького національного технічного університету;

Ткачук Анатолій Анатолійович к.т.н., доц., доцент кафедри електроніки та телекомунікацій Луцького національного технічного університету;

Рібейро Луїс Фролен д.т.н., проф., професор Політехнічного інституту Браганси (Португалія);

Елісон МакМілан (Alison J Mcmillan), Professor (Full) in Aerospace Technology, Wrexham Glyndwr University, United Kingdom;

Баглюк Генадій Анатолієвич д.т.н., проф., заступник директора Інституту проблем матеріалознавства ім. І. Францевича НАН України;

Дядюра Костянтин Олександрович д.т.н., проф., професор кафедри ПМ і ТКМ Сумського державного технічного університету;

Єфременко Василь Георгійович д.т.н., проф., завідувач кафедри фізики, професор кафедри матеріалознавства та перспективних технологій ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»;

Лобода Петро Іванович д.т.н., проф., декан інженерно-фізичного факультету НТУ "КПІ" ім. І. Сікорського;

Савчук Петро Петрович д.т.н., проф., п.н.с. НДЧ Луцького національного технічного університету;

Уманський Олександр Павлович д.т.н., проф., завідувач відділу матеріалознавства та інженерії високостійких поверхневих шарів Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН;

Штерн Михайло Борисович завідувач відділу реологічних та фізико-хімічних основ технології порошкових матеріалів Інституту проблем матеріалознавства ім.І.М.Францевича НАН України;

Зайчук Наталія Петрівна к.т.н., доц., доцент кафедри матеріалознавства Луцького національного технічного університету;

Імбірочич Наталія Юріївна к.т.н., доц., доцент кафедри матеріалознавства Луцького національного технічного університету;

Кашицький Віталій Павлович к.т.н., доц., доцент кафедри матеріалознавства Луцького національного технічного університету;

Повстяной Олександр Юрійович к.т.н., доц., доцент кафедри прикладної механіки Луцького національного технічного університету;

Налобіна Олена Олександрівна д.т.н., проф., професор кафедри будівельних, дорожніх, меліоративних, сільськогосподарських машин та обладнання Національного університету водного господарства та природокористування;

Мартинюк Віктор Леонідович к.т.н., доц., доцент кафедри галузевого машинобудування Луцького національного технічного університету

Пуць Віталій Степанович к.т.н., доц., завідувач кафедри галузевого машинобудування Луцького національного технічного університету;

Цизь Ігор Євгенович к.т.н., доц., доцент кафедри аграрної інженерії Луцького національного технічного університету;

Мікуліч Олена Аркадіївна д.т.н., доц., доцент кафедри прикладної математики та механіки Луцького національного технічного університету;

Пастернак Ярослав Михайлович д.ф.-м.н., доц., завідувач кафедри прикладної математики та механіки Луцького національного технічного університету;

Пальчевський Богдан Олексійович д.т.н., проф., професор кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Луцького національного технічного університету;

Лапченко Юрій Сергійович к.т.н., доц., доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Луцького національного технічного університету;

Крадінова Тетяна Адамівна к. ф.-м. н., доц., доцент кафедри фундаментальних наук Луцького національного технічного університету;

Луцьов Сергій Валентинович к. ф.-м. н., доц., доцент кафедри фундаментальних наук Луцького національного технічного університету;

Федосов Сергій Анатолійович д. ф.-м. н., проф., професор кафедри експериментальної фізики та інформаційно-вимірювальних технологій Волинського національного університету імені Лесі Українки;

Яцек Щот (Jacek Szczot) PhD, голова правління машинобудівного підприємства з виготовлення високоточного обладнання WSK Poznan, Польща.

ЗМІСТ

Зміст	5
Н.В. Шинкарчук, В.В. Кот Визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень ізотропної пластинки з впаяним круглим пружним диском.....	9
В.В. Бурькин, Ю.Э. Рыжов, Л.Г. Полонский, Н.А. Балицкая, Ю.А. Харламов Смазочно-охлаждающие технологические среды при финишной обработке деталей с покрытиями.....	15
Г. В. Алексієнко Використання високопродуктивного інструменту як метод скорочення часу виготовлення деталей на верстатах з ЧПУ.....	21
Г.М. Губаль Математичне дослідження стійкості особливих точок систем диференціальних рівнянь, які описують швидкості біохімічних процесів.....	29
Дахмані Мохамед Вулично-шляхові мережі міст та їх елементи: особливості організації.....	40
С.В. Зозуля Механізми впровадження технології замкненого циклу використання води в умовах експлуатації льодового катка.....	47
Т.І. Каткова Забезпечення криптографічного захисту державних інформаційних ресурсів.....	54
А.Ю. Мальцев Щодо питання прогнозування з використанням класичних і нейромережевих методів машинного навчання.....	59
І.А. Мороз, В.Я. Шемет Особливості проникнення рідин в порошкові матеріали.....	64
А.Я. Ганзюк, М.С. Красівська Дослідження сорбційної здатності катіон заміщених форм сапонітових глин.....	67
О. І. Сидоренко Інноваційні технології розширення спектру дії Bluetooth.....	73
А.К. Автухов, В.А. Бантковський, О.Д. Мартиненко Вплив технологічних прийомів виробництва на рівень залишкового аустеніту в робочому шарі виробів із хромонікелевого чавуну.....	80
Б.В. Єфременко, В.І. Журнаджи, Н.П. Зайчук, С.П. Шимчук, Ю.Г. Чабак, І. Петришинець, В.Г. Єфременко Мікробудова та властивості сталі аісі 3161 біомедичного призначення, виготовленої методом LPBF-друку.....	86
Д.В. Теличко Методика налаштування у режимі реального часу системи бездротового живлення апарату «штучне серце».....	94
Т.І. Четвержук, Р.Г. Редько, Р.М. Полінкевич, О.М. Залета, Б.П. Валецький Проблеми та задачі проектування та розрахунку несучих частин металорізальних верстатів з урахуванням навантажень.....	101
С. Ю. Чайковський Дослідження методу коригування періоду калібрування вимірювального обладнання на основі методу реакції.....	105
В.П. Кашицький, О.Л. Садова, І.В. Боярська, С.Л. Янчук Інтенсифікація процесу формування біокомпозитів на основі глютину, модифікованих сульфатом натрію.....	113
С.Я. Підгайчук, Г.А. Покришко, О.С. Дробот, С.В. Смутко, Н.М. Яворська Особливості хімічного фосфатування деталей із чавуну в системах водопостачання.....	120
О.М. Сизоненко, О.І. Христо, С.В. Конотоп Особливості побудови системи керування та моніторингу процесу іскро-плазмового спікання дисперсних матеріалів.....	126
О.Ю. Пастух, В.Є. Сахнюк, О.В. Замуруєва, А.М. Шутковський Вплив немагнітних домішок на струм джоузефсона в snіns контактах для температур, близьких до критичної.....	136
С.А. Федосов, Д.А. Захарчук, О.В. Замуруєва, В.Є. Сахнюк, Л.І. Панасюк Рівень Фермі в кристалах антимоніду кадмію при наявності радіаційних дефектів.....	143
М.Ю. Думанчук, Н.В. Тарельник, В.О. Пирогов Вдосконалення технологічних методів захисту гнучких елементів пружних муфт від фретинг-корозії.....	149
М.В. Глобчак, О.Л. Мاستикаш, М.М. Борис Прикладні засади застосування математичних методів у дослідженні взаємодії пунктів ремонту автотранспортних засобів.....	157
О.А. Мікуліч Модельовання динамічного напруженого стану пінистих матеріалів за дії концентрованого навантаження.....	166
Д.А Гончарук, О.М. Гріначевський, О.В. Хоменко, Г.М. Молчановська, Г.О. Максимова Дослідження особливостей формування структури сплаву Fe - 55 % мас. Ga.....	171
В.О. Колесник, А.В. Божко, А.О. Нешта, Д.Г. Малимоненко Дослідження впливу режимів різання на температурне розширення свердла та точність отворів свердлінні пакетів «вуглепластик/ титановий сплав».....	177
О.В. Гуда, Т.А. Крадінова, В.М. Тимошук Варіаційний метод виведення рівнянь руху та граничних умов у круглій пластині.....	190

В.М. Максимич Електропровідні та поляризаційні властивості гетерофазного композиту ієрархічної архітектури діоксид кремнію<тіосечовина<дихлорид кобальту>>.....	196
М. С. Ткаченко Застосування R-CNN при автоматичному позиціонуванні об'єктів через нейромережевий аналіз графічних даних.....	203
О.В. Загородній Можливості штучних нейронних мереж діагностування захворювань легень за рентгенівськими знімками.....	210
В.П. Кашицький, В.М. Малець, О.Л. Садова, В.О. Шегинський Експлуатаційні характеристики глютинових біокомпозитів, наповнених деревним борошном.....	216
О.О. Налобіна, О.З. Бундза, М.В. Голотюк, В.С. Пуць, В.Л. Мартинюк Концептуальне комплексне оцінювання ефективності використання комунальних машин.....	222
Б.О. Пальчевський Інтелектуальний моніторинг параметрів технологічного обладнання.....	228
К. Золялетдінов Аналіз сучасного стану предметної області підтримки прийняття рішень: алгоритми автоматизованого підтримки.....	234
С.М. Юхимчук, М.М. Толстушко, С.Ф. Юхимчук, Л.М. Дацюк розробка конструкції дисково-пасового льонобрального апарата.....	239
О.У. Стельмах, Р.Є. Костюнік, В.А. Радзієвський, В.С. Бондар, А.Л. Майстренко, О.Д. Клименко Методологія визначення трибологічно ефективних гібридних пар тертя кочення «кераміка-сталь» в різних умовах змащування.....	243
Є. Б. Козак Застосування математичної моделі інтерполяції кубічним сплайном при автоматизації аеронавігаційної системи.....	259
О. В. Верешко, Св.Св. Гомон Дослідження зміни густини деревини листяних та хвойних порід під дією кислотних середовищ.....	265
Ю.Ю. Жигуц, В.Д. Рудь, Я.П. Легета Особливості властивостей термітних хромокремнієвих сталей.....	270
О.О. Чайка, Н.О. Толстушко, М.М. Толстушко Аналіз процесу підбирання стеблової стрічки льону на льоновищі.....	275

CONTENT

<i>Contents</i>	5
N.V. Shynkarchuk, V.V. Kot Calculation of stress intensity coefficients for the isotropic plate with a soldered circular elastic disk.....	9
V.V. Burykin, Yu.E. Ryzhov, L.G. Polonsky, N.O. Balytska, Yu.O. Kharlamov Cooling and lubrication systems while finishing coated parts.....	15
H. Aleksiienko The use of high-performance tools as a method of reducing the time of manufacturing parts on CNC machines.....	21
H.M. Hubal Mathematical study of the stability of fixed points of systems of differential equations describing biochemical processes rates.....	29
Dahmani Mohamed Street and road networks of cities and their elements: features of the organization.....	40
S. V. Zozulia Mechanisms of introduction of the technology of the closed cycle of use of water in the conditions of operation of an ice rink.....	47
T. Katkova Security cryptographic protection of sovereign information resources.....	54
A. Maltsev On the issue of forecasting using classical and neural network methods of machine learning.....	59
I.A. Moroz, V.Ya. Shemet Features of liquids penetration in powder materials.....	64
A. Hanzjuk, M. Kraevskaya The investigation of sorption capacity of substituted forms of saponite clays.....	67
O. Sydorenko Innovative technologies to expand the range of Bluetooth.....	73
A.K.Avtukhov, V.A.Bantkovsky, O.D. Martynenko Influence of technological methods of production on the level of residual austenite in the working layer of products from chromium-nickel cast iron.....	80
B.V. Efremenko, V.I. Zurnadzhy, N.P. Zaichuk, S.P. Shymchuk, Y.G. Chabak, I. Petryshynets, V.G. Efremenko Microstructure and properties of biomedical steel 316L, fabricated by LPBF-printing.....	86
D. V. Telychko Artificial heart device wireless power supply system real-time adjustment method....	94
T. Chetverzhuk, R. Red'ko, R. Polinkevich, O. Zaleta, B. Valetskyi Problems and tasks of design and calculation of loading parts of metallorising machines taking into account loads.....	101
S. Tchaikovsky Investigation of the method of adjusting the calibration period of measuring equipment based on the reaction method.....	105
V. Kashytskyi, O. Sadova, I. Boiarska, S. Yanchuk Intensification of the forming process glutine-based biocomposites modified with sodium sulfate.....	113
S. Pidgaichuk, A. Pokryshko, O. Drobot, S. Smutko, N. Yavorskaya Features of chemical phosphating of cast iron parts in water supply systems.....	120
O.M. Sizonenko, O.I. Khrysto, S.V. Konotop A monitoring system's building features for the dispersed materials spark-plasma sintering process.....	126
O. Pastukh, V. Sakhnyuk, O. Zamurujeva, A. Shutovskyi Influence of non-magnetic impurities on josephson's current in SNINS junctions for temperatures close to critical.....	136
S. Fedosov, D. Zakharchuk, O. Zamurujeva, V. Sakhnyuk, L. Panasjuk The Fermi level in cadmium antimonide crystals in the presence of radiation defects.....	143
M. Dumanchuk, N. Tarelnyk, V. Pirogov Improvement of elastic couplings flexible elements fretting corrosion protection technology.....	149
M.V. Hlobchak, O.L. Mastykach, M.M. Borys Applied principles of application of mathematical methods in the study of the interaction of motor vehicle repair points.....	157
O.A. Mikulich Modeling of dynamic stress state foam media under the action of concentrated load... 166	166
D.A. Goncharuk, A.M. Gripachevsky, E.V. Khomenko, G.M. Molchanovskaya, G.A. Maksimova Investigation of the features of the formation of the structure of the alloy Fe 55 % wt. Ga.....	171
V. Kolesnyk, A. Bozhko, A. Neshta, D. Malymonenko Investigation of cutting parameters influence on thermal expansion of drill and hole accuracy when drilling cfrp/ ti alloy stacks.....	177
O. Guda, T. Kradinova, V. Timoshchuk A variational method of leadingout of equations of motion boundary terms in a round plate.....	190
V.M. Maksymych Electrical conductivity and polarization properties of heterophase composite of hierarchical architecture silicon dioxide<thiourea<cobalt(ii) chloride>>.....	196
M. Tkachenko Application of R-CNN in automatic in-door positioning through ANNs analysis of graphical data.....	203
O. V. Zahorodnii Possibilities of artificial neural networks for diagnosing lung diseases by X-ray..	210

V. Kashytskyi, V. Malets, O. Sadova, V. Shehynskyi Performance characteristics of glutin biocomposites filled with wood flour.....	216
O.O. Nalobina, O.Z. Bundza, M.V. Holotruk, V.S. Puts, V.L. Martyniuk Conceptual comprehensive evaluation of the efficiency of the use of municipal machines.....	222
B. Palchevskyi Intellectual monitoring of parameters technological equipment.....	228
K. Zalialetdzinau Analysis of the current state of the subject area of decision support: automated support algorithms.....	234
S.M. Yukhymchuk, S.F. Yukhymchuk, M.M. Tolstushko, L.M. Datsyuk Development of the design of a disc-belt flax-pulling device.....	239
A.U. Stelmakh, R.E. Kostyunik, V.A. Radzievsky, V.S. Bondar, A.L. Maistrenko, A. Klymenko Methodology of determination of tribologically efficient hybrid rods of rolling friction «ceramic – steel» at different greasing condition.....	243
E. Cozac Application of mathematical model of cubic spline interpolation in automation of air navigation system.....	259
O.V. Vereshko, S.S. Homon Investigation of changes in the density of deciduous and coniferous wood under the influence of acidic environments.....	265
Yu. Zhiguts, V. Rudj, Ya. Legeta Features of properties of termitic chrome-silicon steels steel.....	270
O.O. Chaika, N.O. Tolstushko, M.M. Tolstushko Analysis of the process of selecting flax stem tape in the field.....	275

УДК 539.3

DOI 10.36910/775.24153966.2022.73.1

Н.В. Шинкарчук¹, В.В. Кот²¹Рівненський державний гуманітарний університет²Відокремлений структурний підрозділ «Рівненський фаховий коледж Національного університету біоресурсів і природокористування України»**ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ІНТЕНСИВНОСТІ НАПРУЖЕНЬ ІЗОТРОПНОЇ ПЛАСТИНКИ З ВПАЯНИМ КРУГЛИМ ПРУЖНИМ ДИСКОМ**

Проведено розрахунок коефіцієнтів інтенсивності напружень однорідної ізотропної пластинки з коловим розрізом на лінії розмежування матеріалів за умови контактування його берегів при дії зосередженої сили в центрі круглого пружного диска. Побудовано систему з чотирьох сингулярних інтегральних рівнянь з логарифмічними ядрами для визначення функцій, через які виражаються контактні зусилля на контурі отвору ізотропної пластинки і пружного диска. Використано числовий метод механічних квадратур і колокації для дослідження напруженого стану пластинчастої конструкції. Наведено результати числових розрахунків в межах поставленої задачі.

Ключові слова: коефіцієнти інтенсивності напружень, коловий розріз, однорідна пластинка, пружний диск, напружений стан, сингулярні рівняння.

Н.В. Шинкарчук, В.В. Кот**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ ИЗОТРОПНОЙ ПЛАСТИНКИ С ВПАЯННЫМ КРУГЛЫМ УПРУГИМ ДИСКОМ**

Произведен расчет коэффициентов интенсивности напряжений однородной изотропной пластинки с круговым разрезом на линии разграничения материалов при контакте его берегов за действия сосредоточенной силы в центре круглого упругого диска. Построена система из четырех сингулярных интегральных уравнений с логарифмическими ядрами для определения функций, через которые выражаются контактные усилия на контуре отверстия изотропной пластинки и упругого диска. Использован числовой метод механических квадратур и коллокации для исследования напряженного состояния пластинчатой конструкции. Приведены результаты числовых расчетов в пределах поставленной задачи.

Ключевые слова: коэффициенты интенсивности напряжений, круговой разрез, однородная пластинка, упругий диск, напряженное состояние, сингулярные уравнения.

N.V. Shynkarchuk, V.V. Kot**CALCULATION OF STRESS INTENSITY COEFFICIENTS FOR THE ISOTROPIC PLATE WITH A SOLDERED CIRCULAR ELASTIC DISK**

Improving the reliability of machine parts designed in the form of piecewise homogeneous plates is one of the important problems of mechanical engineering. Their durability largely depends on the presence on the line of demarcation of materials defects such as cuts or cracks that may occur during manufacture, and during operation significantly reduce the allowable external load on the part.

By the action of concentrated power load applied at the center of the elastic disk, the banks cut lamellar structure partially in contact. We consider that the area of contact plate and drive no friction. Solution of this problem involves identifying the components of stress state on the contour of the hole of the plate, calculation of stress intensity coefficients and set the size and position of the contact zone. Boundary conditions of the problem in the area smooth frictionless contact elected as equality normal displacement of the plate and disk, as in the area of junction in the form of equal displacement of contour points.

Dependencies between the components of the displacement vector contour points of the plate and the elastic disk and contact stresses recorded in the form of integral relations with logarithmic kernels. By substituting these expressions into the boundary conditions, obtained a system of four singular integral equations for determining the functions, which an expressed through the normal and tangent force on the contact area and the junction.

For approximate solution of this problem the structure of the desired functions in the vicinity of the ends of sections of smooth frictionless contact zone and junction. Approximate solution of the problem is realized mechanical quadrature and collocation. The numerical example is considered. The calculation of normal and tangent force and calculation of stress intensity coefficients is conducted. The resulting table shows the values of the stress intensity coefficients around the vertices of the section and the values of the contact zones.

Keywords: coefficients intensity of stress, circular incision, homogeneous plate, elastic disc, stress state, singular equations.

Постановка проблеми. Елементи конструкцій і пластинчасті деталі з отворами, які спроектовані у вигляді однорідних та кусково-однорідних ізотропних пластин, широко використовуються в інженерно-конструкторській практиці. Тривалість їх роботоздатності та

функціонування, у більшості випадків, залежить від наявності на лінії поділу матерів дефектів типу тріщин (розрізів). Їхне зародження може призвести до передчасного руйнування деталі чи споруди. Тому значний теоретичний і практичний інтерес становить дослідження та оцінка напруженого стану і коефіцієнтів інтенсивності напружень в околі вершин тріщини (розрізу, зокрема колового).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботах [1,2] здійснено постановку контактних задач для однорідних і кусково-однорідних ізотропних пластин з коловим розрізом на лінії поділу матеріалів, які перебувають в умовах плоского напруженого стану. Використовуючи метод лінійного спряження [3] розв'язано низку таких задач.

Дослідження розподілу напружень в однорідних і кусково-однорідних пластинках з коловою лінією розмежування граничних умов проведено в [4].

Розрахунок коефіцієнтів інтенсивності напружень однорідної ізотропної пластинки з коловим розрізом на лінії поділу матеріалів при її моментному навантаженні в центрі пружного круглого диска здійснено в [5].

Числово-аналітичний розв'язок задачі про передачу зосередженого силового навантаження прикладеного в центрі абсолютно жорсткого диска до контуру криволінійного отвору ізотропної пластинки за наявності на лінії поділу матеріалів зон спаю, гладкого без тертя контакту і відставання реалізовано в [6].

Мета статті. Дослідити напружений стан на межі поділу матеріалів однорідної ізотропної пластинки з коловим розрізом, береги якого контактують частково або по всій довжині за дії зосередженої сили в центрі круглого пружного диска і визначити коефіцієнти інтенсивності напружень у вершинах розрізу.

Постановка задачі. Допустимо, що круговий отвір одиничного радіуса нескінченної ізотропної пластинки товщиною $2h$, обмежений гладким контуром γ . Середню площину пластинки віднесемо до системи прямокутних (x, y) і полярних (ρ, λ) координат та оберемо так, щоб початок відліку співпадав з центром отвору, а полярна вісь співпадала з віссю абсцис.

Нехай в круговий отвір, одиничного радіуса, ізотропної пластинки вставлено круглий ізотропний пружний диск без зазору і натягу. На симетричній ділянці $\gamma_3 = [\pi - \beta_0, \pi + \beta_0]$ контуру γ диск спаяний з пластинкою. На іншій частині цього контуру між ними наявний наскрізний розріз (тріщина). У центрі диска прикладена зосереджена сила P_0 , внаслідок чого диск вступає у гладку контактну взаємодію з пластинкою на ділянці $\gamma_1 = [\alpha_1, \beta_1]$. На проміжку γ_2 контакт між пластинкою і диском – відсутній. Розрахункова схема задачі наведена на рис. 1.

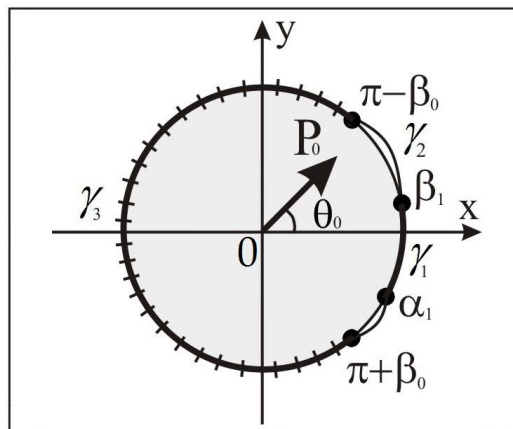


Рис. 1. Розрахункова схема задачі

Розв'язок поставленої задачі полягає у визначенні напруженого стану на контурі отвору пластинки, величини зони контакту і розрахунку коефіцієнтів інтенсивності напружень у вершинах розрізу по дузі кола.

Виклад основного матеріалу. Граничні умови задачі в зоні контакту $[\alpha_1, \beta_1]$ приймаємо у вигляді рівності нормальних зміщень пластинки і диска. За відсутності сил тертя їх можна записати так [6, 7]

$$\cos \lambda (U - U^{(1)}) + \sin \lambda (V - V^{(1)}) = 0;$$

$$S_{\rho\lambda} = S_{\rho\lambda}^{(1)} = 0, \quad T_\rho = T_\rho^{(1)}, \quad \lambda \in \gamma_1, \quad (1)$$

а в зоні спаю $[\pi - \beta_0, \pi + \beta_0]$ пластинки і диска граничні умови записуємо у вигляді рівності зміщень їх контурних точок [3, 7]

$$\begin{aligned} U - U^{(1)} &= 0, & V - V^{(1)} &= 0; \\ S_{\rho\lambda} &= S_{\rho\lambda}^{(1)}, & T_\rho &= T_\rho^{(1)}, & \lambda \in \gamma_3. \end{aligned} \quad (2)$$

Тут T_ρ , $S_{\rho\lambda}$, $T_\rho^{(1)}$, $S_{\rho\lambda}^{(1)}$ – нормальні та дотичні зусилля на контурі отвору ізотропної пластинки і круглого пружного диска.

Шляхом підстановки виразів для визначення компонентів вектора зміщення (при заданому навантаженні) контурних точок пластинки і круглого пружного диска (покладаючи $E^{(1)} = E$, $\nu^{(1)} = \nu$, $h^{(1)} = h$), отриманих у роботі [8], в граничні умови (1), (2) та використавши наступне позначення:

$$\begin{aligned} f_1'(\lambda) + if_2'(\lambda) &= f_1^{\circ'}(\lambda) + if_2^{\circ'}(\lambda), & \lambda &\in [\alpha_1, \beta_1]; \\ f_1'(\pi + \tilde{\lambda}) + if_2'(\pi + \tilde{\lambda}) &= \tilde{f}_1'(\tilde{\lambda}) + i\tilde{f}_2'(\tilde{\lambda}), & \tilde{\lambda} &\in [-\beta_0, \beta_0], \end{aligned} \quad (3)$$

одержимо систему з чотирьох сингулярних інтегральних рівнянь з логарифмічними ядрами для визначення функцій $f_1^{\circ'}$, $f_2^{\circ'}$, \tilde{f}_1' , \tilde{f}_2'

$$\begin{aligned} &\cos \lambda \left[\frac{4}{\pi} \int_{\alpha_1}^{\beta_1} f_2^{\circ'}(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda - t}{2} \right| dt + \int_{-\beta_0}^{\beta_0} \tilde{f}_2'(\tilde{t}) \ln \left| \cos \frac{\lambda - \tilde{t}}{2} \right| d\tilde{t} \right] + T^0 \cos \lambda - \\ &- \frac{1 + \nu}{2\pi} (P_0 \cos \theta_0 \cos 2\lambda + P_0 \sin \theta_0 \sin 2\lambda) \left. \right] + \sin \lambda \left[-\frac{4}{\pi} \int_{\alpha_1}^{\beta_1} f_1^{\circ'}(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda - t}{2} \right| dt + \right. \\ &\left. + \int_{-\beta_0}^{\beta_0} \tilde{f}_1'(\tilde{t}) \ln \left| \cos \frac{\lambda - \tilde{t}}{2} \right| d\tilde{t} \right] - \frac{1 + \nu}{2\pi} (P_0 \cos \theta_0 \sin 2\lambda - P_0 \sin \theta_0 \cos 2\lambda) + T^0 \sin \lambda \left. \right] = \\ &= \tilde{c}_1 \cos \lambda + \tilde{c}_2 \sin \lambda; \quad f_1^{\circ'}(\lambda) \cos \lambda + f_2^{\circ'}(\lambda) \sin \lambda = 0, \quad \lambda \in [\alpha_1, \beta_1]; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} &\frac{4}{\pi} \left[\int_{\alpha_1}^{\beta_1} f_2^{\circ'}(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda - t}{2} \right| dt + \int_{-\beta_0}^{\beta_0} \tilde{f}_2'(\tilde{t}) \ln \left| \cos \frac{\lambda - \tilde{t}}{2} \right| d\tilde{t} \right] + T^0 \cos \lambda - \\ &- \frac{1 + \nu}{2\pi} (P_0 \cos \theta_0 \cos 2\lambda + P_0 \sin \theta_0 \sin 2\lambda) = \tilde{c}_1, \\ &- \frac{4}{\pi} \left[\int_{\alpha_1}^{\beta_1} f_1^{\circ'}(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda - t}{2} \right| dt + \int_{-\beta_0}^{\beta_0} \tilde{f}_1'(\tilde{t}) \ln \left| \cos \frac{\lambda - \tilde{t}}{2} \right| d\tilde{t} \right] + T^0 \sin \lambda - \\ &- \frac{1 + \nu}{2\pi} (P_0 \cos \theta_0 \sin 2\lambda - P_0 \sin \theta_0 \cos 2\lambda) = \tilde{c}_2, \quad \lambda \in [\pi - \beta_0, \pi + \beta_0]; \quad \tilde{\lambda} \in [-\beta_0, \beta_0]. \end{aligned} \quad (5)$$

Тут $\tilde{c}_1 = c_1^{(1)} - c_1$, $\tilde{c}_2 = c_2^{(1)} - c_2$, $f_1 + if_2 = i \int_{\alpha_1}^{\lambda} (T_\rho^* + iS_{\rho\lambda}^*) e^{it} dt$, $T_\rho^* + iS_{\rho\lambda}^* = (T_\rho + iS_{\rho\lambda}) \omega'(\sigma)$,

$\omega(\sigma) = e^{i\lambda}$, $T^0 = \frac{1}{\pi} \int_{\gamma} (f_2'(t) \cos t - f_1'(t) \sin t) dt$, E , $E^{(1)}$, ν , $\nu^{(1)}$ – модулі Юнга і коефіцієнти

Пуассона матеріалів ізотропної пластинки і круглого пружного диска; c_1 , c_2 , $c_1^{(1)}$, $c_2^{(1)}$ – дійсні сталі.

До цієї системи рівнянь потрібно доєднати умови силової рівноваги диска [3, 6]

$$\int_{\alpha_1}^{\beta_1} f_2'(t) dt + \int_{-\beta_0}^{\beta_0} \tilde{f}_2'(\tilde{t}) d\tilde{t} = -P_0 \cos \theta_0,$$

$$\int_{\alpha_1}^{\beta_1} f_1'(t) dt + \int_{-\beta_0}^{\beta_0} \tilde{f}_1'(\tilde{t}) d\tilde{t} = P_0 \sin \theta_0, \quad (6)$$

які служать для визначення сталих \tilde{c}_1, \tilde{c}_2 .

Нормальні і дотичні зусилля на контурі отвору пластинки, через функції $f_1'(\lambda), f_2'(\lambda)$, з врахуванням позначення (3), визначаються за формулою [6]

$$T_\rho + iS_{\rho\lambda} = (f_2'(\lambda) - if_1'(\lambda))(\cos \lambda - i \sin \lambda), \quad \lambda \in \gamma. \quad (7)$$

Якщо значення контактних зусиль T_ρ і $S_{\rho\lambda}$ стануть відомі, то для розрахунку коефіцієнтів інтенсивності напружень можна використати подання функцій $T_\rho(\tilde{x}), S_{\rho\lambda}(\tilde{x})$ у вигляді [9]

$$T_\rho(\tilde{x}) = T_\rho(\cos \tilde{\varphi}) = \sum_{n=1}^M T_\rho(\tilde{\varphi}_n) \frac{(-1)^{n+1} \cos M\tilde{\varphi}}{M(\cos \tilde{\varphi} - \cos \tilde{\varphi}_n)} \frac{\sin^2 \tilde{\varphi}_n}{\sin \tilde{\varphi}};$$

$$S_{\rho\lambda}(\tilde{x}) = S_{\rho\lambda}(\cos \tilde{\varphi}) = \sum_{n=1}^M S_{\rho\lambda}(\tilde{\varphi}_n) \frac{(-1)^{n+1} \cos M\tilde{\varphi}}{M(\cos \tilde{\varphi} - \cos \tilde{\varphi}_n)} \frac{\sin^2 \tilde{\varphi}_n}{\sin \tilde{\varphi}}, \quad (8)$$

та обчислюючи в

$$K_1(\pi \mp \beta_0) = \lim_{\tilde{x} \rightarrow \mp 1 \pm 0} \sqrt{2\pi \sin \beta_0} \sqrt{1 \pm \tilde{x}} T_\rho(\tilde{x}),$$

$$K_2(\pi \mp \beta_0) = \lim_{\tilde{x} \rightarrow \mp 1 \pm 0} \sqrt{2\pi \sin \beta_0} \sqrt{1 \pm \tilde{x}} S_{\rho\lambda}(\tilde{x}),$$

відповідні границі при $\tilde{x} = \cos \tilde{\varphi}$, знаходимо розрахункові формули для обчислення коефіцієнтів інтенсивності напружень у вершинах розрізу по дузі кола

$$K_1(\pi - \beta_0) = \sqrt{\pi \sin \beta_0} \sum_{n=1}^M T_\rho(\tilde{\varphi}_n) (-1)^{n+M} \frac{1 - \cos \tilde{\varphi}_n}{M},$$

$$K_2(\pi - \beta_0) = \sqrt{\pi \sin \beta_0} \sum_{n=1}^M S_{\rho\lambda}(\tilde{\varphi}_n) (-1)^{n+M} \frac{1 - \cos \tilde{\varphi}_n}{M},$$

$$K_1(\pi + \beta_0) = \sqrt{\pi \sin \beta_0} \sum_{n=1}^M T_\rho(\tilde{\varphi}_n) (-1)^{n+1} \frac{1 + \cos \tilde{\varphi}_n}{M},$$

$$K_2(\pi + \beta_0) = \sqrt{\pi \sin \beta_0} \sum_{n=1}^M S_{\rho\lambda}(\tilde{\varphi}_n) (-1)^{n+1} \frac{1 + \cos \tilde{\varphi}_n}{M}. \quad (9)$$

Тут $\tilde{x} = \cos \tilde{\varphi}$, а M – кількість точок колокації.

Наближений розв'язок задачі. Одержати точний розв'язок системи рівнянь (4) – (6) не вдається. Для знаходження наближеного розв'язку, потрібно використати числові методи та встановити структуру шуканих функцій $f_1', f_2', \tilde{f}_1', \tilde{f}_2'$ на кінцях зони контакту і спаю.

У роботі [10], встановлено, що нормальні та дотичні зусилля на кінцях ділянки контакту дорівнюють нулю, а на кінцях зони спаю мають кореневу особливість на яку накладається локальна осциляція, причому в задачах визначення концентрації зусиль її впливом можна знехтувати. З огляду на це, розв'язок системи рівнянь (4) – (6) на ділянці спаю обраємо в класі функцій, що мають кореневу особливість на її кінцях, а на ділянці контакту – в класі функцій, обмежених на її кінцях.

Оскільки одержана система рівнянь має таку ж характеристичну частину, як і в [6, 10], то на підставі [6-8, 10], числовий розв'язок задачі потрібно реалізувати методом механічних квадратур і колокації.

Також необхідно зауважити, що при зведенні несиметричного проміжку інтегрування $[\alpha_1, \beta_1]$ до проміжку $[-1, 1]$ використовується така заміна:

$$\operatorname{tg} \frac{\lambda}{2} = \frac{b_1 - a_1}{2} x + \frac{b_1 + a_1}{2}; \quad \operatorname{tg} \frac{t}{2} = \frac{b_1 - a_1}{2} s + \frac{b_1 + a_1}{2},$$

де $a_1 = \operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2}$, $b_1 = \operatorname{tg} \frac{\beta_1}{2}$.

Результати числового розрахунку. Для однорідної ізотропної пластинки з коловим розрізом $\left[-\frac{\pi}{6}; \frac{\pi}{6}\right]$, досліджено вплив дії сили P_0 , за різних величин θ_0 ($\theta_0 = 0; \frac{\pi}{6}; \frac{\pi}{3}; \frac{\pi}{2}; \frac{2}{3}\pi; \frac{5}{6}\pi; \pi$), на розподіл коефіцієнтів інтенсивності напружень і розмір зони контакту при $\nu = 0.3$.

У таблиці 1 подано значення коефіцієнтів інтенсивності напружень у вершинах розрізу і полярних кутів межових точок зони контакту пластинки та пружного диска.

Табл. 1.

Результати розрахунку величин $K_{1,2}(\pi - \beta_0)$, $K_{1,2}(\pi + \beta_0)$, α_1 , β_1

θ_0 (град)	$K_1(\pi - \beta_0)$	$K_1(\pi + \beta_0)$	$K_2(\pi - \beta_0)$	$K_2(\pi + \beta_0)$	α_1 (град)	β_1 (град)
0	0	0	0.0181	-0.0181	-30.00	30.00
30	0	0	-0.1029	-0.1342	-30.00	30.00
60	0	0.0780	-0.1987	-0.2116	-7.11	30.00
90	0	0.2156	-0.2523	-0.2198	9.07	30.00
120	0	0.3164	-0.2524	-0.1552	25.21	30.00
150	0.1212	0.3268	-0.1911	-0.0442	0	0
180	0.2587	0.2587	-0.0848	0.0848	0	0

Висновки. У роботі розглянуто задачу про контакт берегів розрізу між ізотропною пластинкою з гладким круговим отвором і пружним диском за умов дії зосередженого силового навантаження в центрі диска. Побудовано систему з чотирьох сингулярних інтегральних рівнянь із логарифмічними ядрами для знаходження функцій, через які визначаються компоненти напруженого стану на контурі отвору пластинки. Встановлено структуру шуканих функцій на кінцях ділянок гладкого контакту і спаю пластинки та диска.

На основі результатів числових розрахунків, виявлено, що напрямок дії сили P_0 суттєво впливає на значення коефіцієнтів інтенсивності напружень у вершинах розрізу та величину і положення зони контакту. При цьому, значення коефіцієнтів інтенсивності напружень $K_1(\pi - \beta_0)$ і $K_1(\pi + \beta_0)$ плавно зростають зі збільшенням величини кута θ_0 . Також збільшення величини кута θ_0 призводить до зменшення розмірів зони контакту або ж взагалі до її не утворення.

Список використаних джерел:

1. Гриліцький Д.В. Про деякі випадки пружної рівноваги ізотропної пластинки з впаяною круглою ізотропною шайбою. Доп. АН УРСР. 1960. Вип. 2. С. 164 – 167.
2. Гриліцький Д.В. Основні граничні задачі теорії пружності для безмежної ізотропної пластинки з впаяною круглою ізотропною шайбою з розрізами на лінії спаю. Питання механіки і математики ЛДУ. 1962. Вип. 9. С. 79 – 86.
3. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М: Наука, 1966. 708 с.
4. Гриліцький Д.В., Луцишин Р.М. Напруження в пластинках з коловою лінією розмежування граничних умов. Л: Вища школа, 1975. 115 с.
5. Шинкарчук Н.В., Кот В.В. Розрахунок коефіцієнтів інтенсивності напружень однорідної ізотропної пластинки з коловим розрізом. Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Серія «Технічні науки». 2020. Вип. 2 (90). С. 120 – 126.

6. Сяський А.О., Шинкарчук Н.В. Мішана контактна задача для пластинки з криволінійним отвором і жорсткого диска. Волинський математичний вісник. Серія прикладна математика. 2010. Вип. 7 (16). С. 199 – 209.
7. Сяський А., Шинкарчук Н., Кот В. Напружений стан кусково-однорідної ізотропної пластинки з коловим розрізом. Вісник Тернопільського національного технічного університету. 2014. Вип. 4 (76). С. 63 – 70.
8. Шинкарчук Н. Мішана контактна задача для ізотропної пластинки з круговим отвором і пружного диска. Наукові нотатки: Міжвузівський збірник наукових праць «Наукові нотатки» за галузями знань «Фізико-математичні науки» та «Технічні науки». 2020. Вип. 70. С. 6 – 11.
9. Саврук М.П. Двумерные задачи упругости для тел с трещинами. К: Наукова думка, 1981. 324 с.
10. Сяський А.О., Шинкарчук Н.В. Кусково-однорідна ортотропна пластинка з еліптичним розрізом за умови контактування його берегів. Наукові нотатки : Міжвузівський збірник. 2011. Вип. 30. С. 168 – 174.

Рецензенти:

к.ф.-м.н., професор кафедри інформаційних технологій та моделювання Рівненського державного гуманітарного університету Шахрайчук Микола Іович;

к.т.н., доцент кафедри комп'ютерних наук та прикладної математики Національного університету водного господарства та природокористування Гаврилюк Володимир Іванович.

УДК: 621.9.079

DOI 10.36910/775.24153966.2022.73.2

В.В. Бурыкин¹, Ю.Э. Рыжов¹, Л.Г. Полонский², Н.А. Балицкая², Ю.А. Харламов*Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев¹,
Государственный университет «Житомирская политехника»²***СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДЫ
ПРИ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ С ПОКРЫТИЯМИ**

Представлена классификация основных типов смазочно-охлаждающих технологических сред при хонинговании и полировании напыленных покрытий. Рассмотрены результаты исследований влияния сред на шероховатость обработанной поверхности и остаточные напряжения в поверхностном слое деталей. Показана возможность продления сроков службы сред за счет использования передвижной установки для очистки от примесей, обеспечивая улучшение качества обработанных поверхностей.

Ключевые слова: качество поверхности, полирование, хонингование, шероховатость, остаточные напряжения.

В.В. Бурикін, Ю.Е. Рижов, Л.Г. Полонський, Н.О. Балицька, Ю.О. Харламов**МАСТИЛЬНО-ОХОЛОДЖУЮЧІ ТЕХНОЛОГІЧНІ СЕРЕДОВИЩА
ПРИ ФІНІШНІЙ ОБРОБЦІ ДЕТАЛЕЙ З ПОКРИТТЯМИ**

Представлено класифікацію основних типів мастильно-охолоджуючих технологічних середовищ при хонінгуванні та поліруванні напылених покриттів. Розглянуто результати досліджень впливу середовищ на шорсткість обробленої поверхні та залишкові напруження в поверхневому шарі деталей. Показано можливість продовження термінів служби середовищ за рахунок використання пересувної установки для очищення від домішок, забезпечуючи покращення якості оброблених поверхонь.

Ключові слова: якість поверхні, полірування, хінінування, шорсткість, залишкові напруження.

V.V. Burykin, Yu.E. Ryzhov, L.G. Polonsky, N.O. Balytska, Yu.O. Kharlamov**COOLING AND LUBRICATION SYSTEMS WHILE FINISHING COATED PARTS**

The article presents a classification of the main types of cooling and lubrication systems for honing and polishing of sprayed coatings is presented. The study's results of the systems influence on the treated surface roughness and residual stresses in the parts surface layer are considered. The authors have shown the possibility of extending the service life of the cooling and lubrication systems through the use of a mobile installation for cleaning from impurities, providing an improvement in the quality of the treated surfaces.

Key words: surface quality, polishing, hining, roughness, residual stresses.

Постановка проблеми. Одним из важных направлений повышения эксплуатационных характеристик деталей машин является разработка новых и совершенствование уже существующих прогрессивных технологических процессов их изготовления и ремонта. Для технологического обеспечения восстанавливаемых и упрочняемых поверхностей деталей машин существуют различные методы нанесения покрытий: плазменное, газопламенное, дуговое, детонационное и высокочастотное напыления; плазменная, электродуговая, электрошлаковая, индукционная и другие виды наплавки; гальванический метод; электроконтактная приварка и др. [1].

В настоящее время технологический процесс формирования защитных износостойких покрытий представляет собой комбинированную обработку деталей, состоящую из подготовки поверхности подложки дробеструйной обработкой, плазменного напыления покрытий толщиной 0,7–0,8 мм и твердостью 45–55 HRC из различных порошковых сплавов (ПГСП-4, ХВС-3, ПН85Ю15) и механической финишной обработки. Покрытия из данных порошков широко применяются при упрочнении рабочих органов самого разнообразного по назначению технологического оборудования: почвообрабатывающих машин, экструдеров, строительной, дорожной, буровой, металлообрабатывающей и другой техники. В связи с этим вопрос обеспечения качества данных покрытий имеет существенное значение. В целом качество покрытий является сложной комплексной характеристикой, зависящей от множества факторов технологического процесса, и формируется последовательно на этапах предварительной обработки поверхности, нанесения покрытия и финишной обработки поверхности покрытия. В значительной степени качество деталей определяется на финишной обработке. Это заключительная стадия обработки покрытия, которая позволяет избежать

брака всего изделия. Различают несколько способов финишной обработки. Все они зависят от ряда физико-химических свойств материала, конфигурацией детали, назначением и условием ее эксплуатации. Иногда деталь проходит сразу несколько стадий финишной обработки – целый комплекс металлообрабатывающих операций.

Анализ последних исследований и публикаций. Самым распространенным способом финишной обработки износостойких покрытий является шлифование [2, 3], которое обеспечивает возможность высококачественной обработки покрытий с высоким уровнем твердости. Однако в ряде случаев возможности управления процессом шлифования не позволяют избежать дефектов (трещин, сколов и отслоений), обусловленных уровнем остаточных напряжений и структурой покрытий, сформированных на этапах предварительной обработки и напыления. Поэтому комплексное решение по обеспечению качества покрытий, рассматривающее этапы формирования покрытий, как единый процесс с позиции теории технологической наследственности, позволяет расширить возможности обеспечения качества покрытий на этапе финишной обработки.

В основном это касается финишных методов обработки деталей (точение, шлифование, полирование, хонингование и др.) [4], обеспечивающих качество поверхностного слоя в соответствии с требованиями чертежа и оказывающих решающее влияние на эксплуатационные характеристики поверхностного слоя.

В этой связи представляют интерес методы финишной обработки (хонингование и полирование) деталей с покрытиями современными инструментами из сверхтвердых материалов, которые обеспечивают высокое качество поверхности в сочетании с высокой производительностью, надежностью и простотой выполнения технологического процесса [5].

Методы финишной обработки восстанавливаемых и упрочняемых поверхностей деталей находят широкое и непрерывно расширяющееся применение практически во всех отраслях промышленности с высокими технико-экономическими показателями. Повышение эффективности процесса финишной обработки восстанавливаемых и упрочненных деталей является актуальной и важной задачей, что предопределило необходимость анализа технологий их ремонта покрытиями.

Проблема обеспечения качества поверхностного слоя деталей с покрытиями при финишной обработке обычно рассматривается без рекомендаций по их обеспечению, что отрицательно сказывается на эксплуатационных свойствах деталей и машин в целом. Второстепенное внимание уделяется также роли конструкции инструмента в формировании микропрофиля поверхностного слоя покрытия и его влияния на образование дефектов при обработке. Возрастающие требования к качеству поверхностного слоя напыленных деталей могут быть удовлетворены при использовании в технологических процессах металлообработки смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС). Доля смазочных материалов, в том числе смазочно-охлаждающих жидкостей, являющихся основным видом СОТС, составляет лишь 1,2% от общего объема производимых нефтепродуктов, однако значение их чрезвычайно велико. Практика обработки металлов резанием показывает [6], что рациональное применение СОТС позволяет в 1,2–4,0 раза повысить стойкость инструмента, на 20–60% форсировать режимы резания, на 10–50% повысить производительность труда, уменьшить энергозатраты при механообработке и улучшить состояние поверхности деталей.

Цель статьи. Цель работы является классификация применяемых СОТС при финишной обработке деталей с покрытиями и исследование ее влияния на качество поверхности, а также возможность их очистки от примесей, обеспечивая улучшение качества обработанных поверхностей.

Изложение основного материала. В настоящее время разработано большое количество СОТС, применяемых при обработке деталей с покрытиями, эффективность использования которых зависит от их свойств. Основные типы СОТС (рис. 1) различаются по следующим признакам: агрегатному состоянию (жидкие, твердые, пластичные, газообразные); физико-химическим особенностям базовой и дисперсных фаз (масляные и водные, эмульсии масла в воде, суспензии и др.); размерам частиц дисперсной фазы (ионная, молекулярная, коллоидная и грубая дисперсность; степени легирования присадками (невысокое, умеренное, высокое); типу применяемых присадок (водо- и маслорастворимые); классу применяемых присадок (животные и растительные жиры, органические кислоты, эфиры); степени вязкости [7–9].

Наиболее перспективными для процессов финишной обработки деталей с покрытиями считается применение полусинтетических, синтетических СОЖ и эмульсий на водной основе. СОТС на водной основе обеспечивают снижение пожароопасности производства, обладают высокими смачивающими, охлаждающими, антикоррозионными, моющими свойствами,

отверстия хонингуют эластичными брусками при следующих режимах: скорость вращения хона 0,7–1,5 м/с, скорость его возвратно-поступательных движений в пределах 0,17–0,34 м/с. Величина снимаемого слоя металла при хонинговании составляет от 0,01 до 0,2 мм, давление брусков на обрабатываемую поверхность 600 кПа. В качестве СОТС применяют керосин, смесь керосина с веретенным маслом при соотношении 2:1 или 3%-ый фосфатсодержащий раствор на базе концентрата «Трибол». При хонинговании отверстий брусками из порошков алмаза АС6 зернистостью 63/50–80/63 достигается шероховатость поверхности Ra 0,1–0,3, а Ra 0,05–0,10 – алмаза АСМ зернистостью 14/10–40/28. Алмазные бруски не засаливаются и на обрабатываемой поверхности не образуют царапин, при этом создается микропрофиль с большой несущей поверхностью, что повышает долговечность машин и механизмов.

Важнейшим этапом технологического процесса модификации поверхности деталей является заключительная финишная обработка кругами лепестковыми КЛ 1А1 200x76x25 АС6 50/40 В3-06-4, обеспечивающая качество поверхностного слоя в соответствии с требованиями чертежа [11].

При полировании покрытий алмазными эластичными кругами обычно применяют водные и масляные (углеводородные) технологические среды, так как связки инструмента, содержащие каучук, размягчаются при повышенных температурах. Водные среды дешевле, чем масляные. Большая удельная теплоемкость и лучшая теплопроводность воды позволяют быстрее отводить тепло. Масляные среды дольше сохраняют остроту режущих кромок алмазных зерен. В качестве СОТС применяют водные растворы, содержащие кальцинированную соду, эмульсолы и индустриальное масло. Эмульсолы – водосмешиваемые СОТС с антикоррозионными и антифрикционными свойствами для металлообработки. По классификации ISO 6743 относится к классу МАВ. Используется водная 3–10%-ная эмульсия молочно-белого цвета для обработки сплавов. Благодаря высокоэффективным рабочим характеристикам СОТС гарантирует высокое качество обрабатываемых деталей и стойкость инструментов при широком наборе операций.

Исследования показали, что применение различных технологических сред: Na_2CO_3 (1%) + NaN (0,25%) + H_2O (98,75%); эмульсола ИГЛ 205 (5%-ный раствор в H_2O); масла «Индустриального-20» при обработке КЛ напыленных покрытий (рис. 1) способствует снижению шероховатости поверхности в 1,2–1,5 раза. Это объясняется тем, что хотя мощный воздушный поток, создаваемый кругом, препятствует попаданию СОТС в зону обработки, небольшая часть жидкости, за счет смазывающего, моющего и охлаждающего действия, все-таки принимает участие в процессе полирования. Водный раствор СОТС, имея большую теплоемкость и теплопроводность, обладает лучшим охлаждающим действием по сравнению с СОТС на основе масла. При алмазном полировании с охлаждением эмульсией или маслом шероховатость обработанной поверхности несколько выше. Поэтому для лепесткового полирования наиболее пригодны водные растворы СОТС.

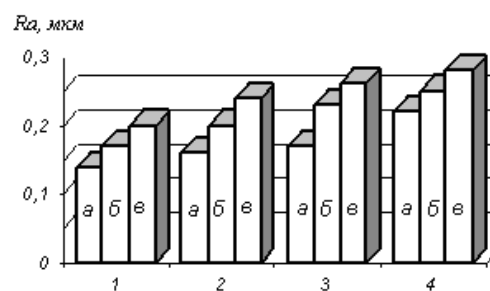


Рис. 2. Зависимость шероховатости поверхности при полировании КЛ от вида СОТС:

1 – Na_2CO_3 (1%) + NaN (0,25%) + H_2O (98,75%); 2 – эмульсол ИГЛ 205; 3 – масло

«Индустриального-20»; 4 – без СОТС при $v_k = 27$ м/с; $\delta = 1,0$ мм; $S_n = 1,0$ м/мин; $v_d = 0,5$ м/с; $\tau = 30$ с; $\alpha = 15^\circ$; а – ПГСП-4; б – ПН85Ю15; в – ХВС-3

Существенное влияние СОТС оказывает и на остаточные напряжения в поверхностном слое деталей. Объясняется это тем, что в результате действия воздушных потоков, создаваемых вращающимся КЛ, большая часть жидкости в процессе обработки никакого участия не принимает, основной эффект проявляется за счет снижения температуры полируемой детали.

Испытания ряда СОТС (рис. 2) показали, что наибольшие сжимающие остаточные напряжения формируются при использовании 1%-ного водного раствора кальцинированной соды и эмульсол ИГЛ

205. Менее эффективно применение в качестве СОТС масла «Индустриальное-20». Вероятно, это связано с тем, что водные растворы СОТС обладают лучшим охлаждающим действием благодаря большей теплоемкости и теплопроводности.

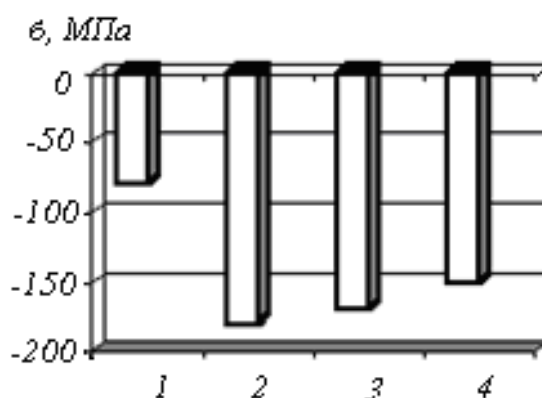


Рис. 3. Влияние технологической среды при полировании КЛ на величину остаточных напряжений в поверхностном слое покрытия ХВС-3: 1 – без охлаждения; 2 – 1%-ный водный раствор кальцинированной соды; 3 – емульсол ИГЛ 205; 4 – масло «Индустриальное-20»

Выводы и предложения. Результаты проведенных исследований позволяют заключить, что в процессе финишной обработки КЛ из алмазных лент с применением СОТС формируется поверхностный слой с благоприятными характеристиками Ra 0,1...0,3 и $\sigma = -(150...180)$ МПа, обеспечивающие лучшие эксплуатационные свойства деталей машин.

Отработанные СОТС являются одним из главных загрязнителей окружающей среды в машиностроении. Их разлив, разбрызгивание, потери во время эксплуатации, нарушения технологического процесса приводят к загрязнению почвы, водоемов и воздуха. При эксплуатации СОТС концентрация вредных веществ в рабочей зоне не должна превышать значений, предусмотренных в санитарных нормах проектирования промышленных предприятий.

Ассортимент СОТС очень широк и постоянно обновляется. В виду огромного многообразия составов растворов, применяемых в технологическом оборудовании при механической обработке материалов, существуют различные способы их очистки и регенерации методами отстаивания, фильтрации, центрифугированием, химическим и биологическим. Вследствие этого, СОТС требует использования специального оборудования необходимого для их очистки.

Возможность технологического обеспечения качества поверхности не только путем регулирования геометрических параметров и физико-химических свойств материала покрытий открывает широкие перспективы применения хонингования и лепесткового полирования при модификации поверхностных слоев деталей машин, но и очисткой СОТС от механических примесей. Так же очистка способствует стабилизации свойств СОТС и продлению ее срока использования, и тем самым сокращению расходов на эксплуатацию.

В случае высоких требований к качеству обработанных деталей применяют многостадийные системы очистки СОТС совместно с целым комплексом мероприятий по продлению их срока службы.

Особую актуальность приобретает вопрос систематизации и усовершенствования методов промышленной чистоты жидкостей по возможности с наименьшими трудозатратами и контролем уровня чистоты на протяжении всего цикла производства. Проблемы обеспечения промышленной чистоты жидкостей связаны с экономией материальных ресурсов, охраной окружающей среды, улучшением санитарных условий работы и снижением пожарной опасности технологических процессов.

В соответствии с техническими требованиями и свойствами СОТС, которые будут подвергаться очистке, разработана передвижная технологическая установка [12] для удаления из водных жидкостей мелкодисперсного шлифовального шлама, взвешенных инородных и посторонних включений (частиц размером от 3...5 мкм). Разработанная передвижная установка для рафинирования загрязненной рабочей жидкости упрощает технологический процесс очистки

жидкости от производственной пыли в процессе металлообработки, продуктов коррозий трубопроводов и резервуаров, продуктов износа трущихся деталей, влаги и загрязнений биологического характера. Как универсальная комплексная система выполняет очистку жидкостей концентрацией загрязнений от 12 г/л, понижает трудоемкость процесса очистки жидкостей и продлевает срок эксплуатации СОТС. Степень очистки от шлама достигает 85...90%, при этом качество поверхностного слоя при финишной обработке покрытий повышается на 20...35%.

В процессе финишной обработки плазменных покрытий хонингованием алмазными блок-брусками и полированием КЛ очистка СОТС от механических примесей обеспечивает улучшение качества обработанных поверхностей (Ra 0,05...0,32 и $\sigma = -(150...180)$ МПа) на 20...35% и повышение эксплуатационных свойств деталей машин.

Намечается современная тенденция для применения твердых смазочных материалов, обеспечивающие низкие коэффициенты трения, выдерживают высокие температуры и давления. В качестве твердых смазочных материалов используют пленочные покрытия, которые образованы из металлов и сплавов более мягких, чем деформируемый металл (медь, латунь, свинец, олово, цинк и др.) для снижения коэффициенты трения и износостойких покрытий (Ti, Cr, Al), для режущего клина инструмента.

Список литературы:

1. Обработка резанием деталей с покрытиями / Под общей редакцией С.А. Клименко. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2011. – 353 с.
2. Хрульков, В.А. Новые СОЖ, применяемые при шлифовании труднообрабатываемых материалов / В.А. Хрульков, В.С. Матвеев, В.В. Волков. – М.: Машиностроение, 1982. – 64 с.
3. Чесов Ю.С. Шероховатость поверхности износостойких покрытий после финишной механической обработки / Ю.С. Чесов, Е.А. Зверев, А.И. Попелюх, П.В. Трегубчак // Обработка металлов. – 2011. – № 1(50). – С.12–14.
4. Рыжов Э.В. Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями / Э.В. Рыжов, С.А. Клименко, О.Г. Гуцаленко. – К.: Наукова думка, 1994. – 180 с.
5. Клименко С.А. Технологія ремонту та відновлення / С.А. Клименко, В.В. Бурикін, Л.Г. Полонський, В.Г. Сніцар. – Житомир: ЖДТУ, 2014. – 122 с.
6. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: Справ. / Под общ. ред. Л.В. Худобина. – М.: Машиностроение, 2006. – 544 с.
7. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: Справ. / Под ред. С.Г. Энтелиса, Э.М. Берлинера. – М.: Машиностроение, 1995. – 496 с.
8. Малиновский Г.Т. Масляные смазочно-охлаждающие жидкости для обработки металлов резанием / Г.Т. Малиновский // Свойства и применение. М.: Химия, 1993. – 160 с.
9. Виноградов Д.В. Применение смазочно-охлаждающих технологических сред при резании металлов. Справ. / Д.В. Виноградов // Инженерный журнал. – 2002. – № 1. – С. 44–51.
10. Инструменты из сверхтвердых материалов / под ред. Н.В. Новикова и С.А. Клименко. – М.: Машиностроение, 2014. – 608 с.
11. Бурыкин В.В. Смазочно-охлаждающие технологические средства для алмазно-абразивной обработки покрытий / В.В. Бурыкин // Новітні технології в машинобудуванні: металообробка, інструмент, реновація: Зб. наук. праць. – Маріуполь: ПДТУ, 2010. – Вип. № 2. – С. 153–162.
12. Трофімов І.Л. Пересувна установка для очистки робочих рідин, що використовуються в технологічних цілях / І.Л. Трофімов, В.В. Бурикін, О.М. Зубченко // Технологические системы. – 2007. – № 3 (39). – С. 80–85.

УДК 621.9

DOI 10.36910/775.24153966.2022.73.3

Г. В. Алексієнко

спеціаліст в галузі «Механічна інженерія» за напрямом підготовки «Обладнання переробних і харчових виробництв», інженер-технолог, Харківський державний університет харчування та торгівлі

ТОВ НВФ «Вест Лабс ЛТД», Україна, місто Харків, вулиця Катерининська 46,
<https://orcid.org/0000-0002-0757-757X>

ВИКОРИСТАННЯ ВИСОКОПРОДУКТИВНОГО ІНСТРУМЕНТУ ЯК МЕТОД СКОРОЧЕННЯ ЧАСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПУ

У статті розкрито принципи використання високопродуктивного інструменту як методу скорочення часу виготовлення деталей на верстатах з числовим програмним управлінням. Зазначено, що технологія високошвидкісного різання з використанням принципів модифікації, оптимізації та заміни або комбінації етапів обробки може підвищити ефективність використання енергії та ресурсів у загальному технологічному процесі, головним чином, скорочуючи час на виробництво. Запропоновано застосовуючи технологію високошвидкісного різання на базі високопродуктивного інструменту відмовитися від попередньої обробки, і одразу виготовляти деталі остаточно у загартованому вигляді. Сформовано модифікований ланцюг технологічного виробництва з використанням високопродуктивного інструменту як методу скорочення часу виготовлення деталей на верстатах з ЧПУ. У якості варіантів використання обрано два цикли виробництва: цикл виготовлення партії деталей з обов'язковим послідовним виконанням операцій та цикл виготовлення партії деталей з використанням технології високошвидкісного різання на базі високопродуктивного інструменту. Проаналізовано час роботи кожної лінії на партії деталей від 1 до 150 шт., з кроком 25 штук. Визначено показники відношення часу виготовлення деталей в залежності від обсягу партії деталей, що виготовляється, враховуючи показники виконання циклу виготовлення партії деталей з використанням технології високошвидкісного різання на базі високопродуктивного інструменту та часу витраченого на реалізацію циклу виготовлення партії деталей з обов'язковим послідовним виконанням операцій. Підкреслено, що застосування технології високошвидкісного різання є вигідним в умовах виробництва, що є часто переналагоджуваним, враховуючи повною мірою час витрачений на відлагодження процесу виготовлення деталі остаточно у загартованому вигляді. Доведено, що при реалізації циклу виготовлення партії деталей з обов'язковим послідовним виконанням операцій значення екстенсивного використання обладнання прагне до граничного значення, що залежить від витрат часу на реалізацію попередньої обробки заготовок та витрати на між операційне пролежування деталі, ці види витрат часу в умовах реального виробництва повністю усунути неможливо.

Ключові слова: високопродуктивний інструмент, час, виготовлення, деталь, верстат, числове програмне управління.

Г.В. Алексієнко

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА КАК МЕТОД СОКРАЩЕНИЯ ВРЕМЕНИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ НА СТАНКАХ С ЧПУ

В статье раскрыты принципы использования высокопроизводительного инструмента как метода сокращения времени изготовления деталей на станках с числовым программным управлением. Указано, что технология высокоскоростной резки с использованием принципов модификации, оптимизации и замены или комбинации этапов обработки может повысить эффективность использования энергии и ресурсов в общем технологическом процессе, главным образом сокращая время на производство. Предложено применять технологию высокоскоростной резки на базе высокопроизводительного инструмента отказаться от предварительной обработки, и сразу производить детали до конца в закаленном виде. Сформирована модифицированная цепь технологического производства с использованием высокопроизводительного инструмента как метода сокращения времени изготовления деталей на станках с ЧПУ. В качестве вариантов использования выбраны два цикла производства: цикл изготовления партии деталей с обязательным последовательным выполнением операций и цикл изготовления партии деталей с использованием технологии высокоскоростной резки на базе высокопроизводительного инструмента. Проанализировано время работы каждой линии на партии деталей от 1 до 150 штук, с шагом 25 штук. Определены показатели отношения времени изготовления деталей в зависимости от объема изготавливаемой партии деталей, учитывая показатели выполнения цикла изготовления партии деталей с использованием технологии высокоскоростной резки на базе высокопроизводительного инструмента и времени потраченного на реализацию цикла изготовления партии деталей с обязательным последовательным выполнением операций. Подчеркнуто, что применение технологии высокоскоростной резки является выгодным в условиях производства, часто переналаживаемым, учитывая в полной мере время затраченное на отладку процесса изготовления детали окончательно в закаленном виде. Доказано, что при реализации цикла изготовления партии деталей с обязательным последовательным выполнением операций значение экстенсивного использования оборудования стремится к предельному значению, зависящему от затрат времени на реализацию предварительной обработки заготовок и расхода на межоперационное пролеживание детали, эти виды затрат времени в условиях реального производства полностью устранить невозможно.

Ключевые слова: высокопроизводительный инструмент, время, изготовление, деталь, станок, числовое программное управление.

H. Aleksienko

THE USE OF HIGH-PERFORMANCE TOOLS AS A METHOD OF REDUCING THE TIME OF MANUFACTURING PARTS ON CNC MACHINES

The article reveals the principles of using a high-performance tool as a method of reducing the time of manufacturing parts on machines with numerical program control. It is noted that high-speed cutting technology using modification, optimization and replacement principles or a combination of processing steps can increase energy and resource efficiency in the overall process, mainly by reducing production time. It is proposed to abandon pre-processing using high-speed cutting technology based on high-performance tools, and immediately make the parts finally hardened. A modified chain of technological production has been formed using a high-performance tool as a method of reducing the time of manufacturing parts on CNC machines. Two production cycles were selected: the batch production cycle with mandatory sequential operations and the batch production cycle using high-speed cutting technology based on a high-performance tool. The operating time of each line on a batch of parts from 1 to 150 pieces, with a step of 25 pieces is analyzed. The ratio of the time of production of parts depending on the volume of the batch of parts produced, taking into account the performance of the cycle of production of the batch of parts using high-speed cutting technology based on high-performance tools and time spent on the production cycle of parts with mandatory sequential operations. It is emphasized that the use of high-speed cutting technology is advantageous in terms of production, which is often reconfigurable, given the full time spent on debugging the manufacturing process of the part finally hardened. It is proved that in the implementation of the cycle of manufacturing a batch of parts with mandatory sequential operations, the value of extensive use of equipment tends to the limit value, which depends on the time spent on pre-workpiece and production cannot be completely eliminated.

Key words: high-performance tool, time, manufacturing, part, machine, numerical program control.

Вступ та постановка завдання. Сучасні верстати з числовим програмним управлінням (ЧПУ) є популярним механізмом обробки металів. Проте враховуючи високу вартість одного часу роботи таких верстатів, на базі їх конфігурації необхідно використовувати інструменти, що забезпечують високу продуктивність праці, скорочуючи час використання останніх. Інтенсифікація режимів обробки за інших рівних умов порівняно з роботою на універсальному устаткуванні може бути забезпечена за рахунок застосування економічних періодів стійкості та сучасних інструментальних матеріалів. Говорячи про фізичну сторону процесу, доцільність застосування економічних періодів стійкості впливає з основного рівняння теорії різання металів [1]:

$$P_1^n V_1 = P_2^n V_2 = const,$$

де P – періоди стійкості, що програмуються;

V – швидкість різання, яка є розрахунковою величиною;

n – показник відносної стійкості.

Як видно з рівняння, швидкість різання залежить, у першу чергу, від виду матеріалу, що обробляється, тобто чим твердіший метал, тим довший час його обробки. Проте варто зауважити, що з економічної складової, чим менше час обробки тим менша технологічна вартість кінцевої деталі.

Основні переваги високошвидкісної обробки полягають не у скороченні машинного часу, а у підвищенні якості поверхні та можливості обробки матеріалів з високою твердістю, наприклад, високошвидкісна обробка металів, загартованих сталей.

У зв'язку з розвитком порошкової металургії і, як наслідок, значного підвищення ріжучої здатності металообробного інструменту доцільно в сучасних умовах обробляти попередньо загартований матеріал.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Публікації стосовно застосування використання високопродуктивного інструменту як методу скорочення часу виготовлення деталей на верстатах з ЧПУ є популярним напрямком досліджень на протязі останніх 20-ти років.

Наукові основи забезпечення параметрів якості робочих поверхонь деталей машин у вигляді тіл обертання дослідив В.О. Дзюра [2]. Автором на основі отриманих нових науково обґрунтованих результатів вирішено актуальну для технології машинобудування науковоприкладну проблему комплексного забезпечення параметрів якості робочих поверхонь деталей класу «тіла обертання» з урахуванням умов експлуатації шляхом оптимізації структури технологічних процесів за параметрами якості та забезпеченні прогресивних режимів обробки з допомогою статистичних методів оцінювання.

Я.П. Коваленко та П.П. Мельничук [3] дослідили принципи підвищення ефективності обробки отворів на багатоцільових верстатах. Науковці зазначили, що важливим етапом у проектуванні ефективного процесу обробки деталі є вибір допоміжного інструменту. На

багатоцільових верстатах свердлильно-фрезерно-розточувальної групи не використовуються допоміжні інструменти, які здійснюють додаткове спрямування осевого різального інструменту під час обробки, не в повній мірі використовуються також допоміжні інструменти для багаторізного розточування отворів, тоді як їх застосування дозволить скоротити число технологічних переходів і різальних інструментів, підвищити продуктивність та якість обробки.

О. Литвиненко, Ю. Бойко та В. Яновський [4] розглянули механізми використання CAD-CAM технологій для проектування та виготовлення деталей на верстатах з числовим програмним керуванням (ЧПК). Ці технології дозволяють проектувати технологічні маршрути обробки поверхонь деталей різної складності та виготовляти їх на сучасних оброблюючих центрах з ЧПК, а їх використання в умовах малосерійного, одичного виробництва виправдане та економічно раціональне.

Стаття [5] присвячена питанням аналізу взаємозв'язку проектування деталей в CAD/CAM-системі та їх виготовлення на фрезерних верстатах з ЧПУ. Розглянуто причини виникнення похибок виготовлення деталей на фрезерних верстатах з ЧПУ та шляхи їх усунення не тільки в процесі самого фрезерування деталі на виробничому обладнанні, а і на етапах проектування конструкції, розробки управляючих програм (УП) для оброблювального центру та розрахунку режимів різання та їх взаємозв'язок.

Оцінка впливу режимів різання на вібрацію розточувального різця і точність оброблюваних отворів на верстатах з ЧПК досліджена на сторінках роботи [6].

Із зарубіжних авторів варто відзначити такі роботи як: Collette, Michael & Corey, Bob & Johnson, John & Livermore, Lawrence [7], Luhn, R. & Sandig, S. & Maul, T. & Geiss, Paul & Gramsch-Kempkes, Sascha [8], Yinsheng, Wan [9], Long, Haifei [10], Sychuk, V. & Zabolotnyi, Oleg & Harchuk, P. & Somov, Dmytro & Slabkyi, Andriy & Omiotek, Zbigniew & Rakhmetullina, S. & Yusupova, G. [11], Та, Thi-Na & Hwang, Yunn-Lin & Horng, Jeng-Haur [12], Şahin, Yusuf & Aydemir, Erdal [13], Rafai, Noor & Kamdani, Kamaruddin & Ibrahim, Mohd & Rahim, E. & Sazali, M. & Wong, C. & Chong, Y. [14] та інші.

Проте, враховуючи описані наукові набутки, за темою, питання розкриття механізмів використання високопродуктивного інструменту як методу скорочення часу виготовлення деталей на верстатах з ЧПУ залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

Постановка завдання. Розкрити принципи використання високопродуктивного інструменту як методу скорочення часу виготовлення деталей на верстатах з ЧПУ.

Викладення основного матеріалу дослідження. На сьогодні, технологія високошвидкісної різки є найбільш перспективним підходом до підвищення ефективності та точності процесів різки металів. Основні проблеми, в галузі різання металу, полягають у розробці та застосуванні інноваційних стратегій, спрямованих, по-перше, на скорочення часу циклу та витрат для кращої продуктивності, більшої прибутковості, вищої енергоефективності та ресурсної ефективності, а також для підвищення продуктивності та зменшення викидів. Наприклад, при обробці легких матеріалів або високотемпературних сплавів використання високошвидкісної обробки і високоефективного різання часто обмежується потужністю машини або зносом інструменту та оброблюваністю заготовки. Загалом, використання високої швидкості може призвести до зменшення сили різання, потужності та енергії, що, у свою чергу, матиме позитивний вплив на конструкцію інструменту та машини. Крім того, існує потенціал для реалізації компонентів вищої якості (наприклад, покращення якості поверхні та високої точності за рахунок зменшеного введення тепла в компонент). Більша подача та глибина різання вимагають більших зусиль і потужності, хоча вони можуть зменшити час різання, вартість та енергію. Високошвидкісна обробка, враховуючи сучасні наукові набутки, більш підходить до алюмінієвих сплавів, вуглецевих сталей та інших традиційних матеріалів та за рахунок використання дозволяє досягти значного зниження витрат та покращення якості поверхні. Однак існують деякі сплави, що особливо важко обробляються, такі як загартовані сталі, що використовуються для штампів і форм, хромокобальтові сплави, що використовуються для протезів, і сплави на основі нікелю, а також високолеговані сталі, що використовуються у газових турбінах. У цих випадках технології високошвидкісного різання стикаються із серйозними труднощами.

Загально відомим фактом є процес обробки деталей на верстатах з ЧПУ, де кожна деталь проходить три основні етапи обробки:

- 1) попередня обробка з припусками,
- 2) термообробка,
- 3) остаточна обробка.

Проходження усіх означених етапів підвищує час виробничого циклу, що є економічно не вигідним фактом. Технологія високошвидкісного різання з використанням принципів модифікації, оптимізації та заміни або комбінації етапів обробки можуть підвищити ефективність використання енергії та ресурсів у загальному технологічному процесі, головним чином, скорочуючи час на виробництво. Застосовуючи технологію високошвидкісного різання на базі високопродуктивного інструменту відмовляємося від попередньої обробки, і одразу виготовляємо деталі остаточно у загартованому вигляді. Також є можливість видалити етап термічної обробки та використання твердого різання замість шліфування. Ще, як варіант, використання товстошарових покриттів і подальше тверде фрезерування з оптимальними умовами обробки. На рисунку 1 наведено модифікований ланцюг технологічного виробництва з використанням високопродуктивного інструменту як методу скорочення часу виготовлення деталей на верстатах з ЧПУ.

У якості варіантів використання обираємо два цикли:

- 1) Цикл виготовлення партії деталей з обов'язковим послідовним виконанням операцій;
- 2) Цикл виготовлення партії деталей з використанням технології високошвидкісного різання на базі високопродуктивного інструменту.

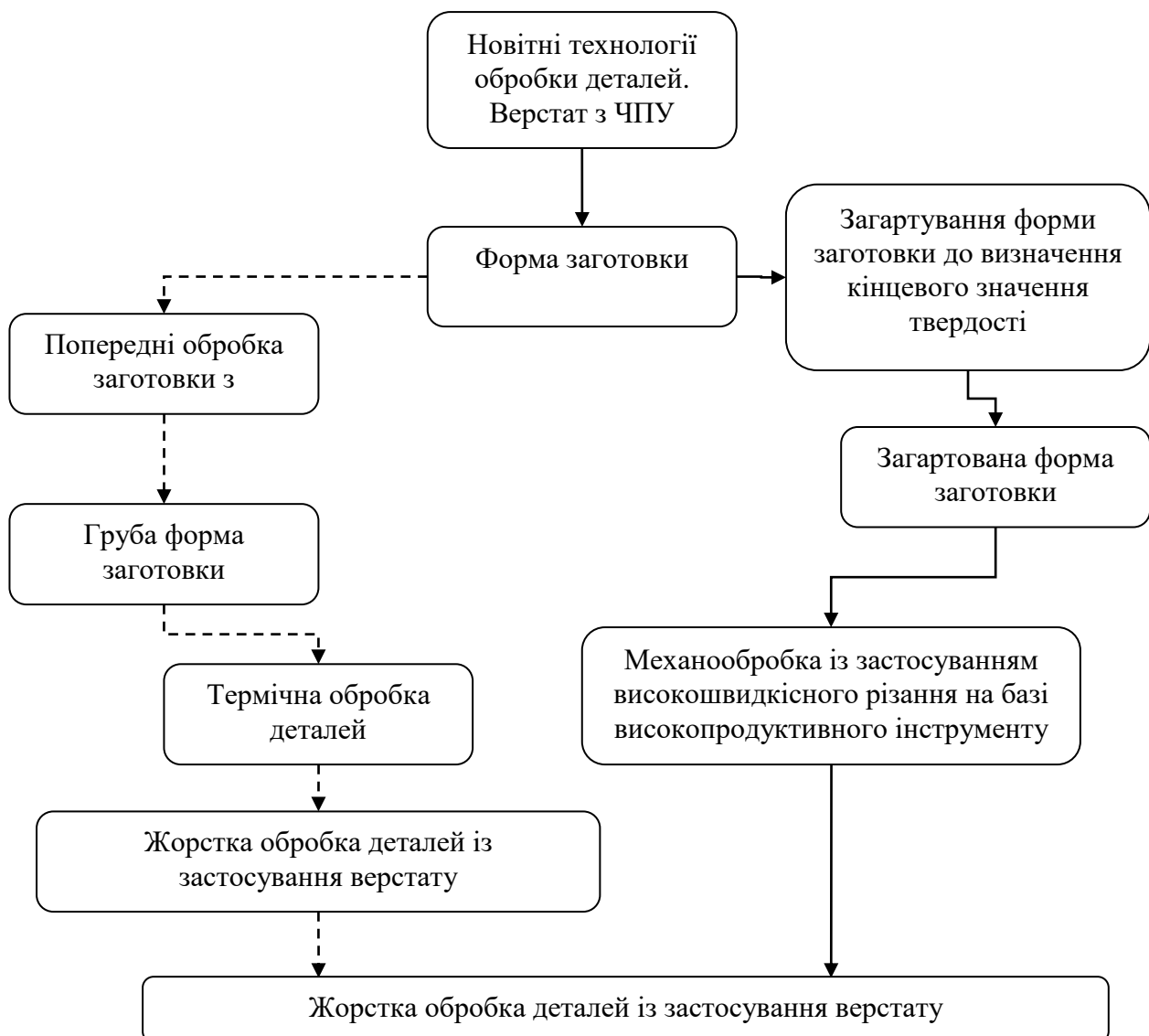


Рис. 1. Модифікований ланцюг технологічного виробництва з використанням високопродуктивного інструменту як методу скорочення часу виготовлення деталей на верстатах з ЧПУ

Кожен із запропонованих циклів має у своєму складі низку операцій, здійснення кожної з них вимагає певного налаштування у залежності від партійності виробництва (одиничне, серійне). Обладнання, яке входить у склад всієї лінії характеризується деякими особливостями:

- лінія виробництва з верстатами з ЧПУ налагоджується окремо в залежності від серійності виробництва;
- матеріали паралельно кожної позиції обробки передаються одинично;
- налаштування лінії на поточне виконання виконує група наладчиків, робота ведеться послідовно, під час здійснення налагодження вся лінія не працює.

У рамках даної роботи припустимо, що необхідний обсяг обробки розподілено між послідовними позиціями рівномірно, час налаштування окремої операції однаковий.

Час обробки деталей на верстатах з ЧПУ за обома циклами складатиметься з:

- а) часу налагодження;
- б) часу проходження першої деталі у всіх позиціях;
- в) сумарного часу перебування на лімітуючій позиції інших деталей партії (якщо партія складається з N деталей, вважається час перебування на лімітуючій позиції N-1 деталей).

Партія деталей, що підлягає обробці варіюється від 1 до 150 шт., з кроком 25 штук.

Загальні значення основних показників етапів проходження по лінії наведено у таблиці 1.

Табл. 1.

Значення основних показників етапів проходження по лініях відповідно до циклу виготовлення партії деталей

№	Назва показника	Цикл виготовлення партії деталей з обов'язковим послідовним виконанням операцій	Цикл виготовлення партії деталей з використанням технології високошвидкісного різання на базі високопродуктивного інструменту
1	Рівень прогресивності обладнання	0,8	1
2	Відношення пропорційності виготовлення деталі між загальним часом виготовлення та часом циклу роботи на верстаті	1,1	1,5
3	Відношення пропорційності виготовлення деталі між часом первинної підготовки та часом циклу роботи на верстаті	45	15
4	Відношення часу використання до часу налагодження обладнання	0,5	1,8
5	Відношення часу між циклом виготовлення партії деталей на верстаті та часом між операційного простою	0,2	0
6	Час налагодження лінії, хв.	30	15

Результати показників відношення часу виготовлення деталей в залежності від обсягу партії деталей, що виготовляється, враховуючи показники виконання циклу виготовлення партії деталей з використанням технології високошвидкісного різання на базі високопродуктивного інструменту та часу витраченого на реалізацію циклу виготовлення партії деталей з обов'язковим послідовним виконанням операцій наведено на рисунку 2.

На рисунку 2 чітко просліджується, що час витрачений на реалізацію циклу виготовлення партії деталей з використанням технології високошвидкісного різання на базі високопродуктивного інструменту значно скорочується у порівнянні з часом витраченим на реалізацію циклу виготовлення партії деталей з обов'язковим послідовним виконанням операцій за умови, що розмір партії не перевищує 25 шт. деталей.

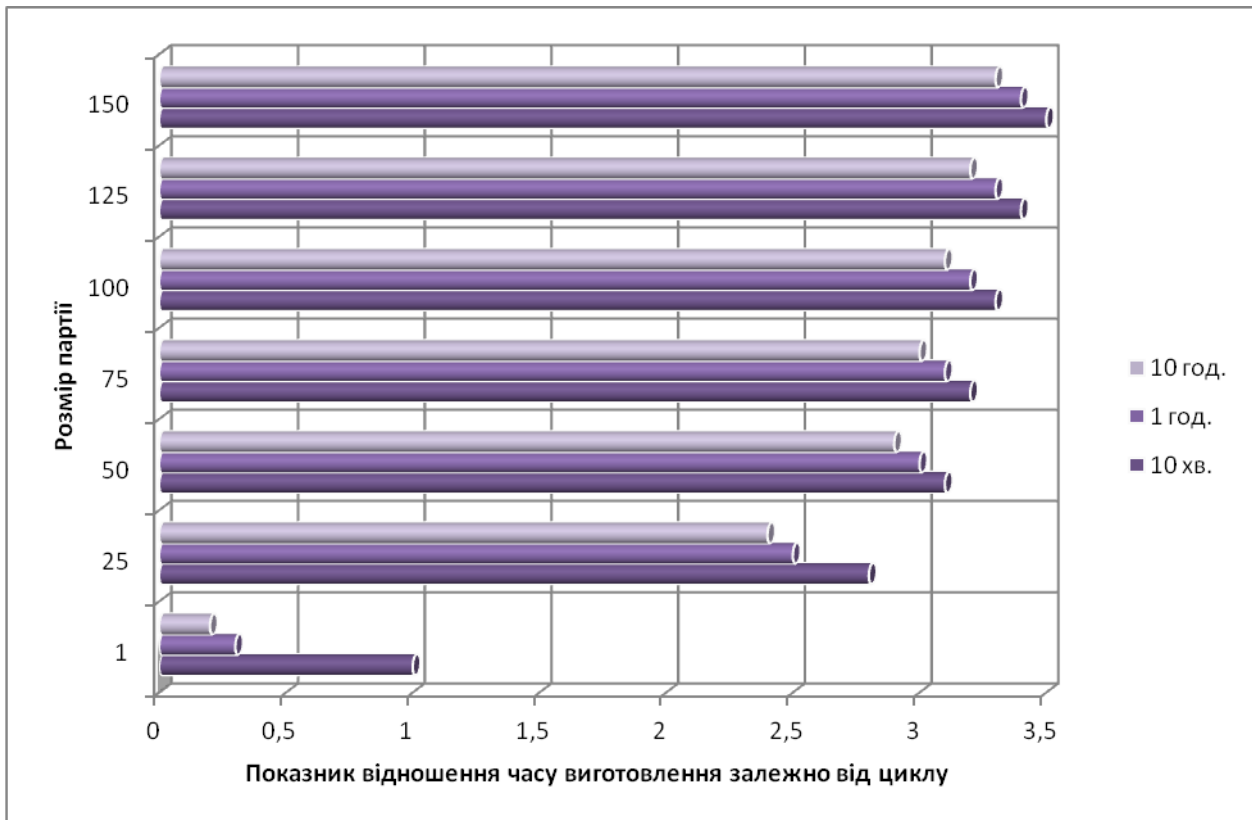


Рис. 2. Діаграма відношення часу виготовлення деталей у залежності від обсягу партії деталей, що виготовляється, враховуючи досліджувані цикли

Таким чином, є можливість стверджувати, що застосування технології високошвидкісного різання на базі високопродуктивного інструменту є вигідним в умовах виробництва, що є часто переналаджуваним, враховуючи повною мірою час витрачений на відлагодження процесу виготовлення деталі остаточно у загартованому вигляді.



Рис. 3. Діаграма відношення екстенсивного використання обладнання в залежності від обсягу партії деталей, що виготовляється, при застосуванні циклу виготовлення партії деталей з використанням технології високошвидкісного різання на базі високопродуктивного інструменту

Обов'язковим є знаходження відношення екстенсивного використання обладнання, даний показник вираховується, як відношення суми часу оперативної роботи лінії до часу виготовлення окремої партії деталей. Отримані дані наведено на рисунку 3.

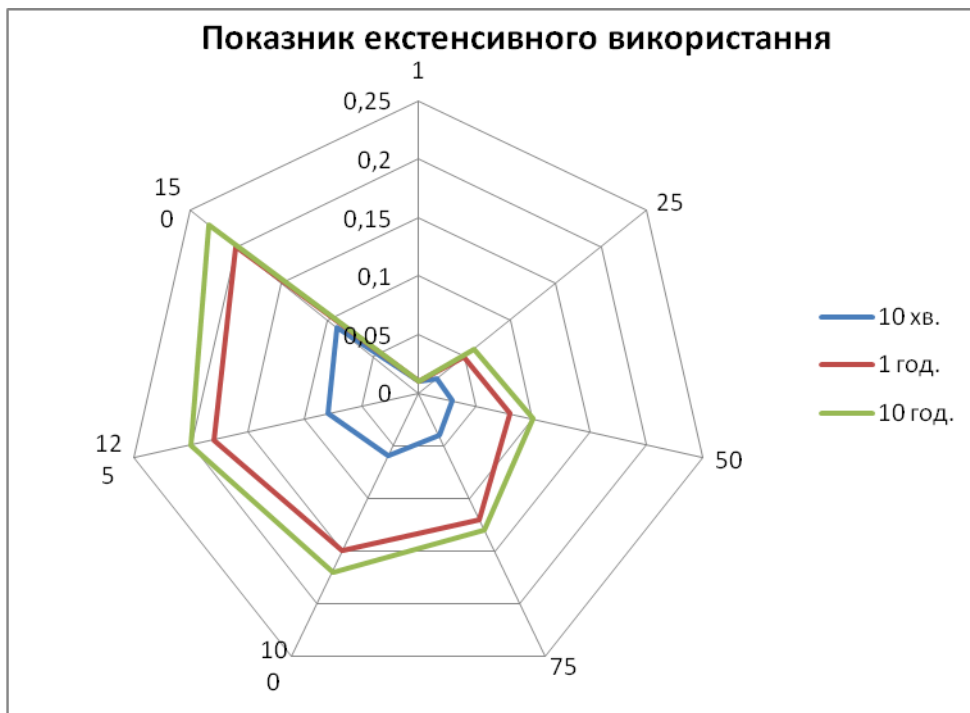


Рис. 4. Діаграма відношення екстенсивного використання обладнання в залежності від обсягу партії деталей, що виготовляється, при застосуванні циклу виготовлення партії деталей з обов'язковим послідовним виконанням операцій

Відповідно до отриманих результатів, при реалізації циклу виготовлення партії деталей з використанням технології високошвидкісного різання на базі високопродуктивного інструменту загальний час екстенсивного використання обладнання не залежить від загального часу витраченого на виготовлення партії деталей. Проте при реалізації циклу виготовлення партії деталей з обов'язковим послідовним виконанням операцій дана залежність існує, що ілюструє рисунок 4.

Значення екстенсивного використання обладнання при реалізації циклу виготовлення партії деталей з використанням технології високошвидкісного різання на базі високопродуктивного інструменту наближається до значення 0,75 при розмірі партії 150 штук деталей, а при реалізації циклу виготовлення партії деталей з обов'язковим послідовним виконанням операцій значення екстенсивного використання обладнання прагне до граничного значення, що залежить від витрат часу на реалізацію попередньої обробки заготовок та витрати на між операційне пролежування деталі. Ці види витрат часу при реалізації циклу виготовлення партії деталей з обов'язковим послідовним виконанням операцій в умовах реального виробництва повністю усунути неможливо.

Висновки. У роботі розкрито принципи використання високопродуктивного інструменту як методу скорочення часу виготовлення деталей на верстатах з ЧПУ. Використання високопродуктивного інструменту дозволяє перепланувати та пришвидшити процес виробництва за рахунок скорочення епізодів обробки. Технологія високошвидкісного різання забезпечує отримання точності розмірів порядку 0,02 мм, до того ж після механічної обробки закаленої заготовки значно підвищується довговічність матриць та пуасонів. Скорочення стадій загального процесу виготовлення деталей на верстатах з ЧПУ дає суттєву економію часу у порівнянні з традиційним способом, у рамках 30-50 %.

Перспективами подальших досліджень є модернізація лінії обробки отворів складної форми із застосуванням керованої розточувальної системи за для скорочення трудомісткості виготовлення деталі.

Список літератури

1. Мазур М.П. Основи теорії різання матеріалів : підручник [для вищ. навч. закладів] / М.П. Мазур, Ю.М. Внуков, В.Л. Доброскок, В.О. Залога, Ю.К. Новосолов, Ф.Я. Якубов ; під заг. ред. М.П. Мазура. – 2-е вид. перероб. і доп. – Львів : Новий світ-2000, 2011. – 422 с.
2. Дзюра В.О. Наукові основи забезпечення параметрів якості робочих поверхонь деталей машин у вигляді тіл обертання. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – «Технологія машинобудування» (з технічних наук). – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2021. 413 с.
3. Підвищення ефективності обробки отворів на багатоцільових верстатах / Я.П. Коваленко П.П. Мельничук // Збірник наукових праць X Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент», 6–9 листопада 2019 року. Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка», 2019. – <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2019/11/125.pdf>
4. Литвиненко О., Бойко Ю., Яновський В. CAD-CAM технології проектування та виготовлення деталей на верстатах з ЧПК. Технічна інженерія. 2020. С. 15-22.
5. Юшков А. Деякі аспекти проектування деталей та розробки управляючої програми в CAD/CAM-системі, що впливають на сумарну похибку виготовлення виробу на фрезерному верстаті з ЧПУ. Комп'ютерно-інтегровані технології освіта, наука, виробництво, 2021. (43), 164-170. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2021-43-27>.
6. Бойко, Ю. І., Литвиненко, О. А., Яновський, В. А. Оцінка впливу режимів різання на вібрацію розточувального різця і точність оброблених отворів на верстатах з ЧПК. Технічна інженерія, 2020, (2(86)), 34–40. [https://doi.org/10.26642/ten-2020-2\(86\)-34-40](https://doi.org/10.26642/ten-2020-2(86)-34-40).
7. Collette, Michael & Corey, Bob & Johnson, John & Livermore, Lawrence. (2022). High Performance Tools & Technologies. Department of Computer Science and Engineering, SJB Institute of Technology (VTU) BGS Health & Education City, Kengeri, Bangalore-60, India
8. Luhn, R. & Sandig, S. & Maul, T. & Geiss, Paul & Gramsch-Kempkes, Sascha. (2012). Production of high-performance tools: Bonded hard material cutting. 40-45.
9. Yinsheng, Wan. (2019). Influence of CNC Tools on CNC Machining Technology. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 569. 032043. 10.1088/1757-899X/569/3/032043.
10. Long, Haifei. (2021). Adaptive control of cutting temperature for CNC machine tool. 51-55. 10.1109/ICSCDE54196.2021.00021.
11. Sychuk, V. & Zabolotnyi, Oleg & Harchuk, P. & Somov, Dmytro & Slabkyi, Andriy & Omiotek, Zbigniew & Rakhmetullina, S. & Yusupova, G.. (2021). Practices of modernization of metal-cutting machine tool CNC systems. 10.1201/9781003225447-22.
12. Ta, Thi-Na & Hwang, Yunn-Lin & Horng, Jeng-Haur. (2021). A Multidisciplinary Approach for Optimization Design of CNC Machine Tools. International Journal of Computational Methods. 18. 10.1142/S0219876221500286.
13. Şahin, Yusuf & Aydemir, Erdal. (2021). A Comprehensive Solution Approach for CNC Machine Tool Selection Problem. Informatica. 1-28. 10.15388/21-INFOR461.
14. Rafai, Noor & Kamdani, Kamaruddin & Ibrahim, Mohd & Rahim, E. & Sazali, M. & Wong, C. & Chong, Y.. (2021). Experimental Study on the Performance of the New Milling Tools When Machining Pre-hardened Material. 10.1007/978-981-15-9505-9_20.

Н.М. Hubal

Lutsk National Technical University

MATHEMATICAL STUDY OF THE STABILITY OF FIXED POINTS OF SYSTEMS OF DIFFERENTIAL EQUATIONS DESCRIBING BIOCHEMICAL PROCESSES RATES

Mathematical study of the stability of fixed points of systems of differential equations describing biochemical processes rates is performed in the article. A system of differential equations for deviations is constructed, which describes the behavior of the system near the fixed point. An analysis of the general solution of the system of differential equations describing biochemical processes rates is made. The behavior of the systems near fixed points is investigated by the method of small perturbations. The conditions of existence of the limit cycle of the system of differential equations are investigated. For the cases when the system of differential equations cannot have an analytical solution, integrated curves are constructed by qualitative research. Phase trajectories of the system of differential equations describing biochemical processes rates are constructed. The definition of the nature of the stability of fixed points is considered and investigated.

Keywords: concentration of substance, system of differential equations, limit cycle.

Г.М. Губаль

МАТЕМАТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ОСОБЛИВИХ ТОЧОК СИСТЕМ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ РІВНЯНЬ, ЯКІ ОПИСУЮТЬ ШВИДКОСТІ БІОХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

У статті виконано математичне дослідження стійкості особливих точок систем диференціальних рівнянь, які описують швидкості біохімічних процесів. Розглянуто і досліджено визначення характеру стійкості особливих точок.

Ключові слова: концентрація речовини, система диференціальних рівнянь, граничний цикл.

Г.Н. Губаль

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОСОБЫХ ТОЧЕК СИСТЕМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ, ОПИСЫВАЮЩИХ СКОРОСТИ БИОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В статье выполнено математическое исследование устойчивости особых точек систем дифференциальных уравнений, описывающих скорости биохимических процессов. Рассмотрено и исследовано определение характера устойчивости особых точек.

Ключевые слова: концентрация вещества, система дифференциальных уравнений, предельный цикл.

Problem formulation. Biochemical processes rates in their mathematical modeling are described by the system of differential equations, which can be written in the form

$$\frac{dc_i(t)}{dt} = f_i(c_1, c_2, \dots, c_N), \quad i = \overline{1, N}, \quad (1)$$

where c_i – concentrations of substances in biochemical reactions; $c_i \geq 0$.

The necessity and methods of reducing the number of equations to two or three differential equations in the system (1) are investigated in the article [1].

For a mathematical study of the stability of fixed points, we consider a system of two differential equations [2]:

$$\begin{cases} \frac{dc_1(t)}{dt} = f_1(c_1, c_2), \\ \frac{dc_2(t)}{dt} = f_2(c_1, c_2). \end{cases} \quad (2)$$

Analysis of the latest research and publications. We consider how in the general case the nature of the stability of a fixed point is determined.

In a mechanical system, it is necessary to make a slight push or shift from the equilibrium position and see if the system returns to this equilibrium position. The same should be done in mathematical modeling of dynamic systems [3]-[6].

Presentation of the main material. Let \bar{c}_1, \bar{c}_2 be the coordinates of a fixed point (equilibrium position) of the system of differential equations (2). Let us define a small deviation $\Delta c_1 \ll \bar{c}_1, \Delta c_2 \ll \bar{c}_2$ from the equilibrium position and substitute it into system of differential equations (2) $c_1 = \bar{c}_1 + \Delta c_1, c_2 = \bar{c}_2 + \Delta c_2$. Then we decompose the right-hand sides of the differential equations of the system (2) into Taylor series in the neighborhood of the point $(\bar{c}_1; \bar{c}_2)$ (i.e. in the neighborhood of the equilibrium position), limited (taking into account the smallness $\Delta c_1, \Delta c_2$) to the first terms of the series (terms of the first degree):

$$f_1(c_1, c_2) = f_1(\bar{c}_1 + \Delta c_1, \bar{c}_2 + \Delta c_2) = f_1(\bar{c}_1, \bar{c}_2) + \Delta c_1 \left. \frac{\partial f_1(c_1, c_2)}{\partial c_1} \right|_{(\bar{c}_1; \bar{c}_2)} + \Delta c_2 \left. \frac{\partial f_1(c_1, c_2)}{\partial c_2} \right|_{(\bar{c}_1; \bar{c}_2)} + \dots,$$

$$f_2(c_1, c_2) = f_2(\bar{c}_1 + \Delta c_1, \bar{c}_2 + \Delta c_2) = f_2(\bar{c}_1, \bar{c}_2) + \Delta c_1 \left. \frac{\partial f_2(c_1, c_2)}{\partial c_1} \right|_{(\bar{c}_1; \bar{c}_2)} + \Delta c_2 \left. \frac{\partial f_2(c_1, c_2)}{\partial c_2} \right|_{(\bar{c}_1; \bar{c}_2)} + \dots.$$

Thus, in order to study the equilibrium position (the fixed point $(\bar{c}_1; \bar{c}_2)$) of the non-linear system of differential equations (2), we, at the point $(\bar{c}_1; \bar{c}_2)$, located on the phase plane $O'c_1c_2$, placed the origin O of the phase plane $O\Delta c_1\Delta c_2$ (Fig. 1) and decomposed the functions $f_1(c_1, c_2)$ and $f_2(c_1, c_2)$ into Taylor series in the neighborhood of the point $(\bar{c}_1; \bar{c}_2)$.

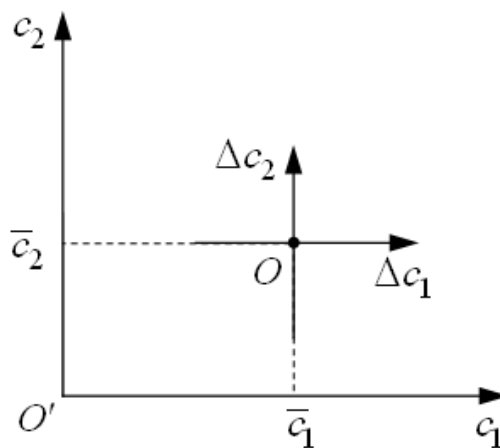


Fig. 1. The fixed point $(\bar{c}_1; \bar{c}_2)$

Since the derivatives of constants $\frac{d\bar{c}_1}{dt} = 0, \frac{d\bar{c}_2}{dt} = 0$ and $\Delta c_1, \Delta c_2$ are variables, i.e. $\Delta c_1 = \Delta c_1(t), \Delta c_2 = \Delta c_2(t)$, then left-hand sides of the differential equations of the system (2) take on the form:

$$\frac{d(c_1(t))}{dt} = \frac{d(\bar{c}_1 + \Delta c_1(t))}{dt} = \frac{d(\Delta c_1(t))}{dt},$$

$$\frac{d(c_2(t))}{dt} = \frac{d(\bar{c}_2 + \Delta c_2(t))}{dt} = \frac{d(\Delta c_2(t))}{dt}.$$

Since at the fixed (stationary) point $(\bar{c}_1; \bar{c}_2)$ $\frac{d\bar{c}_1}{dt} = 0$ and $\frac{d\bar{c}_2}{dt} = 0$, then from the system (2) we obtain

$$f_1(\bar{c}_1, \bar{c}_2) = 0, \quad f_2(\bar{c}_1, \bar{c}_2) = 0.$$

Then, up to the terms of the second order of smallness, after substitution into the system of differential equations (2), we obtain the system of differential equations

$$\begin{cases} \frac{d(\Delta c_1)}{dt} = \Delta c_1 \left. \frac{\partial f_1(c_1, c_2)}{\partial c_1} \right|_{(\bar{c}_1; \bar{c}_2)} + \Delta c_2 \left. \frac{\partial f_1(c_1, c_2)}{\partial c_2} \right|_{(\bar{c}_1; \bar{c}_2)}, \\ \frac{d(\Delta c_2)}{dt} = \Delta c_1 \left. \frac{\partial f_2(c_1, c_2)}{\partial c_1} \right|_{(\bar{c}_1; \bar{c}_2)} + \Delta c_2 \left. \frac{\partial f_2(c_1, c_2)}{\partial c_2} \right|_{(\bar{c}_1; \bar{c}_2)}. \end{cases} \quad (3)$$

Denoting

$$\left. \frac{\partial f_1(c_1, c_2)}{\partial c_1} \right|_{(\bar{c}_1; \bar{c}_2)} = \alpha_1, \quad \left. \frac{\partial f_1(c_1, c_2)}{\partial c_2} \right|_{(\bar{c}_1; \bar{c}_2)} = \alpha_2, \quad \left. \frac{\partial f_2(c_1, c_2)}{\partial c_1} \right|_{(\bar{c}_1; \bar{c}_2)} = \beta_1, \quad \left. \frac{\partial f_2(c_1, c_2)}{\partial c_2} \right|_{(\bar{c}_1; \bar{c}_2)} = \beta_2,$$

in the system of differential equations (3), we write the system (2) in the form

$$\begin{cases} \frac{dc_1}{dt} = \frac{d(\Delta c_1)}{dt} = \alpha_1 \Delta c_1 + \alpha_2 \Delta c_2, \\ \frac{dc_2}{dt} = \frac{d(\Delta c_2)}{dt} = \beta_1 \Delta c_1 + \beta_2 \Delta c_2 \end{cases} \quad \text{or} \quad \begin{cases} \frac{d(\Delta c_1)}{dt} = \alpha_1 \Delta c_1 + \alpha_2 \Delta c_2, \\ \frac{d(\Delta c_2)}{dt} = \beta_1 \Delta c_1 + \beta_2 \Delta c_2. \end{cases} \quad (4)$$

This system of differential equations for deviations (perturbations) $\Delta c_1(t)$, $\Delta c_2(t)$ describes the behavior of the system near the fixed point.

We find the general solution of the system of differential equations (4) in the form

$$\Delta c_1 = Ae^{kt}, \quad \Delta c_2 = Be^{kt}. \quad (5)$$

Substituting (5) into (4), we obtain

$$\begin{cases} Ake^{kt} = \alpha_1 Ae^{kt} + \alpha_2 Be^{kt}, \\ Bke^{kt} = \beta_1 Ae^{kt} + \beta_2 Be^{kt} \end{cases}$$

or reducing each equation of the system by the factor e^{kt} , we obtain the system of algebraic equations

$$\begin{cases} Ak = \alpha_1 A + \alpha_2 B, \\ Bk = \beta_1 A + \beta_2 B. \end{cases}$$

From the second equation of this system of algebraic equations we find $A = B \frac{k - \beta_2}{\beta_1}$ and

substitute it into the first equation, and reduce the obtained equation by the factor B , taking into account that the amplitude $B \neq 0$, we obtain the characteristic equation

$$(k - \alpha_1)(k - \beta_2) = \alpha_2 \beta_1 \quad \text{or} \quad k^2 - (\alpha_1 + \beta_2)k + \alpha_1 \beta_2 - \alpha_2 \beta_1 = 0, \quad (6)$$

whence

$$k_{1,2} = \frac{\alpha_1 + \beta_2 \pm \sqrt{(\alpha_1 + \beta_2)^2 - 4(\alpha_1\beta_2 - \alpha_2\beta_1)}}{2} =$$

$$= \frac{\alpha_1 + \beta_2 \pm \sqrt{(\alpha_1 - \beta_2)^2 + 4\alpha_2\beta_1}}{2} = \frac{\alpha_1 + \beta_2 \pm \sqrt{D}}{2}. \quad (7)$$

Then the general solution of the system of differential equations (4) can be written in the form

$$\Delta c_1 = A_I e^{k_1 t} + A_{II} e^{k_2 t}, \quad \Delta c_2 = B_I e^{k_1 t} + B_{II} e^{k_2 t}, \quad (8)$$

where the amplitudes A_I, A_{II}, B_I, B_{II} depend on the initial data.

The values k_1 and k_2 determine the nature of motion near the fixed point.

Consider combinations of values k_1 and k_2 .

1) Discriminant of the characteristic equation (6)

$$D = (\alpha_1 - \beta_2)^2 + 4\alpha_2\beta_1 \geq 0.$$

Then the two roots are valid. In this case, there may be three cases:

1a. The roots k_1 and k_2 are negative. Then the solution (8) will be in the form of decreasing exponents over time, that is the fixed point is stable. All phase trajectories tend to the fixed point over time.

1b. The roots k_1 and k_2 are positive. Then the fixed point is unstable. The phase point from arbitrary initial data moves away from the fixed point.

1c. The roots k_1 and k_2 have different signs, for example, $k_1 > 0$ and $k_2 < 0$. Then the fixed point is unstable, since the term with a positive exponent will always prevail over time. However, in some cases, when the initial data are such that $A_I = B_I = 0$, then Δc_1 and Δc_2 will decrease over time, since from (8) we obtain

$$\Delta c_1 = A_{II} e^{k_2 t}, \quad \Delta c_2 = B_{II} e^{k_2 t}.$$

Then

$$\frac{\Delta c_2}{\Delta c_1} = \frac{B_{II}}{A_{II}} \quad \text{or} \quad \Delta c_2 = \frac{B_{II}}{A_{II}} \Delta c_1. \quad (9)$$

The equation (9) is the equation of the straight line on the phase plane: along this straight line the phase point goes to the fixed point O (Fig. 2).

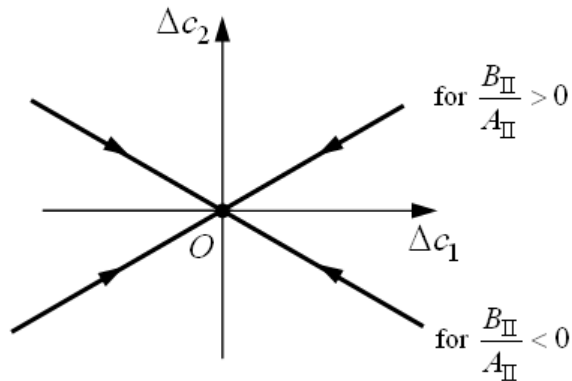


Fig. 2. The fixed point O for $k_1 > 0$, $k_2 < 0$, $A_I = B_I = 0$

2) The discriminant of the characteristic equation (6) has the form

$$D = (\alpha_1 - \beta_2)^2 + 4\alpha_2\beta_1 < 0.$$

Then from the system of differential equations (4) we obtain a differential equation of the second order.

For this equation to be obtained, we differentiate one of two, for example, the first differential equation of the system (4).

We substitute the right-hand side of the second differential equation of the system (4) for $\frac{d(\Delta c_2)}{dt}$ into the differentiated first differential equation and, finding Δc_2 from the first

differential equation of the system (4), we substitute Δc_2 into the differentiated equation.

Thus, we obtain the differential equation of the second order:

$$\frac{d^2(\Delta c_1)}{dt^2} + 2\gamma \frac{d(\Delta c_1)}{dt} + \omega_0^2 \Delta c_1 = 0, \quad (10)$$

where constant values γ and ω_0 are expressed in terms of the coefficients α, β :

$$2\gamma = -(\alpha_1 + \beta_2), \quad \omega_0^2 = \alpha_1\beta_2 - \alpha_2\beta_1.$$

Then we write the characteristic equation (6) in the form

$$k^2 + 2\gamma k + \omega_0^2 = 0,$$

whence

$$k_{1,2} = -\gamma \pm \sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2}.$$

Consider the case with the negative discriminant of this characteristic equation, i.e. $\omega_0^2 > \gamma^2$. In this case, we obtain the complex-conjugate roots of this equation

$$k_{1,2} = -\gamma \pm i\sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2} = -\gamma \pm i\omega,$$

where $\omega^2 = \omega_0^2 - \gamma^2$.

Then we write the general solution of the differential equation (10) in the form

$$\Delta c_1(t) = e^{-\gamma t} (A_1 \cos \omega t + A_2 \sin \omega t). \quad (11)$$

Note that equation (10) is a linear differential equation of motion (or the equation of a damped harmonic oscillator). Its solution is characterized by trigonometric (or harmonic) oscillations, damping for $\gamma > 0$.

From the first differential equation of the system (4) we find Δc_2 :

$$\Delta c_2 = \frac{\frac{d(\Delta c_1)}{dt} - \alpha_1 \Delta c_1}{\alpha_2}. \quad (12)$$

Differentiating the solution (11), we obtain

$$\frac{d(\Delta c_1)}{dt} = e^{-\gamma t} ((\omega A_2 - \gamma A_1) \cos \omega t - (\omega A_1 + \gamma A_2) \sin \omega t). \quad (13)$$

Substituting (13) and (11) into (12), we obtain

$$\Delta c_2 = e^{-\gamma t} \left(\frac{\omega A_2 - (\gamma + \alpha_1) A_1}{\alpha_2} \cos \omega t - \frac{\omega A_1 + (\gamma + \alpha_1) A_2}{\alpha_2} \sin \omega t \right)$$

or

$$\Delta c_2(t) = e^{-\gamma t} (B_1 \cos \omega t + B_2 \sin \omega t), \quad (14)$$

where

$$B_1 = \frac{\omega A_2 - (\gamma + \alpha_1) A_1}{\alpha_2}, \quad B_2 = -\frac{\omega A_1 + (\gamma + \alpha_1) A_2}{\alpha_2}.$$

Thus, the general solution of the system of differential equations (4) consists of general solutions (11) and (14) and has the form

$$\begin{aligned} \Delta c_1(t) &= e^{-\gamma t} (A_1 \cos \omega t + A_2 \sin \omega t), \\ \Delta c_2(t) &= e^{-\gamma t} (B_1 \cos \omega t + B_2 \sin \omega t), \end{aligned} \quad (15)$$

where ω circular frequency $\Delta c_1(t)$ and $\Delta c_2(t)$.

The graph of the function (11) is shown in Fig. 3 for $\gamma > 0$.

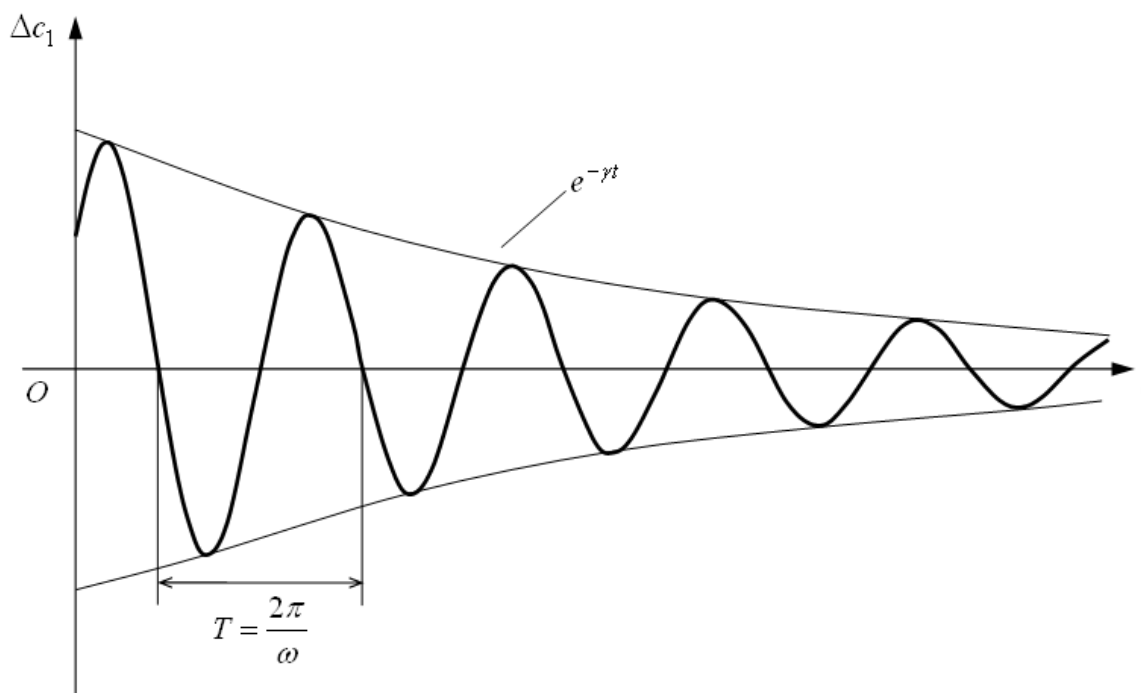


Fig. 3. The graph of the function (11) for $\gamma > 0$

The graph of the function (14) has a similar form.

From the general solution (15) we see that the nature of the stability of the fixed point depends only on the value and sign of γ . Consider the following cases:

2a. $\gamma = 0$. Then $\Delta c_1(t)$, $\Delta c_2(t)$ are harmonic functions of time, i.e. when defining the initial deviations $\Delta c_{1(0)}$, $\Delta c_{2(0)}$ there are undamped oscillations with frequency ω in the system. On the phase plane $O\Delta c_1\Delta c_2$, different graphs (closed elliptical curves that are nested) will correspond to different initial data. In this case, the fixed point (the origin O) is a center, and the phase portrait consists of a continuum of concentric elliptical closed curves. Repeated (periodic) motion occurs in the system.

We write the solution (15) for $\gamma = 0$:

$$\Delta c_1(t) = A_1 \cos \omega t + A_2 \sin \omega t, \quad (16)$$

$$\Delta c_2(t) = B_1 \cos \omega t + B_2 \sin \omega t. \quad (17)$$

Then (16) and (17) can be written in the form

$$\Delta c_1(t) = A_1 \cos \omega t + A_2 \sin \omega t = A \cos(\omega t + \varphi_1), \quad (18)$$

$$\Delta c_2(t) = B_1 \cos \omega t + B_2 \sin \omega t = B \sin(\omega t + \varphi_2), \quad (19)$$

where

$$\varphi_1 = \operatorname{arctg} \left(-\frac{A_2}{A_1} \right), \quad A = \frac{A_1}{\cos \varphi_1}; \quad (20)$$

$$\varphi_2 = \operatorname{arctg} \left(\frac{B_1}{B_2} \right), \quad B = \frac{B_1}{\sin \varphi_2}. \quad (21)$$

Let us show how to obtain the equality (18). From the expressions (20) we have

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = -\frac{A_2}{A_1} \quad \text{or} \quad \frac{\sin \varphi_1}{\cos \varphi_1} = -\frac{A_2}{A_1}, \quad A_1 = A \cos \varphi_1.$$

Then $\frac{\sin \varphi_1}{\cos \varphi_1} = -\frac{A_2}{A \cos \varphi_1}$, whence $A_2 = -A \sin \varphi_1$. Substituting A_1 and A_2 into (18), we obtain

$$\Delta c_1(t) = A(\cos \varphi_1 \cos \omega t - \sin \varphi_1 \sin \omega t) = A \cos(\omega t + \varphi_1).$$

Similarly, we show how to obtain the equality (19). From the expressions (21) we have

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{B_1}{B_2} \quad \text{or} \quad \frac{\sin \varphi_2}{\cos \varphi_2} = \frac{B_1}{B_2}, \quad B_1 = B \sin \varphi_2.$$

Then $\frac{\sin \varphi_2}{\cos \varphi_2} = \frac{B \sin \varphi_2}{B_2}$, whence $B_2 = B \cos \varphi_2$. Substituting B_1 and B_2 into (19), we obtain

$$\Delta c_2(t) = B(\sin \varphi_2 \cos \omega t + \cos \varphi_2 \sin \omega t) = B \sin(\omega t + \varphi_2).$$

Consider the case when $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$. Then (18) and (19) can be written in the form

$$\Delta c_1(t) = A \cos(\omega t + \varphi), \quad (22)$$

$$\Delta c_2(t) = B \sin(\omega t + \varphi). \quad (23)$$

In this case, the phase trajectories are a family of concentric ellipses with the center at the fixed point O (the phase portrait of the system has the form of the continuum of concentric ellipses – Fig. 4):

$$\frac{(\Delta c_1(t))^2}{A^2} + \frac{(\Delta c_2(t))^2}{B^2} = 1.$$

There is periodic motion in the system. Each point (except for the point O) is passed in time $T = \frac{2\pi}{\omega}$ again. The coordinates are periodic on t with the period T and are determined by the formulas (22) and (23). The center (the fixed point O) is a stable equilibrium position of the system (2).

Note that, for example, when $A > 0, B > 0, \varphi = 0$ with increasing t from $t = 0$ to $t = \frac{\pi}{\omega}$ $\Delta c_1(t) = A \cos(\omega t + \varphi)$ decreases, and $\Delta c_2(t) = B \sin(\omega t + \varphi)$ increases. This makes it possible to determine the direction of all trajectories (see quadrant *I* of Fig. 4).

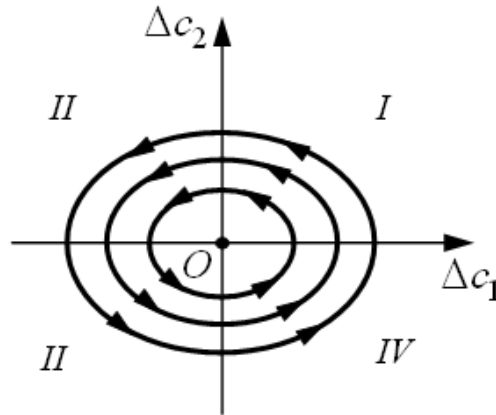


Fig. 4. The phase portrait of the system for $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$.

2b. $\gamma < 0$. Then the presence of the factor $e^{-\gamma t}$ in the solution (15), which $e^{-\gamma t} \rightarrow \infty$ as $t \rightarrow \infty$, leads to the family of spirals that unwind from around the point O , not intersecting, on the phase plane $O\Delta c_1\Delta c_2$. In this case, the fixed point (the point O) is an unstable focus, and the phase portrait consists of repelling spirals.

2c. $\gamma > 0$. Then the presence of the factor $e^{-\gamma t}$ in the solution (15), which $e^{-\gamma t} \rightarrow 0$ as $t \rightarrow \infty$, leads to the representation of deviations $\Delta c_1(t) \rightarrow 0, \Delta c_2(t) \rightarrow 0$ in the form of damped oscillations. That is, the system performs damping, free (no external influence) oscillations. On the phase plane $O\Delta c_1\Delta c_2$, the graphs are the family of twisting spirals tending to point O . In this case, the fixed point O is a stable focus, and the phase portrait consists of attracting spirals.

The circular frequency ω of rotation of a point in a spiral is inversely proportional to the period of one rotation of a point in a spiral: $\omega = \frac{2\pi}{T}$, and the value γ shows how quickly the spiral unwinds or twists.

Thus, from points 2b, 2c, taking into account point 2a, it follows that the transition γ through zero for the solution (15) causes bifurcation of the entire phase portrait, i.e. its qualitative change.

Therefore, due to the method of small perturbations it is possible to define the nature of the stability of fixed points, i.e. to investigate the behavior of the system near fixed points.

It is also very important to know how systems behave far away from fixed points.

If time $t \rightarrow \infty$, then in the case of unstable nodes or foci, the phase point over time t moves away from a fixed point far enough, where it is no longer possible to use linearized systems of equations, which we obtain assuming small deviations Δc_1 and Δc_2 . Therefore, the study of the behavior of the system far from the fixed point is carried out by geometric construction of integral curves.

In practice, no real value, including the concentration of a chemical substance, can grow indefinitely. At some point in the system itself there will be conditions that limit the growth of these values. However, systems of differential equations of type (1) can have stable fixed points at infinity. This happens when some important limitation is not taken into account.

Note that trajectories can proceed from an unstable fixed point when the initial conditions correspond to the equilibrium position (the point O)

Obviously, the trajectories that emerge from an unstable fixed point must go somewhere:

- a) There is a stable position of equilibrium, to which all trajectories tend, near the unstable one;
- b) There is no stable point nearby, but the trajectories do not go to infinity.

In this case, there is at least one closed phase curve, to which the phase trajectories should go in the limit. This curve is the limit cycle.

A limit cycle is the only closed orbit that is in a ring neighborhood (in a three-dimensional one, in a tubular neighborhood), that is, if there is a ring neighborhood that does not contain other closed trajectories except for the limit cycle. Thus, the limit cycle is isolated from all other closed trajectories. The sufficient condition for the existence of the limit cycle of the system (2) is the principle of the ring: if a ring

$$R_1^2 \leq (c_1 - \bar{c}_1)^2 + (c_2 - \bar{c}_2)^2 \leq R_2^2,$$

can be found on the phase plane $O'c_1c_2$ such that all system trajectories that begin at the boundary of this ring enter inside the ring or all of them exit it simultaneously, then there is a limit cycle inside the ring.

If the trajectories are wound on the limit cycle on two sides as $t \rightarrow \infty$, then the limit cycle is stable (attractive) or attractor.

If the trajectories are spirals that move away from the limit cycle on two sides as $t \rightarrow \infty$, then the limit cycle is unstable (repulsive) or repellent.

If the trajectories on one side are wound on the limit cycle as $t \rightarrow \infty$ and move away from it on the other side as $t \rightarrow \infty$, then the limit cycle is semi-stable.

Thus, the phase portrait, which, for example, contains a stable limit cycle is characterized by the presence of an annular neighborhood such that all trajectories that cross the boundary of this neighborhood, go to the limit cycle as $t \rightarrow \infty$.

The system may not have limit cycles.

Limit cycles do not always look like a circle.

Limit cycles can often be detected by passing to polar coordinates.

There may be more than one limit cycle. It depends on the complexity of the nonlinear functions $f_1(c_1, c_2)$, $f_2(c_1, c_2)$.

Since the limit trajectory is closed, it must be a periodic motion. We can consider three-dimensional space $O\Delta c_1\Delta c_2t$, in which the projection of motion on the phase plane $O\Delta c_1\Delta c_2$ is a phase trajectory, and projections on the planes $O\Delta c_1t$ and $O\Delta c_2t$ are the sweeps of the process in time.

Then the limit with a phase trajectory winding on it is constructed. The motion of the phase point in the cycle corresponds to the oscillations $\Delta c_1(t)$ and $\Delta c_2(t)$ with constant amplitudes, which are set approximately in the second period after the start of motion.

The stability of the amplitude of oscillations ensures the stability of the limit cycle, which is the self-oscillating mode, i.e. oscillations occur without periodic external influences and can be maintained for as long as possible, but with an energy source such as sunlight for photosynthesis. However, in this example, the behavior of the system near the fixed point of the center type differs significantly from self-oscillations. In the example given, the projection of the motion of the phase point on the phase plane $O\Delta c_1\Delta c_2$ although passing along closed curves, however, the amplitude of oscillations depends significantly on the initial conditions $\Delta c_{1(0)}$, $\Delta c_{2(0)}$ and is unstable to small perturbations. That is, after any small perturbation, the phase point begins to move along a new curve closed in the projection on the phase plane $O\Delta c_1\Delta c_2$.

Construction of the phase portrait of the system of differential equations (2) can be quite a difficult problem since in the general case the differential equation [2]

$$\frac{dc_2}{dc_1} = \frac{f_2(c_1, c_2)}{f_1(c_1, c_2)}, \tag{24}$$

obtained from the system of differential equations (2) may not have an analytical solution. Then the construction of integral curves should be done by qualitative research. For this we can use the method of isoclines. Isocline lines on the phase plane intersect with all integral curves at the same angle with the x-

axis, i.e. putting $\frac{dc_2}{dc_1} = k = \text{const}$ in the equation (24), we obtain

$$f_2(c_1, c_2) = kf_1(c_1, c_2) \quad \text{or} \quad f_1(c_1, c_2) = \frac{f_2(c_1, c_2)}{k} \quad (25)$$

is an equation of the isocline family.

We obtain the main isoclines (isoclines of horizontal and vertical tangent lines) for $k = \frac{dc_2}{dc_1} = 0$ and $k = \frac{dc_2}{dc_1} \rightarrow \infty$. Then, respectively, the equations of these isoclines according to the formulas (25) have the form:

$$f_2(c_1, c_2) = 0, \quad (26)$$

$$f_1(c_1, c_2) = 0, \quad (27)$$

where (26) is the isocline equation at the points of which the integral curves have horizontal tangent lines; (27) is the isocline equation at the points of which the integral curves have vertical tangent lines.

If we draw the straight line, through each point $(c_1; c_2) \in D$, that the tangent of the angle of inclination to the axis $O'c_1$ is equal to the right-hand part of the differential equation (24), then we obtain the family of straight lines that is the field of directions of the differential equation (24). The direction of the field at each point $(c_1; c_2) \in D$ is represented by a small segment of the straight line corresponding to this point. The center of each segment is selected at the point $(c_1; c_2)$. At each point of the isocline, the direction of the field is the same.

There are fixed points of the system of differential equations (2) at the intersection of the curves (26) and (27). We construct curves of isoclines (26) and (27) on the phase plane $O'c_1c_2$. In Fig. 5, the direction of the field at the points lying on the isoclines $f_1(c_1, c_2) = 0$ and $f_2(c_1, c_2) = 0$ is depicted by vertical and horizontal small segments, respectively (by linear elements of straight lines). At the points of the isocline (26), tangent lines to the integral curves are parallel to the axes of the abscissa, and at the points of the isocline (27), tangent lines to the integral curves are parallel to the axes of the ordinates. Using isoclines, we approximately construct curves that at each of their points touch the direction of the field at this point (in this case, there are only points of two isoclines $f_1(c_1, c_2) = 0$ and $f_2(c_1, c_2) = 0$). These curves are the integral curves $c_2 = c_2(c_1, C)$ of the differential equation (24) and the phase trajectories of the system of differential equations (2). Having constructed several isoclines (in this case, two isoclines (26) and (27)), and the field of directions on these isoclines, we approximately depict the integral curves of the differential equation (24), which coincide with the phase trajectories of the system of differential equations (2). For example, in Fig. 5, we see that under some conditions, depending on the type of functions $f_1(c_1, c_2)$, $f_2(c_1, c_2)$ and their arguments $c_1(t)$, $c_2(t)$, the phase trajectories of the system of differential equations (2) go from the neighborhood of the fixed point $(\bar{c}_1; \bar{c}_2)$ (equilibrium position) in spirals, i.e. the phase curves are spirals that spin from the neighborhood of the fixed point.

Note that the direction of motion can be determined, for example, as follows. Consider in Fig.5 part of the phase plane $O'c_1c_2$, where indicated $k = \frac{dc_2}{dc_1} > 0$. Obviously, if in the specified part of the

phase plane $O'c_1c_2$ $\frac{dc_2}{dt} > 0$ and $\frac{dc_1}{dt} > 0$ (then $k > 0$, since $\frac{dc_2}{dc_1} = \frac{\frac{dc_2}{dt}}{\frac{dc_1}{dt}} > 0$), then we put the arrow

in the direction around the fixed point (Fig. 5). If the conditions $\frac{dc_2}{dt} < 0$ and $\frac{dc_1}{dt} < 0$ were satisfied, then the condition $k > 0$ would also be satisfied, but the arrow would be placed in the direction of the fixed point. In this case, the phase trajectories of the system of differential equations (2) would go to (into

the neighborhood of) the fixed point $(\bar{c}_1; \bar{c}_2)$ (the equilibrium position) on the spirals, i.e. spirals, that are wound on the fixed point $(\bar{c}_1; \bar{c}_2)$, would be the phase curves.

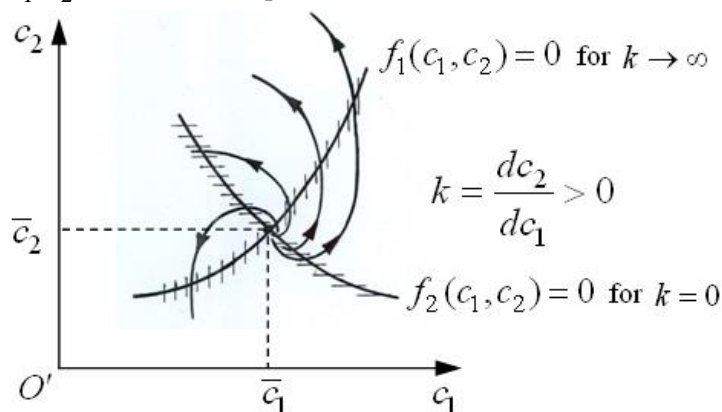


Fig. 5. The phase trajectories of the system (2)

Conclusions. Mathematical study of the stability of fixed points of systems of differential equations describing biochemical processes rates is performed in the article. The definition of the nature of the stability of fixed points is considered and investigated.

Bibliography

1. Hubal H.M. Mathematical Modeling of Biochemical Processes Rates in Biological Systems / H.M. Hubal // Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production. – 2021. – No. 42. – P. 43-49.
2. Hubal H.M. Mathematical Analysis of Qualitative Characteristics of Solutions of Systems of Differential Equations Describing Biochemical Processes Rates / H.M. Hubal // Міжвузівський збірник наукових праць "Наукові нотатки" за галузями знань "Фізико-математичні науки" та "Технічні науки" (за науковою спеціальністю 113 Прикладна математика). – 2021. – № 71. – С. 105–112.
3. Perko L. Differential Equations and Dynamical Systems / L. Perko. – 3rd ed. – Springer-Verlag, 2001. – 556 p.
4. Zill D.G. A First Course in Differential Equations with Modeling Applications / D. G. Zill. – 11th ed. – Cengage Learning, 2017. – 489 p.
5. Christopher C. Limit Cycles of Differential Equations / C. Christopher, Chengzhi Li, J. Torregrosa. – 2nd ed. – Birkhäuser Basel, 2021. – 171 p.
6. Cronin J. Ordinary Differential Equations: Introduction and Qualitative Theory / J. Cronin. – 3rd ed. – CRC Press, 2019. – 408 p.

УДК 332:528.4/

DOI 10.36910/775.24153966.2022.73.5

Дахмані Мохамед

кафедра міського господарства за спеціальністю 192, факультет урбаністики та просторового планування, кабінет архітектури та містобудування, аспірант
Алжир Кооператив нерухомості вулиця п: 14, місто Релізане
dahmani.archi.dz@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-3906-803X>

ВУЛИЧНО-ШЛЯХОВІ МЕРЕЖІ МІСТ ТА ЇХ ЕЛЕМЕНТИ: ОСОБЛИВОСТІ ОРГАНІЗАЦІЇ

Постійне зростання інтенсивності дорожнього руху, значна кількість дорожньо-транспортних пригод (ДТП), збільшення заторів на основних маршрутах міст призводять до необхідності підвищення ефективності організації руху (ОР), оптимізації міських ВШМ і удосконалення їх транспортного обслуговування, а також забезпечення дорожньої безпеки при функціонуванні автомобільного транспорту. Зосередження уздовж основних міських магістралей торгових і офісних об'єктів обумовлює зменшення пропускної здатності магістралей, пов'язаних із перешкодженням руху у вигляді зупинок міського пасажирського транспорту, множинних пішоходних переходів та вуличних парковок.

Ключові слова: вулично-шляхові мережі, організація транспортно-дорожній комплекс міста, організація руху, транспортне обслуговування, оптимізація.

Дахмані Мохамед

УЛИЧНО-ДОРОЖНЫЕ СЕТИ ГОРОДОВ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ: ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ

Постоянный рост интенсивности дорожного движения, значительное количество дорожно-транспортных происшествий (ДТП), увеличение пробок на основных маршрутах городов приводят к необходимости повышения эффективности организации движения (ОР), оптимизации городских ВШМ и усовершенствованию их транспортного обслуживания, а также обеспечению дорожной безопасности при функционировании автомобильного транспорта. Сосредоточение вдоль основных городских магістралей торговых и офисных объектов обуславливает уменьшение пропускной способности магістралей, связанных с препятствием в виде остановок городского пассажирского транспорта, множественных пешеходных переходов и уличных парковок.

Ключевые слова: улично-путевые сети, организация транспортно-дорожного комплекса города, организация движения, транспортное обслуживание, оптимизация.

Dahmani Mohamed

STREET AND ROAD NETWORKS OF CITIES AND THEIR ELEMENTS: FEATURES OF THE ORGANIZATION

The constant increase in traffic intensity, a significant number of road accidents (accidents), increasing congestion on major city routes lead to the need to increase the efficiency of traffic organization (OR), optimize urban GSOM and improve their transport services, as well as road safety. transport. Concentration along the main city highways of trade and office facilities entails a significant reduction in the capacity of highways due to traffic obstacles in the form of urban passenger transport stops, multiple pedestrian crossings and street parking. Numerous structures that ensure the functioning of the city's transport and road complex require real data on the actual state of loading of urban highways in the planning, reconstruction and management of traffic. Effective operation of the city's GSOM is possible under the condition of: constant control of the use of the actual value of capacity on specific elements of city highways; assessment of the degree of loading of individual elements of the GSOM (areas that are in critical condition due to loading or accident); development and operational implementation of measures to compensate for traffic obstacles.

Key words: street and road networks, organization of transport and road complex of the city, organization of traffic, transport service, optimization.

Постановка проблеми. Трансформація та динаміка економічних відносин, інтенсифікація інтеграційних процесів національних економік, суттєва зміна ціннісних орієнтирів і пріоритетів у суспільстві, а також розширення джерел і рівня отримання доходу фізичними та юридичними особами значною мірою вплинули на зростання автомобілізації населення та суб'єктів господарювання в Україні. На сьогоднішній день рівень автомобілізації населення та рівень розвитку національного ринку продажів автомобілів є важливим показниками економічного та соціального розвитку держави.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Методи і підходи щодо підвищення ефективності ОР, оптимізації міських ВШМ і удосконалення їх транспортного обслуговування розроблено, як вітчизняними, так і закордонними вченими: В. А. Андріановим, Я. В. Беззубом, Т. А. Гаврилюком, К. В. Гончаровим, І. А. Євстигнєєвим, І. В. Жуковицьким, О. Ю. Криволаповою, В. М. Маркеловим, І. Н. Розенбергом, О. В. Рудзінською, А. М. Семеновим, В. В. Скалозубом, В. П. Соловйовим, І. В. Соловйовим, В. Ф. Хорошевським, В. Я. Цветковим, В. П. Шумляківським, J. S. Albus, P. J. Antsaklis, Nazmul H Siddique та іншими.

Формулювання цілей статті. Мета статті – проаналізувати особливості організації вулично-шляхових мереж міст та їх елементів.

Виклад основного матеріалу. Центральна зона будь-якого міста й особливо крупного є особливим містобудівним утворенням. Це обумовлено тим, що на незначній площі зосереджуються визначні за значенням та розміром адміністративні, культурні споруди, які є центром збору населення міста [1-3].

Особливості тяжіння до центру міста включають такі пункти: переважання культурних цілей пересування над трудовими; привабливість об'єктів культурного та адміністративного значення; більше значення пішохідного руху.

Економіко-математичний інструментарій на даному етапі не дозволяє прорахувати обсяги та кількісне вимірювання тяжіння до центральної зони. Основними факторами, що впливають на даний показник, є наступні: площа відповідної територіальної одиниці; якість транспортної системи; наявність та рівень забезпеченості паркувальними місцями; щільність розміщення торгівельних, культурних об'єктів.

Особливі умови формування потоків транспорту та пішоходів у зоні загальноміського центру диктують і специфічні вимоги, щодо ВШМ і процесів управління рухом. З метою реалізації зазначених вимог доцільно реалізувати такі заходи містобудівного, інженерного та організаційного характеру: створення головної вулиці міста в центральній зоні; зростання обсягів транспортного обслуговування (сполучення із нецентральними районами); послідовний розподіл і відокремлення пішохідних і транспортних потоків; відведення транзитних транспортних потоків від центральної зони; збільшення доступності об'єктів тяжіння.

Одним із застережень та вихідних положень моделювання є те, що у зв'язку із культурною спрямованістю центра міста, передбачається підвищення кількості та інтенсивності руху легкового транспорту. Це обумовлює необхідність збільшення кількості паркувальних місць. У зв'язку із зазначеним виникає потреба у зосередженні уваги на розвитку центральних транспортних територій.

Разом із тим, вітчизняна практика відповідає кращій світовій практиці автомобілізації, зокрема таких міст як Копенгаген, Париж, Лондон, Гамбург тощо. Хоча, для згаданих міст характерним є також наявність досить високої щільності автомобільних засобів в центральних районах.

Проекти реконструкції великих міст наразі також не повністю враховують потребу у збільшенні площ для руху автомобільного транспорту [4] (таблиця 1).

Табл. 1.

Співвідношення транспортних територій та площі загальноміських центрів

Європа			США		
Назва міста	Транспортні території, % від площі загальноміського центра	Назва міста	Транспортні території, % від площі загальноміського центра	Назва міста	Транспортні території, % від площі загальноміського центра
Київ	25	Берлін	40	Нью-Йорк	62
Дніпро	17	Мадрид	34	Лос-Анджелес	57
Харків	20	Рим	33	Детройт	49
Львів	14	Париж	31	Нешвілл	38

Джерело: складено автором.

Встановлена залежність участі автомобільного транспорту в пасажиро-перевезеннях від “фактору вибору транспорту”, який залежить від рівня поширеності автомобільного транспорту та щільності населення міста:

Встановлена залежність участі автомобільного транспорту в пасажиро-перевезеннях від “фактору вибору транспорту”, який залежить від рівня поширеності автомобільного транспорту та щільності населення міста:

$$F = n_c \gamma_{нас} / 10^3, \quad (1)$$

де F – фактор вибору транспорту; n_c – кількість родин, що приходяться на один автомобіль; $\gamma_{нас}$ – щільність населення міста.

Виявлена закономірність, характерна для міст США, показує, що частка пасажиро-перевезень засобами легкового транспорту в центрі є нижчою за частку пасажиро-перевезень за іншими районами міста. Таким чином, можна стверджувати, що зниження рівня автомобілізації міста та зростання щільності населення призводить до скорочення частки пасажиро-перевезень легковим автотранспортом.

Науково-обґрунтоване визначення необхідної ємкості ВШМ та паркувальних місць може базуватись на основі вимірювання показника тяжіння легкового автотранспорту до центральної зони; тривалості поїздки; розподілі автомобільних потоків та інших чинників.

На даному етапі 60% населення проживає у 450 містах [5]. На рисунку 1 наведено структурний розподіл населення, що проживає у містах.



Рис. 1. Структурний розподіл кількості населення у містах, %.

Специфіка великих міст пов'язана з територіальним зростанням та підвищенням рівня автомобілізації і відповідним збільшенням середньої дальності поїздки та пробігу автомобілів [6]. Наприклад, за останні 20 років в середньому дальність перевезення вантажів автотранспортом в Києві зросла майже на 40 % (що складає орієнтовно 22 км), а для пасажирів – в 1,25 рази (відповідно біля 13 км) за умови підвищення рівня автомобілізації в два рази (на початку двохтисячних років рівень автомобілізації в столиці України складав 140 авто на тисячу жителів).

Розподіл загального пробігу автотранспорту по ВШМ міста є нерівномірним: 55-70% складають магістралі загальноміського значення (їх протяжність – 20-25 % загальної довжини вуличної мережі); 30-20 % складають магістральні вулиці районного значення (їх протяжність – 35-30%), 10-15% складають житлові вулиці та дороги місцевого значення займають (їх протяжність – 40-50 %).

Отже, на магістральні ВШМ українських міст припадає біля 90% навантаження від автомобільного потоку [7].

Інтенсивність руху на автомобільних магістралях країн Західної Європи та США досягає понад 100 тисяч автомобілів на добу. У місті Києві – 70-80 тис. автомобілів на добу, на мостах – 95 тис. автомобілів на добу.

Враховуючи вищенаведене можна зробити висновок, що підвищення ефективності та рівня безпеки міського транспорту залежить від організації дорожнього руху, інженерних конструкцій та якості обладнання міських доріг.

Вирішення цих питань в дуже великій мірі ускладнюється особливостями роботи міського транспорту. До таких особливостей відносяться: інтенсивність руху; значна кількість перехресть та транспортних розв'язок; інтенсивність пішохідного руху та інші.

Рівень розвиненості дорожньої мережі визначається за формулою 2 та характеризує ступінь розвитку ВШМ як в цілому по місту, так і по окремих районах:

$$\delta = \Sigma L / S \quad (2)$$

Як правило, цей показник характеризує щільність магістральної ВШМ, при цьому ΣL відображає протяжність тільки магістральних вулиць та доріг.

Однак, оцінювати оптимальність за даним показником не вважається достатнім, оскільки суперечить вимогам мінімізації втрату часу на пересування та сенсу економічної ефективності міського транспорту.

Оптимальна величина даного показника становить 2,2-2,4 км/км². Для центральних районів міста – 3,5-4,0 км/км², периферійних – 1,5 км/км². При цьому відмітимо, що значення повинно бути не меншим за щільність, характерну для подорожі пасажирів у 400-500 м.

З метою проведення оцінки пропускної спроможності ВШМ необхідно проводити оцінку питомої щільності мережі, при цьому доцільно враховувати показники ширини проїзної частини вулиць і доріг (м²/км²).

Наступним підлягає оцінці показник, що характеризує кількість перетинів на ВШМ міста, дослідженню якого приділено недостатньо уваги. Розвиток ВШМ обумовлює зростання кількості перехресть. В середньому для крупних міст характерним в Україні є наявність 1 перехрестя на 10 км магістралей. При цьому для Києва характерною є наявність 70 таких перетинів [8].

Графічне представлення ВШМ міст суттєво відображає основні характеристики міського руху, кількість та форму перетинів, схемну організацію руху транспортних та пішохідних потоків, а, зрештою, середню швидкість руху і величини затримок. На рисунках 2-7 наведено найбільш типові системи планування міст: прямокутні, радіальні, радіально-кільцеві, лінійні, променеві (чи віяльні), шестикутні, вільні (або комбіновані).

Паралельне розташування магістралей характерно для прямокутної системи (рис. 1) (Нью-Йорк, Пекін, Мандалай, Кишинів). Основними перевагами цієї системи є: практично рівномірний розподіл руху транспорту по ВШМ міста, завдяки відсутності явно вираженого центрального ядра. Як недоліки слід вважати перезавантаженість великої кількості перетинів, що ускладнює процеси організації руху, призводить до збільшення транспортних втрат та великих переїздівок автотранспорту за напрямками, що не співпадають із напрямками вулиць.

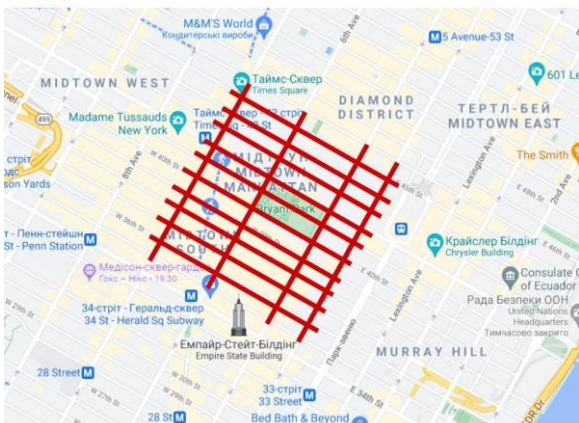


Рис. 2. Прямокутна система планування ВШМ на прикладі м. Нью-Йорк

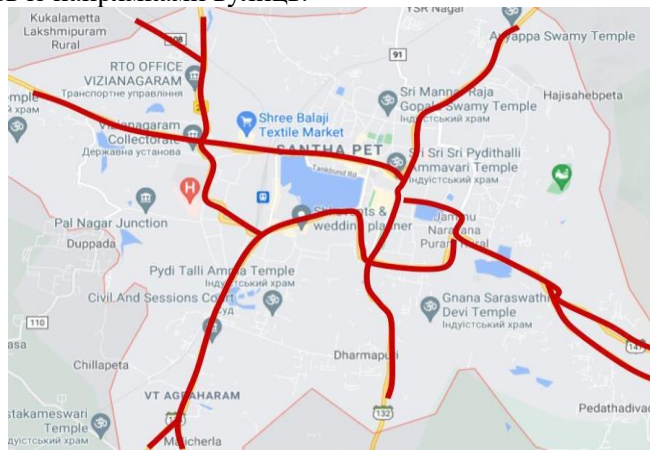


Рис. 3. Радіальна система планування ВШМ на прикладі м. Визіанагарам (Індія)



Рис. 4. Радіальна-кільцева система планування ВШМ на прикладі м. Харків

Система планування ВШМ радіальної форми (рис. 3) властива, зазвичай, старим не великим містам – центрам торгівлі (Визианагарам, Кам'янець-Подільський, Калькутта).

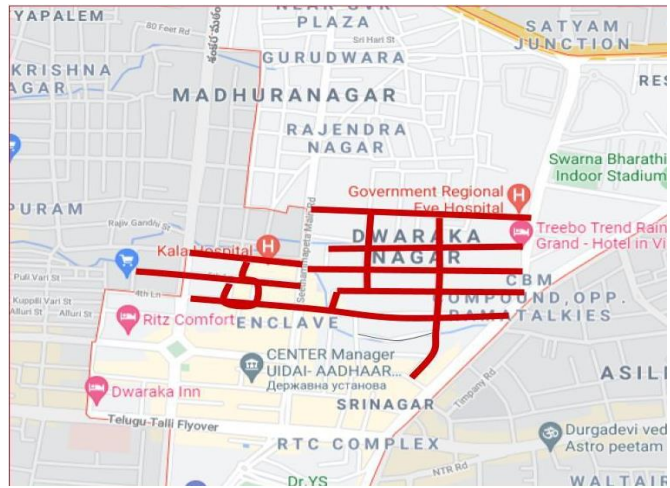


Рис. 5. Лінійна система планування ВШМ на прикладі м. Дварака Нагар (Індія)

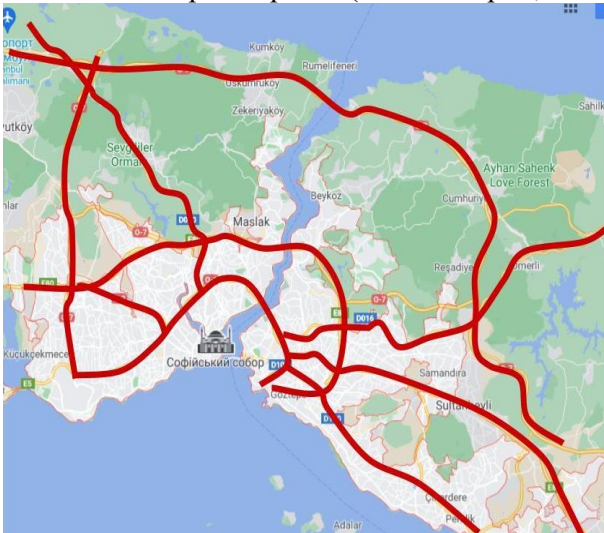


Рис. 6. Променева система планування ВШМ на прикладі м. Стамбул

Радіальна система планування ВШМ міста отримала розвиток у вигляді радіально-кільцевої системи (Харків, Делі, Рим) (рис. 4). Для цієї системи характерно більше завантаження магістралей у порівнянні з кільцевими.

Частковим випадком прямокутної системи планування ВШМ міст є лінійна система (Дварака Нагар, Анталія) (рис. 5).

Променева система планування ВШМ міст за своїми властивостями близька до радіально-кільцевої системи (Стамбул, Ялта) (рис. 6). Сфера застосування цієї системи – це узбережжя, приморські курортні райони, вона забезпечує взаємозв'язок периферійних районів з центром міста.

Вільна система планування ВШМ міст (Стамбул, Катманду, Дніпро, Бомбей) (рис. 7) є найчастішою серед інших видів та її притаманні переваги одних схем чим усуває недоліки інших.

Навіть наочно видно, що різні планувальні системи ВШМ міст характеризуються різним рівнем щільності. Відмітимо, що для планувальної структури міст характеристиками слугують коефіцієнти конфігурації та розміщення центру [2].

За результатами аналітичного дослідження типів транспортних вузлів у 26 обласних центрах України була складена їх типологія [8].

При цьому для центральних зон потреби в розширенні транспортних територій зростають більше.

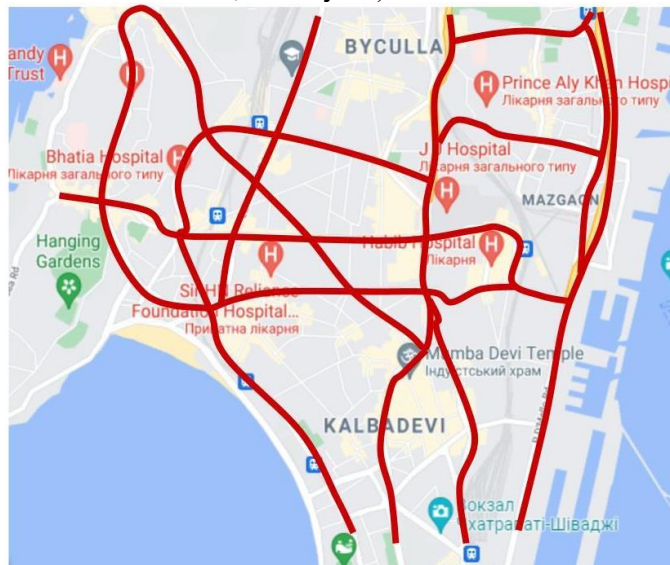


Рис. 7. Вільна система планування ВШМ на прикладі м. Стамбул

Перелік показників для оцінки магістральної\ мережі загальноміського центру наведено в таблиці 2 [3].

Табл. 2.

Показники ефективності для оцінювання магістральних мереж центру міста

№ з/п	Показники ефективності	Основні характеристики	Додаткові характеристики	Діапазон змінювання показників ефективності
1	Щільність магістральних вулиць загальноміського значення, км/км ²	Довжина магістральних вулиць загальноміського значення на 1 км ²	Транспортний зв'язок загальноміської центральної зони з іншими районами міста	1,5-2
2	Сумарна щільність магістральних вулиць, км/км ²	Довжина магістральних вулиць на 1 км ²	Площа міжмагістральних територій, доступність зупинок масового транспорту	3-4,5
3	Відносний показник пропускної спроможності магістральних вулиць, (од/год)/га	Щільність руху (максимальна потенційна)	Щільність магістральної мережі всередині зони, ємкість автостоянок	15-30
4	Вхідна пропускна спроможність магістральних вулиць, тис.од/год	Сумарна пропускна спроможність магістральних вулиць на вході в центральну зону	Транспортне навантаження системи магістральних вулиць центральної зони	8-20
5	Відстань від обхідної магістралі безперервного руху до головної вулиці, км	Розподіл транспортних потоків по території	Завантаження транзитними потоками центральної зони	0,8-1,5

Зростання щільності магістральної мережі в центральних зонах великих міст є обґрунтованим, проте не завжди відповідає інтенсивності руху в місті.

Для визначення максимальної пропускної спроможності пропускних входів до магістралей доцільно використовувати відповідність інтенсивності центробіжних транспортних потоків, який можна розрахувати за формулою 2 [6]:

$$\gamma_{\text{ц}} = \Sigma N_{\text{М}} / A_{\text{ц}}, \quad (2)$$

де $\gamma_{\text{ц}}$ – відносний показник пропускної спроможності магістральних входів в центральну зону (авт/год)/га; $N_{\text{М}}$ – пропускна спроможність магістральної вулиці на вході в центральну частину міст (од/год); $A_{\text{ц}}$ – площа центральної зони (га). На рисунках 8 та 9 наведено кількісні значення площі міст України.

Висновки. Цілком закономірно зробити висновок про те, що якість площ легкового автотранспорту залежить від планувальної структури ВШМ. При цьому доцільно також розраховувати величину усталеного режиму руху, як критерію оцінювання якості організації дорожнього руху. Сучасні методи управління транспортними потоками в містах засновані на мікро- й макромодельованні. При цьому в мікроструктурі модель імітує транспортний потік як сукупність окремих транспортних засобів з використанням відомих методів теорії ймовірності, що може стати напрямом подальшого дослідження.

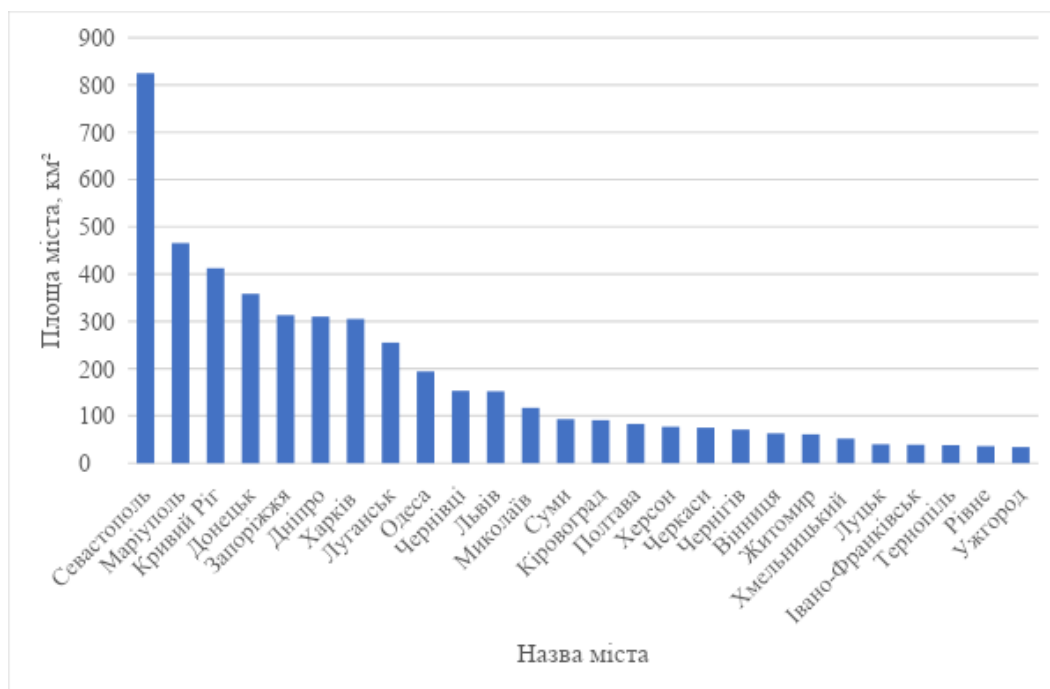


Рис. 8. Кількісний розподіл площі міст в Україні

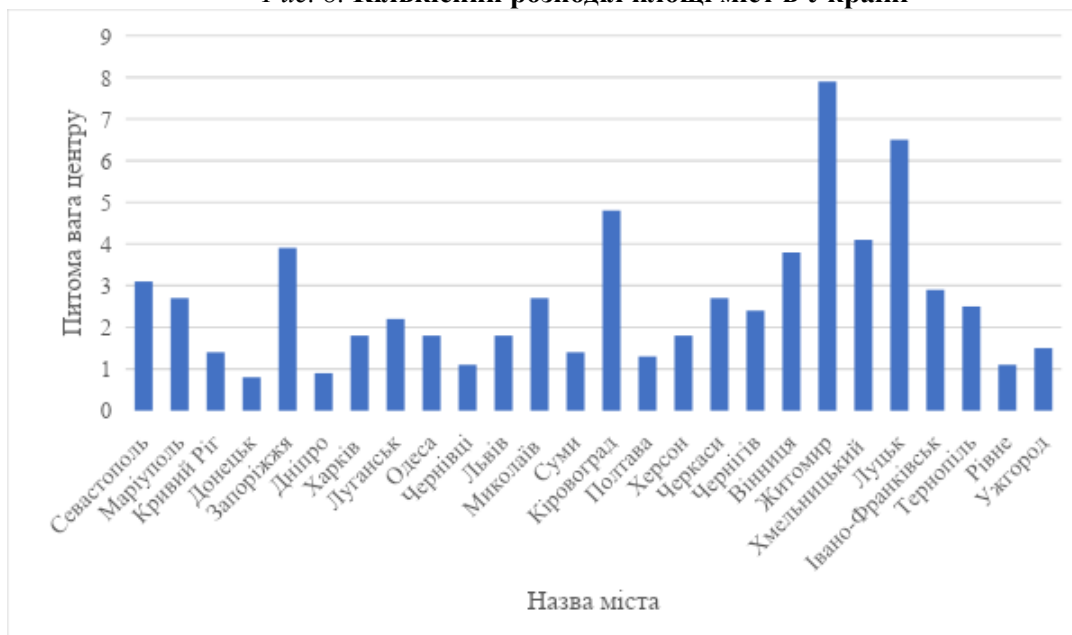


Рис. 9. Кількісний розподіл питомої ваги центру міст України

Бібліографічний список

- 1) Генеральний план міста Києва на період до 2020 року.- К. :Київпроект,2002.
- 2) Гутнов А.Э. Эволюция градостроительства. – М.: Стройиздат, 1984.– 256 с
- 3) Дахно В.П. Объединенные пассажирские станции и вокзалы.К: Будів., 1965
- 4) Лобанов Е.М. Транспортная пласировка городов: М.: Транспорт, 1990. – 240 с.
- 5) Містобудування. Довідник проектувальника/ За ред. Т.Ф. Панченко.– К:Укрархбудінформ, 2001. – 192 с.
- 6) Посацький Б.С. Основи урбаністики. Ч.П.: Навчальний посібник. – Львів: Вид-во НУ “Львівська політехніка”, 2001. – 244 с.
- 7) Сигаев А.В. Проектирование улично-дорожной сети. – М.: Стройиздат, 1978. – 118 с.
- 8) Щурова В.А. Архітектурно-планувальна організація міської забудови у зоні впливу транспортно-пересадочних вузлів: Дис. Канд.. арх.: 18.00.04- К., 2005. – 178с.

УДК 504:725.85

DOI 10.36910/775.24153966.2022.73.6

С.В. Зозуля

Денне відділення будівельного факультету, Промислове та цивільне будівництво
Київський державний технічний університет будівництва і архітектури .

Інженер –будівельник, ПП «Сервіс Підряд» технічний директор

ORCID : 0000-0003-3812-3818

МЕХАНІЗМИ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЗАМКНЕНОГО ЦИКЛУ ВИКОРИСТАННЯ ВОДИ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЛЬОДОВОГО КАТКА

У статті розкрито механізми впровадження технології замкненого циклу використання води в умовах експлуатації льодового катка. Обґрунтовано економічну складову з точки зору ресурсозбереження, використання технології замкненого циклу використання води. Наголошено, що замкнений цикл використання води в умовах експлуатації льодового катка – це система промислового водопостачання та водовідведення, в якій багаторазове використання води під час формування та обслуговування льодового покриття здійснюється без скидання стічних та інших вод у природні водойми / каналізацію, тощо. Зазначається, що утворення льодового покриття здійснюється шляхом заливання води, яка пройшла багаторівневе очищення від домішок та розчинених газів під час реалізації головних стадій очищення: попереднього очищення води – для видалення грубих домішок, а також частини сполук хлору, розчиненого заліза та органіки; отримання очищеної води – відбувається практично повне очищення води від усіх солей та інших сполук та здійснюється її пом'якшення; глибоке очищення води – дозволяє видалити розчинені гази і домішки, що залишилися. Наведено схему повторного використання води при виробництві льоду для льодового спортивного майданчика, технологічний процес має наступні основні етапи: вода з центрального водопроводу надходить на установку очищення та пом'якшення; через патронний фільтр, проходячи через теплообмінник вода переміщається у бак гарячої води; використовуючи насос вода подається на арену для заливання льодового покриття; талая вода отримана з льодової стружки надходить у ємність змішування звідки насосом перекачується на початок циклу водо підготовки. Підкреслено, що реалізація даної технології призведе до підвищення ефективності виробництва та зниження економічного навантаження. Розроблено схему установки очищення води повторного використання. Наголошено, що талая вода отримана з льодової стружки має низьку концентрацію домішок, тому може бути використана повторно за потребою. Прийнято, що ємність для змішування на початку використання містить воду з водопроводу, яка насичена різними компонентами. Оскільки концентрація компонентів постійно змінюється (в залежності від ступеню очищення води, пори року, особливостей місцевого водопостачання, тощо), для визначення граничного рівня концентрації домішок у роботі запропоновано математичну складову, яка дозволить вирахувати необхідну ступінь очищення води повторного використання для більш якісного кінцевого продукту.

Ключові слова: замкнений цикл, водопостачання, льодова арена, спортивний майданчик, технологія, механізм, експлуатація.

С.В. Зозуля

МЕХАНИЗМЫ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДЫ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛЕДОВОГО КАТКА

В статье раскрыты механизмы внедрения технологии замкнутого цикла использования воды в условиях эксплуатации ледового катка. Обоснована экономическая составляющая с точки зрения ресурсосбережения, использование технологии замкнутого цикла использования воды. Отмечено, что замкнутый цикл использования воды в условиях эксплуатации ледового катка – это система промышленного водоснабжения и водоотвода, в которой многократное использование воды при формировании и обслуживании ледового покрытия осуществляется без сброса сточных и других вод в природные водоемы/канализацию и т.д. Отмечается, что образование ледового покрытия осуществляется путем заливки воды, которая прошла многоуровневую очистку от примесей и растворенных газов при реализации главных стадий очистки: предварительная очистка воды – для удаления грубых примесей, а также части соединений хлора, растворенного железа и органики; получение очищенной воды – происходит практически полное очищение воды от всех солей и других соединений и осуществляется ее смягчение; глубокая очистка воды – позволяет удалить растворенные газы и оставшиеся примеси. Приведена схема повторного использования воды при производстве льда для ледовой спортивной площадки, технологический процесс имеет следующие основные этапы: вода из центрального водопровода поступает на установку очистки и смягчения; через патронный фильтр, проходя через теплообменник, вода перемещается в бак горячей воды; используя насос вода подается на арену для заливки ледового покрытия; Талая вода полученная из ледовой стружки поступает в емкость смешивания откуда насосом перекачивается до начала цикла водоподготовки. Подчеркнуто, что реализация данной технологии приведет к повышению эффективности производства и снижению экономической нагрузки. Разработана схема установки очистки воды повторного использования. Отмечено, что талая вода, полученная из ледовой стружки, имеет низкую концентрацию примесей, поэтому может быть использована повторно по необходимости. Принято, что емкость для смешивания в начале использования содержит воду из водопровода, которая насыщена разными компонентами. Поскольку концентрация компонентов постоянно меняется (в зависимости от степени очистки воды, времени года, особенностей местного водоснабжения и т.п.), для определения граничного уровня концентрации примесей в

работе предложена математическая составляющая, которая позволит вычислить необходимую степень очистки воды повторного использования для более качественного конечного продукта.

Ключевые слова: замкнутый цикл, водоснабжение, ледовая арена, спортивная площадка, технология, механизм, эксплуатация.

S. V. Zozulia

MECHANISMS OF INTRODUCTION OF THE TECHNOLOGY OF THE CLOSED CYCLE OF USE OF WATER IN THE CONDITIONS OF OPERATION OF AN ICE RINK

The article reveals the mechanisms of introduction of closed cycle water use technology in the conditions of ice rink operation. The economic component in terms of resource conservation, the use of closed cycle technology of water use is substantiated. It is emphasized that the closed cycle of water use in the conditions of ice rink operation is a system of industrial water supply and drainage, in which repeated use of water during the formation and maintenance of ice is carried out without discharging wastewater and other water into natural reservoirs / sewers, etc. It is noted that the formation of ice cover is carried out by pouring water that has undergone multi-level purification of impurities and dissolved gases during the main stages of purification: pre-purification of water - to remove coarse impurities and chlorine, dissolved iron and organic compounds; obtaining purified water - there is almost complete purification of water from all salts and other compounds and its softening; deep water purification - allows you to remove dissolved gases and impurities. The scheme of water reuse in the production of ice for the ice sports ground is given, the technological process has the following main stages: water from the central water supply enters the installation of purification and softening; through the cartridge filter, passing through the heat exchanger water moves to the hot water tank; using a pump, water is fed to the arena to fill the ice cover; melt water obtained from ice chips enters the mixing tank from where the pump is pumped to the beginning of the water treatment cycle. It is emphasized that the implementation of this technology will increase production efficiency and reduce the economic burden. The scheme of the reusable water treatment plant has been developed. It is emphasized that melt water obtained from ice chips has a low concentration of impurities, so it can be reused as needed. It is accepted that the mixing tank at the beginning of use contains tap water, which is saturated with various components. Since the concentration of components is constantly changing (depending on the degree of water purification, season, local water supply, etc.), to determine the maximum concentration of impurities in the work proposed a mathematical component that will calculate the required degree of recycling for better quality end product.

Key words: closed cycle, water supply, ice arena, sports ground, technology, mechanism, operation.

Вступ та постановка завдання. Побудова спортивних комплексів, модернізація існуючих та впровадження інноваційних технологій у виробничі процеси є пріоритетним напрямком сьогодення. Льодова арена являє собою складну інженерно-технічну будову, при експлуатації якої використовується багато профільне інженерне обладнання: кондиціонування, опалення, водопостачання, холодозабезпечення, вентиляція, електропостачання, тощо.

Покриття льодових катків має складну структуру, яка складається з багатьох шарів, кожен з яких виконує певну функціональну роль. Перший шар, який є найбільш тонким, необхідний для покращення ефекту ковзання, другий – для зменшення можливості деформації льодового покриття, також є шар основа та шар захисту. Льодове покриття, за технологічними параметрами, відрізняється одне від одного в залежності від виду спорту для якого використовується.

Найбільший вплив на якість спортивного льоду здійснює ступінь очищення води та її якісні показники. А використання технології замкненого циклу використання води є економічно вигідним з точки зору ресурсозбереження.

Замкнений цикл використання води в умовах експлуатації льодового катку – це система промислового водопостачання та водовідведення, в якій багаторазове використання води під час формування та обслуговування льодового покриття здійснюється без скидання стічних та інших вод у природні водойми / каналізацію, тощо.

Так, при проектуванні нового об'єкту льодового катку важливим аспектом є передбачення замкненого циклу використання води з метою скорочення витрат води та дотримання екологічних вимог. До технологічних завдань на стадії проведення науково-дослідних робіт при проектуванні льодового катку, варто віднести: льодовий каток повинен бути максимально безвідходним; підприємство повинно бути економічно вигідним; обов'язковою умовою є комплексна переробка сировини, з метою ресурсозбереження використання вторинної сировини; в залежності від складу технологічних вод, повинні бути передбачені способи переробки та утилізації; залежно від особливостей технології виробництва має бути визначено оптимальне місце введення технологічної стічної води у технологічному ланцюзі виробництва льоду та відпрацьовано режим періодичного розмикання замкненого циклу, використовуючи для цього зворотну або технічну воду та зберігаючи максимальні виходи льоду.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Публікації стосовно застосування технології замкненого циклу використання води в різних умовах експлуатації є популярним напрямком досліджень на протязі останніх 20-ти років.

Так, низка авторів підійшли до розгляду принципів циркулярної економіки направленої на підвищення рівня якості українського майбутнього в умовах глобалізації [1]. Авторами проаналізовано досвід зарубіжних країн у даному питанні. У роботі підкреслено, що циркулярна економіка дозволяє компаніям менше думати про закупівлі сировини, так як через певний період використання його знову можна запустити у виробничий процес.

В. М. Штепа [2] розглянув передумови розробки критерію енергоефективності електротехнологічних систем водоочистки, запропоновано відповідний аналітичний вираз, розраховано його значення на реальному об'єкті. Автором розв'язано науково-прикладну проблему в галузі екологічної безпеки, яка полягає в розробленні методів удосконалення науково-теоретичних засад управління екологічною безпекою технологій промислового водоочищення зі зменшенням ризиків виникнення надзвичайних ситуацій та врахуванням вимог енергоефективності, що сприятиме дотриманню нормативів шкідливих впливів на довкілля.

Удосконаленню існуючої технологічної схеми очистки стічних вод гальванічних цехів підприємств вугільного машинобудування на основі їхнього доочищення методом іонного обміну присвячено роботу [3]. У роботі запропоновано на завершальному етапі очищення стічних вод встановити іонообмінні фільтри, що значно знижує вміст сполук важких металів та інших забруднюючих речовин до нормативів якості води, що дозволяє створити на виробництві систему замкненого водообороту, тобто повернути до 95% доочищеної води на власні виробничі потреби (приготування розчинів і електролітів, промивні операції тощо).

Дослідження [4] присвячене практичним аспектам впровадження технологій та інновацій в Україні в умовах розвитку зеленої, ресурсоефективної економіки.

Н. Ширяєва [5] дослідила стратегічні орієнтири управління підприємствами водопостачання та водовідведення. Авторкою обґрунтовано необхідні заміни застарілого обладнання на підприємствах водопостачання та водовідведення. На сторінках роботи розкрито доцільності та змістовність автоматизації технологічних процесів на підприємствах водопостачання та водовідведення. Обґрунтовано врахування особливостей технологій підйому, очищення, подачі, розподілу та використання води при розробці автоматизованої системи управління технологічними процесами водозабезпечення.

У статті [6] розглянуті питання та умови раціонального використання води в оборотній системі водопостачання з урахуванням втрат води на прикладі коксохімічного підприємства. Наведений водний баланс доводять позитивний ефект від пропонованих технологічних рішень та показує скорочення скидання стічних вод і споживання свіжої технічної води на підприємстві.

О. С. Гетта, А. І. Аліфіренко та О. В. Шестопапов [7] розкрили шляхи підвищення екологічної безпеки шляхом повторного використання стічної води на підприємствах підкресливши, що для реалізації зазначеного заходу необхідно створення систем очищення води, які забезпечуватимуть якість очищення достатню, для повторного використання. Обґрунтування вибору методу очищення води конкретного підприємства залежить головним чином від складу забруднюючих її речовин і в кожному випадку потребує експериментальних досліджень ефективності використання конкретного методу очистки, видів та доз реагентів тощо.

Із зарубіжних авторів варто відзначити такі роботи як: Averina Julia [8], Teodosiu Carmen & Barjoveanu George & Sluser Brindusa & Popa (Ene) Simona [9], Teodosiu Carmen [10], Ziegler, D. & Hartig, Claudia & Wischnack, S. & Jekel, Martin [11], Voogt Wim [12], Pelorosso, R. & Gobattoni Federica & Leone Antonio [13], Istomin Eugene & Mikheev Valerii & Petrov Yaroslav & Martyn Irma [14], Prisciandaro Marina & Capocelli Mauro & Piemonte Vincenzo & Barba Diego [15], Skripko Ludmila & Skripko Anastasia [16], Schuur Johann & Spuhler Dorothee [17] та інші.

Проте, враховуючи описані наукові набутки, за темою, питання розкриття механізмів впровадження технології замкненого циклу використання води в умовах експлуатації льодового катка залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

Постановка завдання. Розкрити механізми впровадження технології замкненого циклу використання води в умовах експлуатації льодового катка.

Викладення основного матеріалу дослідження. Сучасні інноваційні технології будівництва, роблять процес створення та впровадження льодових катків у експлуатацію не таким складним як раніше. Саме питання раціонального використання ресурсів дає змогу при возведенні

та проектуванні комунікацій притягнути інноваційні технології та здійснити мінімально збиткове виробництво та максимально ефективне використання ресурсів.

Льодові арени, як спортивні майданчики мають три глобальні відмінності від, наприклад, театрів або спортивних комплексів. Перша, та найголовніша відмінність це реалізація вимог до температурно-вологісного параметру, тобто обов'язковою умовою є створення комфортних умов для глядачів та підтримка умов нормального функціонування льодового покриття. Другою відмінністю виступає рішення питання забезпечення достатньої холодої потужності для створення даного льодового покриття. Та, третя відмінність, це реалізація ефективної системи повітря обміну та глибоке осушення повітря, за для попередження зараження приміщень пліснявою. Інноваційні методи технічного проектування внутрішнього простору приміщення дозволяють обмежити імовірність виникнення похибок.

До системи, яка є генератором льодового покриття, виносять колектори та труби мати. Дана система приєднується до холодої установки з агрегатованою насосною групою за допомогою гнучких рукавів. Завдання заморожування льоду, у рамках льодової арени, здійснюють змійовики, що виконуються або із сталевих труб, або з високоміцних термостійких полімерних (поліетиленових) труб, які інтегровані в бетонні основи льодових покриттів та виконані без будь-яких з'єднань. Температура холодоагенту, який циркулює по змійовикам становить, залежно від призначення льодового покриття (виду змагання), від -8 до -18 °C. Крок труб по горизонталі складає 100-600 мм. Механізм розташування труб підбирається таким чином, щоб забезпечити максимально можливу рівномірність температури по всій площі льодового покриття, від чого залежить якість льоду.

Утворення льодового покриття здійснюється шляхом заливання води, яка пройшла багаторівневе очищення від домішок та розчинених газів під час реалізації головних стадій очищення:

Перша стадія – попереднього очищення води – для видалення грубих домішок, а також частини сполук хлору, розчиненого заліза та органіки.

Друга стадія – отримання очищеної води – є основною створення якісного льоду. У ній відбувається практично повне очищення води від усіх солей та інших сполук та здійснюється її пом'якшення.

Третя стадія – глибоке очищення води – дозволяє видалити розчинені гази і домішки, що залишилися.

Фінішне полірування льодової арени проводиться спеціальними машинами – льодовими комбайнами. Загальна товщина льодового покриття зазвичай становить 40-70 мм, але може досягати і великих значень – 100 мм і вище.

Технологія замкненого циклу використання води в умовах експлуатації льодового катка (рис. 1) ґрунтується на використанні води при таненні стружки льоду.



Рис. 1. Схема повторного використання води при виробництві льоду для льодового спортивного майданчика

Загальний обсяг води, направлений на заливання льоду, льодової арили, дорівнює обсягу води отриманої шляхом танення льодової стружки. За рахунок, даної умови, підтримується постійна товща льодового покриття спортивного майданчика.

Для отримання якісної льодової поверхні, обов'язковою умовою є використання м'якої, очищеної води без додаткових компонентів та домішок. Таким чином, технологічний процес має наступні основні етапи:

перший етап – вода з центрального водопроводу надходить на установку очищення та пом'якшення;

другий етап – через патронний фільтр, проходячи через теплообмінник вода переміщується у бак гарячої води;

третій етап – використовуючи насос вода подається на арену для заливання льодового покриття;

четвертий етап – тала вода отримана з льодової стружки надходить у ємність змішування звідки насосом перекачується на початок циклу водо підготовки.

Головним вузлом технологічної схеми повторного використання води при виробництві льоду для льодового спортивного майданчика є установка очищення води, що попередньо використовувалася. Реалізація даної технології призведе до підвищення ефективності виробництва та зниження економічного навантаження. Схема установки очищення води повторного використання наведена на рисунку 2.

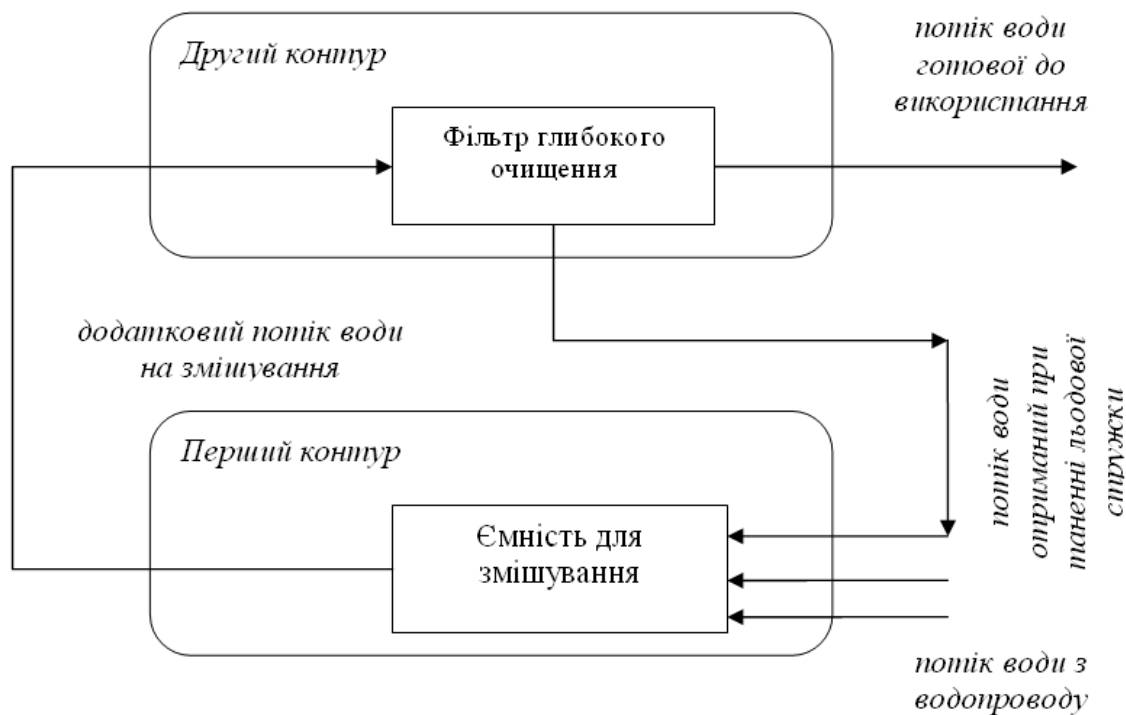


Рис. 2. Схема установки очищення води повторного використання

Враховуючи наукові дослідження останніх років, варто підкреслити, що тала вода отримана з льодової стружки має низьку концентрацію домішок, тому може бути використана повторно за потребою. Таким чином, приймаємо, що ємність для змішування на початку використання містить воду з водопроводу, яка насичена різними компонентами. Оскільки концентрація компонентів постійно змінюється (в залежності від ступеню очищення води, пори року, особливостей місцевого водопостачання, тощо), для визначення граничного рівня концентрації домішок варто враховувати рівняння матеріального балансу:

$$k_{\text{живлення}} = (1 - Q)k_{\text{концентрат}} + Qk_{\text{фільтрат}}$$

де $k_{\text{живлення}}$, $k_{\text{концентрат}}$, $k_{\text{фільтрат}}$ – масова частка кожного окремого компоненту; Q –

ступінь визначення рівня відбору розчинювала.

Ступінь визначення рівня відбору розчинювала знаходиться з відношення масових витрат живлення та фільтрату:

$$Q = \frac{M_{\text{фільтрату}}}{M_{\text{живлення}}}$$

Таким чином, встановлюючи залежності між компонентним складом талої води отриманої з льодової стружки та водопровідної води направленої на очищення отримуємо значенні масової частки фільтрату:

$$k_{\text{фільтрат}} = k_{\text{живлення}} / Q [1 - (1 - Q)^{S_k}]$$

де S_k – селективність кожного окремого компоненту.

Враховуючи, що досліджуваний процес є нестационарним та спираючись на попередньо запропонований математичний аспект рівняння зв'язку поточної концентрації живлячого потоку кожного окремого компоненту та загальний час роботи контуру має вигляд:

$$t = \frac{m_{\text{рід}}}{O_i} \ln \frac{O_i k_{\text{живлення}} + W_i}{O_i k_{\text{живлення}_0} + W_i}$$

де

$$O_i = M_{\text{живлення}} [1 - (1 - Q)^{1-S_k} - 1]$$

$$W_i = M_{\text{іонного обміну}} k_{\text{іонного обміну}} + M_{\text{води зі стружки льоду}} k_{\text{стружки льоду}}$$

Таким чином, аналізуючи отримані рівняння отримуємо значення концентрації фільтрату:

$$k_{\text{фільтрат}}(t) = (1 - S_k)(1 - Q)^{-S_k} \left[\left(\frac{O_i k_{\text{живлення}_0} + W_i}{O_i} \right) \exp \left(t \frac{O_i}{m_{\text{рід}}} \right) - \frac{W_i}{O_i} \right]$$

Враховуючи той факт, що середня концентрація фільтрату за увесь період роботи контуру повинна перевищувати граничну концентрацію кожного окремого компонента, яка визначається технічними умовами, які є обов'язковими до виконання на стадії кожного технологічного процесу виробництва, тоді:

$$\bar{k}_{\text{фільтрат}} = \frac{1}{O_i} (1 - S_k)(1 - Q)^{-S_k} \left[\frac{(O_i k_{\text{живлення}_0} + W_i) \left(\exp \left(T \frac{O_i}{m_{\text{рід}}} \right) - 1 \right)}{T \frac{O_i}{m_{\text{рід}}} - W_i} \right]$$

Таким чином, при впровадженні технології замкненого циклу використання води в умовах експлуатації льодового катка стружка льоду плавиться під дією тепла, що надходить від холодильної установки та отримана вода направляється на вузол водопідготовки, де проходить всі стадії очистки та використовується повторно.

Висновки. У роботі розкрито механізми впровадження технології замкненого циклу використання води в умовах експлуатації льодового катка. До основної переваги застосування технології замкненого циклу використання води варто віднести надійність водопостачання, яка обумовлена наявністю ємності для накопичування води для утворення льодового покриття на льодовій арені, яка усуває проблему відсутності водопостачання за умови поточного ремонту або аварійного відключення. Технологія замкненого циклу використання води в умовах експлуатації льодового катка дозволяє значно мінімізувати споживання води з центрального водопроводу та навантаження на мережу скидання води у каналізацію, а також значно підвищує надійність системи загалом.

Перспективами подальших досліджень є розробка модернізованої системи очистки води в умовах реалізації технології замкненого циклу використання води для утворення льоду на льодовій арені, з урахуванням зовнішніх впливів.

Список літератури

1. Варфоломеєв, М. О., & Чуріканова, О. Ю. (2020). Циркулярна економіка як невід'ємний шлях українського майбутнього в аспекті глобалізації. *Ефективна економіка*, 5. doi: 10.32702/2307-2105-2020.5.200

2. Заєць, Н. А., & Штепа, В. М. (2018). Систематизація електротехнологічних комплексів водоочищення харчових виробництв. *Енергетика і автоматика*, (4), 49-62.
3. Кулікова, Д. В., Ковров, О. С. (2020). Удосконалення технологічної схеми очистки стічних вод гальванічних цехів підприємств вугільного машинобудування. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*, 2(22), 97-106.
4. Кваша, Т., Мусіна, Л. (2017). *Інновації та технології для розвитку зеленої ресурсоефективної економіки України*. Київ: УкрІНТЕІ.
5. Ширяєва, Н. (2019). Стратегічні орієнтири управління підприємствами водопостачання та водовідведення. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія «Економіка»*, 20-26.
6. Галкіна, О.П. Дегтяр, М.В. (2020). Баланс води на підприємстві при розробленні технологічних рішень. *Комунальне господарство міст*, (154), 148-153.
7. Гетта, О. С. Аліфіренко, А. І., Шестопапов, О. В. (2019). Шляхи підвищення екологічної безпеки шляхом повторного використання стічної води на підприємствах переробки овочів та фруктів. *XIII Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів : матеріали конф.*, 19-22 листопада 2019 р.; ред. Є. І. Сокол ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т" [та ін.]. Харків : НТУ "ХПІ", 550-551.
8. Averina, J. M. (2019). Development and design of a closed water use cycle. *19th SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference EXPO Proceedings*. STEF92 Technology. <https://doi.org/10.5593/sgem2019/3.1/s12.019>
9. Barjoveanu, G., Teodosiu, C., Robu, B., & Ene, S.-A. (2012). Sustainability in the water use cycle: challenges in the romanian context. *Environmental Engineering and Management Journal*, 11(11), 1987–2000. <https://doi.org/10.30638/eemj.2012.248>
10. Apopei, P., Catrinescu, C., Teodosiu, C., Ungureanu, A., & Royer, S. (2018). Selective dissolution of TiO₂ crystalline phases: Physicochemical characterization and photocatalytic activity. *Comptes Rendus Chimie*, 21(3-4), 382-390.
11. Ziegler, D., Hartig, C., Wischnack, S., & Jekel, M. (2020). Organic Substances in partly closed Water Cycles. *У Management of Aquifer Recharge for Sustainability* (с. 161–167). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003078838-34>
12. Voogt, Wim. (2022). Improving water use efficiency : water storage, recycling, closed water chain. https://www.researchgate.net/publication/40104506_Improving_water_use_efficiency_water_storage_recycling_closed_water_chain
13. Pelorosso, R. & Gobattoni, Federica & Leone, Antonio. (2018). The low-entropy city. A modelling approach to close water cycles. Conference: INPUT2018 - 10th International Conference on Innovation in Urban and Regional Planning, 5-9 september 2018, Viterbo, Italy.
14. Sokolov, S. V., Rosenberg, I. N., Bayandurova, A. A., & Duhina, N. A. (2021). Precise positioning is known as a loxodrome on a trajectory on navigation measurements with intense noise. *Geoinformatika*, (1), 30–35. <https://doi.org/10.47148/1609-364x-2021-1-30-35>
15. Prisciandaro, M., Capocelli, M., Piemonte, V., & Barba, D. (2016). Process analysis applied to water reuse for a “closed water cycle” approach. *Chemical Engineering Journal*, 304, 602–608. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.06.134>
16. Skripko, L. P., & Skripko, A. A. (2021). Automation of closed water supply system for aquatic organisms. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer science and informatics*, 2021(3), 49–55. <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2021-3-49-55>
17. Schuur, J. S., & Spuhler, D. (2021). Closing Water and Nutrient Cycles in Urban Wastewater Management: How to Make an Academic Software Available to General Practice. *Circular Economy and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s43615-021-00073-6>

T. Katkova

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor Professor Department of Cybersecurity and Information Technology, University of Customs and Finance, Dnipro, Ukraine, V.Vernadsky street 2/4, Dnipro, Ukraine, 49000, takit777@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-1051-4262>, 0562 471 882

SECURITY CRYPTOGRAPHIC PROTECTION OF SOVEREIGN INFORMATION RESOURCES

The development of new information technologies and the introduction of computer systems in all spheres of human activity have led to a sharp increase in the interest of a wide range of users in the problem of information security. Information protection is a set of methods and tools that ensure the integrity, confidentiality and accessibility of information when it is affected by threats of a natural or artificial nature, the implementation of which may harm the owners and users of information. Cryptography plays a leading role in ensuring information security in information and telecommunication systems, one of the main tasks is: ensuring the confidentiality, integrity and authenticity of transmitted data. Cryptography - the science of mathematical methods to ensure the confidentiality (inability to read information by others) and authenticity (integrity and authenticity of the author) of information. Today, cryptography, as a field of knowledge, and cryptographic protection of information, as a separate field of activity, concerns: issues of encryption, the latest e-commerce technologies, automated management systems, reporting and control, and so on. The formation of high-performance encryption methods (decryption) with high cryptographic stability is an important component in addressing information security. Methods of cryptographic protection of information are information encryption systems, algorithms for protection against imposition of false information (MAC codes and electronic digital signature algorithms) and cryptographic protocols for key distribution, authentication and confirmation of receipt (transmission) of information. Cryptographic stability of cryptographic information protection methods is a property of cryptographic algorithms and cryptographic protocols, which characterizes their ability to resist decryption methods (the process of unauthorized restoration of the original message text). Modern cryptography is characterized by the use of open encryption algorithms that involve the use of computing tools. To date, there are more than a dozen proven encryption methods that, when using a key of sufficient length and the correct implementation of the algorithm, make encrypted text inaccessible to cryptanalysis (the science of "breaking" cryptographic transformations).

In the process of work we have considered cryptographic methods and means of information protection, which are one of the elements of a comprehensive information security system. The types of encryption, as well as the essence of electronic signatures are highlighted. The legal bases of application of cryptographic methods of information protection are given.

Keywords: complex information protection, cryptographic methods of information protection, legal basis for cryptographic information security, cryptographic information security software.

Т.І. Каткова

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КРИПТОГРАФІЧНОГО ЗАХИСТУ ДЕРЖАВНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ РЕСУРСІВ

Розвиток нових інформаційних технологій і впровадження комп'ютерних систем в усі сфери людської діяльності стали причиною різкого зростання інтересу широкого кола користувачів до проблеми інформаційного захисту. Захист інформації – це сукупність методів і засобів, що забезпечують цілісність, конфіденційність і доступність інформації за умови впливу на неї загроз природного або штучного характеру, реалізація яких може призвести до завдання шкоди власникам і користувачам інформації. Провідна роль у забезпеченні інформаційної безпеки в інформаційно-телекомунікаційних системах відводиться криптографії, одними із головних задач є: забезпечення конфіденційності, цілісності та автентичності даних, що передаються. Криптографія – наука про математичні методи забезпечення конфіденційності (неможливості прочитання інформації сторонніми) і автентичності (цілісності і справжності автора) інформації. На сьогодні криптографія, як галузь знань, та криптографічний захист інформації, як окрема галузь діяльності, стосується: питань шифрувальної справи, новітніх технологій електронної торгівлі, систем автоматизованого управління, звітування та контролю тощо. Формування високопродуктивних методів шифрування(розшифрування) з високою криптографічною стійкістю є важливою складовою у вирішенні питання інформаційної безпеки. Методи криптографічного захисту інформації – це системи шифрування інформації, алгоритми захисту від нав'язування фальшивої інформації (MAC-коди та алгоритми електронного цифрового підпису) та криптографічні протоколи розподілу ключів, автентифікації та підтвердження факту прийому (передачі) інформації. Криптографічна стійкість методів криптографічного захисту інформації – це властивість криптографічних алгоритмів і криптографічних протоколів, що характеризує їх здатність протистояти методам дешифрування (процес несанкціонованого відновлення оригіналу тексту повідомлення). Для сучасної криптографії характерне використання відкритих алгоритмів шифрування, що припускають використання обчислювальних засобів. На сьогодні відомо більше десятка перевірених методів

шифрування, які при використанні ключа достатньої довжини і коректної реалізації алгоритму, роблять шифрований текст недоступним для криптоаналізу (наука "зламування" криптографічних перетворень).

В процесі роботи нами розглянуто криптографічні методи та засоби захисту інформації, які є одним з елементів комплексної системи захисту інформації. Висвітлено види шифрування, а також сутність електронних підписів. Наведено правові підстави застосування криптографічних методів захисту інформації.

Ключові слова: комплексний захист інформації, криптографічні методи захисту інформації, правова основа криптографічного захисту інформації, програмні засоби криптографічного захисту інформації.

Problem statement. In order to fully meet the needs of modern society, there is a need for information support in all spheres of human activity and, in particular, the reliable protection of information. This problem is particularly acute in connection with mass computerization, the association of computers in computer networks, and the use of the Internet.

The theory of information protection proves that if a protection system is built with consideration of all modern methods and means of protection, and if an enterprise has carefully selected and trained personnel who do not make mistakes, then deliberate actions of intruders in such a system are impossible. However, this is not entirely true. Over time, the protection system becomes obsolete, personnel change and lose vigilance, attackers find new ways of attacking and methods of overcoming protection that were unknown when the protection system was designed.

So, if you have reasonable expectations of the robustness of your information security system, you should still remember the basic rule of information security: no protection system can withstand the purposeful actions of a skilled intruder armed with modern technology for a long time. This rule has been developed by years of experience of information security specialists and is universal. It does not depend on the level of protection, the integrity of users and administrators, hardware, and software. The rule states that the problem is not whether intruders will break the protection system, but when they will do so. And the goal of information protection is to make sure that the system breakdown happens as late as possible.

Analysis of recent research and publications. The problems of creation and functioning of means of cryptographic protection of information have devoted enough publications in open sources, including such scientists as Ponomarenko V.S. [1], Verbitskiy O.V. [2], Khoroshko V. A. [3], Fal O.M. [4].

Ponomarenko V.S. in his works in systematic way deals with the creation of symmetric and asymmetric cryptographic systems for the protection of information.

Scientist Verbitskiy O.V. studies the problems of counteraction and investigation of crimes committed in the use of electronic computers, systems, and computer networks.

Scientists Khoroshko V. A. and Fal O. M. describe tools of the theory of disk encryption, key management procedures, the basics of development and implementation of cryptographic protocols, and the electronic digital signature mechanism.

Article purpose. Identify and process the main cryptographic methods and means of protection, and types of encryption. Analyze the software of foreign and Ukrainian developers, designed for the cryptographic protection of information.

Presentation of the basic material. One of the elements of a comprehensive information protection system is the cryptographic protection of information. This type of information protection is implemented by transforming information using keys based on mathematical methods. There are two purposes of using cryptographic methods - to conceal information by encrypting it and to confirm the significance of documents using an electronic digital signature. In other words, according to V. V. Popovskiy, cryptographic methods solve two problems - ensuring the confidentiality of information by preventing an attacker from extracting information from the communication channel and ensuring the integrity of information by preventing changes in information and entering false content in it [1]. There are two sections of science related to cryptographic methods: cryptography and cryptanalysis, which together form cryptology.

Cryptography studies mathematical transformations that allow information to be encrypted.

Cryptanalysis studies methods of decryption without knowing the secret key [1].

Means of cryptographic protection of information are divided into:

- means implementing cryptographic algorithms of information conversion;
- means, systems, and complexes of protection against imposition of false information using cryptographic algorithms of transformation of information;
- means, systems, and complexes designed for production and distribution of keys of

cryptographic protection of information;

- systems and complexes included in the information protection complexes against unauthorized access and using cryptographic algorithms of information conversion [2].

Means of cryptographic protection together with the key and other types of documentation, which provide the necessary level of protection, form a cryptographic system [2]. Encryption allows protecting information by turning it into incomprehensible text (ciphertext) with the possibility of further decryption (decryption). Both simple texts and computer files can be encrypted.

Encryption is divided into symmetric and asymmetric.

Symmetric encryption uses one secret key for both encryption and decryption. Asymmetric encryption uses a public key, and another secret key for decryption, generated using pseudorandom number generators.

Asymmetric encryption is also called public key encryption. The disadvantage of symmetric encryption is the need to pass the key to the person to the text is addressed, which entails its disclosure and decryption of information by attackers. The advantage of symmetric encryption is its higher speed than asymmetric encryption since asymmetric encryption uses longer keys, which increases the encryption time.

The way the text is encrypted is based on an algorithm and the encrypted text can only be decrypted using the key. One algorithm with different keys can be used to send messages to different recipients. Secrecy is determined by the key, not the algorithm since most algorithms are known to the general public. Due to the increase in computer performance, the probability of finding keys by trying combinations increases, so we have to use longer and longer keys, which increases the time for encryption [3]. An important characteristic of encryption methods is their cryptographic stability, i.e., for cryptographic protection of information in a computer network, it is necessary to create a special service, which generates keys and distributes them among the network users.

To create an electronic signature, the checksum and additional information is encrypted using the sender's private key. To avoid interception and reuse, a sequence number is included in the signature. An electronic signature allows to confirm the authorship of the document and guarantees the information integrity and absence of attempts to distort it. The document consists of the text, an electronic signature, and a user certificate, containing the user data, his identification name, and a decryption public key for the addressee's signature verification of the document [3].

E-signature allows to protect information from such criminal actions:

- "disclaimer of authorship," when the author of a document disclaims authorship;
- "falsification" when the recipient of the document forges it;
- "alteration" when the recipient of the document makes changes to it;
- "masking" when a user masquerades as another user.

To confirm the message, the following conditions must be met:

- the sender must put a signature into the message that contains additional information that depends on the message and the recipient of the message, but is known only to the sender;
- a correct signature cannot be made without additional information;
- the signature must be time-dependent so that old messages cannot be used; this distinguishes an electronic signature from a handwritten one;
- the recipient must be able to verify that the signature belongs to the sender and is correct as far as the message is concerned.

Thus, an electronic signature is a type of password that depends on the sender, recipient, and content of the message [4].

According to the Law of Ukraine "On electronic documents and electronic document flow" an electronic signature is a mandatory requisite of an electronic document, which is used to identify the author and/or signer of an electronic document by other subjects of electronic document flow and imposition of an electronic signature completes the creation of an electronic document. The Law of Ukraine "On Electronic Digital Signature" determines the legal status of an electronic digital signature, according to which an electronic digital signature is a type of electronic signature obtained as a result of the cryptographic transformation of a set of electronic data attached to this set or logically combined with it and allowing to confirm its integrity and identify the signer.

The electronic digital signature is imposed using the private key and is verified using the public key. The procedure for cryptographic protection of restricted information, the disclosure of which causes

(may cause) damage to the state, society, or a person in Ukraine is determined by the Regulations on the Procedure for Cryptographic Protection of Information in Ukraine. According to this Regulation, for cryptographic protection of information constituting state secrets and official information created by order of state bodies or owned by the state, cryptosystems and cryptographic protection means approved for operation are used [6].

For cryptographic protection of confidential information cryptosystems and means of cryptographic protection are used that have a certificate of compliance [7].

There are a large number of software products designed for cryptographic protection of information, and foreign developers and Ukrainian.

One of the best programs for encrypting information is BestCrypt from the Finnish company Jetico. It allows you to create an encrypted container to store information on any type of media and is designed to work under both Windows and Linux. The program can optionally use one of the strongest algorithms implemented with a 256-bit key: Rijndael (AES), Blowfish, and Twofish. Newer versions of the Blowfish algorithm can use a 448-bit key [8].

The “Private Disk” program from the Moldovan company “Dekart” is also known. It allows you to create an encrypted virtual disk to store information. Encryption is performed using AES 256 algorithm. While working with information, files on virtual disk have the same properties as unencrypted ones, until the user does not lock the access. The virtual disk is protected from viruses, Trojans, and spyware using the built-in Disk Firewall [9].

There is a system of cryptographic protection of information “Karma” from the Ukrainian company “NetCom Technology”. It is designed to ensure the use of electronic digital signature and encryption, in particular, in the legally significant electronic document flow. The peculiarity of this system is the possibility to add an image of a handwritten signature to the electronic digital signature. As a result, an electronic document will look like a paper one [10].

LLC “SKZ “CryptoSoft” offers a program complex of cryptographic protection of information “Cryptoserver” for work under MS Windows 8, MS Windows 10. This complex ensures the protection of data transmitted via unprotected public (Internet) or open (e.g., leased lines, MPLS) channels. Data is protected by encryption based on domestic encryption algorithms. The maximum level of access restriction for information protected by this suite is “confidential” [11].

Conclusions. Cryptography is a set of methods of data transformation, aimed at hiding their information content. A cryptographic information protection system is a set of cryptographic algorithms, protocols, and procedures for the formation, distribution, transmission, and use of cryptographic keys. The message itself is called plaintext. Changing the appearance of a message to hide its essence is called encryption.

Cryptographic protection can provide the conditions of confidentiality and integrity of transmitted data in open networks, as well as the anonymity of the object and the conditions of its involvement in the DIR.

References:

1. Ponomarenko, V. S., Zhuravlova, I. V., & Tumanov, V. V. (2003). *Osnovy zakhystu informatsii: navchalnyi posibnyk* [Fundamentals of information protection: a textbook]. Kharkiv: Vyd. KhDEU. [in Ukrainian].
2. Verbitskyi, O.V. (2018). *Vstup do kryptolohii* [Introduction to cryptology]. Lviv: Vyd-vo NTL [in Ukrainian].
3. Khoroshko, V. A., & Chekatkov A. A. (2017). *Metody i zasoby zakhystu informatsiyi* [Methods and means of information protection]. Kyiv: Yuniior [in Ukrainian].
4. Fal, O. M. (2003). *Kryptohrafiya: osnovni ideyi ta zastosuvannya* [Cryptography: basic ideas and applications]. Kyiv : IVTs Vydavnytstvo «Politekhnik» [in Ukrainian].
5. *Pro elektronni dokumenty ta elektronnyy dokumentoobih: Zakon Ukrayiny vid 22.05.2003 № 851-IV*. [On electronic documents and electronic document management: Law of Ukraine of 22.05.2003 № 851-IV]. URL: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/851-15> (application date: 26.01.2022). [in Ukrainian].

6. *Pro elektronnyu tsyfrovyyu pidpys: Zakon Ukrainy vid 22.05.2003 № 852-IV*. [On electronic digital signature: Law of Ukraine of 22.05.2003 № 852-IV.]. URL: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/852-15> (application date: 26.01.2022). [in Ukrainian].

7. *Pro Polozhennya pro poryadok zdiysnennya kryptohrafichnoyi zakhystu informatsiyi v Ukraini: Ukaz Prezydenta Ukrainy vid 22.05.1998 № 505/98*. [On the Regulations on the procedure for cryptographic protection of information in Ukraine: Decree of the President of Ukraine of 22.05.1998 № 505/98]. URL: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/505/98> (application date: 26.01.2022). [in Ukrainian].

8. Private Disk naykrashcha prohrama dlya shyfruvannya fayliv [Private Disk is the best program for encrypting files]. URL: <http://www.private-disk.net/ru> (application date: 26.01.2022). [in Ukrainian].

9. *Systema «KARMA». Universalna systema kryptohrafichnoho zakhystu informatsii* (n.d.) [KARMA system. Universal system of cryptographic protection of information]. URL: <http://www.eos.com.ua/eos/ua/products/carma> (data zvernennia: 26.01.2022). [in Ukrainian].

10. Sira, O., & Katkova, T. (2017). Formation of securities portfolio under conditions of uncertainty. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(4 (85)), 49–55. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.92283>

11. Raskin, L., Sira, O., & Katkova, T. (2019). Dynamic problem of formation of securities portfolio under uncertainty conditions. *EUREKA Physics and Engineering*, 6, 73–82. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00985>

А.Ю. Мальцев

к. ф.-м.н., доцент кафедра математичних методів
системного аналізу НТУУ “КПІ” ім. Ігоря Сікорського Проспект перемоги
37, Київ, Україна

ЩОДО ПИТАННЯ ПРОГНОЗУВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ КЛАСИЧНИХ І НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

У статті описано принципи прогнозування з використанням класичних і нейромережевих методів машинного навчання. Наголошено, що механізм прогнозування застосовується у фінансовій сфері, для прогнозування рівня продажів, інфляції, реального внутрішнього валового продукту, цін на нафту, золото, валюту, тощо. Описано принципи генетичного алгоритму, кластеризації, математико-статичні методи, методи нейромережового прогнозування. Підкреслено, що у порівнянні з математико-статичними методами кластерний аналіз не накладає умов на тип об'єктів, що розглядаються, тому дозволяє досліджувати різноманіття вихідних даних довільної природи. Здійснено порівняння алгоритмів кластеризації. Наведено типову структуру нейронної мережі з прямим зв'язком, математично обґрунтовано принцип визначення похибки роботи штучної нейронної мережі. За для визначення рівня ефективності моделей прогнозування, здійснено оцінку за допомогою математичних статистичних показників: ступінь дисперсії, середньоквадратична помилка, середнє абсолютне відсоткове відхилення, медіана абсолютних відхилень, середньоквадратична похибка прогнозу, середня абсолютна похибка. Наведено схему інформаційних зв'язків при застосуванні системи прогнозування за допомогою класичних і нейромережевих методів машинного навчання. У статті наголошено, що прогнозування за допомогою класичних і нейромережевих методів машинного навчання є програмним комплексом, який призначено для прогнозування даних. Таблично представлено результати аналізу моделей прогнозування. Зазначається, що перша модель поділяє дані на групи, таким чином, щоб кожна група складалася зі схожих об'єктів, а об'єкти різних груп були відмінними один від одного, у другій моделі, на відміну від першої, перелік груп не заданий чітко, а визначається у процесі роботи алгоритму, третя модель за один крок здійснює обробку деякої популяції рядків. Підкреслено, що вибір різних нейрометодів залежить від конкретного завдання і не може бути визначено однозначно, а для досягнення найкращого результату необхідно експериментувати з вибором заходів відстаней, інколи ж навіть змінювати алгоритм.

Ключові слова: штучна нейронна мережа, прогнозування, метод, машинне навчання, кластер, планування, автоматизація.

A. Maltsev

ON THE ISSUE OF FORECASTING USING CLASSICAL AND NEURAL NETWORK METHODS OF MACHINE LEARNING

The article describes the principles of forecasting using classical and neural network methods of machine learning. It is emphasized that the forecasting mechanism is used in the financial sphere, to forecast the level of sales, inflation, real gross domestic product, prices for oil, gold, currency, etc. The principles of genetic algorithm, clustering, mathematical and static methods, methods of neural network prediction are described. It is emphasized that in comparison with mathematical and static methods, cluster analysis does not impose conditions on the type of objects under consideration, so it allows us to study the diversity of initial data of arbitrary nature. The clustering algorithms are compared. The typical structure of a neural network with a direct connection is given, the principle of determining the error of an artificial neural network is mathematically substantiated. To determine the level of efficiency of forecasting models, the estimation was performed with the help of mathematical statistical indicators: degree of variance, standard error, standard absolute percentage deviation, median of absolute deviations, standard error of forecast, average absolute error. The scheme of information connections in the application of the forecasting system using classical and neural network methods of machine learning is given. The article emphasizes that forecasting using classical and neural network methods of machine learning is a software package designed for data forecasting. The results of the analysis of forecasting models are presented in the table. It is noted that the first model divides the data into groups so that each group consists of similar objects, and objects of different groups were different from each other, in the second model, unlike the first, the list of groups is not clearly defined, and is determined in the course of operation of algorithm, the third model in one step carries out processing of some population of lines. It is emphasized that the choice of different neuromethods depends on the specific task and can not be determined unambiguously, and to achieve the best result it is necessary to experiment with the choice of distance measures, and sometimes even change the algorithm.

Key words: artificial neural network, forecasting, method, machine learning, cluster, planning, automation.

Актуальність проблеми. Адекватне та обґрунтоване вирішення завдань прогнозування в умовах формування системи стратегічного планування та ціле покладання, в даний час набуває особливої актуальності. Прогнозування, у тому числі на регіональному рівні, починає відігравати істотну роль при реалізації проектів та прийнятті управлінських рішень у соціально-економічній сфері. Особлива увага має приділятися не лише прогнозуванню значень окремих показників, представлених тимчасовими рядами, а й прогнозуванню структурних трансформацій у тимчасових

лавах для цих показників. Це пов'язано з тим, що крім позаекономічних факторів, які можуть серйозно впливати на стан економіки та соціального благополуччя (яскравим прикладом стало поширення нової коронавірусної інфекції COVID-19 та наслідки, спричинені заходами щодо ефективного подолання пандемії) існує також ряд економічних факторів (зокрема циклічні коливання соціально-економічного розвитку, зміна технологічних укладів, структурні диспропорції в економіці та інші), які серйозно впливають на динаміку часових рядів, що кількісно характеризують рівень соціально-економічного розвитку регіонів і які необхідно враховувати при розробці, прийнятті та реалізації конкретних рішень, проектів та програм.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В умовах сучасного розвитку, актуальності набувають роботи направлені на впровадження нейромережових методів машинного навчання у різні сфери життя людей.

Р. В. Кириленко, Н. А. Гук та О. В. Верба (Кириленко, Гук, Верба, 2017) розглянули комплекс алгоритмів для розв'язання задачі прогнозування реакції користувача на зображення при перегляді цифрових зображень.

Роботу (Кривохата, 2020) присвячено розв'язанню задач класифікації звукових сигналів засобами гібридних нейронних мереж із шарами згортки та автокодувальників з оптимізацією їх структури генетичними алгоритмами.

А. С. Каштальян та О. В. Каштальян (Каштальян, Каштальян, 2019) запропонували метод прогнозування часових рядів адаптованою розширеною згортковою нейронною мережею за архітектурою, подібною до WaveNet. Використання розширених каузальних згорткових шарів дозволяє збільшити рецептивне поле та врахувати довгострокові залежності в часових рядах.

У (Прочухан, 2021) розроблено структуру згорткової нейронної мережі у вигляді моделі послідовної реалізації шарів згортки, агрегування, повного зв'язку. Обґрунтовано доцільність використання функції ReLU для активації вузлів. Застосовано метод Dropout для запобігання перенавчанню нейронної мережі. Вихідний шар реалізовано у вигляді одного нейрону з використанням функції активації сигмоїда. Оптимізація згорткової нейронної мережі здійснена методом стохастичного градієнтного спуску.

Ю. В. Хома (Хома, 2020) удосконалив метод інтелектуального опрацювання сигналів віброартрографії, який відрізняється виділенням діагностичних ознак, одержаних статистичними методами на вибраних рівнях хвилькової декомпозиції ВАГ-сигналу, а його застосування забезпечило високу точність і чутливість класифікатора системи медичної діагностики попри малий обсяг даних.

Із зарубіжних авторів варто відзначити такі роботи як: Rasyid Rachmat & Ibrahim Abdul (Rachmat, Abdul, 2020), Bavkar Vandana & Shinde Arundhati (Vandana, Arundhati, 2021), Mandal Debmalaya & Medya Sourav & Uzzi Brian & Aggarwal Charu (Debmalya, Sourav, Brian, Charu, 2021), Waikhom Lilapati & Patgiri Ripon (Lilapati, Ripon, 2021), Hou Zai-En & Duan Fu-Jian (Zai-En, Fu-Jian, 2009), Pun G. & Yamakov V. & Hickman J. & Glaessgen E. & Mishin Y. (Pun, Yamakov, Hickman, Glaessgen, Mishin, 2020), Li Zizhen & Bai Mei & Huang Ying (Zizhen, Mei, Ying, 2007), Kumari G & P Padmaja & G Jaya (Kumari, Padmaja, Jaya, 2020), Jin Lizhen (Lizhen, 2021), Yong Binbin & Qiao Fei & Wang Chen & Shen Jun & Wei Yongqiang & Zhou Qingguo (Yong, Qiao, Wang, Shen, Wei, Zhou, 2019) та інші.

Проте, враховуючи описані наукові набутки, за темою, питання прогнозування з використанням класичних і нейромережових методів машинного навчання залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

Визначення мети дослідження. Здійснити опис принципів прогнозування з використанням класичних і нейромережових методів машинного навчання.

Виклад основного матеріалу дослідження. Програмне забезпечення, робота якого направлена на обробку великих масивів даних та прогнозування, орієнтовано виключно на обробку великих обсягів даних, мають справу з наборами даних обсягом від кількох терабайт до петабайта. Як правило, ці дані надходять у кількох різних форматах і часто розподілені між кількома розташуваннями. Обробка подібних наборів даних зазвичай відбувається як багатокроковий аналітичний конвеєр, що включає стадії перетворення та інтеграції даних. У таблиці 1 представлено порівняння алгоритмів кластеризації.

Штучні нейронні мережі є обчислювально інтелектуальними методами, це ефективні інструменти моделювання на основі даних, які знайшли широке застосування в динамічних,

нелінійних і складних системах. Вони складаються з різної кількості персептронів, які приймають, обробляють і передають сигнали за допомогою коригування ваги та зміщення.

Табл. 1.

Порівняння алгоритмів

Алгоритм	Переваги	Недоліки
Алгоритм найближчого сусіда	будує оптимальне розбиття; отримання всіх розбиттів у вигляді дендрограми	обчислювальна збіжність; кластери не перетинаються; обчислювальна складність.
Дивізивні алгоритми	побудова розбиття; результат у вигляді дендрограми.	висока обчислювальна складність.
Алгоритм kmeans	простота та швидкість використання; зрозумілість та прозорість алгоритму.	необхідно знати кількість кластерів; обчислювальна складність.
Алгоритм DBSCAN	добре піддається модифікації; малий час обчислення.	нездатність з'єднувати кластери через отвір; висока складність.
Алгоритм EM	лінійне збільшення помилковості при зростанні обсягу даних; можливість побудови бажаної кількості кластерів; швидка збіжність при вдалій ініціалізації.	алгоритм може зупинитися на локальному мінімумі; при невдалій ініціалізації збіжність алгоритму може бути низькою.
Алгоритм COWEB	масштабованість; робота при невідомій кількості об'єктів.	відносно складний математичний апарат.
Алгоритм WaveCluster	може виявляти кластери довільних форм.	складність реалізації; застосовуємо лише до даних низької розмірності.

Схема інформаційних зв'язків при застосуванні системи прогнозування за допомогою класичних і нейромережових методів машинного навчання зображена на рис. 1.

Система прогнозування за допомогою класичних і нейромережових методів машинного навчання є програмним комплексом (ПК), який призначено для прогнозування даних.

Результати аналізу моделей прогнозування наведено у таблиці 2.

Табл. 2.

Результати аналізу моделей прогнозування

Номер моделі прогнозування	Статистичний математичний показник					
	Ступінь дисперсії R ²	Середньоквадратична помилка СКП	Середнє абсолютне відсоткове відхилення САВВ	Медіана абсолютних відхилень МАВ	Середньоквадратична похибка прогнозу СКПП	Середня абсолютна похибка САП
Модель 1	0,45	0,14	0,12	0,02	0,09	0,01
Модель 2	0,99	0,98	0,25	0,1	0,14	0,5
Модель 3	0,98	1,62	0,88	0,11	0,15	0,79

Перша модель поділяє дані на групи, таким чином, щоб кожна група складалася зі схожих об'єктів, а об'єкти різних груп були відмінними один від одного. У другій моделі, на відміну від першої, перелік груп не заданий чітко, а визначається у процесі роботи алгоритму.

Третя модель за один крок здійснює обробку деякої популяції рядків. У найчастішому різновиді роботи моделі для представлення типу об'єкта застосовуються бітові рядки. При цьому кожному атрибуту об'єкта відповідає один тип об'єкта.

Таким чином, машинне навчання є невід'ємною частиною сучасної обробки великих масивів інформації, помітно полегшуючи роботу з нею та охоплюючи безліч сфер застосування. Вибір різних нейрометодів залежить від конкретного завдання і не може бути визначено однозначно. Для досягнення найкращого результату необхідно експериментувати з вибором заходів відстаней, інколи ж навіть змінювати алгоритм.

Висновки і перспективи подальших досліджень. У роботі описано принципи прогнозування з використанням класичних і нейромережових методів машинного навчання. Більшість популярних алгоритмів вимагають запровадження додаткових параметрів, які потім змінюється на той чи інший бік. Запропонована нейромережева модель ефективно функціонує при обробці масивів великої розмірності, оскільки в них оптимально поєднуються цілеспрямований пошук та елементи випадковості, спрямовані на вибивання цільової функції з локальних мінімумів. Жодних попередніх умов для їх використання не потрібно.

Перспективами подальшої роботи є дослідження методів машинного навчання нейронної мережі для передбачення великих зашумлених даних за допомогою сучасних мов програмування.

Список літератури

1. Кириленко Р.В. Передбачення психологічної реакції користувача при перегляді цифрових зображень засобами машинного навчання / Р.В. Кириленко, Н.А. Гук, О.В. Верба // Зб. наук. праць «Питання прикладної математики і математичного моделювання». Дніпро. 2018. Вип. 18. С.51-58.
2. Кривохата А. Г. Нейромережові математичні моделі звукових сигналів у задачах розпізнавання. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізикоматематичних наук за спеціальністю 01.05.02 «Математичне моделювання та обчислювальні методи» (01 – фізико-математичні науки). – Запорізький національний університет Міністерства освіти і науки України, Запоріжжя, 2020. 160 с.
3. Прогнозування часових рядів адаптованою розширеною згортковою нейронною мережею / А. С. Каштальян, О. В. Каштальян // Вісник Хмельницького національного університету, 2019. №6 (279). С. 155-160.
4. Прочухан Д. В. Нейромережеве моделювання в реалізації системи визначення правильності носіння медичної маски / Системи обробки інформації: Харківський політехнічний інститут, Харків, 2021. № 1 (164). С. 65-72.
5. Хома Ю.В. Теорія і методи комп'ютерного опрацювання біосигналів на основі машинного навчання. – На правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти – Національний університет «Львівська політехніка», МОН України, Львів, 2020. 379 с.
6. Rasyid, Rachmat & Ibrahim, Abdul. (2021). Implementation of Machine Learning Using the Convolution Neural Network Method for Aglaonema Interest Classification. Jurnal E-Komtek (Elektro-Komputer-Teknik). 5. 21-30. 10.37339/e-komtek.v5i1.434.
7. Bavkar, Vandana & Shinde, Arundhati. (2021). Machine learning algorithms for Diabetes prediction and neural network method for blood glucose measurement. Indian Journal of Science and Technology. 14. 869-880. 10.17485/IJST/v14i10.2187.
8. Mandal, Debmalya & Medya, Sourav & Uzzi, Brian & Aggarwal, Charu. (2021). MetaLearning with Graph Neural Networks: Methods and Applications. ACM SIGKDD Explorations Newsletter. 23. 13-22. 10.1145/3510374.3510379.
9. Waikhom, Lilapati & Patgiri, Ripon. (2021). Graph Neural Networks: Methods, Applications, and Opportunities. https://www.researchgate.net/publication/354115201_Graph_Neural_Networks_Methods_Applications_and_Opportunities
10. Hou, Zai-En & Duan, Fu-Jian. (2009). The Neural Network Method of Financial Forecasting. 2009 International Workshop on Intelligent Systems and Applications, ISA 2009. 1 - 3. 10.1109/IWISA.2009.5073193.

11. Pun, G. & Yamakov, V. & Hickman, J. & Glaessgen, E. & Mishin, Y.. (2020). Development of a general-purpose machine-learning interatomic potential for aluminum by the physically informed neural network method. *Physical Review Materials*. 4. 10.1103/PhysRevMaterials.4.113807.
12. Li, Zizhen & Bai, Mei & Huang, Ying. (2007). Studies of data processing in future forecasting using neural networks method. *Mathematics in Practice and Theory*. 21. <https://www.researchgate.net/publication/269006893> Studies of data processing in future forecasting using neural networks method
13. Kumari, G & P, Padmaja & G, Jaya. (2020). ENN Ensemble based Neural Network method for Diabetes Classification. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 9. 574-579. 10.35940/ijeat.C4819.029320.
14. Jin, Lizhen. (2021). Application of neural network method in engineering prediction. *Journal of Physics: Conference Series*. 2083. 042080. 10.1088/1742-6596/2083/4/042080.
15. Yong, Binbin & Qiao, Fei & Wang, Chen & Shen, Jun & Wei, Yongqiang & Zhou, Qingguo. (2019). Ensemble Neural Network Method for Wind Speed Forecasting. 31-36. 10.1109/SiPS47522.2019.9020410.

УДК: 66.017:544.778.4

DOI 10.36910/775.24153966.2022.73.9

І.А. Мороз, В.Я. Шемет
Луцький національний технічний університет

ОСОБЛИВОСТІ ПРОНИКНЕННЯ РІДИН В ПОРОШКОВІ МАТЕРІАЛИ

Встановлено теоретичний зв'язок між природою рідини, у якій формуються дисперсні системи на основі порошків, та відносною глибиною проникнення її проникнення у порошковий матеріал. Розглянуто особливості формування просторової структури у порошкових матеріалах. Під час внесення порошків у рідке середовище відбувається руйнування агрегатів частинок порошку. Спочатку рідина розтікається по поверхні порошку та утворює області замкнутого повітря в середині агрегату, а потім проникає в агрегати частинок під впливом капілярних сил.

Ключові слова: порошки, топологічна структура, руйнування агрегатів, дисперсійне середовище, змочування.

І.А. Мороз, В.Я. Шемет

ОСОБЕННОСТИ ПРОНИКНОВЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ В ПОРОШКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Установлена теоретическая связь между природой жидкости, в которой формируются дисперсные системы на основе порошков, и относительной глубиной проникновения в порошковый материал. Рассмотрены особенности формирования пространственной структуры в порошковых материалах. При внесении порошков в жидкую среду происходит разрушение агрегатов частиц порошка путем растекания жидкости по поверхности порошка, образования участков замкнутого воздуха и проникновения жидкости в агрегаты от воздействия капиллярных сил.

Ключевые слова: порошки, топологическая структура, разрушение агрегатов, дисперсионная среда, смачивание.

I.A. Moroz, V.Ya. Shemet

FEATURES OF LIQUIDS PENETRATION IN POWDER MATERIALS

Establishment of features and regularities of penetration of liquids into powder materials. Studies have shown that highly dispersed powders in air are in an aggregated state. Primary particles with a radius of 0.12 to 6.3 nm have the greatest ability to aggregate. The introduction of powder materials into the liquid dispersion medium allows to weaken the interparticle interaction in the system and thus reduce the number of aggregated particles due to re-dispersion.

The destruction of aggregates of particles formed in the air in two stages. In the first stage of destruction, the liquid spreads on the surface of the powders and areas of closed air between the particles are formed. The condition for spreading the liquid on the surface of the powder is wetting the powder with liquid. The rate of liquid penetration into the powder pores depends on the combined effect of the characteristics of the liquid and the dispersion phase, in particular the viscosity and density of the liquid dispersion medium, as well as the surface tension

Key words: powders, topological structure, destruction of aggregates, dispersion medium, wetting.

Постановка проблеми. Надзвичайно важливою проблемою сучасного матеріалознавства є створення матеріалів із заданими властивостями, які не властиві для природних матеріалів. Для вирішення цієї задачі, зокрема для створення композитних матеріалів, металокераміки, функціональної кераміки тощо, необхідно використовувати багатокомпонентні та багатофазні системи [1]. Доволі перспективними є багатокомпонентні системи на основі порошків.

З фізико-хімічної точки зору порошки є доволі специфічними об'єктами їх не можна розглядати лише як просту сукупність твердих частинок у повітрі чи іншому газі. Суттєвий вплив на властивості порошків має висока концентрація твердої фази, наявність високорозвиненої міжфазної поверхні і, відповідно, поверхневих явищ [2]. Розмір частинок твердої фази у порошках буде визначати величину міжчастинкової взаємодії (здатність до агрегування). Зазвичай порошки на повітрі перебувають в агрегованому стані.

Сухе замішування шихти для формування порошкових матеріалів, зважаючи на високу агрегованість вихідних порошків, призводить до утворення неоднорідної структури матеріалу та неможливості досягнути відтворюваності його властивостей під час повторного формування. Тому шихту для порошкового матеріалу формують переважно у рідкому середовищі. У цьому випадку послаблюються міжчастинкові взаємодії і порошки починають повторно диспергуватися (редиспергуватися) та утворювати більш однорідні структури [3]. Для того аби вирішити проблему однорідності порошкових матеріалів необхідно імплементувати цілу низку компромісних рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема агрегування і дезагрегування частинок є надзвичайно важливою як з погляду матеріалознавства так і з точки зору колоїдної хімії, оскільки порошки у будь-якому середовищі можна розглядати як дисперсні системи. Головний підхід до підвищення стійкості дисперсних систем, який полягає у зменшенні розміру частинок дисперсної фази, не реалізується повною мірою, коли розміри дисперсних частинок є меншими 10 мкм. Уявлення про стійкість дисперсних систем розвинулися у теорії ДЛФО. Також відома залежність між стійкістю дисперсних систем на основі порошків і щільністю упаковки цих частинок в седиментаційних осадах [4]. Однак, всі вище згадані дослідження стосувалися систем з низькою концентрацією твердої фази. Сучасні системи для створення порошкових матеріалів є високонцентрованими (пасти, гелі тощо) і подібні теорії стійкості для них повністю не розроблені. Останнім часом з'явилась ціла низка досліджень, які вивчають зв'язок між стійкістю дисперсних систем і структурою осадів, які вони утворюють [5, 6]. Порошкові структури, які утворюються під час внесення вихідних порошків у рідке дисперсійне середовище, є доволі динамічними і складними для прогнозування. Тому регулювати однорідність і відтворюваність таких

структур досить важко. Проміжні структури, які утворюються під час внесення порошків у рідке середовище, доволі складні і недостатньо вивчені. Питання регулювання властивостей суспензій обговорювалися в багатьох роботах, в яких вивчалася дія таких факторів, як: зміна дисперсності [7], поверхнево-активних речовин [8], рН середовища, йонної сили, природи дисперсійних середовищ [9] тощо.

Постановка завдань. Метою даної роботи є встановлення теоретичного зв'язку між фізико-хімічною природою дисперсного середовища, у якому формуються системи на основі порошків, та руйнуванням агрегатів з первинних частинок порошку, внаслідок просочування рідкого середовища у пори структур з агрегованих частинок.

Викладення основного матеріалу. У роботі [10] встановлено, що зазвичай первинні частинки порошків у повітрі формують агрегати, оскільки міжчастинкова взаємодія у системі висока.

Агрегованість первинних частинок у вихідних порошках можна оцінити за коефіцієнтом агрегації

$$S = \frac{|V_A|}{V_B + V_C}, \quad (1)$$

де V_A – енергія молекулярного притягання частинок; V_B – кінетична енергія броунівського руху частинок; V_C – зміна потенціальної енергії частинок під час їх руху в межах сили притягання.

Якщо $S < 1$, то частинки не схильні до зчеплення, а при $S > 1$ вони злипаються. Збільшення коефіцієнта S свідчить про інтенсифікацію процесів агрегації в порошках. Очевидно, що порошки з високими значеннями коефіцієнта агрегації складаються з агрегатів первинних частинок, які повністю або частково руйнуються під час змішування з рідинами.

На підставі визначення коефіцієнта агрегації (1) автори [10] проаналізували умови агрегації частинок і показали, що дисперсні частинки агрегуються, якщо їх діаметр знаходиться в межах від

$$d_{\min} = \frac{24H_0kT}{A} \quad \text{до} \quad d_{\max} = \left(\frac{6kT}{\pi g \rho H_0} \right)^{1/3}, \quad (2)$$

де k – константа Больцмана, T – температура, A – константа Гамакера, g – прискорення сили земного тяжіння, ρ – густина дисперсних частинок, H_0 – рівноважна відстань між частинками.

За формулами (2) можна обчислити розміри агрегатів первинних частинок на повітрі, враховуючи, що густина порошків, які використовують в порошкових технологія, коливається в межах від 2 до 6 г/см³. Константа Гамакера для порошків на повітрі лежить у межах від 3,5 до 10 кТ, Рівноважна відстань між частинками порошків набуває значень від 0,2 нм до 1 нм.

Отож, діаметри первинних частинок у більшості порошків для створення порошкових матеріалів у повітряному середовищі складають від 0,24 до 12,6 нм. Відповідно частинки з таким діаметром можуть утворювати різні за розміром агрегати: від кількох частинок в утворення до максимально можливої кількості.

Під час формування шихти порошки вносять у рідину з подальшим перемішуванням протягом певного часу до встановлення динамічної рівноваги. Під час цієї операції у системі відбуваються одночасно два паралельні процеси: з однієї сторони агрегати порошку, які сформувалися на повітрі, починають руйнуватися до менших угруповань чи, навіть, первинних частинок, а з другої сторони – утворені дрібніші угруповання чи частинки починають повторно укрупнюватися. Процеси повторного укрупнення можуть відбуватись, якщо утворена система є нестабільною.

Руйнування агрегатів первинних частинок починається із розтікання рідини по поверхні порошкового матеріалу. Внаслідок високої швидкості розтікання рідини по поверхні утворюються капсульовані ділянки порошку з повітрям. Розтікання рідини під дією капілярних сил відбувається лише тоді, коли порошки добре змочуються рідиною.

Якщо розглядати розтікання рідини по поверхні порошків, як її рух у горизонтальних капілярах, то цей процес можна описати рівнянням [5]:

$$\frac{d^2l}{dt^2} + \frac{1}{l} \left(\frac{dl}{dt} \right)^2 + a \frac{dl}{dt} - \frac{b}{l} = 0, \quad (3)$$

де $a = \frac{32\eta}{\rho d_k^2}$, $b = \frac{4(\sigma_{mz} - \sigma_{mp})}{\rho d_k} = \frac{4\sigma \cos \theta}{\rho d_k}$; η , ρ – в'язкість та густина дисперсійного середовища відповідно; d_k , l – діаметр і довжина проникнення рідин у капіляри відповідно, θ – кут змочування порошку відповідною рідиною, $\sigma_{пг}$, $\sigma_{тг}$ – поверхневий натяг на межі тверде тіло–газ, тверде тіло–рідина.

Після розв'язання диференційного рівняння (3) отримаємо:

$$l^2 = \frac{2b}{a} \left(t + \frac{\exp(-at) - 1}{a} \right). \quad (4)$$

Як видно з рівняння (4), глибина проникнення рідини у капіляри залежить від параметрів b і a за умови, що радіус капілярів однаковий та час сталий. Відповідно глибина проникнення рідини буде визначатись такими фізико-хімічними характеристиками середовища як: густина та в'язкість рідини, поверхневим натягом на межі розділу фаз рідина – тверде тіло, кутом змочування твердої фази відповідною рідиною. Зростання співвідношення b/a сприяє зростанню швидкості проникнення рідини у капіляри і тим більша ймовірність, що утворюються капсульовані ділянки порошку з повітрям. Визначальним фізико-хімічним чинником співвідношення параметрів b/a є поверхневий натяг. Чим вище значення поверхневого натягу рідини, тим менший ступінь диспергування порошку на цьому етапі. Тому, для

отримання більш диспергованих систем, потрібно використовувати рідкі дисперсійні середовища з низьким значенням поверхневого натягу.

Після первинного розтікання рідини і утворення капсул порошку з повітрям починається поступове проникнення рідкого середовища в утворені капсули порошку з повітрям. Частинки в середині агрегату поступово змочуються рідиною, послаблюються міжчастинкові взаємодії і агрегат починає розпадатися. Величину проникнення рідини в середину агрегату можна знайти за наступним рівнянням:

$$\frac{l}{L} = \frac{1}{1 + \frac{d_0 P_0}{4\sigma \cos \theta}}, \quad (5)$$

де L – максимальна довжина капіляра в середині агрегату, P_0 – атмосферний тиск.

З рівняння (5) видно, що у випадку повного змочування та за умови однакових розмірів капілярів й сталого тиску, величина проникнення рідини в середину агрегату тим більша, чим більший поверхневий натяг на межі розділу фаз.

Зважаючи на вище поданий аналіз, повторне диспергування порошоків у рідкому середовищі залежить від балансу сил як на етапі розтікання рідини по поверхні порошоків і утворення капсульованих ділянок порошку з повітрям, так і на етапі проникнення рідини в середину агрегатів.

Розтікання рідини по поверхні порошоків визначається цілим комплексом фізико-хімічних характеристик дисперсійного середовища та дисперсної фази. Під час проникнення рідини в середину агрегату визначальним чинником є величина поверхневого натягу.

Висновки. Встановлено, що більшість порошоків, які використовують у порошкових технологіях, перебувають у вигляді агрегатів різного розміру у повітряному середовищі. Розмір первинних частинок в агрегатах коливається в межах від 0,24 до 12,6 нм. Внесення порошоків у рідке дисперсійне середовище сприяє повторному диспергуванню порошоків за рахунок протікання двох послідовних процесів: розтікання рідини по поверхні порошоків і утворення капсул порошку з повітрям та проникнення рідини в середину агрегату.

Результати дослідження можуть бути використані для регулювання агрегативно-деагрегативних процесів у порошкових матеріалах за рахунок підбору найбільш оптимального за фізико-хімічними характеристиками дисперсійного середовища. Регулювання міжчастинкової взаємодії у порошках за рахунок зміни рідкого середовища дозволить покращити однорідність порошкової шихти, зменшити температуру термічної обробки та збільшити відтворюваність властивостей порошкових матеріалів.

Список використаних джерел:

1. Masuda H Powder Technology Handbook. N.Y. : CRC Press, 2006. 889 p.
2. Bansal N.P. Handbook of Ceramic Composites. Berlin/New York: Springer-Verlag, 2005. 398 p.
3. Yaremko Z.M., Tkachenko N.H., Bellmann C., Pich A. Redispersion of TiO₂ particles in aqueous solutions. J. Colloid and Interface Sci. 2006. Vol. 296. № 2. p. 565-571.
4. Nelson D. Dispersing Powders in Liquids. Amsterdam: Elsevier Science. 1988. 389 p.
5. Wasan D. Nikolov A., Mondgil D. Colloidal dispersions: Structure, stability and geometric confinement. Powder Technology. 2005. Vol. 153. № 3. p. 135-141.
6. Skorokhod V.V. Topical problems in the theory of technological processes for the nanostructured materials preparation. Functional Gradient Materials and Surface Layers Prepared by Fine Particles Technology. Dordrecht, Boston : Kluwer Academic Publishers, 2001. p. 225-238.
7. Viktor Mackert, Martin A. Schroer, Markus Winterer. Unraveling agglomeration and deagglomeration in aqueous colloidal dispersions of very small tin dioxide nanoparticles. J. Colloid and Interface Sci. Vol. 608, Part 3. 2022. p. 2681-2693. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.10.194>
8. Chia-Chen Li, Shinn-Jen Chang, Chi-Wei Wu, Cha-Wen Chang, Ruo-Han Yu. Newly designed diblock dispersant for powder stabilization in water-based suspensions. J. Colloid and Interface Sci. Vol. 506. 2017. p. 180-187. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.07.045>
9. Nadia Houta, Gisèle-Laure Lecomte-Nana, Nicolas Tessier-Doyen, Claire Peyratout. Dispersion of phyllosilicates in aqueous suspensions: Role of the nature and amount of surfactant. J. Colloid and Interface Sci. Vol. 425. 2014. p. 67-74. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2014.03.024>
10. Яремко З. М., Никипанчук Д. М., Федущинская Л. Б. Редиспергирование высокодисперсного порошка диоксида титана в водной среде. Коллоидн. журн. 2001. Т. 63, № 2. с. 280-285.

УДК 53.082.36:531.755

DOI 10.36910/775.24153966.2022.73.10

А.Я. Ганзюк, М.С. Красвська

Хмельницький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ СОРБЦІЙНОЇ ЗДАТНОСТІ КАТІОН ЗАМЩЕНИХ ФОРМ САПОНІТОВИХ ГЛИН

Досліджено вплив процесу модифікації сапонітової глини солями одновалентних катіонів, її гранулювання та сорбційні властивості отриманих гранульованих алюмосилікатів. Встановлено, що режим модифікації та параметри гранулювання зберігають сорбційні характеристики природних смектинових мінералів по відношенню до вуглеводневих сумішей. Показано, що вирішення задачі вибору методу і умов модифікації та гранулювання дозволить отримати механічно міцні і хімічно стійкі матеріали, які доцільно використати у якості фільтруючої загрузки для очищення нафтопродуктів та для їх депарафінізації. Оцінено сапонітові зразки глини за допомогою СЕМ мікроскопії, проведено рентгенофазовий та рентгенофлуорисцентний аналізи, ІЧ-спектроскопію.

Ключові слова: глинистий мінерал сапоніт, модифікація, гранулят, вуглеводнева суміш, октанове число.

Ганзюк А.Я., Краевская М.С.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОРБЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ КАТИОН ЗАМЕЩЕННЫХ ФОРМ САПОНИТОВЫХ ГЛИН

Исследовано влияние процесса модификации сапонитовой глины солями одновалентных катионов, их гранулирование и сорбционные свойства полученных гранулированных алюмосиликатов. Установлено, что режим модификации и параметры гранулирования сохраняют сорбционные характеристики природных смектиновых минералов по отношению к углеводородным смесям. Показано, что решение задачи выбора метода, условий модификации и гранулирования позволит получить механически прочные и химически стойкие материалы, которые целесообразно использовать в качестве фильтрующей загрузки для очистки нефтепродуктов и их депарафинизации. Оценены сапонитовые образцы глины с помощью СЭМ микроскопии, проведен рентгенофазовый и рентгенофлуорисцентный анализы, ИК-спектроскопия.

Ключевые слова: глинистый минерал сапонит, модификация, гранулят, углеводородная смесь, октановое число.

A. Hanzjuk, M. Kraevskaya

THE INVESTIGATION OF SORPTION CAPACITY OF SUBSTITUTED FORMS OF SAPONITE CLAYS

The influence of the process of modification of saponite clays with salts of monovalent cations, its granulation and sorption properties of the obtained granular aluminosilicates are investigated. It is established that the modification mode and granulation parameters retain the sorption characteristics of natural smectite minerals in relation to hydrocarbon mixtures. It is shown that solving the problem of choosing the method and conditions of modification and granulation will allow to obtain mechanically robust and chemically stable materials, which should be used as a filter load for purification of petroleum products and for their dewaxing. Saponite clay samples were evaluated by SEM microscopy, X-ray phase and X-ray fluorescence analyzes. Moreover, IR spectroscopy was performed.

Keywords: saponite clay mineral, modification, granulate, hydrocarbon mixture, octane number.

Постановка проблеми. Сучасна екологічна ситуація характеризується значною кількістю викидів та скидів у навколишнє середовище, що утворюються в різних галузях промисловості та сільського господарства, а також посилюється розширенням номенклатури поллютантів та збільшенням їх концентрацій. Все це формує складний комплекс екологічних проблем, наслідком яких є забруднення атмосферного повітря, погіршення стану природних водоем і деградація екосистем в цілому. Важливим фактором зменшення негативного впливу промисловості на довкілля є використання водо- та газоочисних технологій, здатних забезпечувати надійне вилучення небезпечних забруднюючих речовин за допомогою ефективних матеріалів. Серед них важливу роль відіграють адсорбенти, що використовуються на різних стадіях очищення промислових стічних вод та газових викидів. Процес сорбції є одним з ефективних методів видалення широкого спектру забруднюючих речовин (важкі метали, барвники, органічні сполуки тощо), проте поширення його використання часто обмежується економічними чинниками. Найбільш відомим та дослідженим сорбентом багатьох поллютантів є активоване вугілля, ефективність якого залежить від типу вуглецевого матеріалу, характеру забруднюючої речовини тощо. Водночас, активоване вугілля є досить дорогим матеріалом у сорбційних циклах; так, його вартість в залежності від сировини, технології, країни виробника коливається в межах від 1,5 до 20\$ США за кг. В той же час інші матеріали із сорбційними властивостями, такі як летка зола, торф, фулерові землі, оксиди мангану, бентоніти та інші мають вартість на рівні від 0,03 до 0,12\$ США за кг [1]. Отже, подальший розвиток технологій повинен бути спрямований на пошуки відносно ефективного, легкодоступного та недорогого матеріалу-сорбенту. Серед дешевих сорбентів глинисті мінерали займають одну з провідних позицій. Найбільше з багатьох природних алюмосилікатів застосовуються бентонітові (монтморилонітові) глини. На території України виявлено близько 100 родовищ бентонітових глин усіх генетичних типів. Хмельницька область – це єдиний регіон України, де розвідані поклади саме сапонітових глин з унікальними властивостями. Поклади Хмельницької групи сапонітів складають 100 млн т, найбільш розвідані Ташківське і Варварівське родовища, які мають запаси близько 60 млн т [2–3]. Попередні дослідження показали, що сапоніти володіють поліфункціональними адсорбційними

властивостями і можуть бути використані для очищення від іонних і молекулярних забруднень. Проте через фрагментарність наукових досліджень вони не знайшли широкого застосування у практиці очистки. Найбільша кількість забруднень антропогенного походження попадає в атмосферу в результаті спалювання різних видів палива, основу якого складають органічні речовини – нафта і нафтопродукти, кам'яне і буре вугілля, пальні сланці, газ, дрова, торф. Великі промислові центри створюють надфонову концентрацію зважених часток, окислів сірки й азоту, окису вуглецю на десятки та сотні кілометрів навколо себе. У великих містах і поблизу автомагістралей основне джерело забруднення приземних шарів повітря – автотранспорт. На нього приходить 90% угарного газу, що взагалі викидається в атмосферу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вихлопні гази дають одну третю вуглекислого газу, що викидається в повітря, сприяють утворенню парникового ефекту, який викликає глобальне потепління. Летючі органічні речовини, такі як поліароматичні вуглеводні та бензол, викликають утворення смогів. Викиди вуглеводнів є наслідком не повного згорання палива. Це можуть бути гази чи тверді частинки. Бензен (що потрапляє у атмосферу з вихлопами та випарами з бензобаків та бензоколонок під час заправки автомобілів) може викликати рак легень та респіраторні захворювання [4–7]. Серед методів, які успішно використовуються для очищення вуглеводневих сумішей, найбільш перспективним є сорбційна очистка на основі природних сорбентів. Це пов'язано, по-перше, з дешевизною і доступністю природних мінералів, що дозволяє їх одноразово використовувати, по-друге, природні алюмосилікати, на відміну від смол, характеризуються підвищеною вибірковістю, як до катіонів металів, так і до органічних барвників, парафінів, ароматичних сполук. Але, незважаючи на вище наведені переваги, природні алюмосилікати мають невисоку сорбційну ємність і недостатню механічну міцність, а тому їх фільтраційні характеристики низькі, і використання у динамічному режимі при високих навантаженнях є складним.

Постановка завдання. Таким чином, дослідження властивостей та наукове обґрунтування технології одержання універсальних сорбентів на основі природного мінералу сапоніту шляхом його модифікації є актуальною проблемою у природоохоронній галузі та раціональному природокористуванні. Кінцевим етапом досліджень є встановлення придатності сорбентів для конкретного технологічного процесу.

Мета роботи: модифікувати смектитову глину солями Na_2CO_3 , NaHCO_3 , NH_4Cl , $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$, оцінити поверхню глинистого мінералу за допомогою СЕМ, ІЧ-спектроскопії, рентгенофазового та рентгеноструктурного аналізів.

Предмет дослідження: технології активації та модифікації смектитової глини, фізико-хімічні та адсорбційні властивості катіон заміщених сапонітових глин.

Об'єкт дослідження: природний та катіон заміщений сапоніт.

Матеріали та методи: загально-наукові (аналіз, синтез), лабораторно-інструментальні (ІЧ-спектроскопія, рентгеноструктурний аналіз, скануюча електронна мікроскопія, елементний аналіз), статистичні. Результати одержаних експериментальних даних оцінювали з використанням прикладних програм MS Office–2016 Excel, Magallanes.

Викладення основного матеріалу.

У побуті під терміном «глина» розуміють землистий матеріал з розміром часток не більше 1 мкм і високим вмістом глинистих мінералів, який здатний давати пастоподібні маси різної консистенції. Залежно від переважаючого мінералу, конкретну глинисту породу відносять до того чи іншого типу. Так, монтморилоніт є основним мінералом бентонітових глин та відбілюючих земель (гумбрин, асканіт тощо). Окрему групу природних глин складають кремнеземисті породи – діатоміти, трепел, опоки. Природні глинисті адсорбенти є полімінеральними високодисперсними системами зі складним хімічним складом, що коливається в широких межах. Склад відбілюючих глин: SiO_2 – від 40 % до 72 %; Al_2O_3 – від 5 % до 33 %; Fe_2O_3 – від 1,2 % до 15 %; CaO – до 7 %; MgO – до 8 %; оксидів лужних та інших металів – від 4 % до 15 %, а також вода. Склад діатомітових земель, трепелів, опок: SiO_2 – від 75 % до 90 %; Al_2O_3 – від 1,5 % до 9 %; решта – оксиди Fe, Ca, Mg, K та інших металів, а також вода [4–5].

Увагу спеціалістів все більше привертають природні сорбенти, які потенційно спроможні брати участь в очищенні забруднених водоймищ від колоїдно-, молекулярно- й іонно-розчинених речовин. Завдяки пористій структурі та високорозвиненій поверхні такі мінеральні сорбенти здатні селективно вилучати з водних розчинів різні речовини, що робить можливим їх використання для потреб різних галузей промисловості [6]. Економічна доцільність їх застосування у різних технологічних процесах зумовлюється також існуванням ефективних методів регулювання їхньої геометричної структури та хімічної природи поверхні, наявністю в Україні великих промислових родовищ і невисокою вартістю глинистих мінералів. Заміна катіонів, що входять до складу монтморилоніту, на катіони великих розмірів призводить до «розкриття» міжшарового простору, який стає доступним для молекул вуглеводнів. Так, введення катіонів K^+ ,

NH_4^+ , Rb^+ в решітку піжевського монтморилоніту збільшує адсорбційну ємність цього мінералу по н-гексану в 1,5 рази, а – Cs^+ – в 4,5 рази. Сорбенти на основі сапонітової глини є дешевими і водночас ефективними відносно органічних забруднювачів, барвників, іонів важких металів. Проте сапонітова глина як сорбент широко не використовується через складність її видалення з води після процесу сорбції [8–9]. Для усунення цієї проблеми частинки глини можуть бути модифіковані магнетитом, що надасть змогу легко видалити їх із води магнітною сепарацією. У роботі [10] розроблено магнітокеровані сорбенти на основі сапоніту і магнетиту за різними схемами, представлено їх характеристику та вибір конструкції магнітного модуля.

Встановлено, що модифікація сапоніту магнетитом (2% від маси) за допомогою методу просочування надає змогу одержати мезопористі сорбенти з високими сорбційними та магнітними властивостями. Отримана адсорбційна ємність магнітокерованих сорбентів для всіх типів барвників (аніонних, катіонних і неіоногенних) становила в 1,5 - 2,5 разів більше, ніж для нативного сапоніту. Тобто, модифікація сапоніту магнетитом не тільки збільшує його магнітні властивості, але й покращує сорбційно-структурні характеристики. Магнітокерований сорбент, отриманий способом просочування, є більш ефективним при видаленні барвників із низько концентрованих розчинів. Найбільш ефективно магнітокерований сорбент видаляється в пірамідальному магнітному модулі. Як відомо, природні мінеральні сорбенти є ефективними обмінниками катіонів. Для підвищення їх сорбційної ємності по відношенню, наприклад, до органічних сполук, які дисоціюють по аніонному типу, необхідно змінити знак заряду їх поверхні. Досягти цього можна, якщо сформувати гідрооксокомплекси алюмінію або заліза на поверхні природних мінеральних сорбентів (ПМС). Для цього треба мати методику проведення роботи по зміні знаку заряду на поверхні ПМС та дослідити адсорбційні властивості сорбенту по відношенню до типових аніон-, катіоноактивних і неіоногенних органічних сполук. Обмін катіонів відбувається в еквівалентних кількостях і є оберненим. Поглинання катіонів із розчину тим сильніше, чим вища валентність катіону і проходить активніше з ростом їх концентрації в розчині [7–9].

Процес обміну іонів посилюється із ростом рН розчину. Обмін іонів виражається рівнянням ізотерми Г. Вігнера, В. Ротмунда, М. Ієні, Е.Н. Гапону, Б.Н. Нікольського. Величина і швидкість обміну іонів залежать від природи обмінних катіонів, структури глин, їх дисперсності, концентрації солей, часу взаємодії, температури, а також від природи аніона, з яким зв'язаний катіон. Тепловий ефект обмінної реакції може бути як позитивний, так і негативний. Із збільшенням атомної маси катіонів теплота поглинання збільшується. Таким чином, нашою задачею було проведення дослідження впливу розчинів солей деяких одновалентних катіонів на стан поверхні сапоніту, можливості підвищення його сорбційних властивостей щодо вуглеводневих сумішей. У роботі використано сапоніт у вигляді куска мінералу, добутого з Ташківського родовища Славутського району, Хмельницької області, при чому пробу взято усереднену з різних місць та глибини покладів. Очищений мінерал просіювали через сита різних діаметрів і для роботи в подальшому обрали сапоніт розміром 1 мм. Всі катіонні форми сапонітів готували шляхом обробки 0,5 нормальними розчинами: NH_4Cl , Na_2CO_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$, NaHCO_3 , NaCl , при перемішуванні на протязі години, при 20°C . Зразки модифікованої глини відмивали та висушували при температурі 100°C . Вологу глинисту масу (вміст вологи становив 20%) гранулювали на побутовому грануляторі ТКМ – 100. Гранули спікали при температурі 400°C протягом 2 годин. Витримали при кімнатній температурі і подрібнили для отримання мікро гранул меншого розміру, які використовували як фільтруючу загрузку у концентраційні патрони.

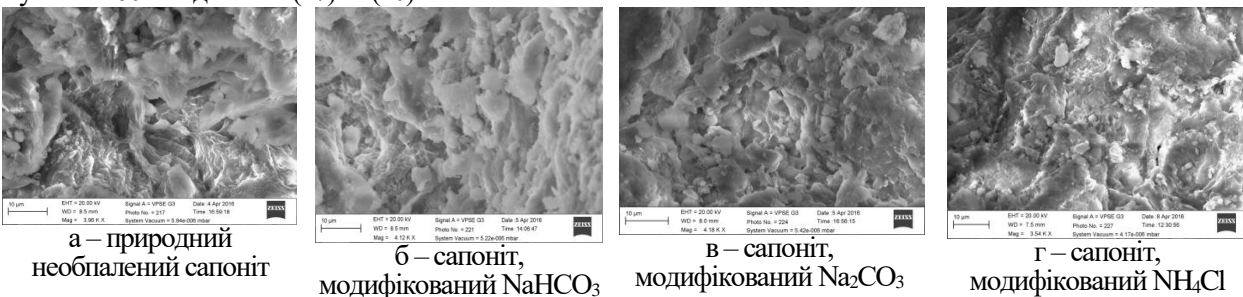
Мелений сапонітовий концентрат використали у якості вихідної сировини. Співвідношення між сапонітом і рідкою складовою (розчини солей – Na_2CO_3 , NaHCO_3 , NH_4Cl , $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$) підбирали експериментально, для того, щоб забезпечити достатню пластичність і формуючу здатність суміші. Тобто масовий вміст рідкої складової (W) підтримували на рівні 35%. Після додавання модифікатора масу перемішували на протязі часу достатнього для повної гомогенізації (10 – 15 хв). Ступінь однорідності підготовленої суміші суттєво впливає на властивості кінцевого продукту. На стадії формоутворення отримали напівфабрикат, продавлюючи підготовлену масу через фільтри методом екструзії. Цей метод найбільш простий, економічний, забезпечує отримання достатньо пористих і міцних гранул. Наступним етапом є сушіння напівфабрикату і обпалювання. Сушіння необхідне для фіксації форми гранул, а обпалювання перетворює напівфабрикат у готовий продукт, у результаті якого має місце зміцнення і ущільнення сорбційного матеріалу. Сушіння проводили при 100°C на протязі 2 годин, а обпалювання при 400°C , так як при $T > 400^\circ\text{C}$ у результаті видавлення конституційної вологи відбувається стискання міжшарового простору, що призводить до зменшення сорбційної ємності сапоніту. Обпалені гранули подрібнили, додатково просіяли і використали для подальших досліджень, а саме для визначення зміни поверхні після модифікації за допомогою методу СЕМ.

Метод електронної мікроскопії дозволяє вивчити топографію і морфології поверхні, особливості мікрогеометрії, розмір частинок і пор, що входять до складу зразка, мінеральний склад і кристалічну структуру об'єкта.

Він встановлює співвідношення різних структурних елементів, що дозволяє стверджувати про стійкість мінералу до розчинення, гідратації та сорбційної здатності поверхні. На електронно-мікроскопічних знімках (рис. 1) зображено морфологію природного сапоніту та зразків глини, модифікованої солями одновалентних катіонів, а саме NaHCO_3 , Na_2CO_3 та NH_4Cl . Вона представлена структурою у вигляді пластинчастих шарів. М'яка активація, у результаті якої відбувся іонний обмін в розчинах солей, не змінює основний структурний мотив досліджуваного матеріалу, його упаковку та розміри первинних частинок. При цьому відбувається тільки модифікація поверхні частинок глини. На рисунках, наведених нижче, зберігається морфологія поверхні сапонітової глини у вигляді пластин (для природної глини), щільно упакованих. Після модифікації солями одновалентних катіонів, масивні пластини подрібнюються на уламки різної довжини та різних поперечних розмірів.

Таким чином, високо дозволяюча здатність електронної мікроскопії визначає ступінь досконалості кристалографічних граней мікро кристалів, набір простих і складних форм і взаємну орієнтацію кристалів та пор. Дифракційні криві, що були зняті методом порошкової рентгенівської дифракції в області малих кутів, представлені на рисунках 2 – 5.

На дифрактограмі (рис.2) зразку природного необпаленого сапоніту присутні три виражених максимуми значення кута 2θ від 20° до 40° з індексами (25), (27) і (30) та два середніх піка при значеннях кута $2\theta = 60^\circ$ з індексами (17) та (20).



а – природний необпалений сапоніт

б – сапоніт, модифікований NaHCO_3

в – сапоніт, модифікований Na_2CO_3

г – сапоніт, модифікований NH_4Cl

Рис.1. – Мікрофотографії зразків сапонітів

На дифрактограмі (рис. 4) зразка сапоніту, модифікованого Na_2CO_3 – три максимуми значення кута 2θ від 20° до 40° з індексами (30), (38) і (33) та середній при значенні кута 60° з індексом (20). На рисунку 5 зразка сапоніту, модифікованого NH_4Cl наявні чотири виражених піка значення кута 2θ від 20° до 60° з індексами (18), (19), (20) і (17). Загалом, після модифікації солями одновалентних катіонів структура глини стала частково аморфною.

На рисунку 3 зразка сапоніту, модифікованого NaHCO_3 наявні три виражених максимуми значення кута 2θ від 20° до 40° з індексами (30) і (33) та два середніх при значеннях кута 55° і 60° з індексами (15) і (20).

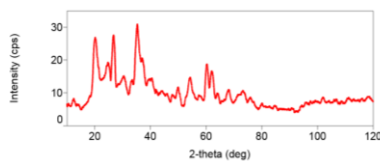


Рис. 2. – Дифрактограма зразка природнього необпаленого сапоніту

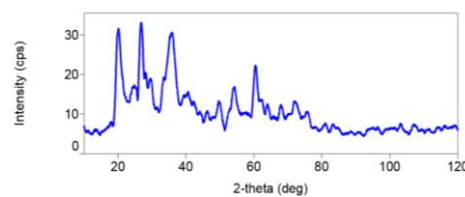


Рис. 3. – Дифрактограма зразка сапоніту, модифікованого NaHCO_3

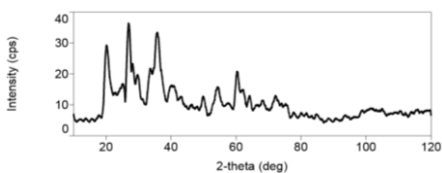


Рис. 4. – Дифрактограма зразка сапоніту, модифікованого Na_2CO_3

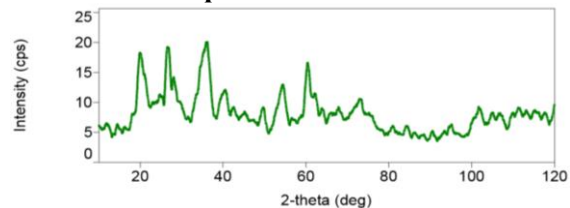


Рис. 5. – Дифрактограма зразка сапоніту, модифікованого NH_4Cl

Рентгенофлуоресцентний аналіз – метод аналізу спектрів флюоресценції елементів, при адсорбції високоенергетичного випромінювання. Один із сучасних спектроскопічних методів дослідження речовини з метою отримання його елементного складу, тобто його елементного аналізу. Завдяки цьому методу аналізу досліджено чотири зразка смектитової глини: природний та модифіковані солями NaHCO_3 , Na_2CO_3 , NH_4Cl .

Результати наведені у таблицях 3.1 – 3.4. Таким чином, результати рентгенофлуорисцентного аналізу показали, що у всіх зразках сапонітових глин найбільший вміст SiO_2 , і становить в середньому 49%, Al_2O_3 – 14%, Fe_2O_3 – 25%.

ІЧ спектри мінералу сапоніту є його індивідуальною характеристикою. Він представляє собою набір смуг поглинання і залежить від маси і взаємного розміщення іонів в кристалі, а також від характеру між- і внутрішньо іонних взаємодій.

Табл. 1.

Елементний склад, вміст оксидів у зразках природної та катіон заміщених смектитових глин (мас. %)

Зразок	O	Mg	Al	Si	Ca	Ti	Mn	Fe	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MnO_2	SiO_2	TiO_2	MgO
Сапоніт природний	45,403	4,778	8,345	23,677	2,441	1,092	0,163	14,100	13,862	2,235	23,737	0,287	49,518	1,949	8,875
модифікований NaHCO_3	45,133	4,924	7,368	23,661	1,740	1,168	0,173	15,833	13,922	2,435	22,637	0,274	50,619	1,949	8,165
модифікований Na_2CO_3	44,691	5,281	6,988	22,868	1,436	1,137	0,187	17,355	13,203	2,010	24,813	0,296	48,921	1,896	8,758
модифікований NH_4Cl	44,720	5,085	7,640	22,478	1,297	1,134	0,202	18,578	14,435	26,562	8,433	0,320	48,087	2,163	8,689

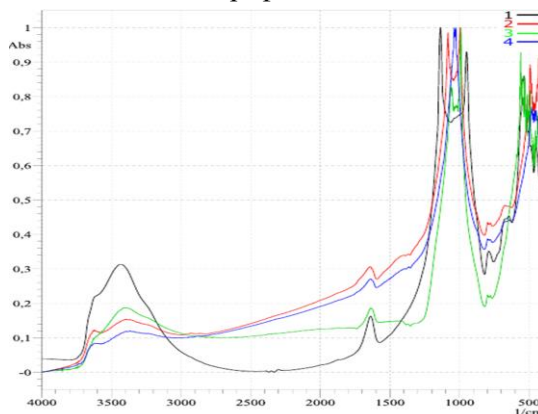
Чим міцніший зв'язок, а також, чим менші маси атомів, тим вища частота поглинання даного зв'язку, тобто, тим більше енергії потрібно затрати на його коливання. Активними в ІЧ спектрах є тільки ті коливання, в процесі яких змінюється дипольний момент молекули або складного іона. Для ідентифікації ІЧ спектрів потрібно знайти відповідність між положенням смуг поглинання і наявністю окремих структурних елементів. Результати ІЧ-спектроскопії наведені на рисунку 6. Наявність адсорбованої води визначено по смузі 1639 cm^{-1} ; таким чином, відбувається послаблення смуги деформаційних коливань молекул сорбованої води, що вказує на видалення відповідної кількості гідрофільних домішок. Наявність оксигено-кремнієвих ланцюгів - Si-O-Si- у структурі природного та модифікованого сапонітів доведена коливаннями з частотою від 674 cm^{-1} до 780 cm^{-1} , -O-Si-O- з частотою $530 - 537 \text{ cm}^{-1}$, а -Si-O- з частотою $945 - 990 \text{ cm}^{-1}$ [11-15]. Ймовірно, при модифікації смектитових глин одновалентними катіон заміщеними солями відбуваються зміни у їх складі та структурі на фоні незначного збільшення гідрофобності поверхні матеріалу та зростання його пористості.

Таким чином, у роботі проведено критичний огляд літератури та патентний пошук згідно досліджуваної тематики, сформульовано актуальність та основні завдання, які потрібно виконати. Зміну поверхні смектитової глини, модифікованої одновалентними катіон заміщеними солями оцінено за допомогою СЕМ мікроскопії. Констатовано морфологію поверхні сапонітової глини у вигляді пластин, які щільно упаковані (для природної глини).

Після модифікації солями одновалентних катіонів, масивні пластини подрібнюються на уламки різної довжини та різних поперечних розмірів. Результати рентгенофазового аналізу довели, що після модифікації солями одновалентних катіонів сапонітова глина набуває аморфної структури, що доведено наявністю чотирьох виражених піка значення кута 2θ від 20° до 60° з індексами (18), (19), (20) і (17).

Результати рентгенофлуорисцентного аналізу показали, що у всіх зразках досліджуваних глин найбільший вміст SiO_2 становить в середньому 49%, Al_2O_3 – 14%, Fe_2O_3 – 25%.

При модифікації сапонітів одновалентними катіон заміщеними солями відбуваються зміни у складі та структурі смектиту на фоні незначного збільшення гідрофобності поверхні матеріалу та зростання його пористості: за допомогою ІЧ-спектроскопії ідентифікована наявність адсорбованої води, яку визначили по смузі 1639 cm^{-1} ; таким чином, відбувається послаблення смуги деформаційних коливань молекул сорбованої води, що вказує на видалення відповідної кількості гідрофільних домішок.



1 – природний сапоніт; 2 – сапоніт, модифікований NH_4Cl ; 3 – сапоніт, модифікований Na_2CO_3 ; 4 – сапоніт, модифікований $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$.

Рис.6. – ІЧ спектри природних та модифікованих форм сапонітових глин

Список використаних джерел:

1. Structural, Mineral and elemental composition features of iron-rich saponite clay from Tashkiv deposit (Ukraine) / H. Sokol, M. Sprynskyu, A. Ganzyuk та ін. // *Colloids and Interfaces*. – 2019. – №3. – P. 10.
2. Сокол Г. М. Отримання гідрофобних органомінеральних сорбційних матеріалів на основі сапоніту / Г. М. Сокол, А. Я. Ганзюк // *Наукові нотатки*. – 2017. – Вип. 58. – С. 288-294.
3. Сокол Г. М. Структурна модифікація сапонітових глин кислотною обробкою / Г. М. Сокол // *Наукові нотатки*. – 2017. – Вип. 56. – С. 149-153.
4. Ганзюк А. Модифікація сапонітових глин поверхнево-активними речовинами / А. Ганзюк, С. Карван, Г. Дейчук, Х. Ганзюк // *Вісник Львівського університету. Серія хімічна*. – 2015. – Вип. 56(1). – С. 1 Deichuk (Sokol) G. Organic-mineral sorption materials on the basis of saponite clay / G. Deichuk (Sokol), A. Ganzyuk, Ch. Ganzyuk // *Abstracts: Workshop with Nobel Prize Winner Professor Erwin Neher. Progress in biomedicine and neuromedicine. Poland, Cracow, 21–23 June*. – 2015. – P. 115-116.86-191.
5. Kratochvil D. Advances in the biosorption of heavy metals / D. Kratochvil, B. Volesky // *Trends. Biotechnol.* – 1998. – Vol. 16, No. 7. – P. 291.
6. Wilson M. *Rock-Forming Minerals, Sheet Silicates: Clay Minerals* / M. Wilson. – Bath : Geological Society, 2013. – 736 p.
7. Композиционные наноматериалы на основе кислотно-активированных монтмориллонитов / В. П. Финевич, Н. А. Аллерт, Т. Р. Карпова, В. П. Дуплякин // *Рос. хим. журн. им. Д. И. Менделеева*. – 2007. – Вып. 4 – С. 70-74.
8. Українські дисперсні мінерали в процесах очищення стічних вод / В. В. Співак, М. М. Бабчук, І. М. Астрелін, О. Ф. Алексєєв // *Збірник матеріалів II-го Всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю [Електронний ресурс]*. – Режим доступу : <http://eco.com.ua/content/ukrainski-dispersni-minerali-v-protsesakh-ochishchennya-stichnikh-vod> (дата звернення 11.04.2019).
9. Gebretsadik F. B. Use of polymer as template in microwave synthesis of saponite. Study of several factors of influence / F. B. Gebretsadik, P. Salagre, Y. Cesteros // *Applied Clay Science*. – 2014. Vol. 87. – P. 170–178.
10. Khumchoo N. Formation of zinc oxide particles in cetyltrimethylammonium-smectites / N. Khumchoo et al // *Applied Clay Science*. – 2015. Vol. 105–106. – P. 236–242.
11. Trujillano R. Saponites containing divalent transition metal cations in octahedral positions — Exploration of synthesis possibilities using microwave radiation and NMR characterization / R. Trujillano, E. Rico, M. A. Vicente, V. Rives, I. Sobrados, J. Sanz // *Applied Clay Science*. – 2015. Vol. 115. – P. 24–29.
12. Дослідження процесів очищення нафтопродуктів за допомогою активованих смектинових глин / А. Я. Ганзюк, Д. М. Вишнеvsька, Н. Л. Похило [та ін.] // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. – 2019. – №1. – С. 82-90.
13. Стремєцький О. І. Дослідження корозії низьковуглецевих сталей у водних розчинах в присутності сапоніту / О. І. Стремєцький, Г. М. Сокол // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. – 2016. – № 5. – С. 38-42.
14. Ганзюк А. Модифікація сапонітових глин поверхнево-активними речовинами / А. Ганзюк, С. Карван, Г. Дейчук, Х. Ганзюк // *Вісник Львівського університету. Серія хімічна*. – 2015. – Вип. 56(1). – С. 186-191.
15. Дослідження процесів очищення нафтопродуктів за допомогою активованих смектинових глин / А. Я. Ганзюк, Д. М. Вишнеvsька, Н. Л. Похило [та ін.] // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. – 2019. – №1. – С. 82-90.

УДК 004.94

DOI 10.36910/775.24153966.2022.73.11

О. І. Сидоренко

науковий співробітник

Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

<https://orcid.org/0000-0002-3584-4380>

ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ РОЗШИРЕННЯ СПЕКТРУ ДІЇ BLUETOOTH

У статті розкрито інноваційні технології розширення спектру дії Bluetooth. Здійснено огляд специфіки формування спектру охопту сигналу. Структуровано механізм дії мережі Bluetooth, яка дозволяє передавати інформацію між своїми вузлами через фізичний рівень, при цьому вузли мережі ретранслюють повідомлення і динамічно працюють для транспортування інформації по мережі. Підкреслено, що для налаштування мережі, кожен пристрій повинен транслювати список доступних пристроїв у межах свого діапазону та оновлювати власну таблицю доступних пристроїв відповідно до цього списку. Наголошено, що проміжні пристрої динамічно вибирають шлях, через який пересилається повідомлення, залежно від трафіку та доступності пристроїв, дана процедура працює у випадку розгортання масштабних мереж передачі даних на базі Bluetooth, де обов'язковим є наявність ретрансляторів, тобто здійснення процедури передачі даних через мережу з повторною ретрансляцією з метою розширення останніх по всій мережі. Зазначено, що враховуючи нестабільність та змінюваність структури кожного набору повідомлень технологія Bluetooth використовує деякі параметри та процедури для контролю та регулювання надійності та ефективності передачі даних, до яких віднесено: процедуру передачі повідомлень через мережу; процедуру прийому та одночасної передачі повідомлень через мережу Bluetooth; процедуру публікації повідомлень; процедуру випадкової затримки. Наведено архітектуру запропонованої технології розширення спектру дії Bluetooth, яка ґрунтується на залученні проміжних пристроїв між відправником і одержувачем. Алгоритм маршрутизації, що діє у рамках запропонованої мережі – це алгоритм маршрутизації вектора відстані. Підкреслено, що визначення рівня отриманого сигналу при пересиланні повідомлення ґрунтується на отриманому рівні фільтрації, а фільтрація за медіаною, формується як метод нелінійної фільтрації даних. Зазначено, що для підвищення якості визначення наявного рівня діапазону спектра, константу та індекс втрат на шляху потрібно оптимізувати для отримання значень параметрів, які відповідають впливу навколишнього середовища.

Ключові слова: мережа, Bluetooth, передача даних, спектр, діапазон, пристрій, трафік, прискорення.

O. Sydorenko

INNOVATIVE TECHNOLOGIES TO EXPAND THE RANGE OF BLUETOOTH

The article reveals innovative technologies to expand the range of Bluetooth. A review of the specifics of the formation of the signal coverage spectrum. The mechanism of operation of the Bluetooth network is structured, which allows to transfer information between its universities through the physical layer, while the network universities relay messages and work dynamically to transport information over the network. It is emphasized that to set up a network, each device must broadcast a list of available devices within its range and update its own table of available devices according to this list. It is emphasized that intermediate devices dynamically choose the path through which the message is sent, depending on the traffic and availability of devices, this procedure works in the case of large-scale data transmission networks based on Bluetooth, where repeaters are required. with retransmission in order to expand the latter throughout the network. It is noted that given the instability and variability of the structure of each set of messages, Bluetooth technology uses some parameters and procedures to control and regulate the reliability and efficiency of data transmission, which include: procedure for transmitting messages over the network; procedure for receiving and simultaneously transmitting messages via Bluetooth; the procedure for publishing messages; accidental delay procedure. The architecture of the proposed technology to expand the range of Bluetooth, which is based on the involvement of intermediate devices between sender and receiver. The routing algorithm operating within the proposed network is a distance vector routing algorithm. It is emphasized that the determination of the level of the received signal when sending a message is based on the received level of filtering, and the median filtering is formed as a method of nonlinear data filtering. It is noted that in order to improve the quality of determining the existing level of the spectrum range, the constant and the index of losses along the way should be optimized to obtain values of parameters that correspond to environmental influences.

Key words: network, Bluetooth, data transfer, spectrum, range, device, traffic, acceleration.

Вступ та постановка завдання. Технологія Bluetooth була розроблена у 1994 році Японом Хаартсенном із Голландії та направлена на заміну телекомунікаційних кабелів RS-232 з використанням ультрависоких хвиль малого радіусу дії від 2,4 до 2,485 ГГц. З кожним роком Bluetooth поступово розвивався, та у 2020 році вийшла, остання на сьогодні версія 5.2. Фундаментальною основою покладеною на початок розробки Bluetooth була заміна з'єднувальних кабелів між навушниками та комп'ютерами на стільниковий телефон.

Bluetooth, як бездротова технологія передачі даних розвивалась на протязі останніх 30 років, покращуючи свою продуктивність, пропускну здатність, потужність, діапазон, надійність та енергоефективність. Введенні оновлення та поправки дозволяли технології збільшуватися у

швидкості, універсальності та діапазоні дії. Одним з останніх представлень став Bluetooth Mesh Profile (BMP), що зробив технологію Bluetooth придатною для широкого спектру застосувань. Проте, модернізація деяких параметрів та коригування механізмів дії накладають обмеження на загальну продуктивність технології.

Питання подолання зазначених обмежень та підвищення ефективності використання нових переваг модернізованої версії Bluetooth є першочерговим завданням в умовах сьогодення. В рамках інноваційних технологій пропонується модифікація поточного стеку протоколів, щоб дозволити передачу більших структур даних.

Враховуючи, той факт, що на сьогодні, Bluetooth є повсюдно поширеним у мобільних телефонах, комп'ютерах, годинниках, автомобілях, медичних пристроях, датчиках тощо, ця технологія є максимально необхідною та актуальною в умовах масового поширення пандемії Covid-19, так як дає змогу відстежувати випадки зараження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Залежно від підходів, завдань та принципів реалізації напрямки розширення спектру дії Bluetooth, як і механізми його апаратної реалізації розглядало чимало як зарубіжних так і вітчизняних вчених.

О.Р. Севост'янов, І.С. Скарга-Бандурова та О.В. Ардель [1] проаналізували основні причини перешкод під час передачі даних через Bluetooth та запропонували шляхи поліпшення точності сигналу для використання в системі позиціонування в середині приміщень.

Вбудовану локальну комп'ютерну мережу wi-fi з конфігуруванням за допомогою технології Bluetooth дослідили А. О. Мельник, Д. В. Лихотоп, А. В. Гребеняк [2]. Науковцями запропоновано використовувати технологію Bluetooth Low Energy (BLE) як додатковий канал для конфігурації мережі, а саме: налаштування назви безкабельної мережі, паролю доступу, режимів функціонування модуля (автовизначення, точка доступу, станція), режимів шифрування, обмеження доступу з інших пристроїв, незалежно від налаштувань режиму роботи модуля в цей час. Розглянуто верхні рівні стека протоколів Bluetooth (GAP, GATT), специфікацію та основні аспекти для побудови пристрою на BLE.

У роботі [3] Л. К. Гліненко та Ю. А. Дайновський проаналізували інваріантні структурні складові різних модифікацій цього шаблону та значення, яких набувають у них такі складові, як: зміст пропозиції цінності, модель отримання доходу, ключові ресурси та партнери в екосистемі IoT. Авторами систематизовано пропозиції цінності, ґрунтовані на специфіці IoT, виявлено основні функції IoT у цих пропозиціях та типи пристроїв IoT, необхідні для їх підтримки. При цьому у роботі запропоновано впровадження Bluetooth, як основи у реалізації контакту з клієнтом.

К.О. Домрачева, Н.М. Довженко та В.В. Дмитренко [4] здійснили структурний аналіз технологій та стандартів зв'язку для мережі IOT, окремий наголос здійснив на застосування технології Bluetooth.

Із зарубіжних авторів варто відзначити такі роботи як: Sharma Pooja [5], Lu, Xingyu & Yin Yufang & Zhao Na & Wei Hua [6], Peng Demei & Peng Liangfu & Yang Yingying [7], Kaisar Marilia [8], P. Raja & Singh Dushyant & Jerath Himani [9], Zhao Peng & Wang Lei & Tian Yu & Guo Linlin & Lu Bingxian [10], Sauter Martin [11], James Alice & Seth Avishkar & Mukhopadhyay Subhas [12], Salah Khaled [13], Honnalli Shashidhar & Prasad Golla [14], Yang Deng & Wang Jian & Wang Minmin & Han Houzeng & Zhang Yalei [15], Nilsson Daniel & Yan Wenqing [16], Liu Chendong & Zhang Yilin & Zhou Huanu [17], Cho Hsun-Wei & Shin Kang [18] та інші.

Проте, враховуючи описані наукові набутки, за темою, питання розкриття інноваційних технологій розширення спектру дії Bluetooth залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

Постановка завдання. Розкрити механізми інноваційних технологій розширення спектру дії Bluetooth.

Викладення основного матеріалу дослідження. Мережа Bluetooth дозволяє передавати інформацію між своїми вузлами через фізичний рівень, при цьому вузли мережі ретранслюють повідомлення і динамічно працюють для транспортування інформації по мережі. Кожен новий пристрій, приєднаний до мережі обов'язково має бути авторизованим. Процес авторизації забезпечує початкову конфігурацію та облікову систему безпеки. Після ініціалізації пристрій називається вузлом, і він дозволяє передавати та отримувати повідомлення. Розширення дії діапазону передачі даних здійснюється шляхом введення пристрою посередника (рис. 1), який має доступ до всіх пристроїв мережі поєднуючи їх.

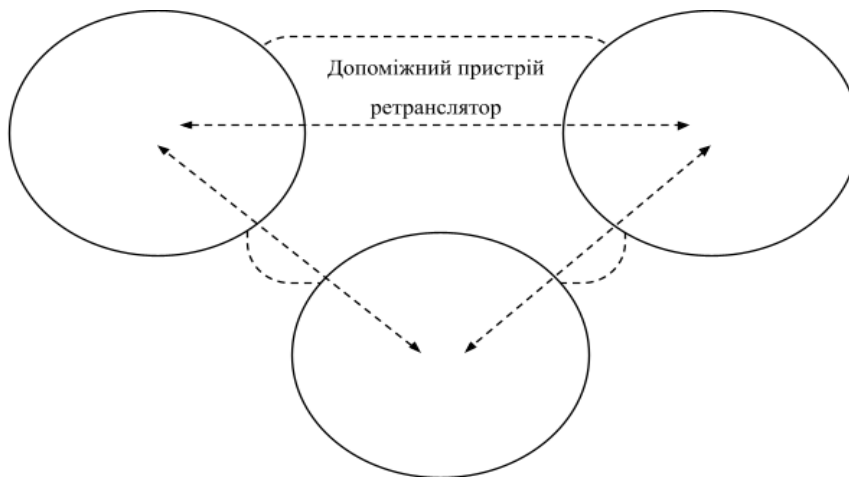


Рис. 1. Схема розширення діапазону передачі даних у мережі Bluetooth за допомогою проміжного пристрою

Першим кроком розширення є створення мережі. Щоб налаштувати мережу, кожен пристрій транслює список доступних пристроїв у межах свого діапазону, оновлює свою таблицю доступних пристроїв відповідно до цього списку.

Також кожен окремих пристрій складає список інших пристроїв, до яких можна отримати прямий або опосередкований доступ. Якщо пристрій бажає надіслати повідомлення на інший пристрій у цьому списку, він через пристрій-посередник знаходить шлях, через який можна досягти пункту призначення, і пересилає повідомлення до першого пристрою на шляху. Але проміжні пристрої динамічно вибирають шлях, через який пересилається повідомлення, залежно від трафіку та доступності пристроїв, дана процедура працює у випадку розгортання масштабних мереж передачі даних на базі Bluetooth, де обов'язковим є наявність ретрансляторів, тобто здійснення процедури передачі даних через мережу з повторною ретрансляцією з метою розширення останніх по всій мережі. Реалізуючи повторну передачу перевіряються два основних параметра: поле Time To Live (TTL), яке присутнє у всіх повідомленнях, та кеш мережеских повідомлень. TTL вказує на кількість разів, коли повідомлення може бути передане, а кеш попереджає передачу раніше отриманих відомостей.

Враховуючи нестабільність та змінюваність структури кожного набору повідомлень технологія Bluetooth використовує деякі параметри та процедури для контролю та регулювання надійності та ефективності передачі даних:

1. процедура передачі повідомлень через мережу. Окреслена процедура здійснює контроль за кількістю переданих даних, згенерованих у вихідному вузлі, та інтервалі між ними. Головними параметрами для контролю є мережева кількість переданих даних (МКПД) і мережевий інтервал. МКПД – це три розрядний параметр, який коливається від нуля до десяти, тому одне повідомлення можна передати до 8 разів, залишаючи між ними пробіл, рівний інтервалу мережі та випадкову затримку. Варто наголосити, що значення МКПД = 0 означає, що це лише одне повідомлення. Для вищого значення кожна передача є аналогічною початковою, включаючи порядковий номер. Мережевий інтервал залежить від іншого 5-бітового параметра під назвою «Кроки інтервалу передачі мережі» (КППМ), який коливається від 0 до 31. Остаточний мережевий інтервал розраховується за допомогою кроків у 10 мс, тобто $(КППМ+1) \cdot 10$ мс. Отже, теоретичний інтервал мережі курсує між значеннями від 10 до 320 мс. Проте, мінімум не повинен бути меншим за мінімальний інтервал, який становить 20 мс.;

2. процедура прийому та одночасної передачі повідомлень через мережу Bluetooth. Дана процедура здійснює контроль, за тим, скільки раз пакет має бути повторно переданий ретранслятором та інтервал надісланих пакетів у екрані мережі передачі. Заданими параметрами, що контролюються є кількість повторних передач (КППР) та інтервалу ретрансляції (IP);

3. процедура публікації повідомлень. Зазначена процедура вказує на кількість разів, що має бути опубліковане одне повідомлення (ООП) і час між цими публікаціями. Процедура публікації повідомлень виводить на скільки разів більше здійснюється передача, публікуючи одне й те саме $(0 \leq ООП \leq)$. Кожна публікація також має відповідати процедурі передачі в мережі. Таким чином, повідомлення можна надіслати до 64 разів $((ООП+1) \cdot (МКПД+1))$. Проте, варто зауважити, що повідомлення направлені на публікацію не є однаковими, та кожна окрема

публікація має свій унікальний номер. Інтервал між публікаціями по 50 мс із функцією «Публікація кроку інтервалу повторної передачі» (ПКІПП) у діапазоні від 0 до 31, зберігаючи кінцеве значення від 50 мс до 1600 мс.;

4. процедура випадкової затримки. Реалізується щоб уникнути зникнення профілю сітки, така процедура також вимагає введення випадкової затримки передачі, яка має типові значення, отримані з базових специфікацій для цієї затримки та становить 10 мс.

З проведеного огляду процедур та параметрів, які діють на передачу з використання технології Bluetooth варто підкреслити, що більшість із наведених процедур застосовуються на рівні мережі (передача, ретрансляційна передача, випадкова затримка) або (повторна передача публікації). Проте, окрему увагу варто приділити шару мережі, який відповідає за зберігання інформації, тобто шару носію інформації.

Рівень даного шару визначає, як транспортувати мережеві повідомлення між вузлами. Наразі для технології Bluetooth визначено два носія: носій GATT (Generic Attribute) і носій AB (advertising bearer).

Пристрої мережі, які задіяні у передачі даних та не підтримують профіль Bluetooth, можуть використовувати носій GATT для зв'язку з мережею через проксі-вузол. І, з іншого боку, коли є можливість включити профіль сітки в стек пристроїв, слід використовувати AB.

Фактично в специфікаціях зазначено, що AB повинен використовувати ненаправлені події, які не підключаються та не скануються. Це залишає можливості для використання нових розширень. Отже, ця структура розроблена з припущенням використання оригінальних і найбільш обмежувальних індикацій для підтримки сумісності з пристроями різних версій.

Архітектура запропонованої технології розширення спектру дії Bluetooth ґрунтується на залученні проміжних пристроїв між відправником і одержувачем. Таким чином, повідомлення від джерела, яке є головним транслятором даних/інформації надходить до одного або кількох проміжних пристроїв, нарешті, потрапляє в пункт призначення. Зазвичай, у класичній теорії це розглядається як архітектура клієнтського сервера. Пристрій, який надсилає дані, є клієнтом, а той, що отримує дані – сервером. Клієнтський вузол розширює свою мережу, шукаючи пристрій з підтримкою Bluetooth у своєму діапазоні. Усі пристрої продовжують цей пошук пристроїв у діапазоні, доки не буде досягнуто точки кінцевого призначення. Модель технології розширення спектру дії Bluetooth представлена на рисунку 2.

Загальна масштабована мережа підвищеного спектру дії складається з пристроїв меншої швидкості, які формують загальну структуру. Алгоритм маршрутизації, що діє у рамках наведеної мережі – це алгоритм маршрутизації вектора відстані. Дія алгоритму полягає у тому, що вузол мережі який є головним транслятором даних/інформації вступає у дію та може отримати прямий доступ до своїх безпосередніх сусідів тобто додаткових вузлів мережі. Кожен окремих вузол створює список вузлів, до яких можна отримати доступ, тобто тих вузлів, які знаходять у безпосередній спектральній близькості.

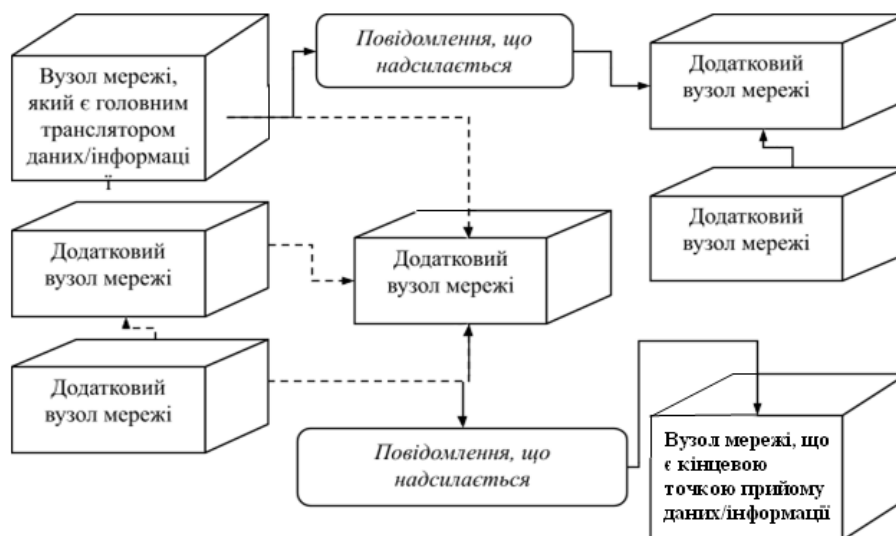


Рис. 2. Модель технології розширення спектру дії Bluetooth

Кожен вузол стабільно надсилає кожному сусіду, який означений у близькості, поточне уявлення про загальну вартість маршруту пересилання повідомлення до досягнення кінцевої точки призначення, вартість такого пересилання ґрунтується на кількості вузлів, які лежать на шляху. Сусідні вузли перевіряють цю інформацію та відповідно оновлюють свою таблицю маршрутизації. З часом усі вузли мережі знайдуть найкращий наступний перехід для всіх пунктів призначення та найкращу загальну вартість повного маршруту для здійснення трансляції у мережі Bluetooth.

У випадку, якщо вузол хоче надіслати повідомлення іншому вузлу в мережі, спочатку він перевіряє, чи цей вузол знаходиться в діапазоні відправника тобто чи підпадає під діапазон спектру дії. Якщо так, то він може безпосередньо надсилати повідомлення, інакше він встановить шлях до місця призначення через проміжні пристрої.

Під час будь-якої передачі даних Bluetooth вузли не є фіксованими, тому будь-який вузол може вийти з мережі, а новий вузол може з'явитися в будь-який час. Якщо до мережі додається будь-який вузол, він знаходить своїх безпосередніх сусідів і готує таблицю маршрутизації, що є обов'язковою умовою дії. І ця таблиця маршрутизації надсилається всім вузлам, які можуть бути безпосередньо доступними. Якщо будь-який вузол бажає вийти з мережі, він надсилає повідомлення про відкликання своїм безпосереднім вузлам. В обох випадках усі вузли відповідно оновлюють свою таблицю маршрутизації та направляють її усім задіяним одиницям.

У випадку, коли вузол надсилає пакет іншому вузлу в мережі, та якщо інформація досягає кінцевої точки призначення, він надсилає підтвердження про завершення циклу відправок. У разі, якщо відправник не отримує підтвердження до вимкнення таймера, процес виявлення маршруту повторюється. Відправник повинен відправити той самий пакет іншим найкоротшим маршрутом, якщо поточний маршрут не існує. Вибір шляху має вирішальне значення, і його вибір залежить від критеріїв найкоротшого шляху та критеріїв балансування навантаження.

Визначення рівня отриманого сигналу при пересиланні повідомлення ґрунтується на отриманому рівні фільтрації. Середня фільтрація означає, що вузол обчислює середнє арифметичне набору отриманих значень тобто відбувається ідентифікація потужності отриманого сигналу (ШОС), як показано в рівнянні (1), а середнє значення використовується як результат вимірювання. Коли кількість вибірок n велика або значення коливання сигналу ШОС дуже мале, проблему випадковості даних ШОС можна вирішити, але коли кількість вибірок невелика або значення ШОС сильно коливається, достовірність знижується.

$$\overline{\text{ШОС}} = 1/n \sum_{i=1}^n \text{шос}_i.$$

Фільтрація за медіаною, формується як метод нелінійної фільтрації даних. У разі одновимірних даних медіанним фільтром є вікно, що містить непарну кількість даних. Після обробки даних, у якості кінцевого результату виводиться середнє значення вікна. Припустимо, що потужність сигналу, отриманого на відстані від вузла мережі, який є головним транслятором даних/інформації d , становить ШОС₁, ШОС₂, ШОС₃, ШОС_n, а n – довжина вікна фільтра, виконуємо медіанну фільтрацію для цієї послідовності. Результат фільтрування наведено у рівнянні (2). Медіанний фільтр значною мірою усуває вплив на кінцевий результат вимірювання, але коли кількість вибірок невелика або значення ШОС сильно коливається, результат фільтрації методу фільтрації за медіаною не дуже ефективний.

Під час поширення бездротових сигналів, які є основою мережі передачі даних Bluetooth сила сигналу буде поступово слабшати зі збільшенням відстані. Тому, пропонується використовувати логарифмічну модель загасання відстані для потужності отриманого сигналу ШОС, а модель передачі має вигляд:

$$P(d) = P(d_0) - 10n \lg \left(\frac{d}{d_0} \right) + \varepsilon$$

де d_0 – еталонна відстань; d – відстань між вузлом мережі який є головним транслятором даних/інформації і вузлом мережі який є кінцевою точкою прийому даних/інформації; $P(d_0)$ – потужність сигналу, отриманого вузлом мережі який є кінцевою точкою прийому даних/інформації, коли відстань дорівнює d_0 ; $P(d)$ – сигнал, отриманий вузлом мережі який є кінцевою точкою прийому даних/інформації, коли відстань дорівнює d ; n – індекс втрат на маршруті, який тісно пов'язаний з навколишніми факторами навколишнього середовища, зазвичай отримують з фактичного вимірювання; ε – ефект загасання, що є випадковою величиною із середнім значенням нуль і дисперсією нормального розподілу Гауса.

Фактична потужність отриманого сигналу $P(d)$ може бути виражена значенням ППС. Формула моделі втрат на шляху логарифмічної відстані перетворюється у відповідну форму значення ППС та має вигляд:

$$\text{ОПС} = A - 10n \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + \varepsilon$$

де $\text{ОПС} = P(d)$; $A = P(d_0)$; ОПС і A – це значення сили ОПС , отримані на відстані між вузлом мережі який є кінцевою точкою прийому даних/інформації і вузлом мережі який є головним транслятором даних/інформації, d і d_0 відповідно.

Для підвищення якості визначення наявного рівня діапазону спектра, константу A та індекс втрат на шляху n потрібно оптимізувати для отримання значень параметрів, які відповідають впливу навколишнього середовища. Значення константи A та значення індексу втрат на шляху n оцінюється за принципом найменших квадратів, а дані, що відповідають ОПС_{d_i} і відстані d_i , отримуються відповідно до значення вимірювання ОПС після процесу фільтрації.

Таким чином, при масштабуванні мережі підвищеного спектру дії Bluetooth однією з головних умов є скорочення часу на запити між вузлами мережі та зниження рівня шуму, а також підвищення якості визначення наявного рівня діапазону спектра з метою реалізації швидкої та якісної передачі даних/інформації у бездротовій мережі.

Висновки. У роботі розкрито інноваційні технології розширення спектру дії Bluetooth. Наведені пропозиції реалізуються через масштабування мережі за рахунок встановлення додаткових вузлів передачі та визначенні рівню отриманого сигналу. У загальному випадку запропонована технологія призведе до швидкої та якісної передачі даних/інформації у бездротовій мережі за рахунок підвищення якості визначення наявного рівня діапазону спектра, скорочення часу на запити між вузлами мережі та зниження рівня шуму.

Перспективами подальших досліджень є розробка стратегії направленої на модернізацію Bluetooth шляхом встановлення розподіленого приймача з розширеним спектром сигналу.

Список літератури

1. Севост'янов О. Р. Відстеження RSSI з bluetooth-маяків для поліпшення точності позиціонування в приміщенні / О. Р. Севост'янов, І. С. Скарга-Бандурова, О. В. Ардель // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2018. – № 6. – С. 154-159. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VISUNU_2018_6_29.
2. Мельник А. О. Вбудована локальна комп'ютерна Wi-Fi мережа з конфігуруванням за допомогою технології Bluetooth / А. О. Мельник, Д. В. Лихотоп, А. В. Гребеняк // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Комп'ютерні системи та мережі. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2017. – № 881. – С. 66–86.
3. Гліненко Л.К., Дайновський Ю.А. Формування бізнес-моделей Інтернету речей за шаблоном ВМС / Маркетинг і цифрові технології, 2021. Том 5. № 1. С. 42-73.
4. Домрачева К. О. Аналіз технологій та стандартів зв'язку для мережі IoT / К. О. Домрачева, Н. М. Довженко, В. В. Дмитренко // Наук. зап. Укр. наук.-дослід. ін-ту зв'язку. – 2019. – № 3. – С. 54-62
5. Sharma, Pooja. (2022). Bluetooth Hotspot: Extending the Communication Range between Bluetooth Devices. https://www.researchgate.net/publication/265448489_Bluetooth_Hotspot_Extending_the_Communication_Range_between_Bluetooth_Devices
6. Lu, Xingyu & Yin, Yufang & Zhao, Na & Wei, Hua. (2021). Indoor Positioning Experiment Based on Phase Ranging with Bluetooth Low Energy (BLE). Journal of Physics: Conference Series. 1971. 012044. 10.1088/1742-6596/1971/1/012044.
7. Peng, Demei & Peng, Liangfu & Yang, Yingying. (2021). Optimization of Indoor Bluetooth Ranging Model Based on RSSI. Frontiers in Signal Processing. 5. 10.22606/fsp.2021.53001.
8. Kaisar, Marilia. (2022). Bluetooth Orgasms. MedieKultur: Journal of media and communication research. 37. 143-160. 10.7146/mediekultur.v37i71.125253.
9. P., Raja & Singh, Dushyant & Jerath, Himani. (2021). Bluetooth Robotics. 10.1201/9781003161097-8.
10. Zhao, Peng & Wang, Lei & Tian, Yu & Guo, Linlin & Lu, Bingxian. (2021). WiFi-Bluetooth Dual Modal Indoor Positioning System Using Adaptive Range Filter. 60-67. 10.1109/BigCom53800.2021.00031.

11. Sauter, Martin. (2021). Bluetooth and Bluetooth Low Energy. 10.1002/9781119714712.ch8.
12. James, Alice & Seth, Avishkar & Mukhopadhyay, Subhas. (2022). Bluetooth Based IoT System. 10.1007/978-3-030-85863-6_7.
13. Salah, Khaled. (2022). Verification of the Integrated Bluetooth Modem. 10.1007/978-3-030-88626-4_5.
14. Honnalli, Shashidhar & Prasad, Golla. (2019). Attendance Monitoring Model for Range Surveillance Using Bluetooth. International Journal of Sensors and Sensor Networks. 7. 56. 10.11648/j.ijssn.20190704.12.
15. Yang, Deng & Wang, Jian & Wang, Minmin & Han, Houzeng & Zhang, Yalei. (2020). Accuracy analysis of Bluetooth-Low-Energy ranging and positioning in NLOS environment. International Journal of Image and Data Fusion. 11. 1-19. 10.1080/19479832.2020.1752314.
16. Nilsson, Daniel & Yan, Wenqing. (2021). Identifying Bluetooth Low Energy Devices. 375-376. 10.1145/3485730.3492880.
17. Liu, Chendong & Zhang, Yilin & Zhou, Huanyu. (2021). A Comprehensive Study of Bluetooth Low Energy. Journal of Physics: Conference Series. 2093. 012021. 10.1088/1742-6596/2093/1/012021.
18. Cho, Hsun-Wei & Shin, Kang. (2021). BlueFi: bluetooth over WiFi. 475-487. 10.1145/3452296.3472920.

УДК 621.771

DOI 10.36910/775.24153966.2022.73.12

А.К. Автухов, В.А. Бантковський, О.Д. Мартиненко*Державний біотехнологічний університет, Харків,
Україна***ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРИЙОМІВ ВИРОБНИЦТВА НА РІВЕНЬ
ЗАЛИШКОВОГО АУСТЕНИТУ В РОБОЧОМУ ШАРІ ВИРОБІВ
ІЗ ХРОМОНІКЕЛЕВОГО ЧАВУНУ**

У статті приведені вимога до великогабаритних деталей з хромонікелевого чавуну, працюючих в умовах знакоперемінних питомих навантажень і температур. Відмічено, що одним з істотних недоліків такого чавуну є наявність в ньому залишкового аустеніту, який в процесі експлуатації розпадається і збільшує схильність до вифарбовування робочої поверхні. Приведені наукові напрями дослідницьких робіт в яких ведуться дослідження спрямовані на підвищення рівня експлуатаційних властивостей хромонікелевих чавунів. Відмічено, що одним з істотних недоліків такого чавуну є наявність в ньому залишкового аустеніту, який в процесі експлуатації розпадається і збільшує схильність до вифарбовування робочої поверхні. Приведений методика визначення визначення змісту долі залишкового аустеніту в структурі хромонікелевих валків. Представлені результати досліджень впливу продування азотом хромонікелевого чавуну на рівень залишкового аустеніту в робочому шарі великогабаритних відливаних.

Ключові слова: чавун, хімічний склад, оптико-математический метод, залишковий аустеніт, структура, неметалічні включення.

А.К.Автухов, В.А.Бантковский, О.Д. Мартыненко**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЕМОВ ПРОИЗВОДСТВА НА УРОВЕНЬ
ОСТАТОЧНОГО АУСТЕНИТА В РАБОЧЕМ СЛОЕ ИЗДЕЛИЙ
ИЗ ХРОМОНИКЕЛЕВОГО ЧУГУНА**

В статье приведены требования к крупногабаритным деталям из хромоникелевого чугуна, работающим в условиях знакопеременных удельных нагрузок и температур. Отмечено, что одним из существенных недостатков такого чугуна является наличие в нем остаточного аустенита, который в процессе эксплуатации распадается и увеличивает склонность к выкрашиванию рабочей поверхности. Приведены научные направления исследовательских работ в которых ведутся исследования направленные на повышение уровня эксплуатационных свойств хромоникелевых чугунов. Отмечено, что одним из существенных недостатков такого чугуна является наличие в нем остаточного аустенита, который в процессе эксплуатации распадается и увеличивает склонность к выкрашиванию рабочей поверхности. Приведен методика определения содержания доли остаточного аустенита в структуре хромоникелевых валков. Представлены результаты исследований влияния продувки азотом хромоникелевого чугуна на уровень остаточного аустенита в рабочем слое крупногабаритных отливок.

Ключевые слова: чугун, химический состав, оптико-математический метод, остаточный аустенит, структура, неметаллические включения.

A.K.Avtukhov, V.A.Bantkovsky, O.D. Martynenko**INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL METHODS OF PRODUCTION ON THE LEVEL
OF RESIDUAL AUSTENITE IN THE WORKING LAYER OF PRODUCTS FROM
CHROMIUM-NICKEL CAST IRON**

The article presents the requirement for large-sized parts made of chromium-nickel cast iron, operating under conditions of alternating specific loads and temperatures. It is noted that one of the significant disadvantages of such cast iron is the presence of residual austenite in it, which disintegrates during operation and increases the tendency to chipping of the working surface. The scientific directions of research work are given in which research is being conducted aimed at improving the level of operational properties of chromium-nickel cast irons. It is noted that one of the significant disadvantages of such cast iron is the presence of residual austenite in it, which disintegrates during operation and increases the tendency to chipping of the working surface. A procedure for determining the content of the proportion of retained austenite in the structure of chromium-nickel rolls is given. The results of studies of the effect of nitrogen blowing of chromium-nickel cast iron on the level of residual austenite in the working layer of large castings are presented.

Key words: cast iron, chemical composition, optical-mathematical method, retained austenite, structure, non-metallic inclusions.

У машинобудуванні широко використовуються вироби із чавуну. Призначення деталей залежить від складу металу чавуну. Часто залежно від застосування кінцевого виробу з чавуну до

сплаву додаються легуючі елементи, що впливають на його фізико-механічні якості. Чавун насамперед застосовується в чорній металургії для виготовлення великогабаритних деталей, що працюють в умовах знакозмінних питомих навантажень та температур [1-4]. Для таких деталей активно використовують хромонікелеві чавуни. Основна вимога до великогабаритних деталей з хромонікелевого чавуну - висока зносостійкість робочого шару та рівень фізико-механічних властивостей, що забезпечує необхідний ресурс виробів без відмов та пошкоджень.

Експлуатація великогабаритних виробів з хромонікелевого чавуну має певні складнощі, які пов'язані з тим, що при виготовленні виливків, у них виникають значні усадкові раковини та термічні напруження. Також слід зазначити, що одним із суттєвих недоліків такого чавуну є наявність у ньому залишкового аустеніту, який у процесі експлуатації розпадається та збільшує схильність робочої поверхні викришуватися. Розпад остаточного аустеніту в процесі експлуатації великогабаритних формуючих інструментів супроводжується зростанням напруги, що сприяє зниженню ресурсу інструментів. Тому дослідження спрямовані на пошук шляхів стабілізації структури, механічних та експлуатаційних властивостей прокатних валків із легованих хромонікелевих чавунів є важливими та актуальними [5,6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останнім часом з'явилася значна кількість публікацій та винаходів, що стосуються різних способів виготовлення виробів із хромонікелевого чавуну. Для підвищення рівня експлуатаційних властивостей хромонікелевих чавунів дослідницькі роботи ведуться у таких напрямках: розробка нових та оптимізація використовуваних сплавів, удосконалення технології їх виготовлення, розробка ефективних методів термічної обробки [1, 7, 8].

Одним із перспективних напрямів забезпечення необхідного ресурсу виробів із хромонікелевого чавуну є підвищення якості сплавів продуванням інертними газами [1, 9].

Продування газами сприяє зміні співвідношення складових структури сплавів, змінює кількість, форму та розподіл неметалевих включень, а також впливає на форму графіту. Проте слід зазначити, що питання впливу продування хромонікелевого чавуну на рівень залишкового аустеніту в сплавах досі вивчений не повністю.

Мета даної роботи: вивчення впливу продування азотом хромонікелевого чавуну на рівень залишкового аустеніту в робочому шарі великогабаритних виливків.

Методологія проведення досліджень. Для вивчення вмісту частки залишкового аустеніту у структурі хромонікелевих валків при їх виробництві був використаний оптико-математичний метод [10]. Сутність використаного методу полягає в наступному. За допомогою комп'ютера обробляються отримані у форматі bmp зображення мікроструктури. Оцифрування цих зображень проводилося у форматі pgm за спеціально розробленою програмою. У цьому форматі є 256 кольорів від 0 до 255 включно. Однією з головних переваг цього методу є те, що він нечутливий до дефектів металографічних зображень, оскільки в його основі лежить аналіз різниці кольорів пікселів, а не самі кольори, які можуть бути спотворені за неправильно вибраних режимів травлення структури або її зйомки [4].

Під час проведення досліджень використовували спеціально розроблену комп'ютерну методику. Результати комп'ютерної обробки травлених шліфів представлені на рис. 1.

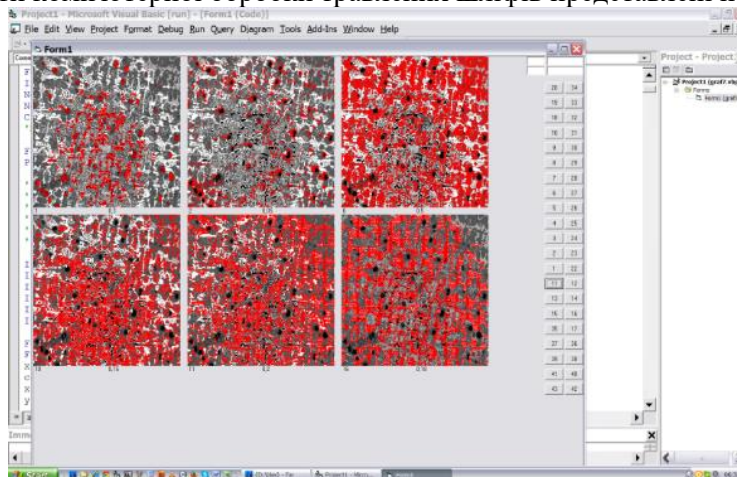


Рис. 1. Результати комп'ютерної обробки травлених шліфів структури валків виконання ЛПХНМдц-71 після термічної обробки

Процес визначення кількості розподілу кольорів на травлених шліфах полягав у наступному: з 256 кольорів (відтінків сірого кольору), що розрізняються комп'ютером, будували гістограми 16 кольорів для зручності обробки та скорочення часу розрахунків. Побудова їх проста. Щоб накопичувати таку гістограму, потрібно пройти всі точки фотографії одну за одною, розділити (кількість точок певного кольору) колір точок на 17 і до цілої частини відношення додати 1, тим самим отримавши номер в масиві гістограми. Наприклад, колір 7, будучи поділений на 17, дає 0. Додаючи до нього 1, отримуємо 1. Тобто кольори від 0 до 16 будуть накопичуватися в першому елементі гістограми кольорів. При кольорах від 17 до 33 – у другому елементі гістограми, і т.д. При такому способі до 16 буде відноситися тільки колір 255. Для чавуну, що розглядається, цього виявилось достатнім.

Накопичені суми ділили на кількість точок, множили на 100 і отримували відсотковий вміст кожного кольору на шліфі. Зручність цього способу полягає у тому, що функції, які є першими, другими і т.д., що характеризуються різницями кольорів, знову будуть кратні 17.

На представлених зображеннях розглядаються всі підобласті розміром 10 на 10 пікселів. Одні й ті ж фотографії досліджених шліфів повторюються 6 разів. Аналізуються 6 найбільш ходових кольорів 1, 2, 6, 10 (аустеніт), 11 та 16. Вони розташовані зверху в низ, зліва направо, крім того, підписані.

Ця методика дозволила з необхідною точністю визначити обсяг вмісту залишкового аустеніту

Результати досліджень. Для досягнення поставленої мети вивчали робочий шар великогабаритних деталей – валків виконання ЛПХНМдц-71 розміром $\varnothing 820 \times 2300$ мм, які були відлиті відцентровим способом за традиційною технологією (без додаткової обробки рідкого металу шлейфовим продуванням азотом) та з продуванням азотом. Сплави аналізували до та після термічної обробки.

Технологічні параметри заливки та хімічний склад досліджених прокатних валків виконання ЛПХНМдц-71 наведено у таблицях 1 – 4.

Табл. 1.

Технологічні параметри заливки прокатного валка виконання ЛПХНМдц-71 *:**

Порції	Температура металу, °С	Маса т.	Заливка		Витримування	
			час	обороти	час	обороти
основна	1410	3,4	33"	480	8'28"	480
1пор прол1	1300	1,4	12"	480	1'58"	480
			40"	480-400	2'18"	400
2пор прол1			1'19"	400-0		

* Обробка металу: ковш – суперсід 3,5 кг, Те 15 г,

** Діаметр $\varnothing 824$ мм, глибина робочого шару 40мм, температура кокіля 136 °С, товщина намазки 4,2 – 4,3 мм.

Табл. 2.

Хімічний склад сплавів заливки прокатного валка виконання ЛПХНМдц-71

Порції	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Mg	W	V
основна	2,90	1,03	0,58	0,082	0,042	1,51	4,29	0,28			0,18	0,18
пр. 1	3,27	1,52	0,30	0,097	0,014	0,24	0,49		0,28	0,030		
пр. 2	3,26	1,64	0,29	0,086	0,015	0,23	0,47		0,29	0,035		

Шлейфове продування азотом сплавів широко використовується для зниження вмісту неметалевих включень у сплавах. Виконані дослідження показали, що кількість неметалевих включень у хромонікелевому чавуні після обробки азотом суттєво зменшується (рис.2).

З метою поліпшення експлуатаційних властивостей валки піддавали термообробці – відпалу при 500°С.

Мікроструктура робочого шару верху бочки валків, відлитої з продуванням азотом (зразки відібрані безпосередньо від валків) представлена на рис.2 та рис.3, а результати аналізу вмісту залишкового аустеніту у сплаві у табл.5.

Табл. 3.

**Технологічні параметри заливки прокатного валка виконання
ЛПХНМдц-71 зі шлейфовим продуванням азотом сплаву робочого шару *****

Порції	Температура металу, °С	Маса т.	Заливка		Витримування	
			час	обороты	час	обороты
основна	1420	3,8	38"	480	9'00"	480
1пор прол1	1300	1,5	14"	480	2'32"	480
			55"	480-400	2'00"	400
2пор прол1	1300		1'24"	350-100-0		

* Обробка металу: ковш – суперсід 4 кг, Те 20 г, азотування – ШПР (шлейфове продування)

** Діаметр Ø824мм, глибина робочого шару 45мм, температура кокіля 140 °С, товщина намазки 4,2 – 4,3 мм

Табл. 4.

**Хімічний склад сплавів заливки прокатного валка виконання
ЛПХНМдц-71 із шлейфовим продуванням азотом сплаву робочого шару**

Порції	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Mg	W	V
основна	2,92	0,94	0,60	0,087	0,041	1,56	4,34	0,26			0,20	0,17
пр. 1	3,22	1,55	0,30	0,083	0,018	0,22	0,45		0,27	0,03		
пр. 2	3,22	1,59	0,30	0,079	0,018	0,22	0,46		0,27	0,03		

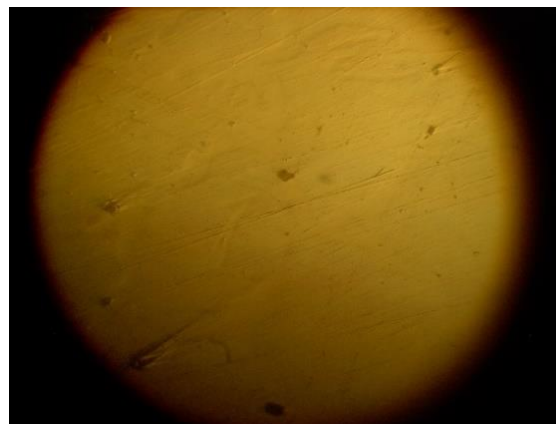


Рис. 2. Неметалічні включення в робочому шарі верху бочки валка до (а) та після (б) обробки азотом, ×1000

Табл. 5

**Вміст залишкового аустеніту у розглянутих валках до та після
термічної обробки**

Характеристика валків виконання ЛПХНМдц-71	Відсотковий вміст залишкового аустеніту в структурі валків, %	
	до ТО	после ТО
відлиті за традиційною технологією	13,4	11,1
відлиті із застосуванням шлейфового продування азотом сплаву робочого шару	10,8	7,6

Аналіз наведених матеріалів показує, при продуванні частка залишкового аустеніту в литому стані менша на 18% у порівнянні з валками відлитими за традиційною технологією.

Термообробка (відпал – 500°C) призводить до розпаду залишкового аустеніту та формування більш тонких голок мартенситу. Рівень залишкового аустеніту після термічної обробки у валках, відлитої із застосуванням шлейфового продування на 31% менше порівняно з відлитими валками за традиційною технологією.

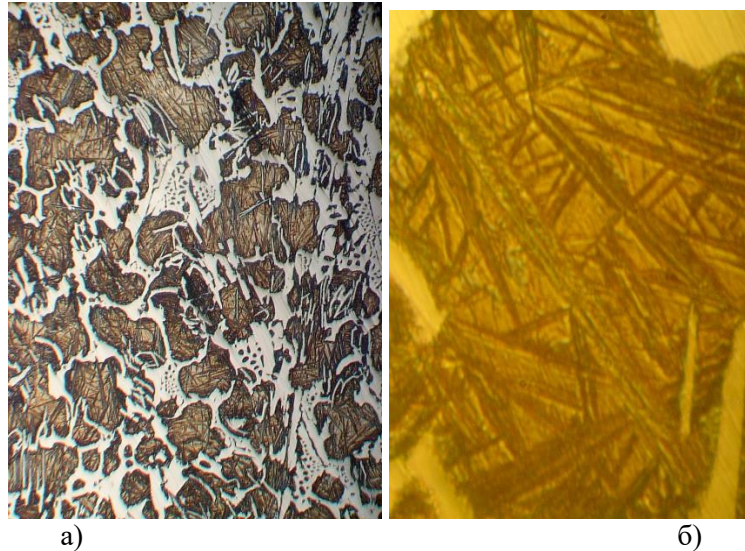


Рис. 2. Мікроструктура робочого шару верху бочки валка після продування азотом до термообробки, (а) $\times 100$; (б) $\times 1000$

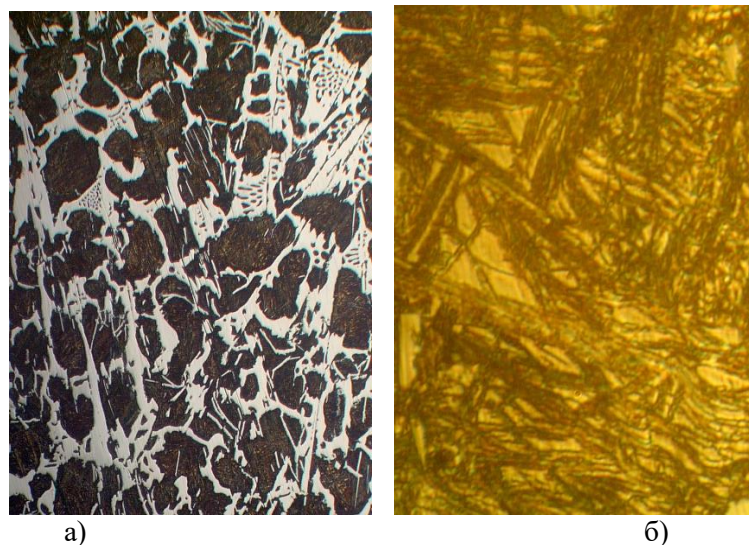


Рис. 3. Мікроструктура робочого шару верху бочки валка після продування азотом та термообробки, (а) $\times 100$; (д-е) $\times 1000$

Промислові випробування прокатних валків виконання ЛПХНМдц-71 показали, що напрацювання термооброблених валків відлитої за традиційною технологією дорівнює 186554т, а термооброблених валків відлитої із застосуванням шлейфового продування азотом сплаву робочого шару – 209611т. Ресурс дослідних валків виявився на 11% вищий у порівнянні з валками поточного виробництва.

Висновки.

Рівень залишкового аустеніту після термічної обробки у валках виконання ЛПХНМдц-71, відлитої із застосуванням шлейфового продування азотом сплаву робочого шару на 31% менше ніж у відлитої валків за традиційною технологією, що сприяє підвищенню експлуатаційної стійкості валків на 11%.

Список літератури

1. Производство и применение прокатных валков: Справочник./ Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, Н.М. Александрова и др. Под ред. Проф. Т.С. Скобло-Х.: ЦД №1.2013-572с.
2. Будагьянц Н.А. Центробежное литье валков для горячей прокатки / Н.А. Будагьянц, Н.А. Жижкина, Ю.И. Гутько// *Вісник Донбаської Державної машинобудівної академії.*- Краматорськ: ДДМА, 2009.-№1(15).-С.71-74.
3. Будагьянц Н.А. Литые прокатные валки /Н.А. Будагьянц, В.Е. Карский - М.: Металлургия, 1983. - 175с.
4. Вдовин К.Н., Гималетдинов Р.Х., Колокольцев В.М., Цыбров С.В. Прокатные валки. Монография. –Магнитогорск, МГТУ. – 2005. – 543с.
5. Скобло Т.С. Прокатные валки из высокоуглеродистых сплавов /Т.С. Скобло, Н.М. Воронцов, С.И. Рудюк / [под. ред. Скобло Т.С.]. - М.: Металлургия, 1994. – 336с.
6. Скобло Т. С., Автухов А. К., Сидашенко А. И. Разработка энергосберегающей технологии производства листопрокатных валков. *Экология и промышленность.*– 2015. №4(45). – С. 87-91.
7. Скобло Т.С. Повышение качества чугунных двухслойных валков листопрокатных станов / Т.С. Скобло, В.Ф. Коробейник, В.Н. Гончаров [и др.] // *Сталь.* - 1987. - №9. - С. 68-70.
8. Скобло Т.С. Применение шлакообразующих смесей при производстве и реновации изделий. Монография / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, А.Д. Мартыненко, Р.В. Ридный, Н.С. Пасько, А.К. Автухов. Под ред. д.т.н., проф. Т.С. Скобло – Х.: «Полосатая типография», 2016. – 284с.
9. Калинин В.Т., Кондрат А.А. Использование азота при литье двухслойных листопрокатных валков. *Сучасні проблеми металургії.*-2007.№10. – С.36-44.
10. Скобло Т.С. Оптикоматематический анализ структурообразования рабочего слоя валков исполнения ЛПХНМдц / Т.С.Скобло, А.К.Автухов, Е.Л.Белкин // *Вісник НТУ обладнання «ХП».* Серія: *Інноваційні технології та обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії.* – Харків: НТУ «ХП», 2015. – №48(1167). – С. 57- 61.

УДК 66.017:624Ю785:533.9(047.31)

DOI 10.36910/775.24153966.2021.72.13

**Б.В. Єфременко¹, В.І. Зурнаджи¹, Н.П. Зайчук², С.П. Шимчук², Ю.Г. Чабак¹,
І. Петришинець³, В.Г. Єфременко¹**

ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет»¹

Луцький національний технічний університет²

Institute of Materials Research, Slovak Academy of Sciences³

МІКРОБУДОВА ТА ВЛАСТИВОСТІ СТАЛІ AISI 316L БІОМЕДИЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ, ВИГОТОВЛЕНОЇ МЕТОДОМ LPBF-ДРУКУ

У статті описана мікроструктура, фазовий стан фізико-механічні властивості біомедичної сталі 316L, виготовленої 3D-друком за адитивною технологією Laser Based-Powder Bed Fusion у порівнянні із катаним варіантом. Встановлено, що друкована сталь має аустенітну структуру гетерогенної будови, особливості якої залежать від площини аналізу відносно напрямку друку. Завдяки наявності нерівноважної дисперсної структури та більш значних викривлень кристалічної решітки LPBF-друковані зразки сталі 316L мають майже двократну перевагу у твердості відносно листових зразків за приблизно однакового рівня модуля пружності.

Ключові слова: нержавіюча сталь, LPBF-друк, мікроструктура, модуль пружності, твердість.

**B.V. Efremenko, V.I. Zurnadzy, N.P. Zaichuk, S.P. Shymchuk, Y.G. Chabak,
I. Petryshynets, V.G. Efremenko**

MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF BIOMEDICAL STEEL 316L, FABRICATED BY LPBF-PRINTING

The article describes the comparative study of microstructure, phase state, physical and mechanical properties of biomedical steel 316L, fabricated by 3D printing using additive technology of Laser Based-Powder Bed Fusion. It is established that 3D-printed steel has an austenitic structure of heterogeneous structure, the features of which depend on the plane of analysis relative to the direction of printing. Due to the non-equilibrium dispersed structure and more significant distortions of the crystal lattice, LPBF-printed 316L steel samples have almost a twofold advantage in hardness over sheet samples at approximately the same level of modulus of elasticity.

Keywords: stainless steel, LPBF-printing, microstructure, elastic modulus, hardness.

**Б.В. Ефременко, В.И. Зурнаджи, Н.П. Зайчук, С.П. Шимчук, Ю.Г. Чабак,
И. Петришинец, В.Г. Ефременко**

МИКРОСТРУКТУРА И СВОЙСТВА СТАЛИ AISI 316L БИОМЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ, ИЗГОТОВЛЕННОЙ МЕТОДОМ LPBF-ПЕЧАТИ

В статье описана микроструктура, фазовое состояние и физико-механические свойства биомедицинской стали 316L, изготовленной 3D-печатью по аддитивной технологии Laser Based-Powder Bed Fusion в сравнении с катанным вариантом. Установлено, что печатная сталь имеет аустенитную структуру гетерогенного строения, особенности которой зависят от плоскости анализа относительно направления печати. Благодаря наличию неравновесной дисперсной структуры и более значительными искривлениями кристаллической решетки LPBF-печатные образцы стали 316L имеют почти двукратное преимущество в твердости относительно листовых образцов при примерно одинаковом уровне модуля упругости.

Ключевые слова: нержавеющей сталь, LPBF-печать, микроструктура, модуль упругости, жесткость.

Постановка проблеми. Сталь AISI 316L (аналог – 08X16H11M3 за ГОСТ 5632-2014) відноситься до корозійностійких сталей аустенітного класу. AISI 316L являє собою модернізовану версію найбільш поширеної нержавіючої сталі AISI 304 (08X18H10), поліпшену за рахунок додавання 2,5 % молібдену. Завдяки молібдену сталь цієї марки має підвищену стійкість до корозії в агресивних середовищах (включаючи середовища із хлором та іншими галогенідами). Завдяки високій корозійній стійкості в присутності іонів хлору (які входять до складу фізіологічних рідин організму людини) сталь AISI 316L в останнє десятиріччя замінила собою сталь AISI 304, яка раніше широко використовувалась в медицині, зокрема для виготовлення хірургічних та ортопедичних імплантів. Нові можливості використання сталі AISI 316L відкривають адитивні технології, які суттєво відрізняється від стандартних металургійних технологій, що зазвичай використовуються для виготовлення нержавіючої сталі. Застосування адитивних технологій потребує більш ретельного вивчення структури та властивостей 3D-друкованих сталей.

© Б.В. Єфременко, В.І. Зурнаджи, Н.П. Зайчук, С.П. Шимчук, Ю.Г. Чабак,
І. Петришинець, В.Г. Єфременко

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Хімічний склад сталі AISI 316L: $\leq 0,03$ % C; 16,5-18,5 % Cr; 10-13 % Ni; 2,0-2,5 % Mo; 0,11 % N; не більше 0,02 % S, 1,0 % Si, 1,0 % Mn. На потрійній діаграмі Fe-Cr-Ni сталь AISI 316L розташовується в γ FeNi-області на границі із α Cr-областю [1]. Тобто мікроструктура сталі AISI 316L складається із аустеніту із можливою присутністю незначної кількості збагаченої хромом α -фази. Це ж підтверджується і діаграмою Schaeffler-Delong, на якій точка для сталі AISI 316L розташовується в області, що є проміжною між 0 % та 5 % фериту [2]. Типова мікроструктура сталі AISI 316L, виготовленої за стандартною металургійною технологією (гаряча прокатка) складається із поліедричних зерен з великою кількістю двійників, що є характерним саме для аустенітних сплавів. Її фізико-механічні властивості за кімнатної температури становлять: модуль Юнга – 193 ГПа, твердість – до 215 НВ, межа текучості – не менше 220 МПа, межа міцності – не менше 540 МПа, відносне подовження – 35-40 %, відносне звуження – 50-55 %, ударна в'язкість – 1,4-1,5 МДж/м² [3].

Виробництво виробів із нержавіючих сталей класичними методами (лиття, кування (прокатка), термічна обробка) потребує спеціалізованого металургійного обладнання і має ряд технологічних складнощів, до яких відносяться: необхідність в чіткій регламентації технології виплавки та розливання через високу реакційну здатність розплаву; складний процес деформування та механічної обробки, високий процент відходів, тощо [4]. Вказані вади повністю відсутні при застосуванні адитивних технологій виробництва. Крім того, імпланти, виготовлені шляхом адитивних технологій, мають ряд незаперечних переваг, головними серед яких є простота і економічність виробничого процесу та можливість виготовлення імплантів за індивідуальною моделлю [5, 6]. Для виготовлення біомедичних імплантів можуть бути використані наступні технології адитивного виробництва: стереолітографія (stereolithography – SLA), селективне лазерне спікання (Selective Laser Sintering – SLS), селективне лазерне плавлення (Selective Laser Melting (Direct Laser Melting) – SLM (DLM)), вибіркоче теплове спікання (Selective Heating Sintering – SHS), електронно-променева плавка (Electron Beam Melting – EBM), пошарове ламінування (Layer Object Manufacturing – LOM), моделювання методом наплавлення (Fused Deposition Modelling – FDM) [4]. У відповідності до стандарту ISO/ASTM 52911-1:2019 технологія SLM позначається як Laser Based-Powder Bed Fusion (LPBF).

Найбільш перспективною для широкого застосування в біомедичній галузі є SLS- та SLM-технології [7-9], оскільки вони забезпечують більш високий коефіцієнт використання матеріалів й отримання імплантів необхідної форми без необхідності подальшої механічної обробки. При проведенні SLS-друку робоча камера відділення 3D принтера заповнюється витратним матеріалом (металевим порошком), який перед друком розігрівається практично до температури плавлення. За допомогою лазерної установки і скануючого дзеркала промінь лазера направляє на необхідні ділянки порошку, забезпечуючи їх спікання шар за шаром (частки порошку оплаваються та зварюються між собою). Після спікання першого шару в камеру додається тонкий шар порошку поверх сплавленого металу, і процес повторюється до отримання необхідної форми об'єкта. При використанні SLM-технології друк проводиться в середовищі інертного газу, при цьому використовується більш потужний лазерний промінь, який забезпечує повне розплавлення часток порошку. SLS/SLM-технології дозволяє виробляти імпланти з кращими механічними властивостями [10] і біосумісністю [11] в порівнянні з імплантатами, отриманими класичним способом. Зважаючи на те, що виробництво імплантів за SLM-технологією відбувається шляхом багатьох циклів швидкого плавлення/охолодження, воно веде до підвищених залишкових напружень, які можуть викликати зниження механічних властивостей, мікротріщини і деформації імпланту, в зв'язку з чим для їх усунення рекомендується проводити термічну обробку [12].

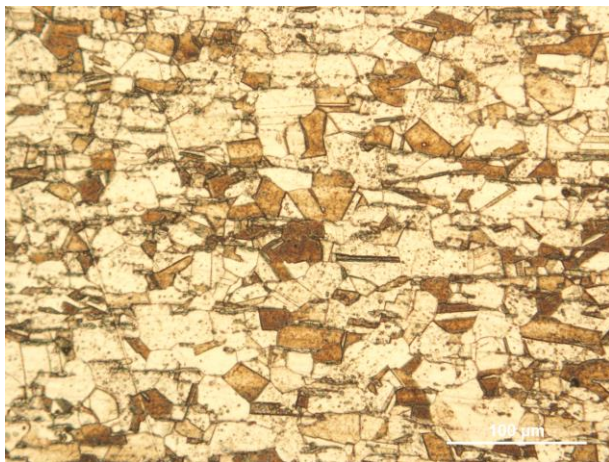
Мета роботи – визначити особливості мікробудови нержавіючої сталі 316L, яка формується при її виготовленні адитивним методом «Laser Based-Powder Bed Fusion», та встановити рівень фізико-механічних властивостей 3D-друкованого металу.

Методика. Виготовлення зразків розмірами 5 × 10 × 20 (мм) виконували за технологією LPBF на 3D-принтері «ProX DMP 320» в робочій камері розмірами 275 × 275 × 420 (мм) за таких параметрів друку: а) товщина шару – 30-60 мкм, б) точність друку – ± 50 мкм, в) джерело енергії – волоконний лазер (потужність – 500 Вт, довжина світлової хвилі – 1070 нм), г) захисний газ – аргон (тиск 1,5-4,0 бар), д) охолодження зразків – в камері принтера. В якості вихідного матеріалу для 3D-друку було використано металевий порошок «EOS 316L» (Electro Optical Systems) хімічного складу (мас. %): 16,8 Cr; 2,25 Mo; 10,8 Ni; 0,48 Si; 1,18 Mn; 0,03 P; 0,03 C; 0,006 S; залізо

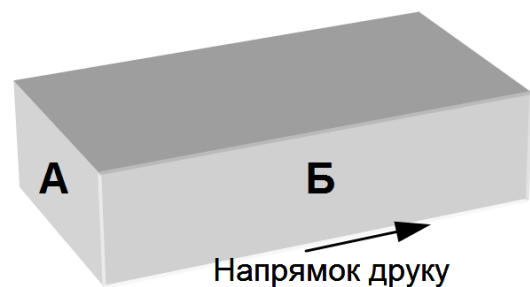
– основа. Дисперсність порошку не перевищувала 63 мкм, густина становила 7,98 г/см³. Для порівняння використовували зразки листової сталі 316Т товщиною 8 мм із хімічним складом, дуже близьким до 316L (мас. %): Fe (base), 17,11 Cr; 2,07 Mo; 10,66 Ni; 0,44 Si; 1,34 Mn; 0,36 Ti; 0,035 P; 0,048 S, 0,001 S, залізо – основа.

Відбір зразків для мікроструктурного аналізу проводили на відрізнаму станку «Vaincut HSS» (Chennai Metco Pvt Ltd) з товщиною різа 0,8 мм (з водно-емульсійним охолодженням). Зразки шліфували на абразивному (SiC) папері та полірували водними суспензіями Al₂O₃ на станку «BainPol UM/UM Auto» (Chennai Metco Pvt Ltd). Підготовлені мікросліфи піддавали хімічному травленню у розчині «Aqua Regia» (65 мас. % HNO₃ + 35 мас. % HCl). Вивчення мікроструктури здійснювали за допомогою оптичних мікроскопів «Optika IM 3MET» (ОПТИКА) і «GX71» (OLYMPUS) та електронного сканувального мікроскопу «EVO MA15» (Carl Zeiss). При цьому структуру 3D-друкованих зразків вивчали у двох напрямках, як зображено на рис. 1. Фазовий склад сплавів досліджували рентгеноструктурним методом із застосуванням дифрактометру «X'Pert PRO» (PANalytical) у Cu-K_α випромінюванні за таких параметрів: напруга – 40 кВ, струм на катоді – 50 мА, крок сканування – 0,03342 град, швидкість сканування – 0,0689 град/с. Визначення фізико-механічних властивостей (твердість, модуль пружності) виконували за допомогою наноіdentування на пристрої «Nano Indenter G200» (Agilent Technologies). Індентування проводили до заглиблення індентора на 2000 нм.

Результати досліджень та їх обговорення. Мікроструктура листової сталі 316Т зображена на рис. 1,а. Вона є типовою для однофазного аустенітного сплаву, тобто складається із полідрічних зерен γ -твердого розчину із двійниками, що є характерним для металів із ГЦК ґраткою. В структурі також наявні гранчасті включення карбиду титану максимальним розміром до 5 мкм. Розмір аустенітних зерен варіюється від 9 мкм до 41 мкм із середнім значенням 20,69±10,1 мкм.



а)



б)

Рис. 1. Розташування площин для аналізу мікроструктури 3D-друкованого зразку відносно напрямку друку (а); мікроструктура листового зразку сталі 316Т (в напрямку прокатки).

На відміну від листового варіанту характер структури 3D-друкованої сталі 316L залежить від площини аналізу відносно напрямку друку (рис. 1,б). На поверхні Б, яка розташована в напрямку наростання шарів при формуванні зразку, структура має характерний рисунок «Fish-Scale» («Риб'яча луска» [13]), тобто структура складається із шарів, які складаються з ланцюжків окремих «лусочок» - елементів напівсферичної форми з опуклістю в напрямку, протилежному напрямку друку (рис. 2, а,б). Ширина шарів коливається в межах 14-45 мкм із середнім значенням 29,2 ± 5,1 мкм. Шари розташовані перпендикулярно довгій стороні зразка, яка збігається з віссю Z друку. Форма «лусочок» відображає форму мікрокраплі, що утворюється при розплавленні часток порошку під впливом лазерного променя, а напівсферична поверхня виникає на границі з попереднім шаром внаслідок його проплавлення (за аналогією з електродуговим наплавленням) (рис. 2,б). Тіло «риб'ячої луски» складається з стовпчастих дендритів шириною 0,3-0,5 μм у поперечному перерізі (рис. 2,в), орієнтованих переважно паралельно до напрямку друку, які росли з утворенням округлих пустот між ними, що добре видно в перпендикулярному напрямку (рис. 2,

г). Причиною утворення стовпчастих дендритів є направлений тепловідвід від поверхні рідкої мікрокраплі в повітря [14, 15].

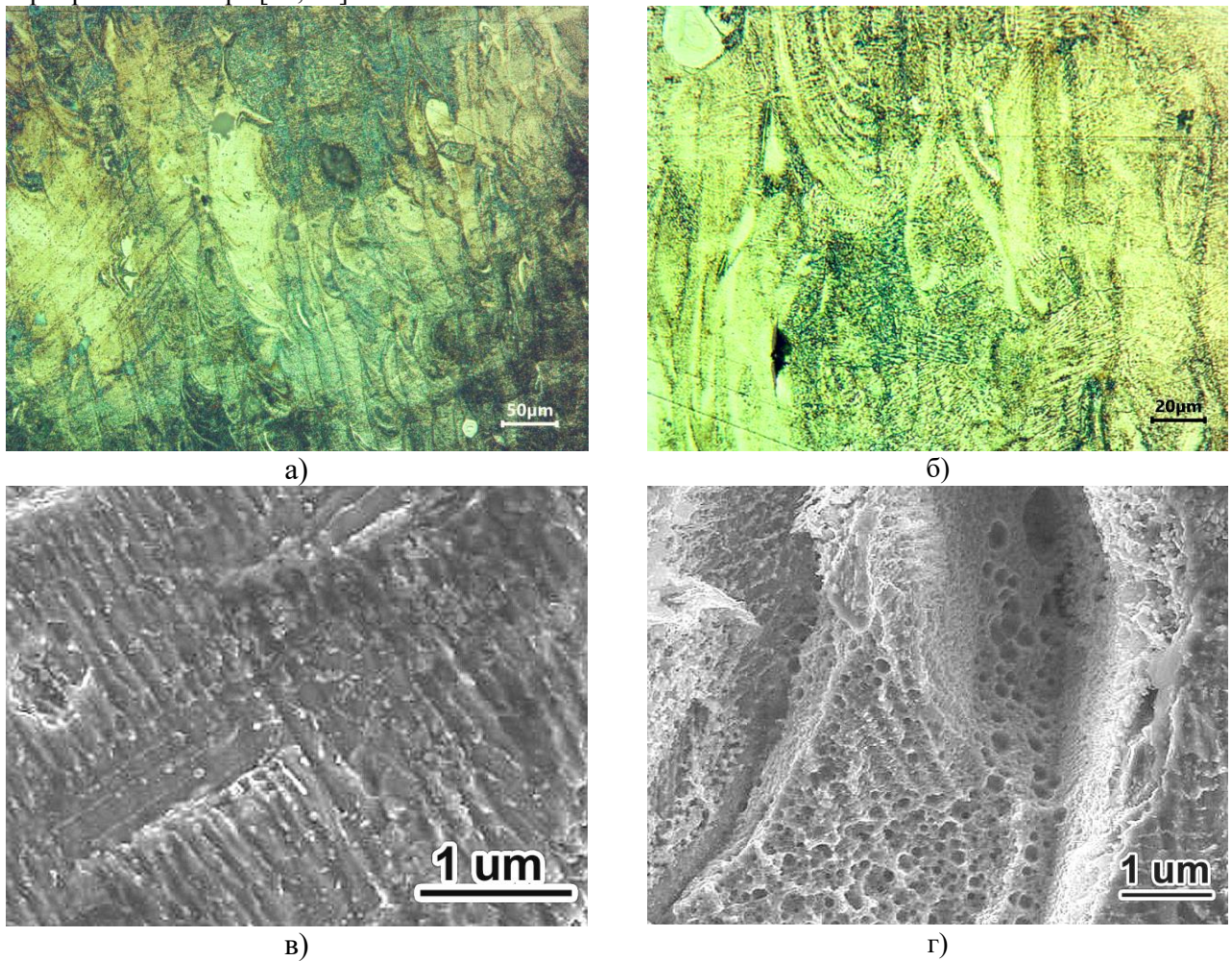


Рис. 2. Зображення мікроструктури друкovanого зразка сталі 316L в площині Б (а, б – оптичне зображення, в, г – електронно-мікроскопічне зображення).

У площині А, яка слугувала основою для нанесення шарів при LPBF-друці, структура має візерунок переривчастих, «переплетених» рядів видовжених елементів шириною 25-50 мкм і довжиною 120-170 мкм. Взаємно перпендикулярне розташування цих рядів є подібним до розташування ниток у тканині (рис. 3, а). Вказані ряди окаймовані світлими та темними ділянками, розташованими у хаотичному порядку (рис. 3, б). При більшому збільшенні темні ділянки набувають диференціацію, складаючись із завихрених «крапель» розміром у кілька десятків мікрометрів. Різний контраст окремих ділянок відображає їх стійкість до травлення через різницю в структурі, хімічному складі та просторової орієнтації. На рис. 3, в видно, що світлі ділянки мають відносно гладку поверхню, в межах якої можна розрізнити окремі границі зерен, а темні ділянки мають «комірковий» характер, утворений стовпчастими дендритами із розміром «комірок» менше 1 μm. Структурні елементи, що спостерігаються в площині А, утворені частинками розплавленого порошку, а їх довжина та розташування у «тканому» рисунку відповідає руху лазерного променя під час LPBF-друку. В додаток до перехованих структурних елементів, в структурі друкovanого зразка присутні пори, які займають приблизно 1.52 % площі шліфу (рис. 3, г), а також окремі тріщини із вкритою окислами поверхнею (рис. 3, д). В окремих ділянках спостерігаються частки вихідного порошку, які не були повністю розплавлені лазерним променем (рис. 3, е). Все перераховане вище вказує на суттєву структурну неоднорідність 3D-друкovanого сталі 316L.

Аналіз рентгенівських дифрактограм показав, що для друкovanого сплаву характерним є більше фізичне уширення піків (111) та (200) гамма-фази відносно катаного зразку. Це свідчить про більше викривлення кристалічної решітки, обумовлене більш високим рівнем мікрона пруг та

густини дефектів решітки через швидке затвердіння розплавлених частинок і циклічний нагрів при повторювальному скануванні лазерного променя [16].

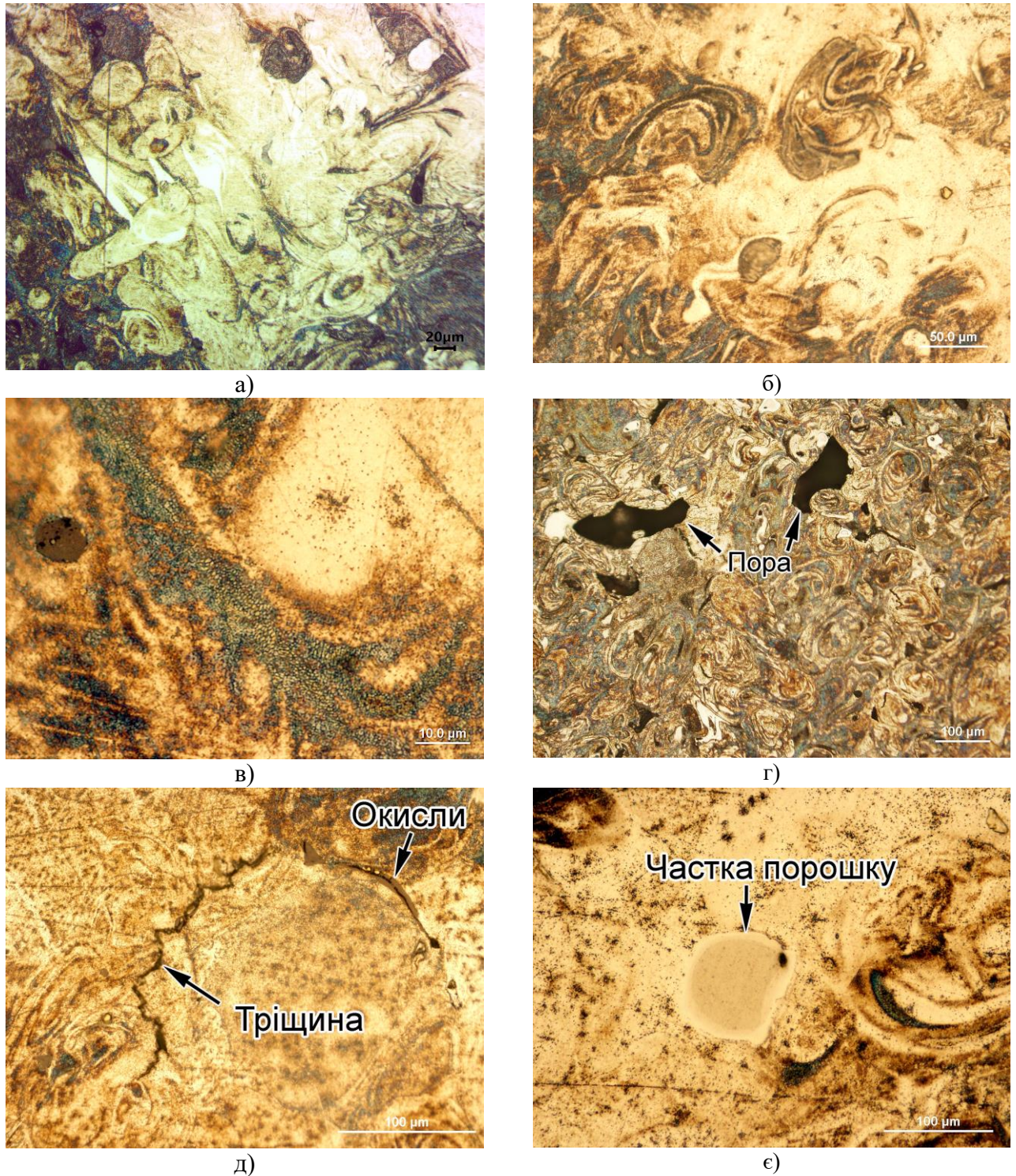


Рис. 3. Оптичні зображення мікроструктури друкованого зразка сталі 316L в площині А.

Результати наноіндентування (рис. 4) показали, що значення модуля пружності листової сталі 316Т коливались в межах 121,202–298,03 ГПа із середнім значенням $202,21 \pm 6,51$ ГПа (основна кількість замірів модуля пружності знаходиться в межах 170–250 ГПа. Твердість листової сталі 316Т змінювалась в межах 0,823–3,087 ГПа із середнім значенням $1,70 \pm 0,075$ ГПа (більша кількість замірів відноситься до інтервалу 170–250 ГПа. З огляду на гетерогенний характер

мікробудови 3D-друкованої сталі 316L наноіндентування проводили таким чином, щоб виконати приблизно однакову кількість замірів як в світлій, так й темній ділянках структури. При цьому було встановлено, що розкид значень твердості і модуля пружності для світлих і темних ділянок практично співпадають. Це ж підтверджується статистичною обробкою отриманих результатів: середні значення твердості та модуля пружності є досить близькими: твердість – $3,310 \pm 0,11$ ГПа (світлі ділянки) й $3,227 \pm 0,15$ ГПа (темні ділянки); модуль пружності – $196,136 \pm 3,23$ ГПа (світлі ділянки) й $194,083 \pm 4,19$ ГПа (темні ділянки). З огляду на близькість отриманих значень, данні для світлих та темних ділянок були поєднані, що дало наступні результати: твердість – розкид значень $1,29-6,08$ ГПа, середнє значення $3,26 \pm 0,13$ ГПа; модуль пружності – розкид значень $143,0-243,9$ ГПа, середнє значення $195,20 \pm 3,68$ ГПа.

Співставлення властивостей листової сталі 316Т та друкованої сталі 316L проводили по середнім значенням фізико-механічних властивостей. Як впливає з рис. 5, листові і друковані зразки демонстрували приблизно однаковий рівень модуля пружності з незначною (7 ГПа) перевагою листового матеріалу. При цьому розкид значень модуля пружності був на 77 % вищим саме в листових зразках, незважаючи на значну гетерогенність структури друкованих зразків. За твердістю 3D-зразки майже у два рази переважали листові зразки, маючи у два рази більший розкид результатів. Перевага в твердості друкованих зразків пояснюється більш дисперсною чарунковою структурою з розміром дендритів, значно меншим за розміри зерен в листовому зразку. Таке диспергування відбулося внаслідок високої швидкості охолодження мікрокрапель металу після лазерного оплавлення, що супроводжувалось деформуванням кристалізованого металу під дією термічних напружень із відповідним зміцненням за рахунок накопичення дефектів кристалічної будови.

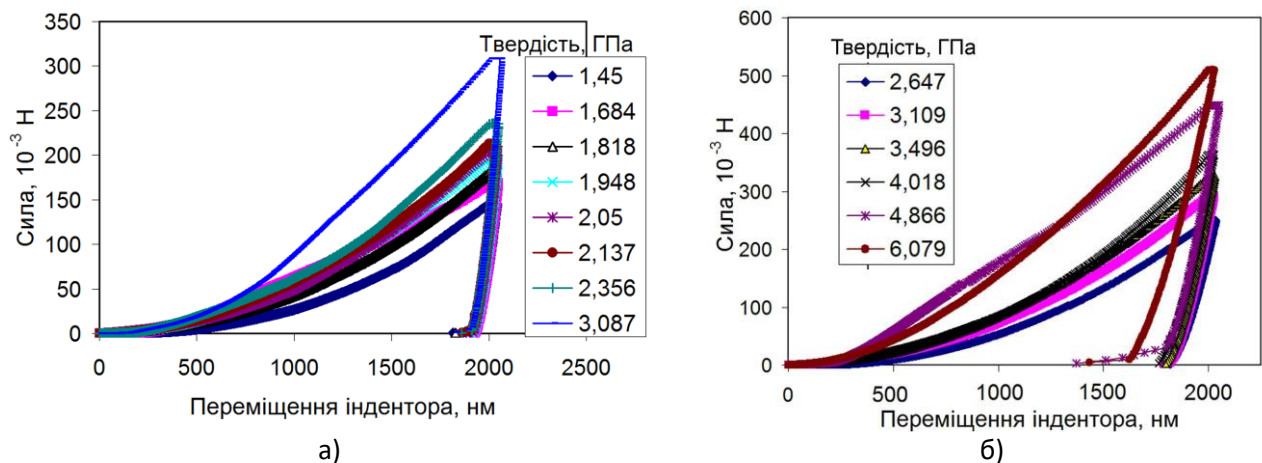


Рис. 4. Криві наноіндентування листової сталі 316Т (а) та друкованої сталі 316L (світлі ділянки мікроструктури).

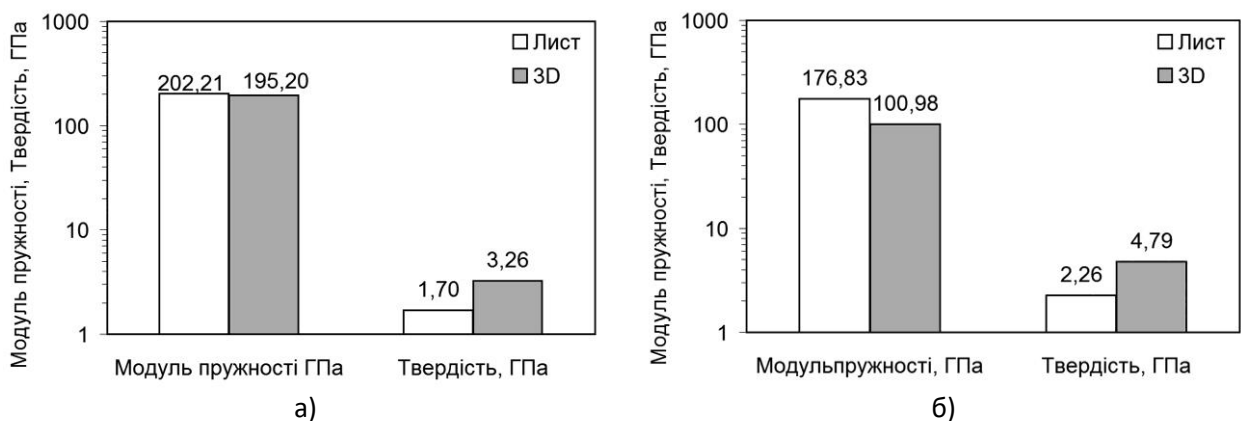


Рис. 5. Співставлення середніх значень (а) та максимального розкиду значень (б) твердості та модуля пружності для листової сталі 316Т й 3D-друкованої сталі 316L.

Отримані результати показали, що за рівнем фізико-механічних властивостей 3D-друковані

зразки сталі 316L в цілому не поступають листовим зразкам нержавіючої сталі 316T з близьким хімічним складом. Це вказує на перспективність використання адитивної LPBF-технології для виготовлення несучих імплантів, що піддаються навантаженню в процесі експлуатації. Для остаточного вирішення доцільності застосування LPBF- технології при виготовленні імплантів необхідно вивчити антикорозійні властивості та біосумісність друкованої сталі 316L, що становить напрямок подальших досліджень в даній області.

Висновки.

1. Проведено порівняльне дослідження фазово-структурного стану біомедичної сталі 316L, виготовленої за адитивною технологією «Laser Based-Powder Bed Fusion» у співставленні із аналогічною листовою сталлю. Зафіксована суттєва різниця у характері мікроструктури зразків та зразків, яка полягає у формуванні більш нерівноважних мікроструктурних складових у 3D-друкованих зразках.

2. LPBF-друкована сталь 316L має однофазну аустенітну структуру, однак характеризується вираженою гетерогенністю, особливості якої залежать від площини відносно напрямку друку. В напрямку друку структура має шаруватий «Fish Scale»-рисунок із дисперсною чарунковою будовою. В площині основи (перпендикулярно до напрямку друку) структура представлена «переплетеними» видовженими шарами, облямованими ділянками із різною схильністю до корозії при травленні.

3. Більш висока дисперсність структури та наявність більш значного викривлення кристалічної решітки обумовлюють майже двократну перевагу LPBF-друкованих зразків у твердості відносно листових зразків за приблизно однакового рівня модуля пружності.

Література.

1. Primary phase diagram overview // Laboratory for Scientific Visual Analysis. – Electron. data. – 1996. – Access mode: http://sv.rkriz.net/classes/MSE2094_NoteBook/96ClassProj/experimental/ternary2.html
2. Indacochea E. Performance of a Steel/Oxide Composite Waste Form for Combined Waste Steams from Advanced Electrochemical Processes Fuel Cycle Research and Development. [Electronic resource] / E. Indacochea, V. Kumar Gattu, X. Chen [etc.]. – Electron. text. data. – Access mode: https://www.researchgate.net/publication/325552960_Performance_of_a_SteelOxide_Composite_Waste_Form_for_Combined_Waste_Steams_from_Advanced_Electrochemical_Processes_Fuel_Cycle_Research_and_Development/figures
3. 08X16H11M3 - Сталь жаропрочная высоколегированная // Марочник стали и сплавов. – Електрон. дані. – Харків, 2003-2021. – Режим доступу : http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=48
4. Henriques B. Microstructure, hardness, corrosion resistance and porcelain shear bond strength comparison between cast and hot pressed CoCrMo alloy for metal–ceramic dental restorations / B. Henriques, D. Soares, F. S. Silva // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. – 2012. – № 12. – P. 83-92.
5. Yusuf S.M. Microstructure and corrosion performance of 316L stainless steel fabricated by Selective Laser Melting and processed through high-pressure torsion / S.M. Yusuf, M. Nie, Y. Chen, S. Yang, N. Gao // Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – vol. 763. – P. 360–375.
6. Monroy, K. Study of the pore formation on CoCrMo alloys by selective laser melting manufacturing process / K. Monroy, J. Delgado, J. Ciurana // Procedia Engineering. – 2013. – № 63. – P. 361-369.
7. Huang, Y. Microstructure and wear properties of selective laser melting 316L / Y. Huang, S. Yang, J. Gu, Q. Xiong // Materials Chemistry and Physics. – 2020. – vol. 254. – P. 123487.
8. Caminero, M.Á. Additive manufacturing of 316L stainless-steel structures using fused filament fabrication technology: mechanical and geometric properties / M.Á. Caminero, A. Romero, J.M. Chacón, P.J. Núñez [etc.] // Journal of Rapid Prototyping. – 2021. – vol. 27(3). – P. 583-591.
9. Chabak Y. Structural and tribological assessment of biomedical 316 stainless steel subjected to pulsed-plasma surface modification: comparison of LPBF 3D printing and conventional Fabrication / Y. Chabak, B. Efremenko, I. Petryshynets, V. Efremenko [etc.] // Materials. – 2021. – vol. 14(24). – P. 7671.

10. Ko G. The corrosion of stainless steel made by additive manufacturing: a review / G. Ko, W. Kim, K. Kwon, T.-K. Lee // *Metals*. – 2021. – vol. 11. – P. 516.
11. Kong D. Bio-functional and anti-corrosive 3D printing 316L stainless steel fabricated by selective laser melting / D. Kong, X. Ni, C. Dong, X. Lei [etc.] // *Materials and Design*. – 2018. – vol. 152. – P. 88–101.
12. Li H. Microstructural features of biomedical cobalt–chromium–molybdenum (CoCrMo) alloy from powder bed fusion to aging heat treatment / H. Li, M. Wang, D. Lou [etc.] // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2020. – vol. 45. – P. 146-156.
13. Di W. Densification, Tailored Microstructure, and Mechanical Properties of Selective Laser Melted Ti–6Al–4V Alloy via Annealing Heat Treatment / W. Di, W. Han, C. Xiaojun, L. Yang // *Micromachines*. – 2022. – vol.(13:2), P. 331.
14. Efremenko V.G. Structure refinement of high-Cr cast iron by plasma surface melting and post-heat treatment / V.G. Efremenko, Yu.G. Chabak, K. Shimizu, A.G. Lekatou, V.I. Zurnadzhy, A.E. Karantzalis, H. Halfa, V.A. Mazur, B.V. Efremenko // *Materials & Design*. – 2017. – vol. 126. – P. 278–290.
15. Chabak Yu.G. Change of Secondary-Carbides' Nanostate in 14.5% Cr Cast Iron at High-Temperature Heating / Yu.G. Chabak, V.G. Efremenko // *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. - 2012. - vol. 34. – P. 1205-1220.
16. Hesse O. Bainit in Stählen mit hohem Widerstand gegen Abrasivverschleiß (Bainite in Steels with High Resistance to Abrasive Wear) / O. Hesse, J. Liefeth, M. Kunert, A. Kapustyan, M. Brykov, V. Efremenko // *Tribologie und Schmierungstechnik*. – 2016. – Vol. 63 (2). - P.5-13.

Рецензент: д.т.н., проф. Налобіна О.О.

УДК 621.38-615.47:612.17

DOI 10.36910/775.24153966.2022.73.14

Д.В. Теличко

*Кафедра радіоелектронних та біомедичних комп'ютеризованих засобів та технологій
Молодший науковий співробітник, аспірант
Кафедра Харківський авіаційний університет «Харківський авіаційний інститут» ім. М.Є.
Жуковського, Україна, 61070, м. Харків, вул. Чкалова, 17
dashatelichko1@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-8557-6871>*

МЕТОДИКА НАЛАШТУВАННЯ У РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ СИСТЕМИ БЕЗДРОТОВОГО ЖИВЛЕННЯ АПАРАТУ «ШТУЧНЕ СЕРЦЕ»

Розглянуто сучасні методи організації, налаштування та оптимізації систем штучного забезпечення кровообігу пацієнтів з серцевою недостатністю (апарат «штучне серце»). Визначено особливості забезпечення енергоживлення відповідних апаратів та вказано на пріоритет у зазначеній галузі методів по адаптації сучасних систем безконтактного енергоживлення, що можуть бути розташовані поза тіла пацієнта. Розроблена методика базується на застосуванні у системі безконтактного живлення принципів магнітно-резонансного зв'язку та набору ретрансляторів. Системи безконтактного енергозабезпечення апарату «штучне серце» розміщуються у медичній палаті і включає у себе підсистему оптичного моніторингу за переміщенням пацієнта. При цьому відбувається автоматичне налаштування роботи котушки передавача та ретранслятора відповідно до цільових показників ефективності і стабільності енергоживлення. Побудована математична модель надала можливість розрахувати навантаження на обчислювальний ресурс і час проведення машинного аналізу, а відповідно оцінити можливість налаштування роботи загальної системи у режимі реального часу.

Ключові слова: апарат «штучне серце», безконтактне енергоживлення, магнітно-резонансний зв'язок, котушка передавача, котушка ретранслятора, математична модель, цільова функція.

D. V. Telychko

ARTIFICIAL HEART DEVICE WIRELESS POWER SUPPLY SYSTEM REAL-TIME ADJUSTMENT METHOD

Modern methods of organization, adjustment and optimization of artificial blood circulation system for patients with heart failure (artificial heart device) are considered. The device power supply organization peculiarities are determined and the priority of adaptation of modern wireless power supply systems, which can be located outside the patient's body, is indicated. A technique based on the application of the principles of magnetic resonance coupling for wireless power supply system has been developed. The wireless power supply systems of the "artificial heart" device are located in the medical ward and include a subsystem for monitoring the movement of the patient. At the same time there is an automatic adjustment of work of the transmitter coil and the repeater coil according to target indicators of efficiency and stability of power supply. The developed mathematical model allowed calculating of the computing resource load and program analysis time, and accordingly assesses the possibility of setting up the general system in real time.

Key words: artificial heart device, wireless power supply, magnetic resonance communication, transmitter coil, repeater coil, mathematical model, objective function.

Вступ. Протягом XXI і другої половини XX сторіччя серцево-судинні захворювання розглядаються як основна причина смертності серед населення у розвинених країнах та значній частині країн, що розвиваються [1]. Починаючи з 2020 року актуальність цієї проблеми виросла у зв'язку з появою проблеми пандемії коронавірусної хвороби «Covid-2019» спричиненої вірусом «SARS-CoV-2», що часто призводить до значних ускладнень в роботі серця і прогресування серцево-судинних захворювань [2]. У найбільш складних випадках, коли немає можливості відновити серцеву функцію пацієнта методами терапії та хірургічного втручання, застосовуються системи штучного забезпечення кровообігу, як то апарат «штучне серце». Одним з недоліків зазначеного підходу є необхідність зовнішнього живлення апарату, через включення у тіло пацієнта електродотів, що є небезпечним через регулярне проникнення інфекцій. Це вносить обмеження у життя хворого, призводить до повторних госпіталізацій, необхідності проведення курсу лікування антибіотиками і, у деяких випадках, хірургічного втручання [3-5]. Це вказує на актуальність завдання адаптації у зазначеній галузі методів безконтактного енергоживлення (Wireless Power Transfer, WPT) відповідно до поставлених задач і наявних обмежень [6].

Аналіз сучасних досліджень і публікацій присвячених проблемам впровадження методів організації, налаштування і автоматизації систем безконтактного енергоживлення апарату «штучне серце» надав можливість визначити і формалізувати актуальні підходи у даній

© Д.В. Теличко

галузі. Зокрема, у рамках даного дослідження, була запропонована загальна класифікація методів безконтактного енергоживлення систем штучного забезпечення кровообігу, що включає у себе наступні групи:

1. Трансскірні системи передачі енергії (Transcutaneous Energy Transfer Systems, TETS), що базуються на застосуванні явища електромагнітної індукції [7, 8]. Базова схема TETS включає у себе блок передавача (Transmitter Coil, TC) і блок приймача (Receiver Coil, RC), відстань між якими складає половину діаметра відповідних котушок індуктивності $d_0/2$. Недоліком системи TETS є залежність між коефіцієнтом корисної дії (ККД) передачі енергії та відстанню між котушками, що призводить до нестабільності роботи пристрою, якщо пацієнт проявляє мінімальну активність. Крім того, це зумовлює розташування на тілі пацієнта габаритного та важкого акумуляторного блоку, що у багатьох випадках є неприйнятним.

2. Системи безконтактного енергоживлення апарату «штучне серце» на основі магнітно-резонансного зв'язку (Magnetic Resonant Coupling, MRC), що, зокрема, широко використовується у електроавтомобілях [9, 10]. У зазначеній схемі застосовуються два коливальних LC-контур, що характеризуються одним значенням резонансної частоти ω_0 . Зазначений підхід надає можливість підтримувати ККД передачі електроенергії до 45% при збільшенні відстані між блоком передавача і блоком приймача до $3d_0$, що є значною перевагою у порівнянні з системами TETS [9].

Таким чином, MRC-схема може бути адаптована для побудови WPT-системи, яка охоплює медичну палату чи приміщення, у якому проживає пацієнт. Для збільшення відстані передачі електроенергії додатково використовується котушка проміжного ретранслятора (Intermediate Repeater, IR) положення якої регулюються відповідно до переміщення людини по палаті через визначення показника ККД безконтактного енергоживлення та пристрої оптичного моніторингу (камери або індикатори руху). На сьогоднішній момент існують дослідження, у яких реалізується відповідна схема, але при цьому не враховується оптимізація системи з точки зору ККД, а також розроблені прототипи не надають можливість стабілізувати рівень напруги у межах допустимих для безпечного функціонування апарату «штучне серце» [11-20], що розглядається як **невирішена частина загального дослідження**.

Таким чином, метою дослідження стала побудова цілісної методології побудови системи безконтактного енергоживлення апарату «штучне серце», що базується на MRC-схемі та наборі проміжних ретрансляторів, а також її оптимізація відповідно цільових показників ККД та стабілізації вихідної напруги.

1. Адаптація методів безконтактної передачі енергії до вирішення задачі енергоживлення апарату «штучне серце»

Запропонована у рамках даного дослідження схема підсистеми безконтактного енергоживлення системи штучного забезпечення кровообігу на основі MRC показана на рис. 1.

Зазначена схема підсистеми безконтактного енергоживлення включає у себе наступні функціональні компоненти:

- котушка передавача, система живлення (Power Supply, PS) та відповідні блоки силової електроніки;
- котушка приймача та відповідні датчики для визначення ефективності і стабільності передачі енергії, а також даних про положення пацієнта;
- котушка ретранслятора та механізми її позиціонування за допомогою роботизованої підсистеми;
- блок машинного аналізу, що визначає оптимальне положення котушки ретранслятора відповідно розташування котушок передавача та приймача у режимі реального часу.

Відповідно до схеми, представленої на рис. 1 передавач підключено до габаритного блоку акумуляторів або стаціонарної системи енергоживлення. Для підсилення сигналу використовується блок ретранслятора, що позиціонується автоматичними механізмами відповідно показників датчикам напруги на апараті «штучне серце» з метою збільшення ККД та стабілізації рівня напруги у вказаних межах (тобто, рівень напруги, при якому система штучного забезпечення кровообігу працює без збоїв з відповідним значенням допустимої похибки).

Блок приймача і датчики розташовуються на одязі пацієнта. Завдяки методу магнітно-резонансного зв'язку, що характеризується більшою відстанню ефективної передачі енергії, його можна розташувати на спині, що, очевидно, є більш зручним, хоча й суттєво зменшує ККД.

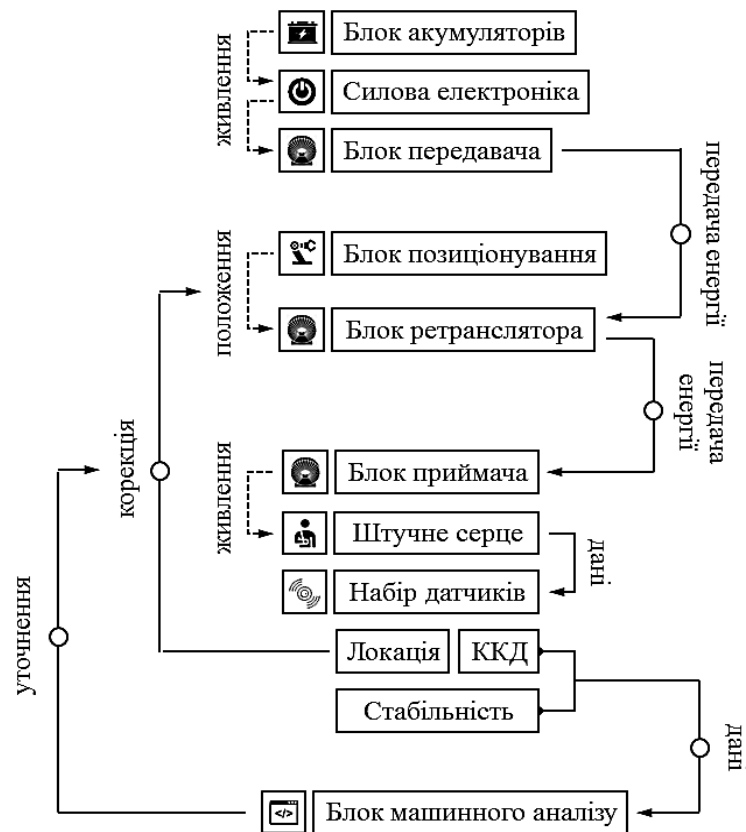


Рис. 1. Базова схема підсистеми безконтактного енергоживлення апарату штучного серця

Налаштування ефективної роботи системи безконтактного енергоживлення шляхом забезпечення стабільної напруги на апараті «штучне серце» та максимального ККД передачі енергії необхідно максимізувати коефіцієнт зв'язку (Coupling Coefficient, CC) між котушкою передавача та котушкою приймача, а також узгодити імпеданси відповідних ланцюгів. Налаштування системи включає у себе визначення оптимальних показників як елементів електричних контурів так і механічних параметрів (просторове розташування ретранслятора відповідно до переміщення пацієнта камерами руху або відеокамерою з належним програмним забезпеченням). Блок машинного аналізу при цьому дозволяє визначити оптимальну відстань між положенням котушки ретранслятору по відношенню до котушки передавача та котушки приймача (блок, пов'язаний з пацієнтом).

2. Розробка системи безконтактного живлення апарату «штучне серце» на основі магнітно-резонансного зв'язку

Еквівалентна електрична схема відповідної системи безконтактного енергоживлення представлена на рис. 2.

Набір елементів, з яких складається схема включає у себе:

- елементи блока енергоживлення, зокрема, джерело напруги U_{PC} , внутрішній опір R_{PC} та опір блока генератора R_{TS}^0 , котушка індуктивності генератора L_{TS}^0 ;
- елементи блока передачі енергії, зокрема, опір резонатора передавача R_{TC}' , конденсатор резонатора передавача C_{TC}' , котушка індуктивності резонатора передавача L_{TC}' ;
- елементи блока внутрішнього ретранслятора, зокрема, резистор кола ретранслятора R_{IR} , конденсатор кола ретранслятора C_{IR} і котушка індуктивності кола ретранслятора L_{IR} ;
- елементи блока приймача, зокрема, резистор кола резонатора R_{RC}' , котушка індуктивності кола резонатора L_{RC}' , конденсатор кола резонатора C_{RC}' , резистор приймача R_{RC}^0 , котушка індуктивності приймача L_{RC}^0 і резистор навантаження R_L .

При цьому ефективність електропередачі визначається через показник взаємної індуктивності індуктивності:

- M_{TC} — взаємна індуктивність між котушками L_{TS}^0 і L'_{TC} ;
- M_{IR}^{TC} — взаємна індуктивність між котушками L'_{TC} і L_{IR} ;
- M_{RC}^{IR} — взаємна індуктивність між котушками L_{IR} і L'_{RC} ;
- M_{RC} — взаємна індуктивність між котушками L'_{RC} і L_{RC}^0 ;
- M_{RC}^{TC} — взаємна індуктивність між котушками L'_{TC} і L_{RC}^0 .

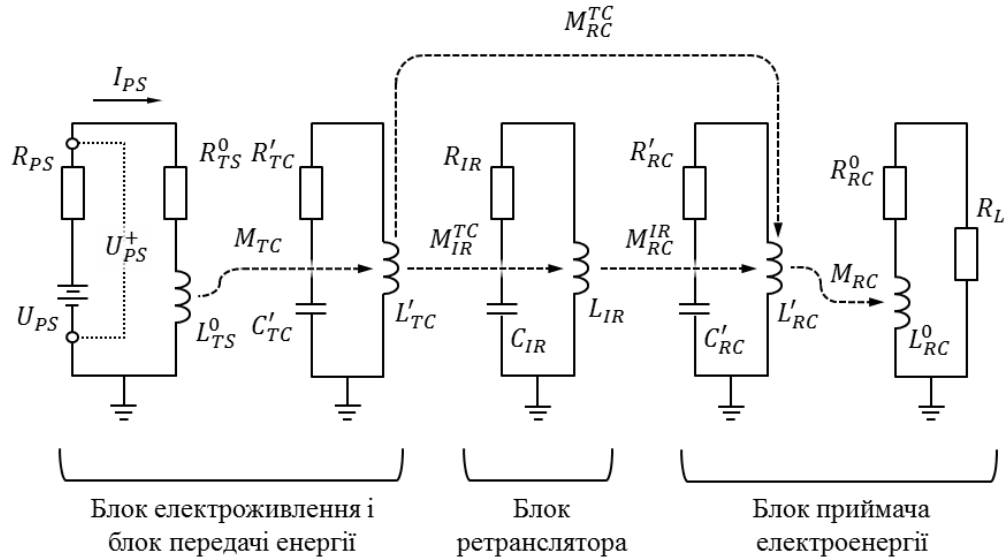


Рис. 2. Електричний контур системи безконтактного енергоживлення апарату «штучне серце»

Для розрахунку чисельних показників ефективності роботи системи безконтактної передачі електроенергії необхідно співвіднести значення вхідної і вихідної потужності контурів PS і RC, відповідно. Нехай потужність на вході представленої схеми складає P_{PS} , що визначається на основі значень U_{PS}^+ і I_{PS} , а потужність на виході складає P_{RS} , що, у свою чергу, визначається на основі значень R_L і I_{RS} :

$$\begin{cases} P_{PS} = Re(U_{PS}^+ \cdot I_{PS}) \\ P_{RS} = (I_{RS})^2 \cdot R_L \end{cases} \rightarrow \eta = \frac{P_{RS}}{P_{PS}} \cdot 100\%. \quad (1)$$

У свою чергу, I_{PS} і I_{RS} можуть бути записані як функції, змінними аргументами яких є значення взаємної індуктивності M_{IR}^{TC} , M_{RC}^{IR} і M_{RC}^{TC} у зв'язку з тим, що вони змінюються в залежності від локації і положення ретранслятора (набори $\{X_{IR}, Y_{IR}, Z_{IR}\}$ і $\{\theta_X^{IR}, \theta_Y^{IR}, \theta_Z^{IR}\}$, відповідно) та локації і положення пацієнта (набори $\{X_{RC}, Y_{RC}, Z_{RC}\}$ і $\{\theta_X^{RC}, \theta_Y^{RC}, \theta_Z^{RC}\}$, відповідно), у той час як показники M_{TC} і M_{RC} можуть розглядатись як константи, тому що блок генератора стабільно пов'язаний з передавачем, а приймач — з апаратом «штучне серце».

На рівні формалізації зазначеного підходу та побудови математичного апарату можна ввести матрицю, що узагальнює взаємне розташування блоку передавача, блоку ретранслятора та блоку приймача LP , а також матрицю, що узагальнює змінні значення взаємної індуктивності $M\Sigma$ відповідно законів Кірхгофа:

$$\begin{cases} LP: \{X_{IR}, Y_{IR}, Z_{IR}, \theta_X^{IR}, \theta_Y^{IR}, \theta_Z^{IR}, X_{RC}, Y_{RC}, Z_{RC}, \theta_X^{RC}, \theta_Y^{RC}, \theta_Z^{RC}\} \\ M\Sigma: \{M_{IR}^{TC}, M_{RC}^{IR}, M_{RC}^{TC}\} \end{cases} \quad (2)$$

Таким чином, у якості цільової функції ефективності F_G можна використати різницю ККД, як функції від $M\Sigma$ та штрафної функції (Penalty Function, PF) — F_P , що також розглядається як цільова функція початкової задачі безумовної оптимізації, аргументом якої є LP :

$$F_G = \eta(M\Sigma) - F_P(LP). \quad (3)$$

За умов неоптимального розташування котушок передавача, ретранслятора та приймача відповідно заданих допустимих значень відстані та положення, значення F_P нелінійно зростає відповідно встановленого алгоритму штрафної функції, а при знаходженні відповідних показників у допустимих межах $F_P = 0$. Це надає можливість за допомогою методу градієнтного спуску або аналогічних математичних підходів визначити максимум цільової функції і, таким чином, звести задачу налаштування оптимальної локації і положення блока ретранслятора до математичної задачі пошуку максимуму цільової функції.

При застосуванні методу градієнтного спуску різниця між значеннями набору LP взаємного розташування блоків визначається через значення кроку зміни цільової функції λ , що визначає швидкість спуску та розрахунок функції градієнта F_G :

$$LP_{i+1} - LP_i = \lambda \cdot grad(F_G). \quad (4)$$

У свою чергу, для зменшення навантаження на обчислювальний ресурс, наближене значення взаємної індуктивності M_{IR}^{TC} , M_{RC}^{IR} і M_{RC}^{TC} між блоками пропонується розрахувати через відстань між котушками r_{IR}^{TC} , r_{RC}^{IR} і r_{RC}^{TC} , відповідно, кількість витків котушок n_{TC} , n_{IR} і n_{RC} , відповідно, а також наступним чином:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{IR}^{TC} \approx \frac{\mu_0 \cdot n_{TC} \cdot n_{IR}}{4\pi} \cdot \sum_{\Delta s_{TC}, \Delta s_{IR}} \frac{\Delta s_{TC} \cdot \Delta s_{IR}}{r_{IR}^{TC}} \\ M_{RC}^{IR} \approx \frac{\mu_0 \cdot n_{IR} \cdot n_{RC}}{4\pi} \cdot \sum_{\Delta s_{IR}, \Delta s_{RC}} \frac{\Delta s_{IR} \cdot \Delta s_{RC}}{r_{RC}^{IR}} \\ M_{RC}^{TC} \approx \frac{\mu_0 \cdot n_{TC} \cdot n_{RC}}{4\pi} \cdot \sum_{\Delta s_{TC}, \Delta s_{RC}} \frac{\Delta s_{TC} \cdot \Delta s_{RC}}{r_{RC}^{TC}} \end{array} \right. ,$$

де Δs_{TC} , Δs_{IR} і Δs_{RC} — одиничні вектори відрізків для блоків передавача, ретранслятора та приймача, відповідно, а μ_0 — магнітна стала.

3. Оптимізація методики організації та налаштування системи безконтактного живлення апарату «штучне серце»

Запропонована методика організації та налаштування системи безконтактного живлення апарату «штучне серце», що базується на алгоритмі пошуку глобального максимуму цільової функції може бути формалізована наступними чином: (I) побудова еквівалентної електричної схеми системи безконтактного живлення, (II) розрахунок значень, які характеризують роботу системи безконтактного живлення, що є константами, (III) визначення за допомогою системи датчиків матриці, що узагальнює взаємне розташування блоку передавача, блоку ретранслятора та блоку приймача LP , (IV) розрахунок матриці $M\Sigma$, що визначає змінні значення взаємної індуктивності на основі законів Кірхгофа, (V) встановлення алгоритму розрахунку штрафної функції, (VI) розрахунок ККД, (VII) розрахунок штрафної функції, (VIII) розрахунок цільової функції як різниці ККД і штрафної функції.

Після цього відбувається встановлення оптимального значення кроку зміни цільової функції λ відповідно вимог до точності аналізу та обмежень на навантаження на обчислювальний ресурс блоку машинного аналізу. Згідно отриманих значень може бути проведено коригування електричної схеми системи безконтактного живлення, що включає у себе внесення змін як саму структура, так і зміну представлених показників окремих елементів, як це показано на рис. 3.

Висновки

У результаті проведеного дослідження було розглянуто методи організації підсистеми енергоживлення системи штучного забезпечення кровообігу пацієнтів з серцевою недостатністю. Вказано на пріоритет застосування у зазначеній галузі безконтактних методів енергоживлення на основі магнітно-резонансного зв'язку. Була запропонована методика застосування набору роботизованих ретрансляторів, взаємне положення яких по відношенню до приймача і передавача оптимізуються згідно з цільовими показниками ККД і стабільності передачі енергії.

В результаті проведеного дослідження було запропоновано:

1. Базова схема підсистеми безконтактного енергоживлення апарату «штучне серце» на основі системи ретрансляторів;
2. Еквівалентний електричний контур системи безконтактного енергоживлення апарату «штучне серце»;
3. Комплексна методологія налаштування та оптимізації системи безконтактного живлення.

Розроблена методика характеризується простим математичним апаратом, що дозволяє мінімізувати навантаження на обчислювальний ресурс апаратно-програмної платформи

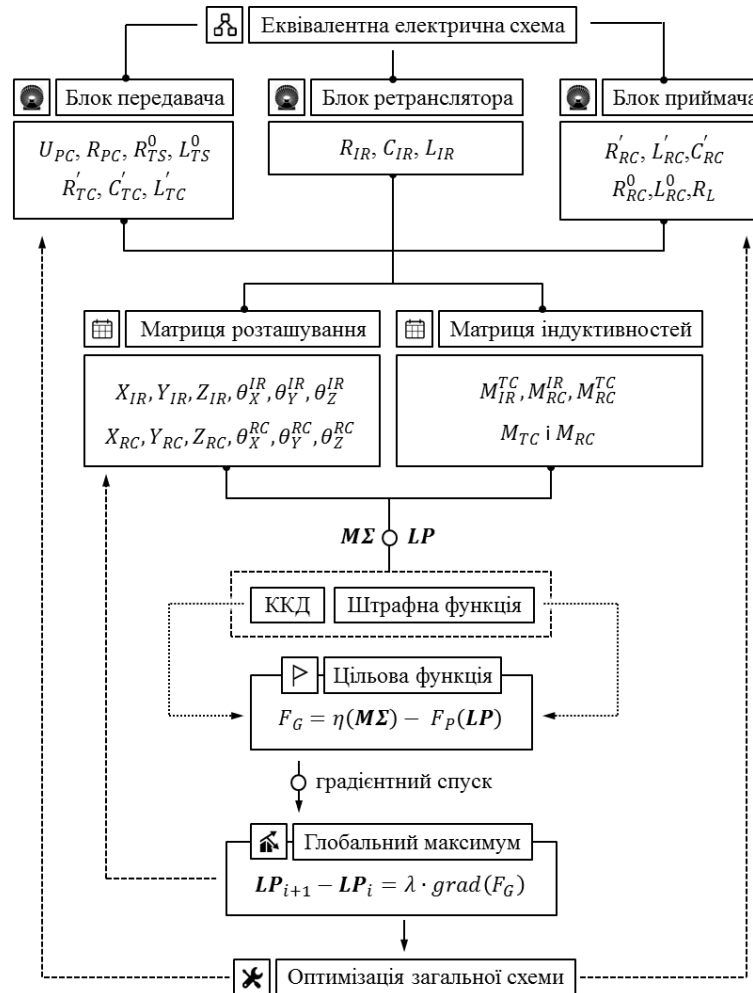


Рис. 3. Методологія налаштування системи безконтактного живлення

Література

1. Frayn, K. N., Stanner, S., & Coe, S. (2019). *Cardiovascular disease: Diet, nutrition and emerging risk factors*. Published by Blackwell Publishing for the British Nutrition Foundation.
2. Saad, M., & Vittorio, T. J. (2022). *Covid-19 and the heart: A case-based pocket guide*. McGraw-Hill.
3. Frankfort, A., Baker, C., & Wilson, D. (2017). *Artificial heart*. Phonic Books Ltd.
4. Creech, T. A. (2011). *Artificial heart*. JMS Books LLC.
5. Morshuis, M., El-Banayosy, A., Arusoglu, L., Koerfer, R., Hetzer, R., Wieselthaler, G., Pavie, A., & Nojiri, C. (2009). European experience of DuraHeart™ magnetically levitated centrifugal left ventricular assist system. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*, 35(6), 1020–1028. <https://doi.org/10.1016/j.ejcts.2008.12.033>
6. Hijikata, W., & Suzuki, H. (2018). Real-time optimization of Coil positioning in wireless power transfer system for Artificial Heart. *2018 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*. <https://doi.org/10.1109/wpt.2018.8639256>.

7. Dowling, R. D., Etoch, S. W., Stevens, K., Butterfield, A., Koenig, S. E., Johnson, A., Chiang, B., & Gray, L. A. (2000). Initial experience with the Abiocor implantable replacement heart at the University of Louisville. *ASAIO Journal*, 46(5), 579–581. <https://doi.org/10.1097/00002480-200009000-00014>.
8. Bluvshstein, V., & Lucke, L. (2012). Modeling TETS to optimize performance for ventricular assist and Artificial heart devices. *Journal of Medical Devices*, 6(1). <https://doi.org/10.1115/1.4026778>.
9. Kurs André, Karalis, A., Moffatt, R., Joannopoulos, J. D., Fisher, P., & Soljačić Marin. (2007). Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances. *Science*, 317(5834), 83–86. <https://doi.org/10.1126/science.1143254>.
10. Steinweg, T. (2011). The Electric Car Battery: Sustainability in the supply chain. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1802553>.
11. Hsu, S.-L., Tsai, N.-C., & Lin, C.-C. (2013). An innovative power regulation method applied for wireless magnetic-energy transportation. *Mechatronics*, 23(3), 289–296. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2012.12.006>
12. Zhu, Z., Zhang, C., & Li, D. (2018). A novel parameter design and optimization method for Wireless Power Transfer System. *2018 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT)*. <https://doi.org/10.1109/accept.2018.8610852>.
13. Nagato, S., Hijikata, W., & Shinshi, T. (2017). Evaluation of a transcutaneous energy transmission system with a flexible coil for an implantable ventricular assist device. *2017 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*. <https://doi.org/10.1109/wpt.2017.7953865>.
14. Ishizaki, T., & Nishikawa, K. (2014). Wireless Power Beam device using microwave power transfer. *2014 IEEE Wireless Power Transfer Conference*. <https://doi.org/10.1109/wpt.2014.6839622>.
15. Zhang, Y. (2018). Radio Frequency Power Source Design for Wireless Power Transfer System. *2018 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*. <https://doi.org/10.1109/wpt.2018.8639140>.
16. Abdolkhani, A. (2016). Fundamentals of inductively coupled Wireless Power Transfer Systems. *Wireless Power Transfer — Fundamentals and Technologies*. <https://doi.org/10.5772/63013>.
17. Minnaert, B., & Stevens, N. (2018). Maximizing the power transfer for a mixed inductive and Capacitive Wireless Power Transfer System. *2018 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*. <https://doi.org/10.1109/wpt.2018.8639265>.
18. Aboualalaa, M., & Elsadek, H. (2020). Rectenna systems for RF Energy Harvesting and wireless power transfer. *Recent Wireless Power Transfer Technologies*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.89674>.
19. Agbinya, J. I. (2016). *Wireless Power Transfer*. River Publishers. https://www.researchgate.net/publication/344350800_Wireless_Power_Transfer_2nd_Edition.
20. Shinohara, N. (2018). *Wireless Power Transfer: Theory, technology, and applications*. Institution of Engineering and Technology. <https://digital-library.theiet.org/content/books/po/pbpo112e>.

Т.І. Четвержук, Р.Г. Редько, Р.М. Полінкевич, О.М. Залета, Б.П. Валецький

Луцький національний технічний університет

ПРОБЛЕМИ ТА ЗАДАЧІ ПРОЕКТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНКУ НЕСУЧИХ ЧАСТИН МЕТАЛОРІЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ З УРАХУВАННЯМ НАВАНТАЖЕНЬ

Проведено комплексний аналіз недоліків існуючих методик розрахунків несучих частин металорізальних верстатів з урахуванням різного роду навантажень. Запропоновано шляхи покращення кінцево-елементних методів їх розрахунків з метою більш детального врахування впливу деформацій окремих конструктивних елементів та деталей на точність всього верстату.

Ключові слова: металорізальний верстат, проектування, кінцево-елементна модель, навантаження, точність, жорсткість, динамічні характеристики.

Т.И. Четвержук, Р.Г. Редько, Р.Н. Полинкевич, , О.М. Залета, Б.П. Валецький

ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА НЕСУЩИХ ЧАСТЕЙ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ С УЧЕТОМ НАГРУЗОК

Проведен комплексный анализ недостатков существующих методик расчетов несущих частей металлорежущих станков с учетом разного рода нагрузок. Предложены пути улучшения конечно-элементных методов их расчетов с целью более детального учета влияния деформаций отдельных конструктивных элементов и деталей на точность всего станка.

Ключевые слова: металлорежущий станок, проектирование, конечно-элементная модель, нагружение, точность, жесткость, динамические характеристики.

T. Chetverzhuk, R. Red'ko, R. Polinkevich, O. Zaleta, B. Valetskyi

PROBLEMS AND TASKS OF DESIGN AND CALCULATION OF LOADING PARTS OF METALLORISING MACHINES TAKING INTO ACCOUNT LOADS

The complex analysis shortcomings of the existing methods of calculations bearing parts of metal-cutting machines taking into account various kinds of loadings is carried out. Ways to improve the finite element methods of their calculations in order to take into account in more detail the impact of deformation of individual structural elements and parts on the accuracy of the whole machine.

Keywords: machine-cutting tool, design, finite element model, load, accuracy, rigidity, dynamic characteristics.

Постановка проблеми. Одним з перспективних напрямків для впровадження обґрунтованих методик проектування є конструювання несучих частин металорізальних верстатів. В даний час при проектуванні корпусних деталей металорізальних верстатів переважно використовуються розрахункові схеми, в яких реальні конструкції металорізальних верстатів представлені у вигляді найпростіших балкових і пластинчастих моделей, а також загальні емпіричні рекомендації, отримані на основі експериментальних досліджень існуючих корпусних деталей. Такий підхід не дозволяє точно обґрунтувати доцільність застосування тієї чи іншої конструкції корпусної деталі і значно ускладнює оцінку нових конструкцій несучих частин, по яким відсутні експериментальні дані.

Разом з тим, останнім часом значно розвинулися методи розрахунку точності верстатів, а також застосування математичного моделювання напружено-деформованого стану. Перш за все, методу скінченних елементів, який дає можливість розробки і впровадження нових, більш точних і ефективних методик розрахунку і оптимізації крнструкцій верстатів. Основною задачею розрахунку несучих частин металорізальних верстатів є оцінка впливу на точність обробки їх зміщень, що виникають під дією навантажень різної природи. Даний вплив чисельно характеризується відносними зміщеннями інструменту та заготовки за нормаллю до оброблюваної поверхні, зумовленими деформаціями корпусних деталей.

Таким чином, дослідження, спрямовані на розробку науково-обґрунтованих методик розрахунку і проектування несучих частин металорізальних верстатів, є актуальною науковою задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В [1] проведена класифікація даних навантажень за ступенем можливості отримання їх точного чисельного значення. Ця класифікація представлена нижче. Статичні силові навантаження, що діють на систему, можна вважати відомими. Динамічні навантаження умовно поділяють на дві групи [2]:

1) Навантаження, параметри яких можуть бути обчислені в залежності від параметрів верстата, оброблюваної деталі та режимів обробки (навантаження від сил інерції у верстатах, з вузлами, які здійснюють зворотно-поступальні рухи, від обертання неврівноважених деталей та інструменту тощо).

2) Навантаження, параметри яких обчислити практично неможливо (навантаження від ударів у зазорах елементів приводу, при врзанні та виходах зубів інструмента тощо).

Теплові навантаження також залежить від багатьох невизначених чинників (тертя у рухомих з'єднаннях, умов теплопередачі та інших.).

Кінематичні збурення, які виникають в станині (фундаменті) визначаються властивостями ґрунту, інтенсивністю роботи сусіднього обладнання та можуть характеризуватись лише деякими усередненими параметрами. Похибки виготовлення елементів верстата, які можна розглядати як кінематичні збурення (наприклад, відхилення форми напрямних), зазвичай відомі лише за рівнем (у максимальних відхиленнях).

Виклад основного матеріалу. В даний час для розрахунку деформацій несучих частин металорізальних верстатів застосовують аналітичні методи та метод кінцевих елементів.

При використанні аналітичних методів [3] конструкція, яка розраховується, представляється у вигляді сукупності балок або пластин. При введенні певних припущень для кожного з цих елементів можна отримати рішення аналітичними методами. Для уточнення аналітичного рішення в розрахункову схему вводяться коефіцієнти, які отримують емпіричним шляхом. Дані коефіцієнти використовуються, наприклад, для визначення величин згинальних та крутильних жорсткостей балок, що входять до складу розрахункової схеми.

Перевагою аналітичних методів є їх відносна простота, а також те, що аналітичні формули, які використовуються, наочно показують вплив того чи іншого розрахункового параметра конструкції на її зміщення, наявність можливості швидко порівняти різні варіанти конструкції. Разом з тим, аналітичні методи мають значні недоліки – при їх використанні не можна врахувати реальну геометричну форму корпусних деталей, місцеві деформації окремих конструктивних елементів. Аналітичні рішення для деталей складної форми мають значну похибку і вимагають корекції за допомогою емпіричних коефіцієнтів, які, в свою чергу використовуються лише для обмеженого набору конструкцій, аналогічних тим, для яких є експериментальні дані.

Зазначені недоліки суттєво обмежують можливості застосування аналітичних методів та призводять до необхідності використання методу кінцевих елементів.

При використанні методу кінцевих елементів [4] конструкція, яка розраховується, представляється у вигляді сукупності простих геометричних об'єктів – кінцевих елементів, для кожного з яких заздалегідь визначений вид функціональної залежності розподілу зміщень у цьому елементі від зміщень у його вузлах. Вузли забезпечують з'єднання елементів між собою, їх зміщення визначають напружено-деформований стан всієї конструкції.

Для кожного кінцевого елемента виходячи з його форми, властивостей матеріалу, товщини (для пластинчастих елементів) можна задати наступну залежність між зміщеннями та силами у вузлах:

$$F = [K]u + [D]u' + [M]u'' \quad (1)$$

де: F – вектор, що визначає значення сил у вузлах кінцевого елемента; u , u' і u'' – вектори, що визначають, відповідно, значення зміщень у вузлах кінцевого елемента, а також його перша та друга похідні по часу; $[K]$, $[D]$ та $[M]$ – відповідно, матриці жорсткості, демпфування та мас кінцевого елемента.

У випадку статичної задачі всі компоненти векторів u' та u'' є нульовими тому рівняння (1) зводиться до наступного:

$$F = [K]u \quad (2)$$

Прирівнюючи до нуля суму сил, що діють на кожен з вузлів кінцевоелементної моделі і виразивши дані сили через зміщення вузлів відповідно (1) і (2), можна отримати систему рівнянь, що містить як невідомі зміщення вузлів і знайти їх значення шляхом розв'язання цієї системи.

В даний час для кінцевоелементних розрахунків деталей пружної системи металорізальних верстатів [5] в основному використовуються два типи кінцевоелементних моделей:

- 1) з пластинчастих елементів.
- 2) зі стрижневих елементів та жорстких тіл.

Кінцево елементні моделі з пластинчастих елементів застосовують для статичних розрахунків корпусних деталей складної форми з урахуванням впливу окремих конструктивних елементів – стінок, ребер жорсткості та інших. Дані моделі застосовуються для порівняння різних конфігурацій корпусних деталей та вибору найбільш раціональної.

Кінцево елементні моделі зі стрижневих елементів і жорстких тіл застосовують як при статичних (рис. 1), так і при динамічних навантаженнях. При цьому з'єднання окремих елементів моделюються між собою пружинами. Ці моделі використовуються для раціонального розподілу мас і жорсткостей між елементами несучої системи, а також для порівняння різних їх компонок. Розглядаються різні схеми базування шпиндельної бабки. Розрахунок проводиться для кількох варіантів конструкції з метою визначення найкращого варіанту.

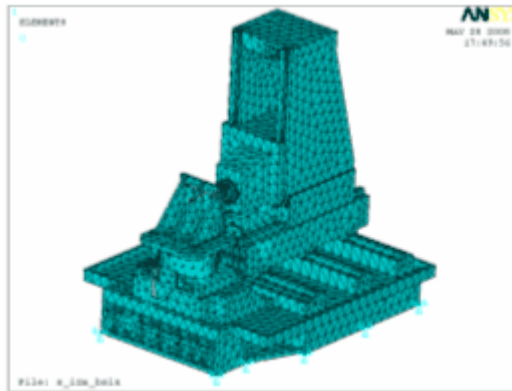


Рис. 1. Статичний розрахунок несучої системи верстата

Для оптимізації товщин стінок базових частин верстатів зазвичай використовуються кінцевоелементні моделі із пластинчастих елементів. Станина сприймається як прямокутна пластина з поперечними ребрами жорсткості. Ребра жорсткості утворюють коміркову структуру з прямокутними отворами. Здійснюється підбір оптимальних значень товщин стінок станини з метою мінімізації її маси при обмеженнях на її силові зміщення. При визначенні теплових деформацій корпусні деталі верстата розглядають як бруси чи коробки з тонкими стінками. Спочатку визначають температуру деталей шляхом розгляду теплового балансу при роботі верстата, при цьому для розрахунку потужності тепловиділення в механізмах і системах верстата, а також для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі різних поверхонь використовуються емпіричні формули. Потім визначають теплові деформації корпусних деталей. Розрахунок теплових деформацій несучої системи верстата та показників його точності з урахуванням теплових зв'язків між його елементами також проводять із застосуванням методу кінцевих елементів (рис 2.).

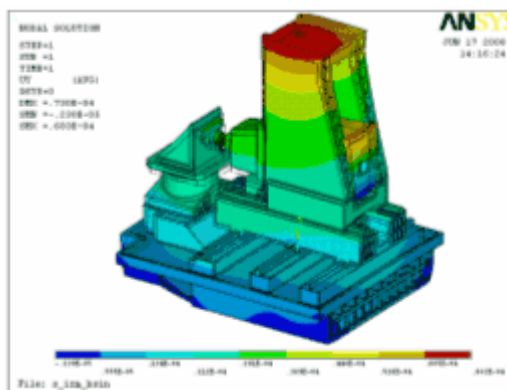


Рис. 2. Тепло-деформаційний розрахунок несучої системи верстата.

Аналіз багатьох робіт показує, що в останній час при кінцевоелементних розрахунках несучих систем металорізальних верстатів використовуються, як правило, спрощені моделі, що не враховують місцевих деформацій окремих конструктивних елементів несучих частин і взаємний вплив один на одного деформацій окремих корпусних деталей. Використовують спрощені схеми закріплення та навантаження корпусних деталей. Як остаточні результати кінцевоелементного розрахунку розглядаються розрахункові зміщення окремих точок пружної системи. Не оцінюються відхилення розмірів і форми оброблюваних деталей, обумовлені деформаціями несучих частин

верстата. Завдяки експериментальним дослідженням, встановлено, що в загальному балансі зміщень шпинделя в радіальному напрямі на шпindelну бабки припадає не менше 30%, а в осьовому напрямі 60-70%, що підтверджує актуальність досліджень власної жорсткості корпусних деталей металорізальних верстатів. З огляду на те, що в даній роботі проводиться розрахунок не тільки окремих несучих частин, а й складальних одиниць, що містять кілька корпусних деталей, при аналізі раніше проведених досліджень значну увагу приділялося методом врахування в розрахункових схемах податливості стиків несучих систем [6] і експериментальним дослідженням у цій галузі.

З'єднання, які використовуються у корпусних деталях, можна розділити на дві групи – рухомі і нерухомі. Рухомі з'єднання використовуються для встановлення на корпусні деталі рухомих вузлів – супортів, шпindelних вузлів і т. п. Конструктивно дані з'єднання реалізуються, як правило, за допомогою напрямних або підшипників. Нерухомі з'єднання використовуються, як правило, для з'єднання окремих корпусних деталей між собою і зазвичай конструктивно реалізуються за допомогою затягнутих стиків. Затягування стиків здійснюється, як правило, за допомогою гвинтових з'єднань. Моделювання затягнутих стиків з огляду на те, що їх податливість співставна зі власною податливістю корпусних деталей призводить до визначення взаємного впливу власних деформацій корпусних деталей та контактних деформацій у затягнутих стиках і відповідно, виникає необхідність їх одночасного врахування під час побудови розрахункової схеми.

Отже вказані недоліки використовуваних методик розрахунку призводять до необхідності уточнення кінцевоелементних розрахунків несучих частин металорізальних верстатів з метою більш детального врахування деформацій окремих конструктивних елементів несучих частин.

Висновки. В даний час для розрахунку силових і теплових зміщень несучих частин верстатів, як правило, застосовуються або аналітичні методи, при використанні яких корпусні деталі розглядаються як рами або балки, або методом кінцевих елементів з використанням спрощених балкових і пластинчастих моделей, які не враховують місцевих деформацій окремих конструктивних елементів корпусних деталей. Форма несучих частин металорізальних верстатів визначається, в основному, виходячи з критеріїв жорсткості, на основі рекомендацій, розроблених для різних типів корпусних деталей на основі досвіду їх експлуатації. Існуючий підхід до конструювання несучих частин металорізальних верстатів не забезпечує досить точну оцінку жорсткості корпусних деталей, не дає можливості визначити оптимальну форму корпусних деталей з метою мінімізації впливу їх деформацій на точність обробки.

Отже можна сформулювати такі вимоги до методик проектування та розрахунку несучих частин металорізальних верстатів з урахуванням навантажень: Забезпечити вплив місцевих деформацій всіх конструктивних елементів, що істотно впливають на зміщення базових поверхонь (грані напрямних, поверхні опор шпинделя). Забезпечити близькі до реальної конструкції схеми закріплення та навантаження. При розрахунку конструкції, що складається з кількох деталей, враховувати реальні умови контакту між ними.

Список використаних джерел:

1. Ito Y. Modular design for machine tool. / Y. Ito – McGraw-Hill, New-York, 2008. – 504 p.
2. Чуприна В. М. Динамічні розрахунки верстатів та їх вузлів за методом кінцевих елементів в САПР. / В.М. Чуприна // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – Чернігів: ЧДТУ, 2013. – №2(65). – С.81-91
3. Четвержук Т. І. Методика визначення точнісної надійності вузлів верстата / О. Ф. Гордєєв, Т. І. Четвержук // Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади», – Луцьк, 2014 – Вип. 1 – С. 21-27.
4. Дубенець В. Г. Основи методу скінченних елементів. Навчальний посібник. / В.Г.Дубенець– Чернігів, ЧДТУ, 2007. – 345 с.
5. Струтинський В.Б.. Математичне моделювання пружної системи верстата для визначення точності обробки / В.Б. Струтинський, О.В. Колот, В.М. Чуприна // Вісник Херсонського національного технічного університету. – №1(56). -2016. – С.179-191.
6. Четвержук Т. І. Характеристики і моделювання стиків несучої системи верстата / О. Ф. Гордєєв, Р. М. Полінкевич, Т. І. Четвержук, Р. П. Голодюк // Науковий журнал «Технологічні комплекси». – Луцьк, 2014. – Вип. №1(9) – С. 174-179.

С. Ю. Чайковський

старший науковий співробітник випробувальної лабораторії
Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби
безпеки України
ORCID 0000-0002-2891-0845

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ КОРИГУВАННЯ ПЕРІОДУ КАЛІБРУВАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ НА ОСНОВІ МЕТОДУ РЕАКЦІЇ

У статті проведено дослідження методу коригування періоду калібрування вимірювального обладнання на основі методу реакції. Структуровано поняття калібрування та підходів до здійснення повірок. Визначено основні складові впливу кількості повірок на загальний цикл виробництва. Детально описано етапи та принципи проведення коригування періоду калібрування вимірювального обладнання від визначення необхідної кількості одиниць засобів вимірювального обладнання для випробування до механізмів застосування математичної статистики до отриманих значень, з метою знаходження вибіркового середнього та вибіркового стандартного відхилення, враховуючи результати нестабільності, які перевищують інтервали, та ґрунтуючись на вибірковій характеристиці розподілу нестабільності метрологічних ознак одиниць вимірювального обладнання. У якості вимірювального приладу для проведення дослідження обрано вимірювач комплексних коефіцієнтів передачі (векторний аналізатор ланцюгів) P2-116. Зазначено, що метод коригування періоду калібрування базується на методі реакції в основі якого лежить дослідження параметрів приладу відповідно до умов, що змінюються. Підкреслено, що зміна умов експлуатації полягає у перетворенні імпедансу порту, включенні ланцюга та виключенні останнього. Сформовано схеми реалізації кожного підходу. Математично обґрунтовано принципи роботи з вибіркою отриманих значень та їх обробка відповідно до методу коригування періоду калібрування вимірювального приладу. Проведено групування отриманих значень за порядковими номерами перевірок, починаючи з виготовлення або ремонту вимірювального обладнання з метою коригування періоду калібрування. У табличній формі представлено результати випробувань тридцяти вимірювачів комплексних коефіцієнтів передачі (векторний аналізатор ланцюгів) з якими, із застосування статистичної обробки результатів інтервалу охоплення для кожної групи здійснено прорахунок основних математичних показників. Представлено, на основі розрахунку систему рівнянь, вирішення якої дозволило отримати значення коефіцієнтів необхідних для встановлення періоду калібрування. Порівнюючи отримані результати із заявленими у технічній документації виробником, підкреслено, що необхідність коригування періоду калібрування вимірювального обладнання є беззаперечним фактом, так як підвищення періоду є економічно вигідним для підприємства яке використовує дане обладнання у власному виробництві.

Ключові слова: коригування, метод, період, вимірювальне обладнання, калібрування, повірка, реакція.

S. Tchaikovsky

INVESTIGATION OF THE METHOD OF ADJUSTING THE CALIBRATION PERIOD OF MEASURING EQUIPMENT BASED ON THE REACTION METHOD

The article investigates the method of adjusting the calibration period of measuring equipment based on the reaction method. The concept of calibration and approaches to calibration is structured. The main components of the influence of the number of calibrations on the overall production cycle are determined. The stages and principles of adjusting the calibration period of measuring equipment from determining the required number of units of measuring equipment for testing to the mechanisms of application of mathematical statistics to the obtained values, in order to find the sample mean and sample standard deviation, taking into account instability on the sample characteristics of the distribution of instability of metrological features of measuring equipment units. A meter of complex transmission coefficients (vector circuit analyzer) P2-116 was chosen as a measuring device for the study. It is noted that the method of adjusting the calibration period is based on the method of reactions, which is based on the study of the parameters of the device in accordance with changing conditions. It is emphasized that the change in operating conditions is to convert the port impedance, turn on the circuit and turn it off. Schemes of realization of each approach are formed. The principles of work with sampling of the received values and their processing according to a method of adjustment of the period of calibration of the measuring instrument are mathematically substantiated. The obtained values were grouped by serial numbers of inspections, starting with the manufacture or repair of measuring equipment in order to adjust the calibration period. The tabular form presents the test results of thirty meters of complex transmission coefficients (vector circuit analyzer) with which, using statistical processing of the results of the coverage interval for each group, the calculation of basic mathematical indicators. Based on the calculation, a system of equations is presented, the solution of which allowed to obtain the values of the coefficients required to establish the calibration period. Comparing the results with those stated in the technical documentation by the manufacturer, it is emphasized that the need to adjust the calibration period of measuring equipment is an indisputable fact, as increasing the period is cost-effective for the company that uses this equipment in its own production.

Key words: adjustment, method, period, measuring equipment, calibration, verification, reaction.

Вступ та постановка завдання. Загально визнаним підходом до проведення калібрування є здійснення сукупності операцій направлених на встановлення взаємозв'язку між значеннями величин, що вказуються вимірювальним приладом або вимірювальною системою, або значеннями,

представленими мірою матеріалу або еталонним матеріалом, та відповідними значенням, що реалізуються стандартами, з урахуванням умов експлуатації обладнання та відповідно до умов за яких проводиться дослідження [1].

Питання здійснення калібрування вимірювального обладнання охоплює різні підходи до калібрування, які можна вивчати з «метрологічного» або «методологічного» погляду. Метрологічний підхід ґрунтується на значеннях та властивостях фізичних і хімічних вимірів, на базі методу проводиться вимірювання / розрахунок різниці між прямим і непрямим калібруванням, а потім між калібруванням обладнання та калібруванням процесу. При прямому калібруванні (також відомому як абсолютне калібрування) значення еталона (контрольне значення) виражається в тій же величині, що і вимірювання обладнання (наприклад, калібрування ваг при гравіметричному визначенні), тоді як при непрямому (або відносному) калібруванні, значення еталона величини розраховується відповідно до одиниці виміру відмінного від початкового та кінцевого значення.

Період проведення калібрування визначається відповідно до атестації оцінки засобів вимірювальної техніки за існуючою системою забезпечення єдності вимірювань, проте деякі компанії настільки суворо дотримуються графіків калібрування, що часто калібрують обладнання в надмірній кількості. Беззаперечно це допомагає уникнути виробництва неякісних деталей, однак непотрібні калібрування також збільшують витрати.

Процедура визначення та регулювання періоду калібрування вимірювального обладнання є трудомісткою та складною задачею, вирішення якої дозволить скоротити витрати та підвищити якість продукції, що випускається.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основні наукові публікації за темою дослідження направлено на розкриття принципів та методологій застосування обладнання для калібрування.

В. І. Цвіліховський та В. А. Томчук [2] обговорили питання щодо критеріїв вибору методу дослідження в діагностичних лабораторіях згідно організаційної, аналітичної та діагностичної точок зору. Автори звернули увагу на міжнародні терміни та визначення правильності та відтворюваності вимірювань, чутливості та специфічності методу кількісного визначення аналізу.

Коригування між калібрувальних інтервалів вимірювального обладнання розглянули О. Косарева та О. Дзябенко [3]. Науковцями запропоновано методику встановлення і коригування міжкалібрувальних інтервалів еталонів та вимірювального обладнання, яке використовується під час проведення калібрування і випробувань у лабораторіях підприємства у відповідності з вимогами національних та міжнародних стандартів.

І. О. Потоцький [4] розробив методи визначення інтервалів між калібруваннями (міжкалібрувальних інтервалів) робочих еталонів та засобів вимірювальної техніки, які застосовуються у випробувальних та калібрувальних лабораторіях, спрямована на забезпечення метрологічної простежуваності, точності та достовірності результатів вимірювань.

Метод коригування міжкалібрувальних інтервалів засобів вимірювань дослідили В.С. Єременко, В.М. Мокійчук та О.О. Редько [5]. Авторами пропонується метод встановлення міжкалібрувальних інтервалів, який полягає у використанні даних калібрувань та проміжних перевірянь вимірювального устаткування. Розроблено програмний продукт, який реалізує запропонований метод, буде корисний у застосуванні випробувальними лабораторіями різних сфер діяльності.

Із зарубіжних авторів варто відзначити такі роботи як: Zhang Ting & Li Sheng & Liu Jixin & Xia Jianchao & He Chuyao [6], Gong Chengcheng & Wang Wenke & Zhang Zaiyong & Franssen Harrie-Jan & Cochand Fabien & Brunner Philip [7], Zhang Xinrui & Wu Sa & Li Tao [8], Moeck Christian & Freyberg Jana & Schirmer Mario [9], Tuenge Jason & Poplawski Michael [10], Sun Jingxia & Zhang Aimin & Gong Guoqiang & Jiang Jian [11], Krndija Mladjen & Latinović Marina & Broćeta Gordana & Savić Gojko [12], Wang Jing & Zhang Qi [13], Kawalec Małgorzata & Czerwińska Karolina & Pacana Andrzej [14], Myers Daniel & Ficklin Darren & Robeson Scott & Neupane Ram & Botero Acosta Alejandra & Avellaneda Pedro [15] та інші.

Проте, враховуючи описані наукові набутки, за темою, питання дослідження методу коригування періоду калібрування вимірювального обладнання на основі методу реакції залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

Постановка завдання. Дослідити метод коригування періоду калібрування вимірювального обладнання на основі методу реакції.

Викладення основного матеріалу дослідження. Метод коригування періоду калібрування вимірювального обладнання реалізується за кілька етапів.

Одним з головних є формування вимірюваної величини засобів вимірювального обладнання для випробування. Кількість вимірювального обладнання, яке входить до вибірки коригування періоду калібрування, повинно становити не менше 30 одиниць. Кожна група одиниць вимірювального обладнання може складатися з неідентичного обладнання проте такого, що є близьким за призначенням, конструкцією, технологією виготовлення або умовами застосування. За умови максимальної схожості випробувальних одиниць, результати їх випробування можуть бути включені в той самий ряд результатів, на основі яких і буде сформовано еталон калібрування вимірювального обладнання.

Наступним кроком, є випробування у навантаженому режимі, нормальному режимі та прискореному. Тут головною умовою є вимірювання перевірених параметрів при однакових термінах служби або експлуатації групи зразків направлених на встановлення значення еталону.

Встановлення періоду тривалості випробування, здійснюється за рахунок простої лінійної моделі прогнозування із застосуванням методу найменших квадратів, який для більшої точності вимагає мінімум 3 груп множинного вимірювання. Таким чином, тривалість випробування має бути не менше $2\Delta t$, де Δt – початковий інтервал калібрування.

Далі, обов'язковим є застосування математичної статистики до отриманих значень, з метою знаходження значень вибіркового середнього та вибіркового стандартного відхилення, враховуючи результати нестабільності, які перевищують інтервали, та ґрунтуючись на вибірковій характеристиці розподілу нестабільності метрологічних ознак одиниць вимірювального обладнання.

На основі отриманих математичних значень будується функція залежності від часу значень вибіркового середнього та вибіркового стандартного відхилення. Коефіцієнти поліноміального рівняння підбираються із застосуванням методу найменших квадратів. Поліноміальний порядок вибирається з варіантів 1...5 за критерієм апроксимації мінімальної похибки.

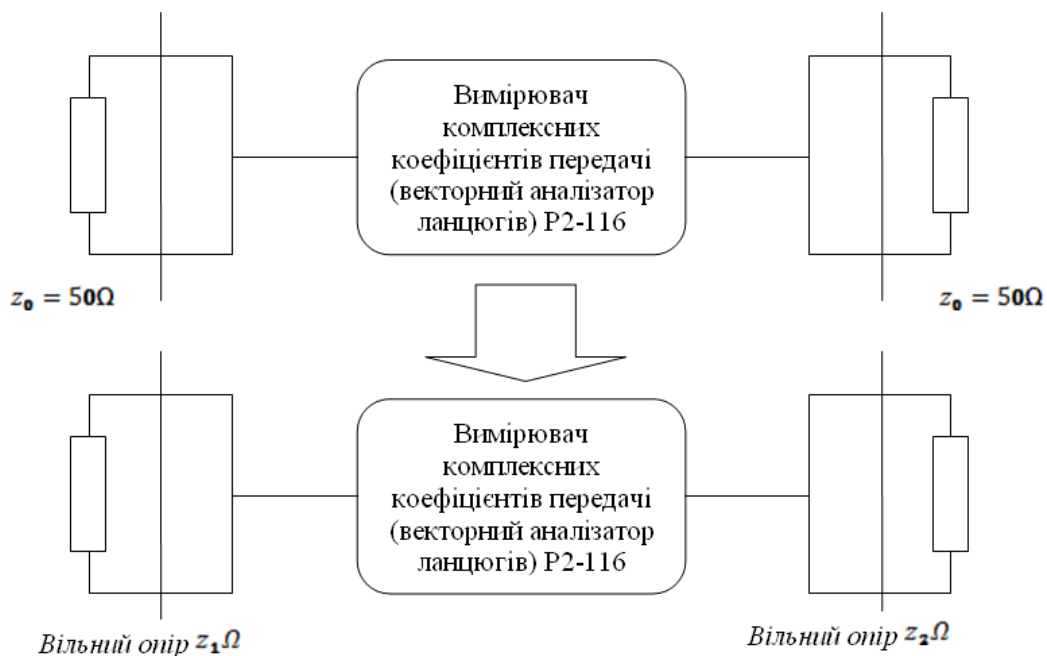


Рис. 1. Схема реалізації методу перетворення імпедансу порту

У рамках даної роботи, у якості вимірювального приладу для проведення дослідження обрано вимірювач комплексних коефіцієнтів передачі (векторний аналізатор ланцюгів) P2-116. Метод коригування періоду калібрування вимірювального приладу базується на методі реакцій в основі якого лежить дослідження параметрів приладу відповідно до умов, що змінюються. Зміна умов експлуатації полягає у перетворенні імпедансу порту, включенні ланцюга та виключенні останнього. На рисунку 1 наведено схему реалізації методу перетворення імпедансу порту.

Перетворення імпедансу порту є ефективним методом дослідження параметрів приладу навантажуючи його різними величинами, які є нестандартними для нього.

Реалізація схеми включення ланцюга запропоновано на рисунку 2.



Рис. 2. Схема включення ланцюга

Поширеною сферою застосування включення ланцюгів є розробка ланцюгів узгодження. Для цього розрахункові дані узгоджувального ланцюга включаються до результатів вимірювань і дозволяють спостерігати параметри такого нового узгодженого пристрою.

Функція виключення ланцюга зміщує площину калібрування у напрямку випробуваного пристрою так, як показано на рисунку 3.

Ланцюг, що виключається, повинен бути визначений через файл даних, що містить параметри цього ланцюга. Ці параметри можна отримати прямими точними вимірами, розрахунками чи за результатами комп'ютерного моделювання.

Вибіркою для дослідження послуговували значення випробувань тридцяти вимірювачів комплексних коефіцієнтів передачі (векторний аналізатор ланцюгів) P2-116. Отримані результати наведено у таблиці 1.

Відповідно до рекомендацій виробника, інтервал калібрування для цього типу обладнання становить дванадцять місяців, а клас точності – 0,5 %.

З метою коригування періоду калібрування результати згруповано за порядковими номерами перевірок, починаючи з виготовлення або ремонту вимірювального обладнання:

1 – засоби вимірювального обладнання, отримані під час першої перевірки після виготовлення або ремонту;

2 – засоби вимірювального обладнання, отримані при другій повірці після виготовлення або ремонту;

інші – за порядковим номером перевірок, виготовлення чи ремонту вимірювального обладнання.

Застосування статистичної обробки результатів інтервалу охоплення для кожної групи дозволяє знайти варіанти узагальненого нормального розподілу метрологічних властивостей (нестабільності засобу вимірювання).

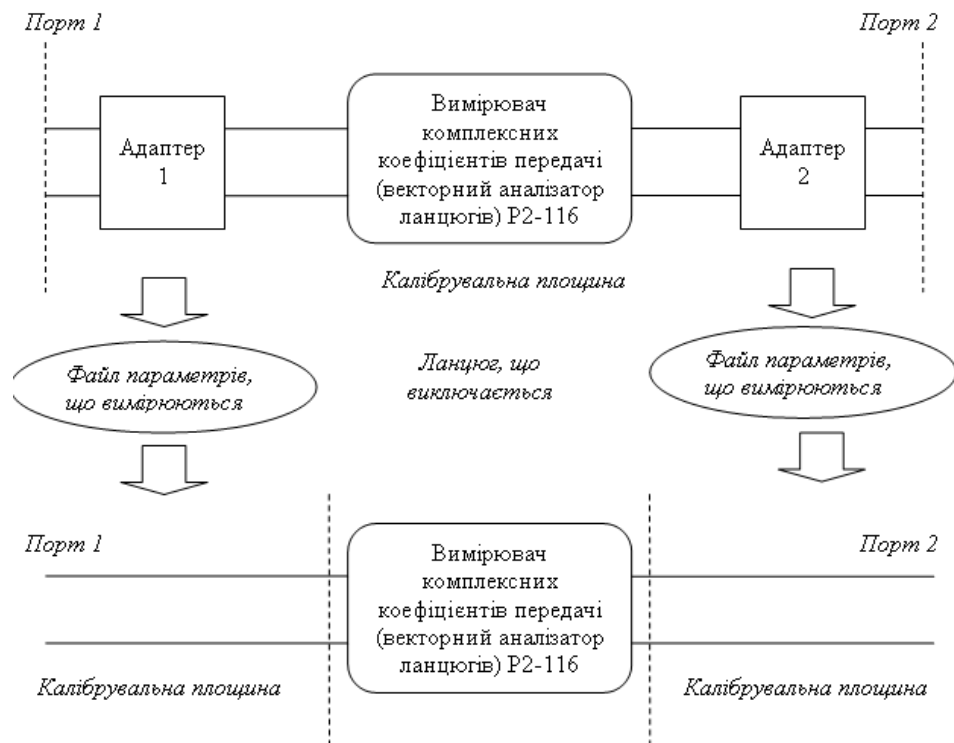


Рис. 3. Схема виключення ланцюга

Табл. 1

Результати випробувань

Порядковий номер приладу направлено на повірку	Періоди проведення повірки			
	1	2	3	4
1	0,21	0,2	-0,14	-0,1
2	0,21	0,21	-0,17	-0,1
3	0,21	0,2	0,11	0,1
4	0,22	0,19	0,15	0,1
5	0,2	0,18	0,16	0,1
6	0,2	0,18	0,13	0,12
7	0,21	0,19	0,19	0,19
8	0,21	0,19	0,5	0,51
9	0,21	0,2	0,26	0,52
10	0,2	0,2	0,24	0,51
11	0,2	0,14	0,33	0,11
12	0,22	0,15	-0,11	0,12
13	0,22	0,16	-0,14	0,11
14	0,19	0,14	-0,16	0,19
15	0,2	0,2	0,17	-0,11
16	0,18	0,18	0,18	0,09
17	0,22	0,2	0,2	-0,07
18	0,22	0,21	0,2	0,11
19	0,21	0,2	0,13	0,13
20	0,21	0,18	0,14	0,13
21	0,21	0,18	0,14	0,13
22	0,2	0,19	0,16	0,11
23	0,2	0,19	0,19	0,19
24	0,22	0,2	0,18	-0,19
25	0,22	0,2	0,2	-0,19

26	0,19	0,14	-0,11	0,11
27	0,2	0,15	0,09	0,55
28	0,19	-0,08	-0,07	0,15
29	0,2	0,17	0,11	0,1
30	0,2	0,14	0,13	0,12

Здійснюємо застосування статистичної обробки результатів інтервалу охоплення для кожної групи шляхом побудови матриці W значень від 0 до 4 з кроком 0,1.

Для кожного значення матриці знаходимо:

$$X_i^W = \text{sign}(x_i | x_i) = 1 \dots n$$

де

$$\text{sign}(x_i), \begin{cases} X_i < 0, \text{sign}(x_i) = -1 \\ X_i = 0, \text{sign}(x_i) = 0 \\ X_i > 0, \text{sign}(x_i) = 1 \end{cases}$$

Значення функції ймовірності розраховується відповідно до рівняння:

$$\ln[K(W)] = n \ln \left[\frac{|W|}{\sqrt{2\pi\sigma_i}} \right] + (W - 1) \sum_{i=1}^n \ln(|x_i|) - 0,5(n - 1)$$

де W – показник розподілу.

Отримані значення функції ймовірності відповідають значенню функції максимальної правдоподібності, що є максимально точним наближенням вибіркового розподілу метрологічних властивостей (нестабільності засобу вимірювальної техніки) завдяки нормальному закону розподілу.

Максимальне значення функції $\ln[K(W)]$ у першій групі досягає $W = 1,0$.

Вибіркове (емпіричне) середнє значення вказує на характеристику положення для вибіркового розподілу:

$$\bar{y}_i(H_j) = 1/n \sum_{i=1}^n X_i^W(H_j), j = 1, 2, \dots$$

де H_j – порядок інтервалу калібрування;

Некореговане стандартне відхилення для вибірки вказує на середнє значення цих спостережень. Розраховується за рівнянням

$$\sigma_i(H_j) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i^W(H_j) - y_i(H_j))^2}{n - 1}}, j = 1, 2, \dots n.$$

Результати математичної обробки даних для чотирьох періодів випробувань тридцяти вимірювачів комплексних коефіцієнтів передачі (векторний аналізатор ланцюгів) наведені в таблиці 2.

Табл. 2.

Результати математичної обробки отриманих значень

Математичні показники	Сформовані групи приладів направлених на повірку			
	1	2	3	4
Вибіркове (емпіричне) середнє значення $\bar{y}_i(H_j)$	0,0079	0,0309	0,0098	0,0399
Некореговане стандартне відхилення $\sigma_i(H_j)$	0,1111	0,1229	0,1499	0,1501
Максимальне значення функції $\ln[K(W)]$	17,99	14,55	7,5	7,21
Показник розподілу W	1,0	1,1	1,1	1,1

Застосовуючи апроксимуючий поліном та відповідно до результатів попередніх обчислень, здійснюємо обчислення коефіцієнтів формуючи систему рівнянь з чотирма невідомими:

$$\begin{cases} y_0 + 12y_1 + 144y_2 + 1728y_3 = 0,0079 \\ y_0 + 24y_1 + 576y_2 + 13824y_3 = 0,0309 \\ y_0 + 36y_1 + 1296y_2 + 46656y_3 = 0,0098 \\ y_0 + 48y_1 + 2304y_2 + 110592y_3 = 0,0399 \end{cases}$$

Шляхом розв'язання наведеної системи рівнянь отримуємо значення коефіцієнтів:

$$\begin{aligned} y_0 &= -0,1545 \\ y_1 &= 0,02198 \\ y_2 &= -0,0008 \\ y_3 &= 9,1617 \cdot 10^{-6} \end{aligned}$$

Таким чином, на основі отриманих результатів період калібрування вимірювача комплексних коефіцієнтів передачі (векторний аналізатор ланцюгів) P2-116 становить 60 місяців, що значно довше, а ніж заявлено у технічній документації до приладу.

Висновки. У роботі проведено дослідження методу коригування періоду калібрування вимірювального обладнання на основі методу реакції. Отримані результати підтверджують необхідність коригування періоду калібрування вимірювального обладнання, оскільки отримані значення значно перевищують період перевірки заявлений виробником у технічній документації до приладу (вимірювач комплексних коефіцієнтів передачі (векторний аналізатор ланцюгів) P2-116), що є економічно вигідним для підприємства яке використовує дане обладнання у власному виробництві.

Перспективами подальших досліджень є розробка автоматизованої системи визначення періоду калібрування вимірювального обладнання з урахуванням потреб користувача.

Список літератури

1. Про метрологію та метрологічну діяльність: Закон України № 1314-VII від 05.06.2014 року // Відомості верховної ради, 2014, № 30, ст.1008.
2. Цвіліховський В. І. Критерії вибору методу дослідження / В. І. Цвіліховський, В. А. Томчук. // Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України, 2017. № 4. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nd_2017_4_25.
3. Косарева О. Коригування міжкалібрувальних інтервалів вимірювального обладнання / О. Косарева, О.Дзябенко // Метрологія та прилади, 2017. №3. С.33-35.
4. Потоцький І.О. Методи встановлення інтервалів калібрування еталонів та засобів вимірювальної техніки. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.01.02 «Стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2020. 147 с.
5. Єременко В.С. Метод коригування міжкалібрувальних інтервалів засобів вимірювань /В.С. Єременко, В.М. Мокійчук, О.О. Редько// Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС-2017): зб. тез допов. IV міжнар. наук. конф. 31 жовтня – 02 листопада 2017 р., м. Вінниця. – Вінниця: ПП «ТД «Едельвейс і К»», 2017. – С.34-35.
6. Zhang, Ting & Li, Sheng & Liu, Jixin & Xia, Jianchao & He, Chuyao. (2021). Research on the Method of Measuring Equipment Calibration Period Adjustment Based on Reaction Method. 455-459. 10.1109/ICETCI53161.2021.9563464.
7. Gong, Chengcheng & Wang, Wenke & Zhang, Zaiyong & Franssen, Harrie-Jan & Cochand, Fabien & Brunner, Philip. (2021). Influence of calibration period length on predictions of evaporation. 10.5194/egusphere-egu21-8986.
8. Zhang, Xinrui & Wu, Sa & Li, Tao. (2021). Method of Calibration Period Determination for Temperature Chamber Based on Risk Analysis. 1034-1039. 10.3850/978-981-18-2016-8_187-cd.
9. Moeck, Christian & Freyberg, Jana & Schirmer, Mario. (2017). The effects of model complexity and calibration period on groundwater recharge simulations.
10. Tuenge, Jason & Poplawski, Michael. (2020). Specifying Calibration of Energy-Measuring Equipment. 10.2172/1616176.

11. Sun, Jingxia & Zhang, Aimin & Gong, Guoqiang & Jiang, Jian. (2018). Study on calibration period of Gas Sensor in exercise Pulmonary Function instrument. *Modern Electronic Technology*. 2. 66. 10.26549/met.v2i3.1133.

12. Krndija, Mladjen & Latinović, Marina & Broćeta, Gordana & Savić, Gojko. (2020). Measuring equipment calibration and determination of the initial calibration interval. *CABPEMEHA TEORIJA И ПРАКСА У ГРАДИТЕЉСТВУ*. 14. 10.7251/STP2014411K.

13. Wang, Jing & Zhang, Qi. (2011). Optimization of calibration period for automatic test system based on innovation weibull model. *JOURNAL OF ELECTRONIC MEASUREMENT AND INSTRUMENT*. 25. 159-163. 10.3724/SP.J.1187.2011.00159.

14. Kawalec, Małgorzata & Czerwińska, Karolina & Pacana, Andrzej. (2021). Influence of Technical Condition of Control and Measurement Equipment on Calibration Results. *System Safety: Human - Technical Facility - Environment*. 3. 79-88. 10.2478/czoto-2021-0009.

Myers, Daniel & Ficklin, Darren & Robeson, Scott & Neupane, Ram & Botero-Acosta, Alejandra & Avellaneda, Pedro. (2021). Choosing an arbitrary calibration period for hydrologic models: How much does it influence water balance simulations?. *Hydrological Processes*. 35. 10.1002/hyp.14045.

В.П. Кашицький, О.Л. Садова, І.В. Боярська, С.Л. Янчук

Луцький національний технічний університет

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ БІОКОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ ГЛЮТИНУ, МОДИФІКОВАНИХ СУЛЬФАТОМ НАТРІЮ

В статті визначено оптимальний вміст композиції в прес-формі, що дозволило отримати біокомпозитні зразки циліндричної форми без розшарувань та дефектів структури за рахунок прикладання одновісного навантаження стиснення. Досліджено вплив модифікуючої добавки на міцність біокомпозитних матеріалів, наповнених порошком деревного борошна, на основі глютинової матриці та визначено оптимальний вміст сульфату натрію в композиції, що забезпечило підвищення міцності при стисненні біокомпозитів. Розроблено технологію отримання водного розчину глютину, а також оптимізовано режим формування біокомпозитів під впливом теплового поля та механічного навантаження, що забезпечило формування щільної та однорідної структури біокомпозитів. Проаналізовано мікроструктуру розроблених біокомпозитних матеріалів з різним вмістом модифікуючої добавки, що дозволяє оптимізувати вміст та розробити режим формування біокомпозитних виробів.

Ключові слова: розчин глютину, біополімерна матриця, модифікатор, деревне борошно, пресування, композиція.

V. Kashytskyi, O. Sadova, I. Boiarska, S. Yanchuk

INTENSIFICATION OF THE FORMING PROCESS GLUTINE-BASED BIOCOMPOSITES MODIFIED WITH SODIUM SULFATE

The article determines the optimal content of the composition in the mold. Biocomposite samples of cylindrical shape without delamination and structural defects due to uniaxial compression load were obtained. The influence of the modifying additive on the strength of glutine-based biocomposite materials filled with wood flour powder has been studied. The optimal content of sodium sulfate in the composition was determined, which provided an increase in compressive strength of biocomposites. The technology of obtaining an aqueous solution of glutine has been developed. The mode of formation of biocomposites under the influence of thermal field and mechanical loading was optimized, which ensured the formation of a dense and homogeneous structure of biocomposites. The microstructure of the developed biocomposite materials with different content of modifying additives is analyzed. This allows to optimize the content and develop a formation mode of biocomposite products.

Key words: glutine solution, biopolymer matrix, modifier, wood flour, pressing, composition.

Постановка проблеми. Підвищення екологічної безпеки та зменшення попиту на використання синтетичних полімерів на основі вичерпних джерел забезпечується активною розробкою та впровадженням у виробництво нових біокомпозитних матеріалів. При цьому особлива увага приділяється технологічним та економічним аспектам виготовлення біокомпозитних виробів, оскільки зменшується споживання енергії та використовуються відновні джерела сировини, що забезпечує зменшення викидів забруднюючих речовин та утворення відходів. Хоча біокомпозити значно дорожчі за класичні композитні матеріали на полімерній основі, однак інтенсивно відбувається вдосконалення структури та покращення властивостей біокомпозитних матеріалів. За умови оптимального поєднання екологічних та економічних факторів є висока ймовірність швидкого впровадження та заміщення синтетичних полімерів на екологічно чисті біокомпозитні матеріали, що дозволить вирішити проблему екологічного забруднення. Цьому процесу також сприяє створення нових виробничих потужностей для переробки відходів та утилізації відпрацьованих біокомпозитних виробів.

Класичні полімеркомпозитні матеріали є стійкими до впливу атмосферних факторів, бактерій та грибків, тому накопичення їх в навколишньому середовищі призводить до зростання сміттєвих полігонів, які негативно впливають на екологічну безпеку. Тому потреба у розширенні асортименту виробів на основі біополімерних матриць, які характеризуються високою біодеградабельністю, зростає відповідно до інтенсивності забруднення навколишнього середовища. При цьому виникає проблема, яка пов'язана з підвищенням стійкості біокомпозитів до руйнування в процесі експлуатації, що досягається шляхом введення модифікуючих добавок.

Біокомпозитні матеріали на основі глютинової матриці повністю відповідають вимогам екологічної безпеки під час формування виробів, однак технологічний процес характеризується тривалою витримкою, що ускладнює їх виробництво. Перспективним методом вирішення проблеми є зміна хімічного складу розчину, зокрема введення до складу композиції аніонів сульфатів, які здатні підвищувати швидкість гелеутворення. В результаті відбувається інтенсифікація процесу

формування біокомпозитних виробів, що потребує вивчення механізму взаємодії компонентів між собою та дослідження впливу модифікуючої добавки на механічні властивості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні значна увага науковців в галузі дослідження полімеркомпозитних матеріалів акцентована на розробці біодеградабельних матеріалів, які здатні до розкладу в навколишньому середовищі під впливом біологічних та атмосферних факторів. Завдяки своїй біосумісності, нетоксичності та одноразовому використанню біокомпозити мають високий потенціал для впровадження у виробництво в різних сферах промисловості, зокрема як матеріали для виготовлення корпусів медичних пристроїв, меблів, будівельних матеріалів, упаковки та ізоляції. Такі матеріали органічного походження створюють широкі можливості для створення нового класу екологічно безпечних матеріалів, які в подальшому будуть замінювати пластмаси та інші екологічно шкідливі матеріали у всьому світі [1].

Біокомпозитні матеріали виготовляють з сировини природного походження і не містять мінеральних компонентів порівняно з такими матеріалами як вуглецеве волокно та скло або епоксидні смоли. Тому біокомпозити є більш перспективними, ніж їх синтетичні аналоги, оскільки не потребують використання викопного палива або складних хімічних реагентів. Їх здатність до біологічного розкладання дозволяє утилізувати вироби шляхом переробки або звичайного компостування наприкінці терміну експлуатації без нанесення шкоди навколишньому середовищу. При цьому біокомпозитні вироби мають задовільні механічні, хімічні та експлуатаційні властивості порівняно з синтетичними аналогами.

Біокомпозитні матеріали (волокна льону, коноплі, вовни, шовку, бамбука та шерсті) виготовляють з сировини різних природних джерел в основному рослинного походження. При цьому гума, термопластичні або терморектопластичні полімери зазвичай використовуються як матричний матеріал для формування біокомпозитів [2, 3]. Рослини є найефективнішим джерелом сировини для виготовлення наповнювачів біокомпозитів завдяки високій якості, кількості та доступності. Однак фізичні та механічні властивості (товщина, розчинність у воді та щільність) рослинних матеріалів суттєво відрізняються, що викликає потребу у проведенні експериментальних та теоретичних досліджень для встановлення характеру та механізму взаємодії між наповнювачами природного походження та полімерною матрицею. Крім того, здатність до модифікування рослинних матеріалів призводить до зміни хімічних і фізичних властивостей біокомпозитів та забезпечує підвищення ступеня кристалізації та полімеризації біополімерної матриці, що розширює сфери застосування біокомпозитних виробів.

Згідно міжнародній класифікації визначено спектр натуральних волокон, які поділяються на три основні групи – рослинні, тваринні та мінерального походження (рис. 1). Найбільш затребуваними для армування біополімерної матриці є волокна лубу, листя та деревини. Луб'яні волокна, такі як льон, коноплі, джут і кенаф, отримують зі стебел рослин і найчастіше використовуються як армуючий елемент, оскільки вони мають знану довжину, найвищу міцність і жорсткість. Особливе значення в Європі надають волокнам льону і коноплі, які характеризуються розвинутою сировинною базою завдяки сприятливому клімату в даному регіоні [4].

Перевагами армувальних волокон природного походження є відновлюваність сировини, низька собівартість та доступність. Також перевагами натуральних волокон є їх низька щільність, вища міцність на розрив і жорсткість, ніж скловолокна, а також менші затрати в процесі виробництва [5]. Композити з натуральних волокон досить рентабельні, особливо для виготовлення конструкцій, упаковки, салонів автомобілів і залізничних вагонів, корпусів приладів. Натуральне волокно має порожнисту структуру, що забезпечує високу ізоляцію від шуму та тепла. Завдяки структурним особливостям натуральні волокна можуть бути потенційно придатними для заміни дорогого скловолокна, яке застосовують для виготовлення виробів, що піддаються впливу низьких навантажень.

Поряд з волокнистими матеріалами широко використовують продукти деревообробної промисловості для виготовлення меблів і будівельних матеріалів. При цьому більшість відходів деревини, які отримують в результаті знесення дерев'яних будівель, масової вирубки лісів та виготовлення пиломатеріалів зазвичай спалюють для утилізації або забезпечення енергетичних цілей, що спричиняє серйозні екологічні проблеми. В основному подібні відходи являють собою стружку у вигляді частинок сферичної або пластинчастої форми, які після додаткової обробки можна успішно використовувати як наповнювач для виготовлення біокомпозитних матеріалів. Таким чином, існує значний попит на розробку нових технологій, які могли б забезпечити нові способи споживання

невикористаних відходів від виготовлення пиломатеріалів, а також виробництва дерево-композитних матеріалів більш ефективним та екологічно безпечним способом [6].

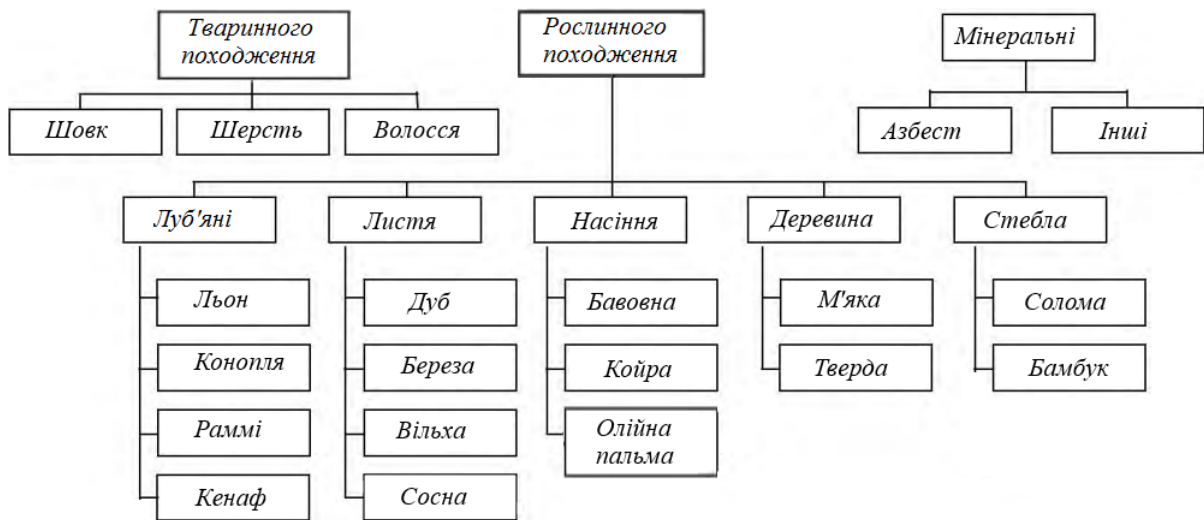


Рис. 1. Класифікація видів натуральних волокон

Біополімерна матриця виконує важливу функцію для захисту волокон від руйнування та деградації біокомпозитів під час експлуатації виробів в умовах впливу атмосферних факторів та механічних пошкоджень, а також забезпечує передачу та перерозподіл на волокна навантажень від фізичних полів [7]. Окрім того, біополімерна матриця повинна забезпечувати високу однорідність матеріалу, можливість переробки у вироби без розкладання і виділення низькомолекулярних продуктів. Визначальною і головною властивістю таких матеріалів є біологічна нешкідливість, тобто відсутність подразнюючого, токсичного або канцерогенного впливу на живі організми. Такі біокомпозитні матеріали повинні мати високі технологічні характеристики із застосуванням порівняно дешевих способів формування виробів. Велике значення має доступність сировини, оскільки собівартість виготовлення компонентів біокомпозитів впливає на економічну ефективність та рентабельність біокомпозитних виробів [8].

Постановка завдань. Метою роботи є оптимізація складу біокомпозитного матеріалу з розробкою технології підготовки компонентів та формування композиції, до складу якої входить модифікована сульфатом натрію глютинова матриця та деревне борошно як наповнювач.

Викладення основного матеріалу. Формування біокомпозитних зразків на основі глютинової матриці полягало в отриманні однорідної композиції, до складу якої входили деревне борошно та модифікуюча добавка (сульфат натрію). Залежно від об'єму зразків розраховували кількісний вміст компонентів на 100 мас. ч. розчину глютину.

Приготування розчину глютину для формування біокомпозитних зразків проводили наступним чином. На першому етапі проводять дозування компонентів композиції – гранул кісткового клею, які заливають холодною водою.

Вміст гранул кісткового клею (m) визначають за формулою:

$$m = \frac{x \cdot m_p}{100 - w}, \text{ г}$$

де: x – концентрація розчину, %;

m_p – маса розчину, г;

w – вологість, %.

Вміст води в композиції розраховують за формулою:

$$m_e = m_p - m, \text{ г}$$

В результаті приготування розчину глютину з концентрацією 50% в'язкість отриманого розчину є низькою, що позитивно впливає на процес змочування частинок деревного борошна, однак в результаті формування біокомпозитного матеріалу в прес-формі під впливом теплового поля відбувається виділення розчину глютину через інтенсивне випаровування вологи. Концентрація глютинового розчину 40 % забезпечує достатнє змочування частинок наповнювача в результаті чого отримують однорідну композицію, що дозволяє проводити пресування композиції. Наступне

збільшення в'язкості глютину є недоцільним через зменшення вмісту води, що призводить до ускладнення процесу змочування та зменшення однорідності композиції.

Суміш гранул глютину та води поміщають в герметичну тару для уникнення випаровування води та забезпечення контрольованої в'язкості. Далі суміш гранул глютину та води поміщають в сушильну шафу з температурою 50 °С протягом 40 хв. з подальшим перемішуванням для забезпечення однорідності розчину.

Наступним етапом отримання композиції була підготовка суміші наповнювача (деревного борошна) із модифікатором (порошком сульфатом натрію) шляхом механічного змішування компонентів, після чого вводився розчин глютину в кількості 35 мас.ч. з подальшим механічним вимішуванням до моменту досягнення однорідності композиції.

Експериментально встановлено, що із збільшенням часу витримки композиції в тепловому полі межа міцності при стисканні біокомпозитів зростає, що зумовлено поступовим видаленням води та утворенням додаткових фізичних та хімічних зв'язків між компонентами системи. Тривалість витримки 1 год є недостатньою, оскільки отримано найнижчі значення межі міцності при стисненні за температури теплового поля 130 °С (рис. 2). Очевидно, що такий температурно-часовий режим формування не забезпечує повного видалення води та утворення щільної структури біокомпозитного матеріалу. Збільшення температури теплового поля до 170 °С забезпечує підвищення межі міцності при стисненні на 28-30 %, що обумовлено більш інтенсивним виділенням води.

В результаті витримки 2 год за температури 130 °С відбувається незначне підвищення межі міцності (12 %) порівняно із витримкою 1 год. Однак підвищення температури теплового поля до 170 °С призводить до зростання даної характеристики на 31-32 % порівняно з температурою 130 °С. Підвищення тривалості витримки до 3 год забезпечує зростання межі міцності при стисненні біокомпозитів до 20,23 МПа, що пояснюється підвищенням жорсткості макромолекул біополімерної матриці через ущільнення компонентів та утворення фізичних та хімічних зв'язків. Крім того збільшення температури призводить до інтенсивного накопичення теплової енергії в об'ємі біокомпозитів, що сприяє максимальному видаленню води та рівномірному розподілу біополімерної матриці.

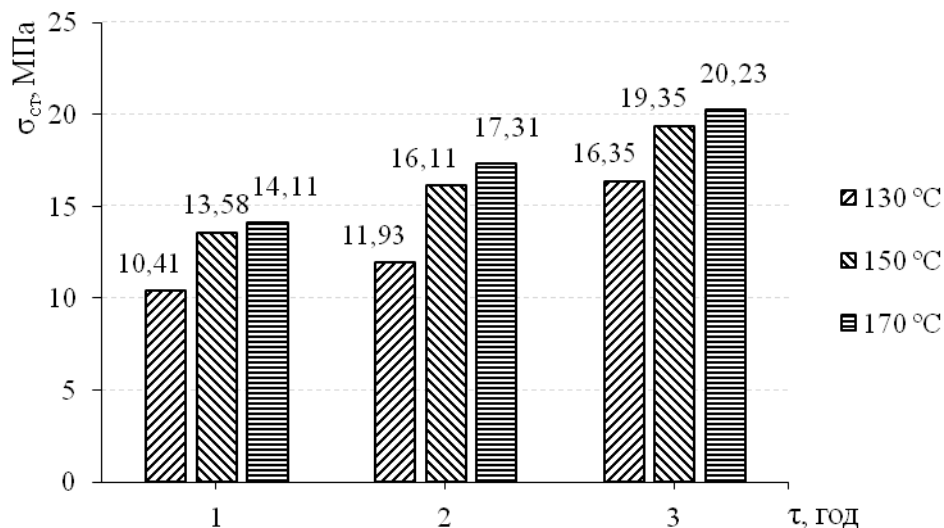


Рис. 2. Залежність межі міцності при стисканні немодифікованих біокомпозитів від температурно-часового режиму формування

З метою інтенсифікації процесу формування біокомпозитів у тепловому полі, що має практичну доцільність під час розробки технологічного процесу формування виробів на виробництві, було використано модифікуючу добавку (сульфат натрію) у вигляді дрібнодисперсного порошку, дозовану кількість якого змішували механічно з деревним борошном.

Отриману композицію поміщали у прес-форму, стискали під тиском 10-15 МПа з фіксацією пуансонів для забезпечення високої щільності композиції і уникнення розшарування. При цьому ступінь стиснення визначається вмістом композиції в об'ємі прес-форми, який змінювався для

регулювання величини ущільнення композиції. Визначення оптимального вмісту композиції в порожнині прес-форми проводили з використанням різних співвідношень маси композиції до сталого об'єму порожнини ($V=9,5 \text{ см}^3$) прес-форми: 10 г, 11 г, 12 г, 13 г. У випадку малого вмісту композиції в порожнині прес-форми (10 г) тиск пресування становив 10 МПа, в результаті чого отриманий біокомпозит має спотворену форму, що спричинено великою усадкою в результаті інтенсивного видалення вологи. У випадку завантаження композиції з масою 11 г тиск пресування складав 12 МПа, що забезпечило формування брикету з незначною кількістю тріщин. Підвищення тиску пресування до 15 МПа у випадку завантаження 13 г композиції призводить до утворення глибоких поперечних поверхневих тріщин через руйнування слабких фізичних зв'язків між глютиновою матрицею і частинками деревного борошна. Тому більш доцільно завантажувати композицію масою 12 г, що відповідає тиску 13 МПа. Це забезпечує формування бездефектної структури з високим ступенем ущільнення та низькими залишковими напруженнями.

Термічну обробку композиції у прес-формі проводили протягом 2 год за оптимальної температури 150 °С, оскільки температура 170 °С призводила до деструкції поверхневого шару зразків через руйнування органічної складової компонентів біокомпозитного матеріалу. Після охолодження до температури 18-20 °С виріб виймають з прес-форми.

Встановлено, що введення до складу композиції модифікуючої добавки в кількості 16 мас. ч. забезпечує зростання межі міцності при стисненні до 30,44 МПа, що відповідає зростанню характеристики на 46 % порівняно з немодифікованою системою. У випадку збільшення вмісту модифікуючої добавки до 50 мас. ч. відбувається збільшення міцності при стисненні до 50,95 МПа, що пов'язано з гігроскопічністю сульфату натрію, в результаті чого відбувається поглинання молекул води та зменшення її вмісту в композиції. Це забезпечує інтенсивне утворення фізичних та хімічних зв'язків між компонентами біокомпозитного матеріалу. Збільшуючи вміст сульфату натрію до 83 мас. ч. відбувається різке зменшення міцності при стисненні до 17,51 МПа, що відповідає 65-67 %, порівняно з значеннями межі міцності біокомпозитів, що містять 50 мас. ч. сульфату натрію. Це можна пояснити інтенсивним видаленням води з глютинового в'язучого, що спричиняє значну усадку біокомпозитних зразків в результаті термічної обробки та появу мікропор і мікротріщин на поверхні зразків. Руйнування біокомпозитних зразків з вмістом сульфату натрію 83 мас. ч. відбувається швидко з утворенням зони крихкого руйнування, що зумовлено підвищенням ступеня напруженого стану внаслідок інтенсивного структурування біополімерної матриці.

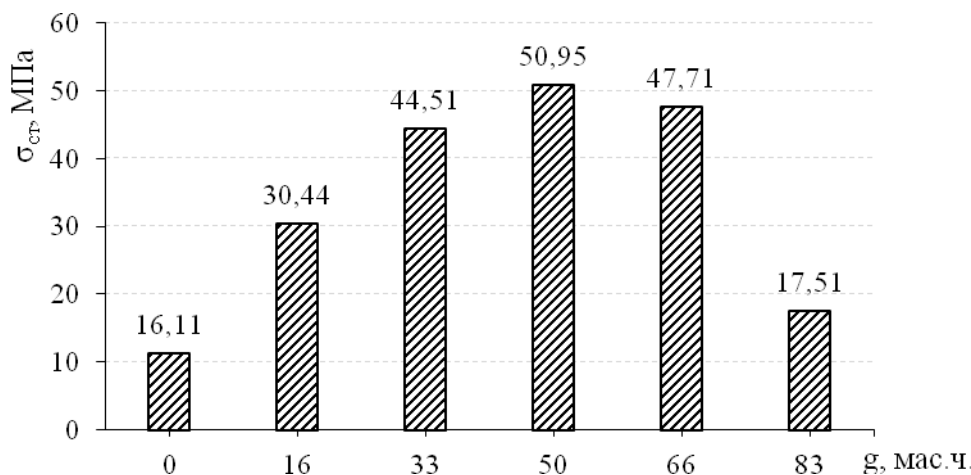


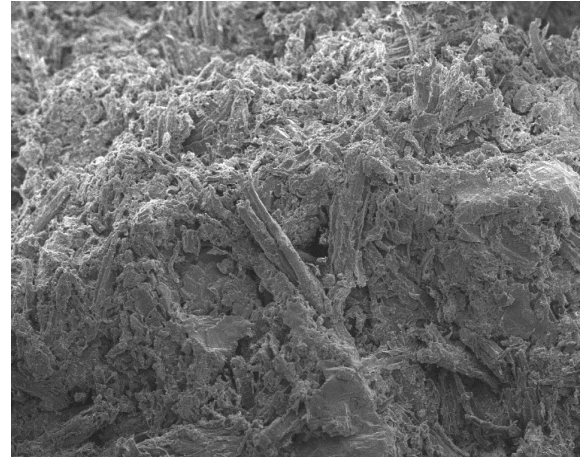
Рис. 3. Залежність межі міцності біокомпозитних матеріалів від вмісту модифікуючої добавки (сульфат натрію)

Поверхня зламу біокомпозитних зразків, що не містять модифікуючої добавки, є неоднорідною, з різким переходом в місцях зміни напрямку поширення тріщини, що вказує на підвищену крихкість системи (рис. 4, а). У випадку введення модифікуючої добавки до складу біополімерної матриці під впливом динамічного навантаження відбувається в'язке руйнування матеріалу (рис. 4, б), що пов'язано з утворенням додаткових фізичних та хімічних зв'язків між макромолекулами глютину, а також між активними групами амінокислот та поверхнею частинок деревного борошна. Такий механізм взаємодії компонентів активізується в результаті впливу сульфату натрію, який адсорбує вологу та утворює декагідрат сульфату натрію. На фрактограмі зламу біокомпозитний матеріал, що містить 83 мас. ч. сульфату натрію присутні кристали речовини з

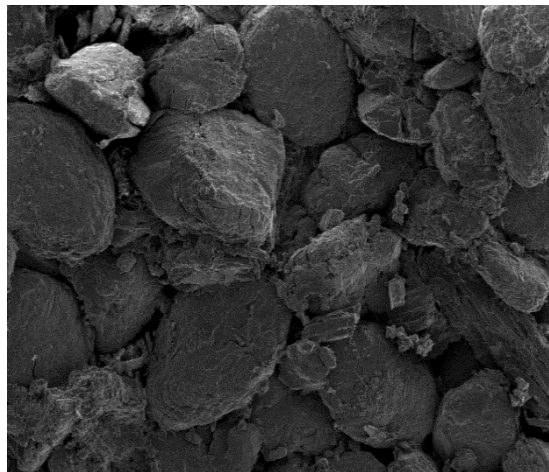
заокругленими краями через руйнування кромek в процесі механічного вимішування компонентів. Встановлено, що такий вміст модифікуючої добавки є надлишковий, оскільки не відбувається розчинення частини кристалів в біополімерній матриці. В результаті формується структура біокомпозиту з підвищеною неоднорідністю у вигляді скупчень деформованих кристалів сульфату натрію (рис. 4, в), що призводить до викришування матеріалу через присутність мікротріщин та розшарувань. Кристали сульфату натрію не змочуються та не закріплені в біополімерному в'язучому, тому легко відділяються один від одного та від глютинової матриці під впливом механічного навантаження, що призводить до швидкого поширення тріщин та формування структури біокомпозитного матеріалу з низьким опором до динамічних навантажень.



а



б



$$f(x) = w \cdot x + b$$

Рис. 4. Фрактограми зламу поверхні біокомпозитних матеріалів на основі глютинової матриці, наповненої деревним борошном та модифікованої сульфатом натрію в кількості:

а – без модифікатора, б – 50 мас. ч., в – 83 мас. ч., $\times 500$

Висновки та перспективи подальших досліджень. Оптимальний тиск пресування композиції у прес-формі становить 12 МПа, що забезпечує формування бездефектної структури біокомпозитного матеріалу з високим ступенем ущільнення та невисокими залишковими напруженнями.

Максимальна тривалість витримки біокомпозитних матеріалів без модифікуючих добавок у тепловому полі за температури 150 °С складає 3 год, що забезпечує повне видалення вологи з об'єму біокомпозиту та формування виробів з достатньою міцністю за рахунок підвищення жорсткості біополімерної матриці.

Введення модифікуючої добавки (сульфат натрію) в оптимальній кількості 50 мас. ч. забезпечує зростання межі міцності при стисненні до 50-52 МПа в результаті формування однорідної структури за рахунок утворення фізичних та хімічних зв'язків між компонентами біокомпозитного матеріалу. Такий механізм взаємодії реалізується за рахунок створення сприятливих умов через

зменшення вмісту води у глютиновому в'язучому, оскільки кристали сульфату натрію адсорбують воду, що скорочує тривалість термічної обробки виробів на 35 %.

В подальшому планується провести визначення впливу на процеси структурування та механічні властивості біокompatивних модифікуючої добавки, яку вводять безпосередньо до розчину глютину на етапі підготовки в'язучого, що забезпечить рівномірне та повне розчинення кристалів сульфату натрію у водному розчині порівняно з технологією розчинення кристалів на етапі термічної обробки виробу, що ускладнює процес рівномірного розчинення кристалів.

Список використаних джерел

1. Domka F. L., Czaja N.: „Opakowania biodegradowalne alternatyw dla opakowań z tworzyw sztucznych. Chemia z dodatkiem natury”, Ekoprofit, 2004
2. Wilpizewska K., Spychaj T.: Polimery 2006, 5, 325
3. Kikolski P., Duska-Smolik E., Bolińska A.: Polimery 2005, 50, 3
4. Biobased Packaging Materials for the Food Industry, status and perspectives; ed. Claus J. Weber, A European Concerted Action, Denmark (2000).
5. M. Ghasemi, M. Tsianou and P. Alexandridis, Bioresour. Technol., 2017, 228, 330-338
6. Bispo TS, Barin GB, Gimenez IF, Barreto LS. Mater. Charact. 2011, 62
7. P. Wasserscheid and T. Welton, Ionic liquids in Synthesis, John Wiley & Sons, New York, 2008
8. Ruhe P. Quinten. Bone inductive properties of rhBMP-2 loaded porous calcium phosphate cement implants in cranial defects in rabbits / Ruhe P. Quinten, C. KroeseDeutman Henriette, G.C. Wolke Joop, H.M. Spauwen Paul, Jansen John A. // Biomaterials. – 2004. – № 11. – P. 2123-2132.

УДК: 621.793.3

DOI 10.36910/775.24153966.2022.73.18

С.Я. Підгайчук¹, Г.А. Покришко², О.С. Дробот², С.В. Смутко², Н.М. Яворська²*Національна академія Державної прикордонної служби України¹
Хмельницький національний університет²***ОСОБЛИВОСТІ ХІМІЧНОГО ФОСФАТУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ЧАВУНУ В СИСТЕМАХ ВОДОПОСТАЧАННЯ**

В роботі проаналізовані способи та механізм процесу фосфатування, існуючі режими та склади електролітів для отримання фосфатної плівки. Наведені результати дослідження з нанесення фосфатних плівок та визначення їх корозійної стійкості в кліматичній камері. Вдосконалено технологію фосфатування для отримання корозійно стійкої фосфатної плівки на деталях із чавуну, виготовлених методами порошкової металургії.

Ключові слова: фосфатування, чавун, корозійна стійкість, фосфорна кислота, солі фосфорної кислоти, кліматична камера.

С.Я. Пидгайчук, А.А. Покрышко, О.С. Дробот, С.В. Смутко, Н.М. Яворская**ОСОБЕННОСТИ ХИМИЧЕСКОГО ФОСФАТИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЧАЛУНА В СИСТЕМАХ ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

В работе проанализированы способы и механизм процесса фосфатирования, существующие режимы и составы электролитов для получения фосфатной пленки. Представлены результаты исследования по нанесению фосфатных пленок и определению их коррозионной стойкости в климатической камере. Усовершенствована технология фосфатирования для получения коррозионно-стойкой фосфатной пленки на деталях из чугуна, изготовленных методами порошковой металлургии.

Ключевые слова: фосфатирование, чугун, коррозионная стойкость, фосфорная кислота, соли фосфорной кислоты, климатическая камера.

S. Pidgaichuk, A. Pokryshkko, O. Drobot, S. Smutko, N. Yavorskaya**FEATURES OF CHEMICAL PHOSPHATING OF CAST IRON PARTS IN WATER SUPPLY SYSTEMS**

The work concerns the increase of corrosion resistance of parts made of cast iron by powder metallurgy in conditions of not constant water flow. The analysis of scientific researches and publications of existing developments of ways of drawing and structures of protective coverings for pig-iron and steel details is carried out. There are advantages and disadvantages Zn, Zn-Ni and Zn-Ni-P coatings. Peculiarities of electrolytic coating and chemical deposition coatings are noted. The advantages and disadvantages of these methods for applying protective coatings for mass-produced parts are presented. The analysis of phosphate coatings is carried out, their advantage in the conditions of mass production is substantiated. The methods and mechanism of phosphating process, existing regimes and compositions of electrolytes for obtaining phosphate film are considered in the work. The results of research on the application of phosphate films and determine their corrosion resistance in the climate chamber are presented. Phosphating technology has been improved to obtain a corrosion-resistant phosphate film on cast iron parts made by powder metallurgy.

Key words: phosphating, cast iron, corrosion resistance, phosphoric acid, phosphoric acid salts, climate chamber.

Постановка проблеми. Виробництво деталей із чавуну методами порошкової металургії стає все більш затребуваним і, відповідно, виникають завдання щодо удосконалення технологій одержання таких деталей з наданням їх поверхні відповідних функціональних властивостей. Доведено, що корозійна стійкість деталей із чавуну є недостатньою в ситемах де є непостійний потік води [1]. Тому постало виробниче завдання з забезпечення корозійної стійкості деталей із чавуну, виготовлених методом порошкової металургії в умовах масового виробництва з врахуванням економічної доцільності на базі діючого підприємства м. Хмельницького.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відома велика кількість захисних покриттів для деталей із сталей і чавуну, які різняться, як за складом, так і за способом нанесення. Існують технології отримання електролітичних покриттів на основі Zn-Ni сплавів, які крім високої корозійної тривкості, порівняно з чистими цинковими покриттями, мають кращу зносостійкість, зварюваність і термостійкість [2-5]. Легуванню гальванічних Zn-Ni сплавів додатковими компонентами, зокрема фосфором, присвячені роботи [6, 7, 8]. Автори відмічають, що навіть

незначне впровадження фосфору (менше 1 мас. %) суттєво впливає на морфологію та структуру Zn-Ni сплавів, призводить до підвищення вмісту нікелю у сплавах та зростання корозійної тривкості. Формування сплавів на основі цинку, нікелю та фосфору хімічним осадженням має низку труднощів пов'язаних з тим, що цинк є каталітично неактивним металом до реакцій відновлення-окиснення, які протікають на поверхні. Тому осаджений цинк, утворюючи окрему фазу, блокує активність нікелю і тим самим сповільнює швидкість реакцій хімічного осадження. [6,7].

Не дивлячись на те, що покриття на основі сплаву цинк-нікель, крім корозійної стійкості, мають низку функціональних властивостей (здатність до пайки, низький коефіцієнт тертя), для захисту від корозії деталей системи водопостачання, виготовлених із чавуну, отримання цинк-нікелевих гальванічних покриттів для масового виробництва є економічно не вигідним (великі партії деталей потребують потужних гальванічних ліній).

Широко відомим напрямком покращення протикорозійних властивостей деталей, виготовлених із мало легованого чавуну та сталі є застосування фосфатних покриттів [9]. Авторами надано склади розчинів і режими фосфатування для різних металів. Представляє інтерес визначення та співставлення різних режимів утворення фосфатних плівок та порівняння якості сформованих покриттів.

Аналіз фосфатних покриттів доводить їх перевагу в умовах масового виробництва. Фосфатні покриття, що утворюються на поверхні металів в результаті їх хімічної взаємодії з розчином ортофосфорної кислоти та її кислих солей – це плівки нерозчинних в воді фосфорнокислих сполук. Фосфатні плівки складаються з досить мілких кристалів двох і трьох заміщених фосфатів, які зрослися між собою і хімічно зв'язані з металом.

За рахунок високорозвиненої шорсткої поверхні фосфатні плівки мають специфічні фізико-хімічні властивості. Наявність між кристалами ультрамікроскопічних пор забезпечує високі адгезійні властивості плівки. Високі антифрикційні властивості фосфатних плівок, наповнених масляно-жировими речовинами, використовуються в процесах штамповки, протяжки, волочінні дроту, тобто в операціях холодної деформації металів. Фосфатне покриття при певних умовах є протизадирним.

В металургійній промисловості фосфатні плівки запобігають розтіканню розплавленого металу на сталі поверхні. Фосфатне покриття використовується для антикорозійного захисту. Воно створює бар'єр, що захищає поверхні деталі від взаємодії з навколишнім середовищем. Для покращення корозійного захисту проводиться додаткова обробка фосфатної плівки оливою, фарбою і ін. В деяких випадках захисна здатність фосфатних покриттів є унікальною. Так, неодимові магніти типу NdFeB мають погану корозійну стійкість в багатьох агресивних середовищах через наявність в їх складі 35% неодиму. Застосування фосфатного покриття є найкращим варіантом для захисту цих магнітів.

Фосфатна плівка – відмінний ґрунт під лакофарбове покриття. Наявність фосфатної плівки підвищує адгезію лакофарбового покриття з основою і дозволяє забезпечувати забарвлення навіть сучасними методами (порошково-полімерне забарвлення і ін.). Фосфатування викликає значне підвищення стійкості до термічного окислення сплавів чорних металів при температурах 300-700 °С.

Фосфати мають високі електроізоляційні властивості. Значний електричний опір фосфатної плівки дозволяє використовувати її для створення електроізолюючого шару на трансформаторних, роторних та статорних пластинах електротехнічних виробів.

Захисні фосфатні плівки здатні витримувати високі (до + 500 °С) і низькі температури (до - 75 °С), пробивні напруги до 500 В. Додаткове просочення лаками підвищує рівень пробивної напруги фосфатного шару. [9].

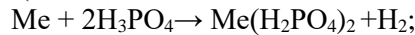
Постановка завдань.

Попередні випробовування штуцерів для з'єднання корпусів водяних лічильників з трубами, виготовлених із чавуну способами порошкової металургії, проведені в кліматичній камері з температурою випробовувань 60 °С і 90% вологості, впродовж 72 годин, показали недостатню корозійну стійкість деталей.

Ґрунтуючись на унікальних властивостях фосфатних покриттів для захисту деталей із чавуну, які працюють в умовах де є непостійний потік води, постало завдання розробити технологію нанесення покриття на основі важкорозчинних фосфатів металів для масового виробництва.

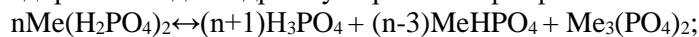
Викладення основного матеріалу.

Механізм процесу фосфатування базується на використанні фосфорної кислоти (H_3PO_4). Цей процес починається відразу після контакту металу з кислотою. При цьому утворюються первинні фосфати (дигідрофосфат $\text{Me}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$) і водень.



Подальша взаємодія металу і кислоти призводить до зменшення її концентрації з утворенням двох типів важкорозчинних солей: двохзаміщених MeHPO_4 (моногідрофосфати); трьохзаміщених $\text{Me}_3(\text{PO}_4)_2$ (фосфати).

У загальному вигляді рівняння для гідролізу первинних фосфатів має вигляд:



Завдяки властивостям трьох видів солей фосфорної кислоти формується важкорозчинний покрив з фосфатів, що захищає поверхню металу від корозії. Процедура супроводжується осадженням фосфатів з наступним розчиненням металу основи. При цьому формується плівка з двох шарів: 1) бар'єрний, який з'єднаний з поверхнею металу незначної товщини, шар еластичний і досить пористий; 2) зовнішній – крихкий, який має кристалічну будову і складається з двох і трьохзаміщених фосфатів. Зовнішній прошарок надає властивості, що притаманні фосфатованій поверхні. Товщина, структура, пористість, колір фосфатної плівки залежать від методу та режиму фосфатування, а також від складу сплаву, що фосфатують, та умов підготовки його поверхні. Колір плівки - від світло-сірого до темно-сірого, можна спостерігати зеленуваті та червонуваті відтінки в залежності від вмісту хрому, нікелю, міді в сплавах сталі.

Кристалічна структура і товщина фосфатного шару пов'язані між собою. Шари товщиною 1-4 мкм та до 8 мкм – дрібнокристалічні (тривалість фосфатування – 30 хв.). Крупнокристалічні шари (товщина 10-12 мкм) одержують протягом 60-90 хв в гарячих електролітах. Для отримання фосфатованих шарів товщиною біля 100 мкм поверхню деталей на основі сплавів чорних металів попередньо потрібно протравити 10-15% розчині HNO_3 . [9].

Фосфатування в умовах промислових підприємств виконується двома методами - розпиленням захисного складу або зануренням в нього металевого виробу. Перед початком процесу проводять ретельне очищення поверхні гідроабразивним методом, завдяки якому вдається домогтися найвищої якості. Після цього виконують підготовку поверхні: протруюють кислотою, промивають содовим розчином і водою. Провівши всі ці маніпуляції, вироби обробляють робочим розчином, основними компонентами якого є фосфати заліза і марганцю. В якості додаткових добавок для прискорення процесу і поліпшення кінцевого результату використовують нітрити та нітрати цинку і барію і т.д.

Відомо, що захисна фосфатна плівка отримується різними способами, вибір конкретного методу залежить від деталі, яку потрібно обробити, а також від області застосування деталі або конструкції. У промисловості найчастіше застосовуються такі способи фосфатування: із застосуванням фосфорної кислоти; за допомогою препаратів «Мажеф»; за допомогою монофосфата цинку; за допомогою пасти.

Отримання захисної плівки фосфатуванням за допомогою препарату «Мажеф» виконують кількома способами - холодним, нормальним, прискореним. Цей порошок з зеленуватим відтінком є аналогом солі, збагаченої марганцем, залізом, фосфором. Препарат «Мажеф» містить в %: 18-20 Mn^{2+} ; 0,14-0,15 Fe^{2+} ; 2-2,5 Fe^{3+} ; 60-70 PO_4^{3-} ; 1,0 SO_4^{2-} ; сліди Ca^{2+} і воду – 2-3%. Погіршується якість покриття при накопиченні в електроліті домішок алюмінію, мишяку, сульфідів та хлоридів. Вміст домішок не повинен перевищувати для Pb - 0,01%; As – 0,002%; Al – 0,02%; іонів SO_3^{2-} - 0,3%; іонів Cl⁻ - сліди. Якщо вміст домішок перевищує вказану кількість, то розчин замінюють. На практиці ванни експлуатують роками, періодично чистять від осаду, що накоплюється на дні ванни.

Розчини для холодної обробки не вимагають підігріву, їх температура становить 20-40°C. При цьому товщина фосфатного покриття виходить невелика (до 5 мкм)

При нормальному фосфатуванні з використанням препарату «Мажеф» розчин, з концентрацією солі (30-35 г/л), необхідно нагріти до температури біля 98°C. Менша температура розчину викликає кристалізацію шару покриття, а більш висока призводить до підвищення шлакоутворення.

Для збільшення фосфатного шару, що має дрібнокристалічну будову, необхідно збільшити концентрацію солі «Мажеф» до 120 грам на літр рідини. Робочий склад потрібно нагрівати до температури біля 105-110°C [1].

Відома методика швидкого фосфатування, яку застосовують для промислового захисту металоконструкцій. Цей процес вимагає більш ретельної підготовки поверхні виробів. Підготовка сталевих (листових) деталей включає наступні етапи: очищення поверхні з знежиренням основи лугом, промивання; протравлення чистого виробу в розчині соляної кислоти, потім промивання водою; пасивування в розчині кальцинованої соди з кінцевим промиванням. Хімічне фосфатування підготовленої очищеної поверхні прискореним методом триває від 15 до 40 хвилин в залежності від складу робочого розчину (розчини на основі залізо-марганцевих фосфатів, первинних фосфатів цинку та їх сумішей). Крім того, в розчин вводять прискорювачі, наприклад, нітрат цинку. Найчастіше підігрійтий розчин готують з препаратом «Мажеф» (30 г/л), тоді процес триває близько 40 хвилин. Після такої обробки деталі промивають проточною водою, потім піддають пасивуванню в теплому розчині (5-10%) біхромата калію. На завершальному етапі виробу із захисною плівкою промивають в гарячій воді, сушать [10].

На базі аналізу способів та режимів одержання фосфатних покриттів для сталевих та чавунних деталей масового виробництва було проведено низку експериментів з отримання захисного фосфатного покриття для деталей із чавуна для систем водопостачання, виготовлених методами порошкової металургії.

Технологічний процес фосфатування на початковому етапі складався з піскоструменевої обробки деталей, виготовлених із чавуну методами порошкової металургії. Наступним етапом було безпосереднє нанесення фосфатної плівки.

Як показала практика та аналіз інформаційних джерел, розчини для утворення залізофосфатної плівки дозволяють розробити технологічний процес для якісного масового фосфатування сталевих виробів при температурах 60 - 70 °С, що є економічно вигідним. Однак, виявилось, що така плівка на чавуні не забезпечує захисту від корозії [1]. Тому, для отримання залізо фосфатної плівки в початковий експериментальний розчин було введено препарат Екол-фос, виготовлений на базі ортофосфорної кислоти H_3PO_4 – 110-130 мл/л та прискорювач NH_4HF_2 в кількості – 3-5 г/л. Температура розчину складала 35-40 °С, тривалість процесу - 15-20 хв. Фосфатна плівка, отримана з наведеного вище розчину, була пористою та кородувала на вологому повітрі. Таке покриття можна застосовувати на виробках, які в подальшому формуються, піддаються холодній деформації, можуть бути ґрунтом для нанесення лакофарбового покриття, однак не може бути використано для деталей із чавуна для систем водопостачання.

Як було відмічено вище, ефективним способом отримання якісних захисних плівок є фосфатування з утворенням двох-, трьох- фосфатних солей марганця, заліза та цинку, які утворюються при нанесенні покриттів з застосуванням препарату «Мажеф». Тому особливостями фосфатування чавуну є застосування розчинів з солями марганцю. Утворене покриття на відміну від покриття на основі лише фосфатів заліза є більш корозійностійким в умовах експлуатації деталей водопровідної системи. Однак, технологічний процес нанесення такого покриття, вимагає високої температури нагріву, що є економічно невигідним, проте захисна плівка, яка утворюється за таким технологічним процесом якісна [10].

Для зниження температури розчину та отримання якісного покриття з вмістом фосфатів заліза, марганцю та цинку було використано розчин наступного складу: ортофосфорна кислота H_3PO_4 – 30-35 г/л; борфтороводнева кислота HBF_4 – 5-7 г/л; $Mn(H_2PO_4)_2$ – 15-20 г/л; нітрид цинку $Zn(NO_3)_2$ (прискорювач) – 20-25 г/л ПАР (змочувач) – 10-12 г/л;. При цьому нагрів був до 70 °С. При зануренні деталей температура знижувалася до 60 °С. Тривалість процесу - 15 хв., товщина утвореного покриття - 10-15 мкм.

Наступні корозійні дослідження нанесеного покриття виявили, що протягом тижня нанесене покриття на повітрі не кородувало. Однак, випробовування в кліматичній камері при температурі 50-60 °С та вологості 98% призвело до утворення ділянок корозії (характерний червонуватий колір оксиду заліза), наведено на рис.1.

Кращий результат виявився при витримці протягом 30 хв., при цьому товщина покриття становила 20 мкм. Однак, поодинокі сліди оксиду заліза утворилися на різьбовій поверхні після кліматичних випробовувань. Для покращення корозійної стійкості фосфатного шару та надання поверхні гідрофобних властивостей було застосовано зміцнювач - ЕКОЛ-У (склад розчину зміцнювача: ЕКОЛ-У - 50 мл/л, вода до 1 л, температура розчину -18-40°C) [11].

Фосфатацію виконували протягом 20 хв. в розчині для фосфатизації (склад наведено вище). Після чого виконувалася промивка деталі та занурення в розчин зміцнювача з наступною гарячою сушкою при температурі 60-80 °С без попередньої промивки деталі. Висока якість покриття була доведена випробуваннями в кліматичній камері при температурі 50-60 °С та вологості 98%. Утворене покриття не кородувало і було якісним адгезійним прошарком для подальшого нанесення лакофарбового покриття, наведено на рис.2.



Рис.1. Деталь «Гайка» з слідами корозії після випробувань в кліматичній камері



Рис. 2. Деталь «Корпус» після нанесення лакофарбового покриття

Висновки

Таким чином, на базі аналізу способів створення фосфатних покриттів для сталевих та чавунних деталей та механізмів їх утворення, було розроблено технологію отримання фосфатних покриттів на чавунних деталях системи водопостачання, виготовлених методами порошкової металургії. Для цього було проведено експерименти нанесення фосфатних покриттів з розчинів різного складу та режимів нанесення. Корозійна стійкість покриттів була перевірена випробуваннями в кліматичній камері. На зовнішню поверхню деталі «Корпус» було нанесено лакофарбове покриття, яке мало якісне зчеплення з фосфатованою поверхнею.

Список використаних джерел

1. Підгайчук С., Дробот О., Яворська Н. Особливості експлуатації деталей із чавуну в системах водопостачання // IX Ukrainian-Polish Scientific Dialogues: Conference Proceedings. International Scientific Conference, 20-23 October 2021, Khmelnytskyi (Ukraine). – Khmelnytskyi National University, 2021. – С. 120. ISBN: 978-966-8226-41-5.
2. Abou-Krishna M. M., Zaky A. M., Toghan A. A. Morphology, composition and corrosion properties of electrodeposited Zn-Ni alloys from sulphate electrolytes // The Journal of Corrosion Science and Engineering. – 2005. – V. 7 – P. 1–25.
3. Hammami O., Dhoubi L., Berçot P., Rezrazi M. Effect of phosphorus doping on some properties of electroplated Zn-Ni alloy coatings // Surface and Coatings Technology. – 2013. – V. 219. – P. 119–125.
4. Ordine A.P., Díaz S.L., Margarit I.C.P., Mattos O.R. Zn-Ni and Zn-Fe alloy deposits modified by P incorporation: anticorrosion properties // Electrochimica Acta. – 2004. – V. 49, № 17 – 18. – P. 2815–2823.

5. Заверач Є. М. Корозійні властивості цинк-нікелевих покриттів, осаджених в ацетатному та амонійному електролітах // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2008. – Спец. випуск № 7, Т. 1. – С. 336–341.
6. Veeraraghavan B., Hansung Kim, Popov B. Optimization of electroless Ni-Zn-P deposition process: experimental study and mathematical modeling // Electrochimica Acta. – 2004. – V. 49, № 19. – P. 3143–3154.
7. Bouanani M., Cherkaoui F., Fratesi R., Roventi G., Barucca G. Microstructural characterization and corrosion resistance of Ni-Zn-P alloys electrolessly deposited from a sulphate bath // Journal of Applied Electrochemistry. – 1999. – V. 29. – P. 637–645.
8. Методи захисту обладнання від корозії та захист на стадії проектування [Електронний ресурс] : підр. для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології», спеціалізації «Електрохімічні технології неорганічних та органічних матеріалів»/ М. В. Бик, О. І. Букет, Г. С. Васильєв – Електронні текстові дані (1 файл: 8,81 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 318 с. с.
9. Кунтий О.І. Гальванотехніка: Навч. посібник – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2004. – 236 с.5
10. Гальванические покрытия в машиностроении. Справочник. В 2-х томах/ Под ред. М.А.Шлегера, Л.Д.Тока. – М.: Машиностроение, 1985. – Т.2. 1985. 248 с., ил.
11. Олександренко В. П., Свідерський В. П., Кириченко Л. М., Єфіменко В. В. Вплив складу і технологічних факторів на адгезійну міцність фторопластових покриттів до металевих поверхонь // Вісник ХНУ, 2021, серія 5, технічні науки, с. 45-51

Рецензент: доцент кафедри хімії та хімічної технології
Хмельницького національного університету,
кандидат технічних наук, доцент

Алла Ярославівна ГАНЗЮК

УДК 621.317:004.38

DOI 10.36910/775.24153966.2022.73.19

О.М. Сизоненко, О.І. Христо, С.В. Конотоп*Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв***ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТА МОНІТОРИНГУ ПРОЦЕСУ ІСКРО-ПЛАЗМОВОГО СПІКАННЯ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Проаналізовано принципи стабілізації швидкості навантаження у системі імпульсно-фазового керування електроприводом розривної машини R-0,5, яка задіяна у режимі стиснення матеріалу за рахунок використання спеціального реверсорового механізму. Виявлено основні шляхи поширення електромагнітної перешкоди до слабкострумних ланок системи керування та моніторингу й запропоновано основні заходи щодо посилення рівня її електромагнітної сумісності з потужним джерелом імпульсного струму. Розкрито конструктивні особливості сполучення блоків виміру сили навантаження та швидкості стиснення з механічними передачами обертового руху розривної машини та зазначено основні чинники, що впливають на точність перетворення сигналу абсолютного кутового положення з ШИМ виходу магнітного енкадера.

Ключові слова: розривна машина, система моніторингу, ІПС процес.

О.Н. Сизоненко, А.И. Христо, С.В. Конотоп**ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И МОНИТОРИНГА ПРОЦЕССОМ ИСКРО-ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Проанализированы принципы стабилизации скорости нагружения в системе импульсно-фазового управления электроприводом разрывной машины R-0,5, задействованной в режиме сжатия материала за счет использования специального реверсорового механизма. Выявлены основные пути распространения электромагнитной помехи к слаботочным узлам системы управления и мониторинга, а также предложены основные меры по усилению уровня ее электромагнитной совместимости с мощным источником импульсного тока. Раскрыты конструктивные особенности сопряжения измерительных блоков силы нагружения и скорости сжатия с механизмами вращательного движения разрывной машины и отмечены основные факторы, влияющие на точность преобразования сигнала абсолютного углового положения с ШИМ выхода магнитного энкодера.

Ключевые слова: разрывная машина, система мониторинга, ИПС процесс.

О.М. Sizonenko, O.I. Khrysto, S.V. Konotop**A MONITORING SYSTEM'S BUILDING FEATURES FOR THE DISPERSED MATERIALS SPARK-PLASMA SINTERING PROCESS**

The loading rate stabilization principles in pulse-phase control system of tensile testing machine R-0.5 electric drive, which is involved in material compression mode by using special reverse mechanism are analyzed. The main ways of electromagnetic interference propagation to low-current nodes of the control and monitoring system are revealed, and also the basic measures for strengthening of its electromagnetic compatibility level with a powerful source of pulse current are offered. The interface design features of measuring units for the loading force and compression rate with rotating mechanisms of tensile testing machine are disclosed and the main factors affecting on accuracy of absolute angular position signal conversion from the magnetic encoder PWM output are noted.

Keywords: tensile testing machine, monitoring system, SPS process.

Постановка проблеми. В даний час все більшу значимість набувають роботи, спрямовані на розробку нових способів отримання матеріалів з поліпшеними фізичними та функціональними властивостями. Одним з найбільш перспективних методів є іскро-плазмове спікання (ІПС) дисперсних композитів. Для забезпечення якісного та ефективного спікання необхідно проводити синхронний моніторинг одразу кількох параметрів, що впливають на даний процес: температуру, струм, напругу, силу навантаження і т. д. Попре те складність визначення зазначених параметрів процесу залежить на сам перед від ефективності рівня забезпечення електромагнітної сумісності системи керування та моніторингу з технологічними вузлами ІПС установки.

Аналіз останніх досліджень й публікацій. Ця стаття є логічним продовженням попереднього циклу робіт авторів по даній тематиці [1-3] та присвячена, вирішенню актуальної задачі синтезу та розробці основних функціональних елементів системи керування та моніторингу, що забезпечать керуваність процесу ІПС за рахунок автоматизації вимірювання інформаційних сигналів у напрямку покращення якості композитних виробів.

Постановка завдання. Метою роботи є створення апаратно-програмного комплексу керування та моніторингу установки іскро-плазмове спікання, що включає механічне

навантаження вихідних дисперсних композицій, систему реєстрації та управління, систему охолодження та вакуумування для одержання дисперснозміцнених композитів.

Методи дослідження – методи математичного моделювання, фізичний експеримент, реєстрація швидкоплинних електричних процесів.

Об'єкт дослідження – принципова схема технологічного вузла експериментального обладнання для іскро-плазмового спікання дисперсних композицій.

Система керування електромеханічним пресом (розривна машина Р-0,5)

В процесі іскро - плазмового спікання порошків чимало важливим завданням є підтримання рівномірного навантаження матеріалу, що знаходиться в прес формі. Як правило, механізми, що дозволяють створювати високий тиск розрізняються за типом подання навантаження (переміщення траверси) в основу яких покладено гідравлічний або гвинтовий принцип дії [4]. Гідравлічні преса зазвичай розраховані на великі навантаження більше 10 тонн, однак їх істотний недолік пов'язаний з точністю позиціонування механізму навантаження, яке в більшій мірі визначається швидкістю переміщення штока, що штовхає гідроциліндр. У свою чергу регулювання швидкості навантаження в таких механізмах часто виконується за допомогою систем автоматичного керування побудованої на базі електроприводу змінного або постійного струму [5]. Одна з таких систем використовується в машині розривної Р-0,5, функціональні можливості якої розширюються, шляхом використання спеціального реверсорового механізму, що дозволяє також проводити випробування матеріалу на його стиснення. Головними елементами електроприводу є напівпровідниковий перетворювач і двигун постійного струму. Сполучною ланкою між цими двома елементами є система імпульсно-фазового керування СІФК (рис.1). Основним завданням СІФК є забезпечення плавного регулювання швидкості обертання валу двигуна, що дозволяє підтримувати постійну швидкість руху активного захвату машини. Регулювання і стабілізація обертів двигуна досягається за рахунок введення негативного зворотного зв'язку по швидкості.

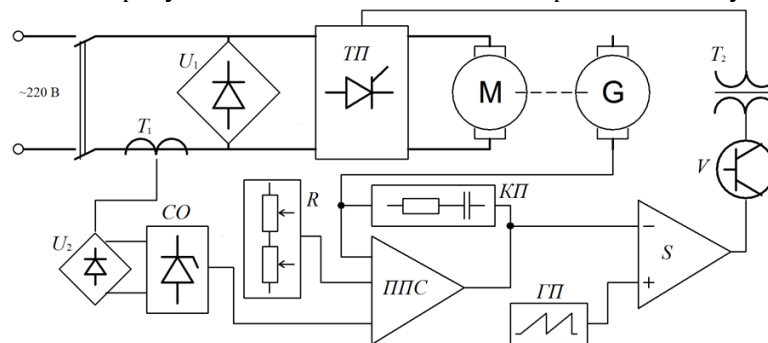


Рис.1. Структурна блок схема електроприводу Р-0,5

М – електродвигун постійного струму; *ТП* – тиристорний перетворювач; *S* – ШІМ компаратор
ППС – підсилювач постійного струму; *ТГ* – тахогенератор; *U₁*, *U₂* – діодні випрямлячі, *СО* – вузол струмообмеження; *КП* – коригувальний пристрій; *ГП* – генератор пилкоподібної напруги, *T₁* – мережевий трансформатор, *T₂* – імпульсний трансформатор, *V* – транзистор.

При цьому, система керування електроприводом розглядається, тільки як складова частина загальної системи автоматичного управління всім комплексом технологічного процесу вакуумного спікання й механічного навантаження оброблюваних порошкових сумішей. Виконавчим механізмом електроприводу є електродвигун постійного струму, оснащений тахогенератором для контролю оборотів валу. У міру стиснення зразка навантаження на валу двигуна поступово зростає, що тягне до зниження швидкості обертання валу і як наслідок до порушення сталості швидкості навантаження матеріалу. Для її підтримки необхідно поступово підвищувати потужність, що підводиться до електродвигуна. Однак коректний приріст потужності може бути оцінений тільки завдяки введенню слідкуючого зв'язку за швидкістю. Такий вид зв'язку забезпечує сигнал напруги, що знімається з обмотки тахогенератора, який пропорційний швидкості обертання валу двигуна. До складу СІФК входять генератор пилкоподібної напруги [6], коригувальний підсилювач, ШІМ компаратор, випрямляч сигналу тахогенератора, силовий перетворювач, логіка формування керуючого сигналу, а також блок захисту по перевищенню струму навантаження. В основу даного пристрою покладений принцип формування імпульсів з регулюванням їх шпаруватості. Центральним елементом пристрою є ШІМ - компаратор [7], функціональним призначенням якого є порівняння сигналів, що надходять на його входи для формування результуючого вихідного сигналу. Так як компаратор це той же підсилювач тільки з нескінченним

коефіцієнтом посилення, то його вихідним сигналом будуть пороги напруг, прив'язані до рівнів напруги джерела живлення. При цьому частота перемикання компаратора задається частотою пилоподібної напруги, яка надходить на його прямий вхід, а тривалість імпульсу визначається сигналом завдання, який подається на його інверсний вхід. На підставі порівняння виробляється результуючий сигнал широтно-імпульсної модуляції. Розмах напруги пилоподібного сигналу та його частота залишаються постійними в часі і задаються за допомогою пасивних елементів генераторного блоку. У свою чергу сигнал завдання, що надходить на компаратор з коригуючого пристрою, є постійно змінюваним сигналом, який формується на підставі посилення помилки неузгодженості вхідного і вихідного сигналів системи керування. Коригувальний пристрій являє собою сумуючий диференційний підсилювач з підсумовуванням напруги завдання і напруги з тахогенератора на прямому його вході за вирахуванням опорної напруги на його інверсному вході. Результуючий сигнал може бути визначений, як $U_{\text{зад}} = K_y \cdot (U_0 + U_{\text{ТХГ}} - U_{\text{оп}})$. Додаткове інтегрування результуючого сигналу завдання дозволяє також усунути небажані пульсації напруги тахогенератора і як наслідок підвищити точність регулювання. У точках перетину сигналу завдання з пилоподібним сигналом буде відбуватися перемикання виходу компаратора, при цьому рівень сигналу завдання близький до рівня опорної напруги, тобто коли їх різниця близька до нуля, це викличе максимально можливе розширення вихідного імпульсу, а в разі збільшення різниці до його звуження. Таким чином, при початковому запуску приводу сигнал з тахогенератора ще тимчасово відсутній, що змушує компаратор сформувати найбільше розширення імпульсу. По мірі розгону двигуна сигнал з обмотки тахогенератора зростає і як наслідок результуючий керуючий імпульс ШІМ - компаратора звужується. Якщо в процесі роботи двигуна необхідно змінити його обороти, то для здійснення його м'якого пуску або гальмування в корегуючому пристрої передбачена відповідна інтегруюча ланка, що забезпечує плавне зростання і спад напруги завдання. Також в системі передбачений захист по перевантаженню, що досягається шляхом відстеження струму якірного ланцюга двигуна блоком струмового захисту. В силу того, що сигнал управління виробляється єдиним ШІМ компаратором, в системі також передбачена логіка, що дозволяє розподілити імпульси тактування по діагональним парам транзисторів, які відповідають за потрібний напрямок переміщення траверси. Кожний транзистор міста керується від окремого оптично розділеного драйвера. Напруга на силовий міст подається після двунівневого діодного випрямляча зашунтованого фільтруючою електролітичною ємністю.

Сполучення системи керування процесом ІПС з електричними вузлами електромеханічного пресу, генератором імпульсного струму "Гефест" [3], системами охолодження та вакуумування.

Системи керування та моніторингу об'єднано та виконано на базі промислового восьмирозрядного мікроконтролерного модулю Atmega2560 [8].

Живлення МК відбувається через USB роз'їм, вбудований на його платі та підключений відповідним кабелем до одного з портів персонального комп'ютера. Структурну схему сполучення мікроконтролера з технологічними вузлами установки ІПС представлено на рис. 2.

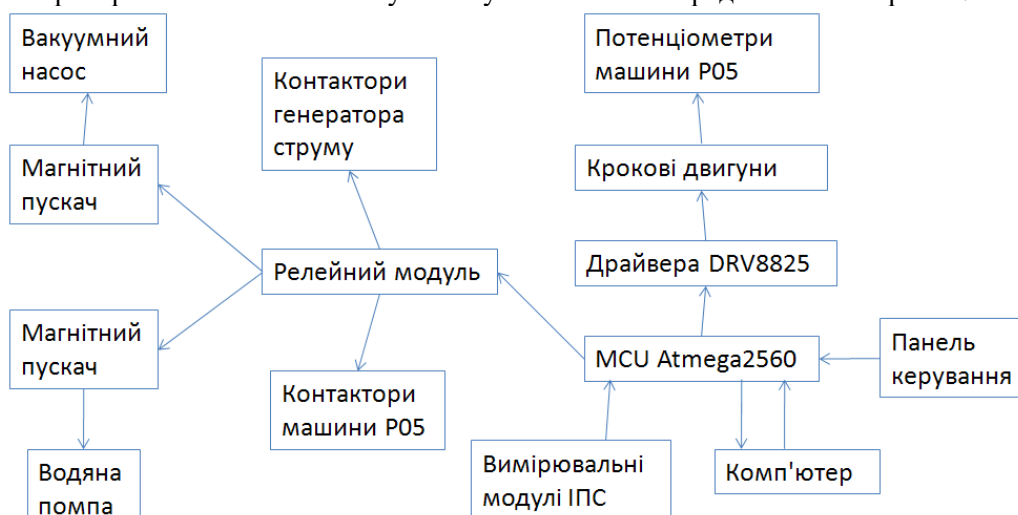


Рис.2. Структурна схема системи керування ІПС

Окрім контакторів машини та генератора до релейного модуля під'єднуються обмотки магнітних контакторів, що вмикають відповідно вакуумний або водяний насоси. В свою чергу, рівень вакууму у вакуумній камері та температура рідини охолоджувального контуру є сигналами зворотного зв'язку, за якими виконується автоматична підтримка кожного із параметрів. Для сполучення МК з контакторами систем керування електромеханічного пресу та генератором імпульсного струму використано двохстановий 16-канальний релейний модуль [9].

Програмне керування швидкістю стиснення досягається через механічний зв'язок потенціометрів регулювання грубо / точно з кроковими двигунами, які під'єднуються до МК через драйвери керування DRV8825 [10]. З'єднання валу крокового двигуна зі шпинделем потенціометра досягається через обтискову муфту, яка скріплює обертові механізми радіально врізаними гвинтами. Спеціальний стенд, на якому співвісно розміщуються потенціометри та крокові двигуни, показано на рис. 3.

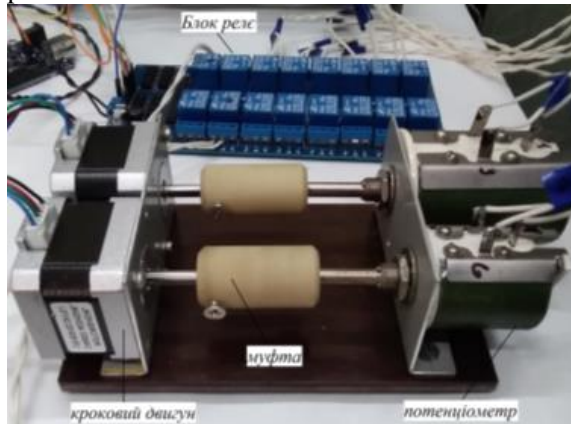


Рис. 3. Сполучення потенціометрів із кроковими двигунами

Модулі виміру напруги, струму та температури на графітовій матриці від генератора імпульсного струму «Гефест»

Технологія спікання порошкового матеріалу, який розміщено у графітовій матриці стиснутого з обох боків пуансонами під дією, як струму високої щільності, так й зовнішнього механізму навантаження, відбувається за температурними показниками до 1500 °С. Вимірювання температури нагрітого зразка прийнято проводити хромель-алюмельовою термопарою [11]. Сигнал із термопари на рівні від 5 мВ до 50 мВ подається на вхід інструментального диференціального підсилювача AD627 [12] та підтягується до рівня, достатнього для оцифрування, й направляється на один із входів вбудованого модуля АЦП МК Atmega2560. Крім того, для усунення попадання високої напруги на порти МК в схемі передбачено гальванічну розв'язку силової частини від вимірювального тракту на основі лінійної оптопари ІЛ300 [11]. Таку обережність пов'язано з можливістю виникнення величезних значень електрорушійної сили (ЕРУС) самоіндукції на зразку, що спікається, в результаті короткочасного обриву струму, що проходить через нього величиною порядку 1 кА і більше. Коефіцієнт посилення підсилювача AD627 визначається за формулою та задається резистором на його вході:

$$K_n = 5 + 200000 \text{ Ом} / R_g, \quad (1)$$

де R_g – опір резистора на вході підсилювача AD627, Ом.

Значення цього коефіцієнту задається з урахуванням напруги насичення обраної термопари, а результуючий сигнал не повинен перевищувати опорної напруги АЦП МК. Максимальне значення хромель-алюмельової термопари при температурі 1350 °С сягає 50 мВ. Якщо коефіцієнт посилення дорівнює $K_n=45$, амплітуда сигналу буде сягати 2,43 В, що є прийнятною напругою на вході АЦП. Лінійну оптопару ІЛ300 може бути налаштовано, як для фотодіодного, так і для фотогальванічного режиму підсилювання. Як відомо, фотогальванічна топологія забезпечує кращу лінійність, найнижчий рівень шуму та дрейфові характеристики. Якщо лінійний оптрон побудувати з ОП LM358 [13], то лінійність передачі можна отримати на частоті сигналу приблизно до 2 кГц. Так як процес нагріву або охолодження зразку в матриці відбувається достатньо повільно, то отримана частотна смуга пропускання оптрона вважається прийнятною.

Для виміру струму у навантаженні використано датчик струму компенсаційного типу на основі ефекту Холла [14]. Модель CSNR161 дозволяє вимірювати змінний, постійний або

імпульсний струми амплітудою ± 200 А з частотою до 150 кГц. Генератор імпульсного струму працює на частоті до 50 кГц, але амплітуда імпульсів може сягати 1200 А. Струмознімальний контакт генератора виконано у вигляді широкої мідної шини розміром 70 мм \times 50 мм. Переріз вікна обраного датчика струму складає всього 10 мм \times 13,5 мм, тому його вбудовано у шину таким чином, щоб охоплювати тільки деяку частину її поверхневої площі. Якщо зробити припущення, що вимірювальний струм розподіляється рівномірно по перерізу шини, то частину струму, що проходить через вікно датчика, можна визначити за відношенням їх перетинів $S_d/S_{ш} = 1/7$. Живлення датчика здійснюється від біполярного джерела ± 12 В. Вихід датчика в своєму роді є джерелом струму, який навантажено на опір порядку від 30 Ом до 40 Ом. Внаслідок цього сигнал напруги на резисторі виявляється пропорційним струму в первинному колі, поділеному на кількість витків додаткової обмотки. Значення струму можна обчислити за формулою:

$$I = \frac{V_H \cdot N}{R_L}, \quad (2)$$

де V_H – напруга на опорі навантаження, В;

N – кількість витків компенсаційної обмотки, од.;

R_L – навантажувальний опір, Ом.

Для обраної моделі датчика $N=1000$, $R_L=30$ Ом. Результуюче значення струму розраховується з урахуванням коефіцієнту відношення перетинів.

Так як сигнал струму у своєму спектрі може містити високочастотну складову, то перед подачею на вхід АЦП його потрібно попередньо проінтегрувати (згладити) для отримання середнього значення. Треба також зазначити, про необхідність введення випрямляючої ланки сигналу датчика струму на випадок, якщо спікання буде відбуватися від генератора змінного струму. Випрямляч зібраний на двох ОП, тому потребує біполярного джерела для їх живлення. Так як конструкція датчика забезпечує гальванічну розв'язку з силовим контуром, то усереднений сигнал струму без будь-яких додаткових ланцюгів оптичної розв'язки подається безпосередньо на один із входів АЦП МК для подальшої обробки. Вимірювання напруги на навантаженні теж відбувається за подібним принципом як і для струму, але з тою відмінністю, що перед подачею на АЦП МК усереднений сигнал напруги подається на лінійний оптрон ІЛ300 для забезпечення гальванічного розв'язування з силовим контуром. Сигнал напруги з вузлів навантаження подається на вхід блоку напруги через коаксіальну екрановану лінію. Під'єднання лінії з обох її кінців як до навантаження, так і до блоку здійснюється через байонетні роз'єми.

Генератор імпульсного струму «Гефест» [3], представляє собою напівпровідниковий перетворювач із однотактною схемою керування однією транзисторною діагональною парою мосту. В протилежній діагоналі знаходяться рекуперативна швидкодіюча діодна пара. Керуючі сигнали на затвори транзисторів надходять за принципом широтно-імпульсної модуляції сигналу від одноканального контролера UC3845 [15]. Частота тактування задається фіксованою на рівні 50 кГц зовнішнім RC ланцюгом. Контролер має зворотній зв'язок за струмом у первинному колі силового трансформатора, що дозволяє виконувати стабілізацію струму через динамічне навантаження процесу ПС. Генератор видає багатоскладовий сигнал струму (напруги), який окрім основної гармоніки (50 кГц) вміщує високочастотну складову на рівні 20 МГц. Встановлено, що збудження високої частоти відбувається в моменти перемикання транзисторів. Це пов'язано з присутністю в електромагнітній системі перетворювача паразитних ємнісних зв'язків, як між обмотками трансформатора, так й провідниками печатної плати силового модуля. Власні частоти коливання цих контурів співмірні з тривалістю перемикання транзистору. Струмові лінії, що з'єднують генератор з камерою через гнучкий силовий кабель, представляють собою відкритий коливальний контур. Як відомо, високочастотні коливання струму у відкритому контурі можуть збуджувати потужну електромагнітну перешкоду, яка спроможна виводити з ладу слабкоструміву електронну техніку, призводити до спотворення або зашумлення інформаційних сигналів, та як наслідок до великої похибки обчислення. Тому усі вразливі слабкоструміву блоки та вимірювальні кабелі повинні знаходитися у екранованій оболонці. При цьому одна частина електромагнітної перешкоди з виходу генератора розповсюджується у ефірному просторі, а інша за рахунок безпосереднього електричного зв'язку перетворювача потрапляє у мережу. На рис. 4,а наведено осцилограму напруги на елементах перетворювача генератора. Окрім високочастотної складової, що майже становить 200 кГц, у сигналі присутня високочастотна гармоніка, спричинена процесом перемикання транзисторів перетворювача.

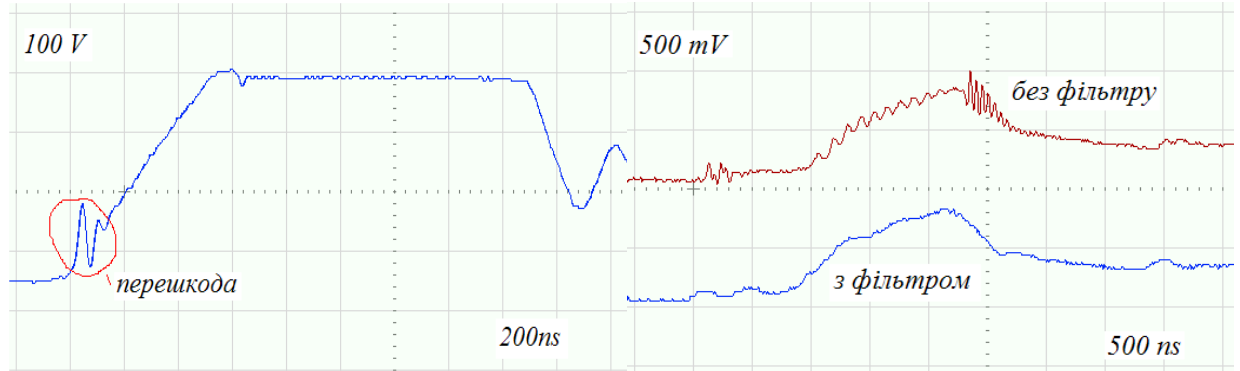


Рис.4. Осцилограми імпульсу напруги: а) на силовому транзисторі генератора струму “Гефест”; б) порівняння сигналів на вході блоку вимірювання напруги

Тому вкрай важливою проблематикою процесу ПС є забезпечення електромагнітної сумісності електрообладнання з потужним джерелом імпульсного струму. У цьому сенсі живлення потенційно вразливої техніки повинно відбуватися через спеціальний клас мережевих фільтрів або у автономному режимі від незалежного джерела. Блок живлення повинен бути екранованим та розташовуватися в безпосередній близькості з перетворювачем сигналу датчика для забезпечення мінімальної довжини лінії живлення. Крім того, живлення плати перетворювача постійним струмом захищає з’єднувальні лінії від збудження електромагнітної перешкоди. Сигнал напруги, що поступає по коаксіальній лінії перед подачею на перетворювальний блок, попередньо пропускається через LC фільтр нижніх частот з частотою зрізу амплітудо-частотної характеристики (АЧХ) біля 2 МГц. Узгоджувальний резистор лінії 50 Ом вбудовано у корпусі фільтра. На рис. 4,б показано суміщені осцилограми імпульсів на вході блоку вимірювання напруги з фільтрацією високочастотної складової та без неї.

Вимірювання проводилось цифровим запам’ятовуючим осцилографом SDS1022, який під’єднувався до мережі через розв’язувальний трансформатор. Для зняття характеристик напруги генератор струму навантажувався на активний опір у вигляді біфілярного шунта $R_{ш}=0,035$ Ом з роз’ємом під коаксіальний кабель. Фільтрування сигналу є обов’язковою процедурою, так як стримує просування високочастотної перешкоди до наступних ланок блока перетворення напруги. Зовнішній вигляд розглянутих блоків представлено на рис. 5.

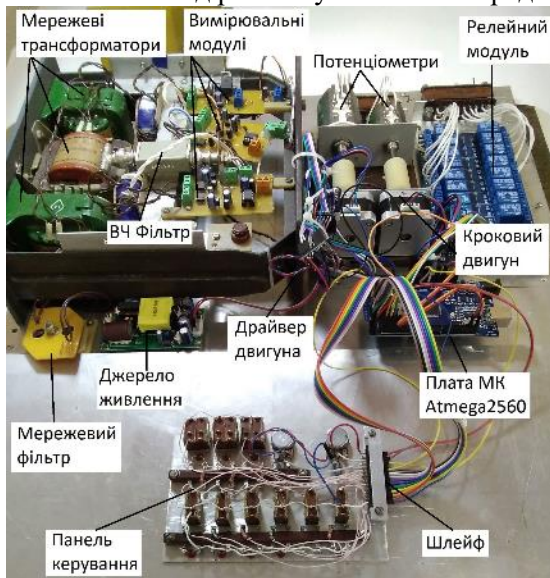


Рис.5. Блоки вимірювання напруги, струму й температури

запускається від діаметрально намагніченого двополюсного магніту, який повинен розміщуватися паралельно торцевій поверхні мікросхеми на висоті від 0,5 мм до 1,8 мм. Матеріал магніту – неодим-залізо-бор у формі таблетки діаметром 6 мм і висотою 2,5 мм. Зусилля, що передається

Кожний блок живиться від свого незалежного мережевого понижуючого трансформатора з багатьма гальванічно роз’єднаними вторинними обмотками. Цей підхід зменшує електромагнітний взаємозв’язок між блоками, тим самим підвищує точність вимірювання сигналів. Усі три блоки разом з трансформаторами закріплено на металевому каркасі, який розміщено у корпусі приладу системи керування та моніторингу ПС.

Модулі виміру сили навантаження та швидкості стиснення порошкового матеріалу (магнітний енкодер)

Силу навантаження порошкової суміші у графітовій матриці та швидкість її стиснення вирішено аналізувати на основі кута повороту відповідного обертового механізму машини Р-0,5. У ролі кутового вимірювача використовується інкрементальний магнітний енкодер на основі ефекту Холла AS5040 [16], що має роздільну здатність з дозволом $0,35^\circ$ або 1024 імпульсів за оборот. Дія датчика

порошкової суміші під дією реверсивного механізму, прямопропорційне куту повороту шестерні силовимірювача, тому для його визначення потрібне знання про абсолютне кутове положення обертового механізму, яке надається за ШІМ сигналом магнітного енкодера. Робочий цикл ШІМ прямопропорційний абсолютному кутовому положенню, яке визначається за формулою:

$$\varphi_{\text{роз}} = \frac{t_{\text{он}} \cdot 1025}{t_{\text{он}} + t_{\text{оф}}} - 1, \quad (3)$$

де $t_{\text{он}}$ – тривалість імпульсу, с;
 $t_{\text{оф}}$ – тривалість паузи, с.

Аналоговий сигнал зручніше вимірювати, ніж тривалість імпульсу, тому перед подачею на МК сигнал ШІМ усереднюється за допомогою RC фільтра нижніх частот. Параметри фільтра задаються такими, щоб не перевантажувати вихід ШІМ та забезпечувати меншу пульсацію. Для таких значень фільтра, як $R_{\text{ф}}=10$ кОм, $C_{\text{ф}}=47$ мкФ постійна часу ланцюга буде становити біля 0,47 с. Збільшення постійної часу RC ланки зменшує пульсації, але водночас зменшує час відповіді системи, який буде помітно відчутним при високих значеннях швидкостях зростання сили стиснення. На відміну від сили навантаження для визначення швидкості стиснення знання абсолютного кутового положення обертового механізму не є обов'язковою умовою, тому для цього більш доцільно використовувати інкрементальний вихід енкодера.

Плата енкодера, як блоку сили навантаження, так й швидкості стиснення, є конструктивно ідентичними, але за призначенням мають відмінні інтерфейси сполучення з МК та місце розташування над обертовим механізмом машини Р0,5. Зовнішній вигляд кожного з блоків зображено на рис. 6, а, б.

Несуча панель з платою енкодера блока швидкості стиснення (див. рис. 6, а) кріпиться до верхнього швелеру машини та розміщується над її правим черв'ячним (ходовим) гвинтом. У глухий технологічний отвір черв'ячного гвинта вставлено втулку, що проходить через отвір несучої панелі та виходить над поверхнею енкодера. У сидлі верхнього краю втулки знаходиться двополосний магніт, який виставляється над поверхнею енкодера так, щоб проміжок між їх зовнішніми поверхнями становив не більше, ніж 2 мм. Початкове радіальне положення магніту блока швидкості стиснення може бути виставлено довільно.

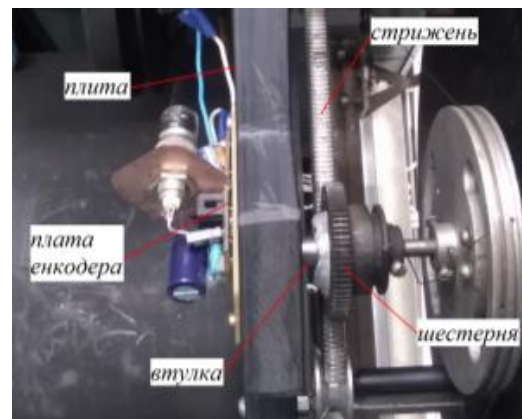


Рис.6. Кріплення магнітних енкодерів до машини:

а) блок швидкості стиснення; б) блок сили навантаження

Панель, що несе плату енкодера блока сили навантаження (див. рис. 6, б) кріпиться до задньої стінки силовимірювача машини та розміщується над осью шестерні стрілки циферблата, яка зчіплюється із зубчатою рейкою, що штовхається важелем маятника. Як й для попереднього принципу кріплення, у технологічний отвір осьової шестерні також вставлено втулку, що несе двополосний магніт. Проміжок між зовнішніми поверхнями енкодера та магніта дорівнює не більше 2 мм. Механічний нуль магніту виставляється радіальним обертанням втулки попередньо до її остаточного склеювання з шестернею.

Експериментальні дослідження показали, що на точність вимірювання абсолютного кутового положення впливають наступні чинники:

- стабільність напруги живлення магнітного енкодера;
- рівень пульсацій на виході RC фільтра;

- в) нелінійність кута через перекося магніту відносно поверхні датчика;
- г) нелінійність кута через граничне відхилення магніту від геометричного центру датчика;
- д) брязкіт заднього фронту імпульсу ШІМ через перевищення граничної відстані магніту до поверхні датчика;
- е) нелінійність аналогово-цифрового перетворювача.

За технічною документацією ємність вхідного та вихідного електролітичних конденсаторів лінійного стабілізатора напруги L7805 [17] повинна становити на рівні 10 мкФ та 1 мкФ відповідно. Але як показує практика, навіть для живлення енкодера AS5040 цієї ємності виявляється недостатньо. Виявлено, що на виході стабілізатора присутня гармонійна складова з повним розмахом амплітуди практично у 15 мВ та частотою 2 МГц. Основним чинником шуму у стабілізаторах є його внутрішнє джерело опорної напруги, тому для його пригнічення потрібно використовувати фільтр нижніх частот або ставити вихідні конденсатори з високим еквівалентним послідовним опором. Вимірювання показали, що збільшення вихідної ємності стабілізатора напруги на порядок призводить до майже трьохкратного зменшення амплітуди власних коливань на його виході. Але подальше нарощення вихідної ємності вже не дає суттєвого пригнічення цього коливання. Крім того, ця гармоніка буде накладатися на пульсації усередненого ШІМ сигналу з виходу RC фільтру. По результатам експериментів, встановлено, що амплітуда пульсації з ростом постійної часу інтегрувальної ланки зменшується, але при цьому сповільнюється відгук системи на різкі стрибки сигналу сили навантаження.

Організації програмної взаємодії мікроконтролера з комп'ютером

У програмі, що заноситься у пам'ять мікроконтролера, відбуваються наступні дії: сканування стану ліній аналогових та цифрових портів; зберігання інформаційних параметрів у тимчасовому масиві; обробка зовнішніх переривань; обробка та виконання завдання на запит, що надходить з комп'ютера або панелі керування.

Структура програми, окрім основної функції «main()», включає функції обробки таких переривань, як від таймерів лічильників T0 та T1; по завершенню перетворення АЦП; по завершенню прийому даних через UART; за появою зовнішнього сигналу від енкодера. Окрім того, є функції визначення координат позиціонування крокового двигуна та інтерфейсу його керування для драйвера DRV8825.

На початку функції «main()» відбувається ініціалізація портів вводу-виводу та апаратної периферії МК. Контактори пульта керування (кнопки і тумблери) одним зі своїх виводів з'єднуються безпосередньо з вхідними лініями МК, які програмно конфігуруються, як високоімпедансні входи з внутрішньою підтяжкою через 100 кОм резистори до його напруги живлення 5 В. Іншим вільним виводом усі контактори панелі під'єднуються до цифрової землі блока живлення МК. Зміна стану кожної лінії з високого до низького рівня відбувається при натисканні контактора.

Лінії порту, що живлять світлодіоди панелі керування налаштовуються, як низькоімпедансні виходи. Кнопки пульта, такі як «стоп», «вгору», «вниз», «прискорено» відповідають за керування електромеханічним пресом. Кнопки вмикання та вимикання струму у навантаженні відповідають за керування генератором струму «Гефест». Програма послідовно сканує стан кожної лінії та у випадку, якщо у конфігураційному регістрі фізичного рівня порту з'являється логічний нуль, то виконується звернення до дешифратора плати релейного блоку. Реле вмикається при наявності за низьким рівнем лінії дешифратора, тому живлення релейного блоку вмикається після початкового запуску МК та ініціалізації портів. Процедура сканування стану контакторів панелі керування виконується у нескінченному циклі кожен раз через 10 мс. Також на панелі керування виводяться ручки змінних резисторів для завдання швидкості стиснення електромеханічного пресу. Змінний резистор послідовно з постійним утворює дільник напруги, з якого напруга подається на вхід АЦП МК та варіюється у діапазоні від 0,68 В до 5 В (відповідно крайнє ліве та крайнє праве положення ручки резистора). Для зменшення флуктуацій напруги паралельно крайнім виводам змінного резистора під'єднується керамічний конденсатор ємністю 0,1 мкФ. Наступним кроком програми є обробка команди, що надходить по послідовному модулю UART з комп'ютера. Спочатку відбувається перевірка прапора, що сигналізує про заповнення трьохбайтового буфера UART команди. У першому байті міститься код команди, а наступні два байти можуть утримувати дані, які необхідні для виконання цієї команди. Наприклад, це може бути кількість кроків двигуна для регулювання швидкості стиснення або граничне значення сили навантаження, при якому виконується автоматична зупинка електромеханічного пресу. Кожна команда кодується латинським символом верхнього регістру. Розпізнавання команди виконується за допомогою

конструкції гілкової інструкції «else if ()». Якщо команду не знайдено, то до комп'ютера відправляється нульовий байт. У програмі маються декілька функцій-обробників як внутрішніх, так і зовнішніх переривань. Запуск модуля АЦП відбувається у тілі функції обробника переривання по переповненню 8-бітного таймера лічильника T0. При частоті тактування таймера в 250 кГц така подія буде виконуватися 976 раз за секунду. Так як сканування каналів виконується послідовно й одразу по п'яти датчикам, то результуюча частота дискретизації по одному каналу буде розділятися кількістю каналів. У тілі функції обробника переривання по завершенню перетворення АЦП зберігається поточне значення у масив збору ШС та здійснюється перехід до наступного каналу АЦП. Після того, як масив заповнено, на наступному етапі відбувається оновлення попередніх даних з урахуванням, що їх уже передано на запит до комп'ютера. Підрахунок кількості імпульсів з інкрементального виходу магнітного енкодера, що відповідає за швидкість стиснення, виконується у тілі функції обробки зовнішнього переривання каналу int0 МК. Функція викликається при наявності на вході int0 сигналу з наростаючим переднім фронтом. Результуюча кількість підраховується за інтервал часу 10 с, потім відправляється до ПК. Для фіксування цього інтервалу використовується 16-бітний таймер-лічильник, частота якого з урахуванням коефіцієнта ділення становить 15625 Гц. Таймер використовується у режимі порівняння. Кожен раз по досягненню рахункового регістра таймера певного значення, яке відповідає значенню регістра порівняння (відносяться до периферійних пристроїв мікроконтролера), відбувається виклик функції обробки цієї події. Значення рахункового регістра кожен раз обнуляється для підготовки до наступної обчислювальної ітерації. Перехід до основного програмного циклу у функції «main()» здійснюється після виходу із підпрограм обробників розглянутих апаратних переривань.

Усі перетворення над двобайтовими числами з урахуванням розмірності (одиниці виміру) кожного параметра виконуються програмою комп'ютера. Цифрові дані таких параметрів, як напруга, струм, температура та тиск спочатку приводяться до значення сигналу напруги відповідно для кожного вимірювального блоку, а потім розраховуються остаточні значення цих параметрів з урахуванням апроксимаційних коефіцієнтів.

Висновки. Експериментально встановлено основні чинники, які впливають на точність вимірювання абсолютного кута повороту з аналогового виходу магнітного енкодера при обертанні шестерні силовимірювача електромеханічного пресу.

Виготовлено модернізований макетний варіант системи керування та моніторингу процесу ШС та виконано її сполучення з електричними вузлами електромеханічного пресу, генератора імпульсного струму «Гефест-10», системами охолодження та вакуумування. Для підвищення стійкості системи до електромагнітних перешкод виконано додаткове екранування її вимірювальних блоків, які розміщено на обертових деталях електромеханічного пресу. Крім того, у мережі живлення вимірювальних блоків встановлено завододавні фільтри для пригнічення високочастотних коливань, що розповсюджуються при перемиканні силових ключів напівпровідникового перетворювача генератора імпульсного струму.

Перевірено роботу комп'ютерного програмного забезпечення на базі мікроконтролерного модуля atmega2560 системи моніторингу процесу спікання, що дозволяє відтворювати та зберігати наступні характеристики процесу ШС: температуру спікання зразка, силу механічного навантаження, середнє значення модульованого імпульсного струму та напруги на зразку, швидкість його стиснення, виділену потужність, та залишковий рівень тиску у вакуумній камері.

Список використаної літератури

1. Сизоненко, О.М., Христо О.І. Інформаційно-вимірювальна система SPS процесу спікання дисперсних матеріалів // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». Луцьк, 2021, No71, DOI 10.36910/6775.24153966.2021.71.49
2. Сизоненко, О.М. Литвинов, В.В. Конотоп, С.В. Коваленко, О.О. Автоматизація процесу вимірювання температури, струму і напруги при іскро - плазмовому спіканні дисперсних композицій. Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. 2014. № 21 (1064). с. 130-140.
3. Сизоненко О.М., Івлієв А.І., Райченко О.І., Литвинов В.В., Конотоп С.В., Зайченко А.Д. (25.07.2012). Патент 71816, МПК В22F3/14. Пристрій для іскро-плазмового спікання порошків (Україна). u201200951; заявлено 30.01.2012; бюл. № 14

4. Цурпал І. А. Механіка матеріалів і конструкцій : навч. посібник. – К.: Вища освіта, 2005. – 367 с.
5. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування. Київ: Либідь, 1997.– 544 с.
6. Triangular wave generator [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.circuitstoday.com/triangular-wave-generator>
7. PWM generator circuit. Texas Instruments. [Електронний ресурс]. – <https://www.ti.com/lit/sboa212>.
8. 8-bit Microcontroller with 16/32/64KB In-System Programmable Flash [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega640-1280-1281-2560-2561-Datasheet-DS40002211A.pdf>
9. 16-Channel Relay Module Board [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://www.uctronics.com/download/Amazon/U604302_print.pdf
10. DRV8825 Stepper Motor Controller IC [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8825.pdf>
11. Геращенко О.А. Тепловые и температурные измерения: Справочное руководство. Киев: Наукова думка, 1965. 304 с.
12. Micropower, Single- and Dual-Supply, Rail-to-Rail Instrumentation Amplifier [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD627.pdf>
13. Vishay Semiconductors. IL300 Datasheet, Linear Optocoupler. URL: <http://www.vishay.com/docs/83622/il300.pdf>
14. Closed Loop Current Sensors URL: <http://www.farnell.com/datasheets/2602959.pdf>
15. UCx84x Current-Mode PWM Controllers [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/uc2845.pdf>.
16. 10Bit 360° Programmable Magnetic Rotary Encoder. URL: https://ams.com/documents/20143/36005/AS5040_DS000374_3-00.pdf
17. μ A7800 Series Positive-Voltage Regulators [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/LM7805.pdf>

Рецензенти:

Кускова Н. І., заст. директора з наукової роботи, д.т.н., професор (Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв)

Дубовий О.М., завідувач кафедри матеріалознавства і технологій металів, д.т.н., професор (Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв)

УДК 538.945

DOI 10.36910/775.24153966.2022.73.20

О.Ю. Пастух, В.Є. Сахнюк, О.В. Замуруєва, А.М. Шутовський

*Волинський національний університет імені Лесі Українки***ВПЛИВ НЕМАГНІТНИХ ДОМІШОК НА СТРУМ ДЖОЗЕФСОНА В SNINS КОНТАКТАХ ДЛЯ ТЕМПЕРАТУР, БЛИЗЬКИХ ДО КРИТИЧНОЇ**

В роботі було досліджено рівноважні струмові стани у надпровідних контактах типу SNINS (S – надпровідник, N – нормальний метал, I – діелектрик) за наявності немагнітних домішок довільної концентрації у надпровідних областях. Дослідження проводились для температур, близьких до критичної з використанням теорії Гінзбурга-Ландау. Одержані результати є чинними для широкого інтервалу значень коефіцієнта проходження електронів та довільної товщини нормального прошарку. При дослідженні струмових станів було враховано вплив на струм-фазову залежність ефектів розпаровування.

Ключові слова: контакт Джозефсона, параметр впорядкування, ефекти розпаровування, теорія Гінзбурга-Ландау, струм-фазова залежність, немагнітні домішки.

О.Ю. Пастух, В.Е. Сахнюк, О.В. Замуруєва, А.Н. Шутовський

ВЛИЯНИЕ НЕМАГНИТНЫХ ПРИМЕСЕЙ НА ТОК ДЖОЗЕФСОНА В SNINS КОНТАКТАХ ДЛЯ ТЕМПЕРАТУР, БЛИЗКИХ К КРИТИЧЕСКОЙ

В работе были исследованы равновесные токовые состояния в сверхпроводящих контактах типа SNINS (S – сверхпроводник, N – нормальный металл, I – диэлектрик) при наличии немагнитных примесей произвольной концентрации в сверхпроводящих областях. Исследования проводились для температур, близких к критической с использованием теории Гинзбурга-Ландау. Полученные результаты действуют для широкого интервала значений коэффициента прохождения электронов и произвольной толщины нормальной прослойки. При исследовании токовых состояний было учтено влияние на ток-фазовую зависимость эффектов разпаривания.

Ключевые слова: контакт Джозефсона, параметр приведения в порядок, эффекты разпаривания, теория Гинзбурга-Ландау, ток-фазовая зависимость, немагнитные примеси.

O. Pastukh, V. Sakhnyuk, O. Zamurujeva, A. Shutovskyi

INFLUENCE OF NON-MAGNETIC IMPURITIES ON JOSEPHSON'S CURRENT IN SNINS JUNCTIONS FOR TEMPERATURES CLOSE TO CRITICAL

Equilibrium current states in superconducting junctions of SNINS-type (S – superconductor, N – normal metal, I – insulator) for arbitrary concentrations of nonmagnetic impurities in superconducting regions were investigated using the Ginzburg-Landau theory near the critical temperature. We found the current-phase relation valid in a wide range of electron transmission coefficient values and an arbitrary thickness of the normal layer. The influence of depairing effects was taken into account.

Keywords: Josephson junctions, order parameter, depairing effects, Ginzburg-Landau theory, current-phase relation, nonmagnetic impurities.

Постановка проблеми. Як відомо поблизу критичної температури густина струму в контакті виражається через параметр впорядкування, просторова поведінка останнього описується рівнянням Гінзбурга-Ландау [1]. Основними факторами, що впливають на просторову поведінку параметра впорядкування є наявність в контакті нормальної області, діелектричного прошарку, домішок, а також струму. Виявляється, що вплив кожного з даних факторів за певних умов може викликати руйнування куперівських пар. Ефекти розпаровування виникають за умов, коли параметри контакту можуть набувати значень, при яким струм в контакті є немалим. А саме, у випадку наявності достатньо малих товщин нормального прошарку та немалих значень прозорості діелектричного прошарку. Крім того руйнування пар може бути спричинене наявністю границі розділу надпровідної області з ненадпровідною та власне залежністю параметра впорядкування на даній границі від різниці фаз надпровідників. Як результат, врахування ефектів розпаровування веде до появи ангармонійної струм-фазової залежності.

Дослідження властивостей надпровідних контактів типу SNINS, як просторово неоднорідної системи, слабкий зв'язок в якій є комбінацією прошарків нормального металу та діелектрика, виконувалось в багатьох роботах [2-9]. В дослідженнях [2-4], поширеною є модель, де параметр впорядкування в надпровідній області вважається сталим аж до границі розділу нормального металу та надпровідника. Використовуючи метод функцій Гріна, в [2] одержано формулу для густини струму при малих значеннях коефіцієнта проходження електронів D крізь діелектрик. Довільні значення D розглядалися в [3] на основі методу t -представлення [1], в якому розв'язуються рівняння для функцій Гріна, попередньо згладжених на

атомних довжинах. Гранично брудний випадок $l \ll \xi_0$ з врахуванням просторової зміни параметра впорядкування в надпровідній області аналізувався в [5, 6]. Показано, що зменшення параметра впорядкування поблизу границі нормальної та надпровідної областей приводить до зменшення величини критичного струму контакту. Стационарні властивості SNINS контакту для області температур, близьких до критичної розглядалися в [7] для товщини нормального прошарку $d \gg \xi_0$, а випадок довільних значень товщини нормального прошарку в масштабі ξ_0 аналізувався в [8].

Постановка завдань. В роботі поставлено мету – дослідити рівноважні струмові стани у надпровідних контактах типу SNINS за довільної прозорості D діелектричного прошарку та за довільних товщин нормального прошарку. Проаналізувати значення параметрів контакту, за яких виникають ефекти розпаровування та яким чином вони відображаються на формі струм-фазової залежності.

Викладення основного матеріалу. Вважатимемо поверхні, що розділяють нормальний метал і надпровідник плоскими, а вісь OZ перпендикулярною до них. Нехай надпровідник заповнює область $|z| > d/2$, а нормальний метал – $|z| < d/2$. Прошарок діелектрика розміщений у площині $|z| = 0$. Оскільки просторова неоднорідність порушена лише в напрямку осі OZ , то досліджувані величини залежатимуть лише від z -координати.

Як відомо з теорії Гінзбурга-Ландау, вихідна формула для густини струму є функціоналом від параметра впорядкування [1]

$$j(\zeta) = i \frac{7\zeta(3)}{16\pi^2} \frac{env_0}{p_0 \xi_0 T_c^2} \left(\Delta \frac{d\Delta^*}{d\zeta} - \Delta^* \frac{d\Delta}{d\zeta} \right) \chi \left(\frac{\xi_0}{l} \right), \quad (1)$$

де e – заряд електрона, n – концентрація електронів, v_0 – фермі-швидкість, p_0 – фермі-імпульс, $\xi_0 = v_0/2\pi T_c$ – довжина когерентності, T_c – критична температура, $\zeta = z/\xi_0$ – безрозмірна змінна,

$$\chi \left(\frac{\xi_0}{l} \right) = \frac{8}{7\zeta(3)} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2 (2n+1+1/\lambda)}, \quad l/\xi_0 = \lambda \text{ – безрозмірна довжина вільного пробігу електронів,}$$

яка визначає ступінь забруднення надпровідників домішками.

Параметр впорядкування за наявності струму в контакті, представимо у формі

$$\Delta(\zeta) = e^{\pm i \frac{\varphi}{2}} \Delta_{\infty} f(\zeta) e^{2im\chi(\zeta)}. \quad (2)$$

Тут $\Delta_{\infty} = \sqrt{\frac{8\pi^2}{7\zeta(3)}} T_c \sqrt{1 - \frac{T}{T_c}}$ – параметр впорядкування в просторово однорідному випадку поблизу

критичної температури, а функція $f(\zeta)$ описує просторову зміну параметра впорядкування. Якщо не враховувати ефектів розпаровування, то $f \rightarrow 1$ в глибині надпровідника, при $\zeta \gg 1$. Кінцевий результат для густини струму в контакті виражається через φ – стрибок фази при переході через контакт. Тому, без втрати загальності, в (2) покладено фазу параметра впорядкування на лівому березі контакту рівною $(-\varphi/2)$, а на правому – $(\varphi/2)$. Через $\chi(\zeta)$ – неперервну складову фази параметра впорядкування

$$(\chi(d/2) = \chi(-d/2) = 0) \text{ виражається надплинна швидкість } v_s: \frac{d\chi}{d\zeta} = \xi_0 v_s(\zeta).$$

Поблизу критичної температури просторова поведінка параметра впорядкування описується рівнянням Гінзбурга-Ландау. Однак при використанні цього рівняння постає проблема граничної умови на границі надпровідної області з ненадпровідною. Одержати коректну інформацію про поведінку параметра впорядкування в надпровідній області поблизу NS-границі можна звернувшись до мікроскопічної теорії надпровідності [1]. В результаті, виконуючи розрахунки подібні до виконаних в [10], приходимо до наступних систем лінійних інтегральних рівнянь для симетричної та антисиметричної частин параметра впорядкування

$$\begin{cases} \Delta_s(\zeta) = \sum_n \int_0^{\infty} d\zeta' \Delta_{n,s}(\zeta') \{K(\zeta - \zeta') + K(\zeta + \zeta' + a)\}, \\ \Delta_{n,s}(\zeta) = \Delta_s(\zeta) + \int_0^{\infty} d\zeta' \Delta_{n,s}(\zeta') \{\tilde{K}(\zeta - \zeta') + \tilde{K}(\zeta + \zeta' + a)\}, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \Delta_a(\zeta) = \sum_n \int_0^\infty d\zeta' \Delta_{n,a}(\zeta') \{K(\zeta - \zeta') + K_D(\zeta + \zeta' + a)\}, \\ \Delta_{n,a}(\zeta) = \Delta_a(\zeta) + \int_0^\infty d\zeta' \Delta_{n,a}(\zeta') \{\tilde{K}(\zeta - \zeta') + \tilde{K}_D(\zeta + \zeta' + a)\}. \end{cases} \quad (4)$$

Ядра цих інтегральних рівнянь мають вигляд

$$K(\zeta) = \frac{\rho}{2} \int_0^1 \frac{dx}{x} \exp\left(-\frac{|2n'+1||\zeta|}{x}\right), \quad K_D(\zeta) = \frac{\rho}{2} \int_0^1 \frac{dx}{x} \tau(x) \exp\left(-\frac{|2n'+1||\zeta|}{x}\right),$$

$$\tilde{K}(\zeta) = \frac{1}{2\lambda} \int_0^1 \frac{dx}{x} \exp\left(-\frac{|2n'+1||\zeta|}{x}\right), \quad \tilde{K}_D(\zeta) = \frac{1}{2\lambda} \int_0^1 \frac{dx}{x} \tau(x) \exp\left(-\frac{|2n'+1||\zeta|}{x}\right),$$

де $\tau(x) = 2R(x) - 1 = 1 - 2D(x)$.

Легко переконатись, що асимптотика розв'язків систем рівнянь (3) і (4), при $\zeta \gg 1$ є лінійною

$$\begin{aligned} \Delta_s(\zeta) &= C_1(\zeta + q_{1,\infty}), & \Delta_a(\zeta) &= C_2(\zeta + q_{2,\infty}), \\ \Delta_{n,s}(\zeta) &= \left| \frac{2n'+1}{2n+1} \right| C_1(\zeta + q_{1,\infty}), & \Delta_{n,a}(\zeta) &= \left| \frac{2n'+1}{2n+1} \right| C_2(\zeta + q_{2,\infty}). \end{aligned} \quad \zeta \rightarrow \infty \quad (5)$$

Важливим тут є той факт, що $q_{1,\infty}$ та $q_{2,\infty}$, які є відношеннями коефіцієнтів лінійної асимптотики, визначаються однозначно ядром інтегрального рівняння. Ця обставина пов'язана з тим фактом, що інтегральні рівняння (3) і (4) визначені на півосі. Нам важливо обчислити коефіцієнти $q_{1,\infty}$ та $q_{2,\infty}$, оскільки вони входять як у граничну умову для рівняння Гінзбурга-Ландау, так і у кінцевий вираз для густини струму. Для їх відшукування застосовуємо метод квазіортогональності до асимптотики [11], що зрештою приводить до такого результату

$$q_{1,\infty} = \frac{1}{2I_1} \left[I_2 + I_2(a) + \frac{(I_1 + I_1(a))^2}{I_0 - I_0(a)} \right]; \quad (6)$$

$$q_{2,\infty} = \frac{1}{2I_1} \left[I_2 + I_2(a, D) + \frac{(I_1 + I_1(a, D))^2}{I_0 - I_0(a, D)} \right]. \quad (7)$$

В останніх рівностях було використано позначення для наступних інтегралів

$$I_s(a, D) = \frac{\rho}{2} \sum_n \frac{1}{|2n+1|^2 |2n'+1|^s} \int_0^1 dx x^{s+1} \tau(x) e^{-\frac{|2n'+1|a}{x}}, \quad s = 0, 1, 2.$$

$$I_s(a) = I_s(a, 0), \quad I_s = I_s(0, 0), \quad s = 0, 1, 2.$$

Залежність коефіцієнтів $q_{1,\infty}$ та $q_{2,\infty}$ від товщини нормального прошарку зображена на рис. 1, 2. Бачимо, що зі збільшенням товщини нормального прошарку вплив останньої на значення цих коефіцієнтів є несуттєвим. Із рис. 1 слідує, що величини $q_{2,\infty}$ для різних значень коефіцієнта проходження електронів зі збільшенням товщини d/ξ_0 наближаються до асимптотичного значення. При збільшенні концентрації немагнітних домішок значення як $q_{1,\infty}$ так і $q_{2,\infty}$ зменшуються (рис. 2).

Маючи результати дослідження просторової поведінки параметра впорядкування поблизу NS-границі, можемо перейти до знаходження граничних умов для рівняння Гінзбурга-Ландау. Лінійне інтегральне рівняння є чинним в області, де характерна відстань, на якій зазнає зміни параметр впорядкування, є порядку довжини когерентності ξ_0 . Однак, якщо відійти вглиб надпровідника на

відстань порядку $\xi(T) = \xi_0 \left(\frac{7\zeta(3)}{12} \frac{\chi(\xi_0/l)}{1-T/T_c} \right)^{1/2}$, ($\xi(T) \gg \xi_0$), то характерною відстанню, на якій зазнає зміни параметр впорядкування є характерна довжина в теорії Гінзбурга-Ландау. Тому в цій області

лінійне інтегральне рівняння втрачає свою чинність і параметр впорядкування буде описуватись рівнянням Гінзбурга-Ландау.

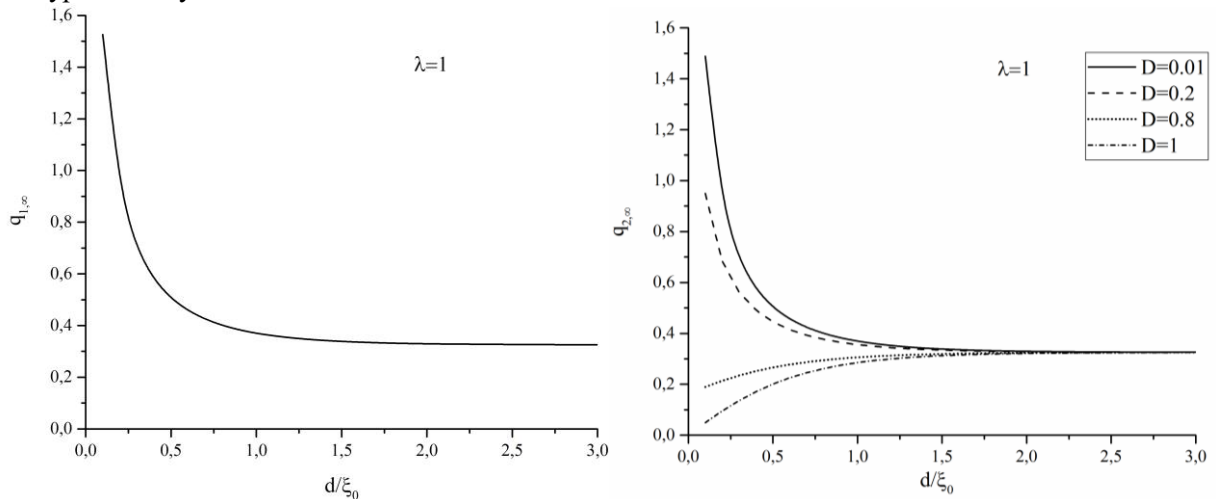


Рис. 1. Залежність коефіцієнта $q_{2,\infty}$ від товщини нормального прошарку для заданого значення довжини вільного пробігу λ та різних значень коефіцієнта проходження електронів D .

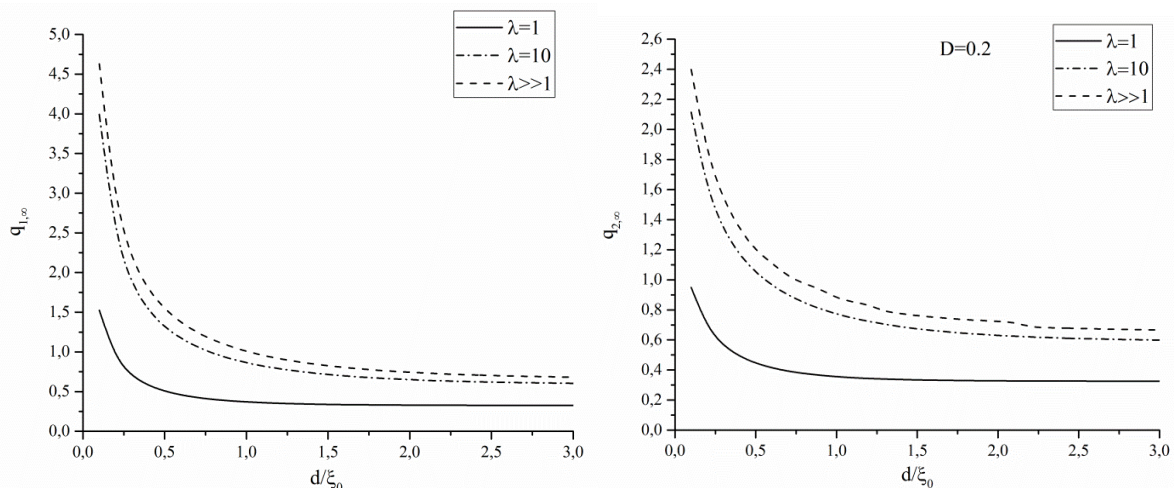


Рис. 2. Залежність коефіцієнтів $q_{1,\infty}$ та $q_{2,\infty}$ від товщини нормального прошарку для заданого значення коефіцієнта проходження електронів D та різних значень довжини вільного пробігу λ .

Зрозуміло, що перехід від лінійного інтегрального рівняння до рівняння Гінзбурга-Ландау та навпаки не може відбуватися різко. Тому логічно вважати, що існує така область $\xi_0 \ll z \ll \xi(T)$, де чинними є обидва рівнянь. Зрозуміло, що це область великих z у порівнянні з довжиною когерентності ξ_0 та малих z в порівнянні з характерною довжиною в теорії Гінзбурга-Ландау. Тобто, можемо зшити асимптотику розв'язку лінійного інтегрального рівняння на нескінченності з асимптотикою розв'язку рівняння Гінзбурга-Ландау на малих відстанях від границі розділу нормального металу і надпровідника. Це дасть можливість одержати граничну умову для рівняння Гінзбурга-Ландау

$$f_+ = f_-, \quad f'_+ = -f'_-, \quad \frac{f'_+}{f_+} = \frac{\cos^2 \frac{\varphi}{2}}{q_{1,\infty}} + \frac{\sin^2 \frac{\varphi}{2}}{q_{2,\infty}}. \quad (8)$$

f_+ і f_- – значення функції f на межі нормальної та надпровідної областей. Як бачимо з граничної умови, параметр впорядкування на межі залежить від різниці фаз, а тому очевидно, що дана умова буде відігравати ключову роль у формуванні ангармонійної струм-фазової залежності.

Фактично, можемо вважати, що умова (8) відповідає за розпаровування спричинене різницею фаз та самою NS границею.

Слід відмітити, що через залежність граничної умови від різниці фаз виникає ангармонічність в струм-фазовій залежності поблизу критичної температури. Гранична умова (8) є аналогічна умові (2) в [6] з феноменологічними параметрами g_l і g_s . В нашій роботі ці параметри одержані з мікроскопічних розрахунків ($g_s = 1/q_{1,\infty}$, $g_l = 1/2(1/q_{2,\infty} - 1/q_{1,\infty})$), що дає можливість проаналізувати їх значення в залежності від параметрів контакту. Одержана гранична умова (8) з виразами (6) і (7) для $q_{1,\infty}$ та $q_{2,\infty}$ є чинною для довільної концентрації немагнітних домішок.

Густину струму обчислюватимемо в області спільної чинності лінійного інтегрального рівняння та рівняння Гінзбурга-Ландау, а тому у виразі для струму будемо використовувати асимптотичну форму для параметра впорядкування, яка є лінійною в цій області. Підставляючи представлення (2) у вираз для струму (1) та беручи до уваги (8), одержимо такий результат для густини струму

$$I = \frac{f_+^2}{2\tau} \left(\frac{1}{q_{2,\infty}} - \frac{1}{q_{1,\infty}} \right) \sin \varphi. \quad (9)$$

Тут запроваджено безрозмірну густину струму $I = \frac{j}{j_0}$, де $j_0 = \sqrt{\frac{12}{7\zeta(3)}} \frac{env_0}{p_0 \xi_0} \sqrt{\chi(\xi_0/l)} \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{3/2}$ та

використано позначення $\tau = \frac{\xi_0}{\xi(T)} = \left(\frac{12}{7\zeta(3)} \frac{1}{\chi(\xi_0/l)} \left(1 - \frac{T}{T_c}\right) \right)^{1/2}$ – відношення довжини когерентності до характерної довжини в теорії Гінзбурга-Ландау.

Співвідношення для f_+ можна одержати скориставшись рівнянням Гінзбурга-Ландау, якому задовольняє функція $f(\zeta)$

$$\frac{1}{\tau^2} \frac{d^2 f(\zeta)}{d\zeta^2} - \frac{I^2}{f^3(\zeta)} + f(\zeta) - f^3(\zeta) = 0. \quad (10)$$

В граничному випадку $\zeta \rightarrow \infty$ функція $f(\zeta)$ прямує до сталої, яку позначимо через f_∞ , а похідна $f'(\zeta)$ прямуватиме до нуля. В результаті для безрозмірної густини струму одержимо

$$I^2 = f_\infty^4 (1 - f_\infty^2). \quad (11)$$

Використовуючи останню рівність та беручи до уваги граничну умову (8), для першого інтегралу рівняння (10) на границі нормального металу та надпровідника ($\zeta = a/2$) одержимо

$$\frac{1}{\tau^2} \left(\frac{\cos^2 \frac{\varphi}{2}}{q_{1,\infty}} + \frac{\sin^2 \frac{\varphi}{2}}{q_{2,\infty}} \right)^2 f_+^4 - (f_\infty^2 - f_+^2)^2 \left(\frac{1}{2} f_+^2 + f_\infty^2 - 1 \right) = 0. \quad (12)$$

Доповнюючи (12) рівнянням

$$f_\infty^4 (1 - f_\infty^2) = \frac{f_+^4}{4\tau^2} \left(\frac{1}{q_{2,\infty}} - \frac{1}{q_{1,\infty}} \right)^2 \sin^2 \varphi, \quad (13)$$

яке слідує з порівняння (9) і (11), маємо замкнену систему рівнянь (12), (13). Розв'язуючи отриману систему, знаходимо залежність $f_+(\varphi)$, а підставляючи її в рівняння (9), отримуємо залежність струму від різниці фаз. Зазначимо, що у виразі для густини струму j/j_0 також враховується залежність від коефіцієнта прозорості D , товщини нормального прошарку a та ступеня забрудненості немагнітними домішками $\chi(\xi_0/l)$.

Отримати точний аналітичний розв'язок системи рівнянь (12), (13) у загальному випадку неможливо, однак ми можемо виконати чисельні розрахунки. З рис. 3(а) видно, що при значенні товщини нормального прошарку, близькому до ξ_0 , величина струму в контакті при заданому коефіцієнті проходження електронів є суттєво меншою за значення струму для SIS контакту, яке асимптотично отримуємо за умови $a = 0$. Зі збільшенням коефіцієнта проходження електронів форма кривої (рис. 3(б)) починає відрізнятися від синусоїдальної і струм досягає максимуму за різниці фаз, яка менша за $\pi/2$. Останнє є значенням різниці фаз, при якому струм досягає максимального значення при $D \ll 1$. Очевидно, що поява ангармонічності у струм-фазовій залежності є викликана ефектами струмом розпаровування, які при малих значеннях товщини нормального прошарку a . є значними. Аналогічний результат було одержано в [13], для SNS контакту.

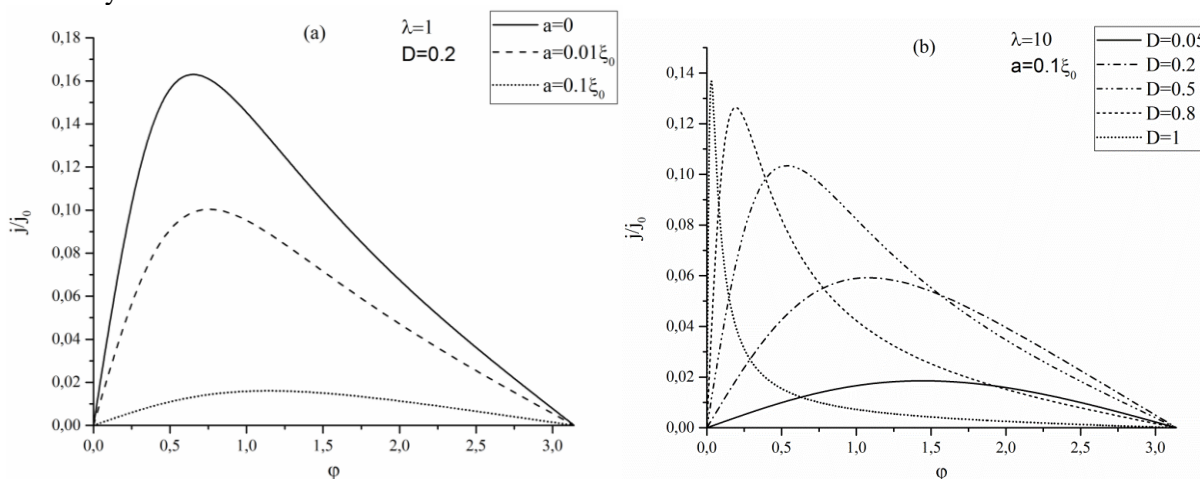


Рис. 3. Залежність струму в контакті від різниці фаз: а) для довжини вільного пробігу електронів $\lambda = 1$ та коефіцієнта проходження електронів $D = 0.2$ при різних значеннях товщини нормального прошарку a ; б) для довжини вільного пробігу електронів $\lambda = 10$ та товщини нормального прошарку $a = 0.1\xi_0$ при різних значеннях коефіцієнта проходження електронів D .

З рис. 3(б) видно, що строга ангармонійність струму виникає також при значеннях прозорості діелектричного прошарку, близьких до одиниці, коли критичний струм контакту близький до струму розпаровування однорідного надпровідника. Верхній графік в границі $D=1$ відображає фактично залежність струму від різниці фаз для SNS-контакту. Ця залежність є аналогічною з одержаними в роботах [13, 14] результатами: величина різниці фаз, при якій струм набуває максимального значення, зміщується в напрямку $\varphi < \pi/2$. Аналогічне зміщення маємо і для випадку, коли товщина нормального прошарку $a = 0$, тобто для тунельного SIS-контакту [10, 15]. З аналізу рис. 1 стає очевидним, що великі значення прозорості та малі товщини нормального прошарку відповідають значенню коефіцієнтів $q_{1,\infty} \gg 1$ і $q_{2,\infty} \ll 1$. Таким чином, маємо повну аналогію з асимптотичними значеннями відповідних коефіцієнтів в роботах [16], де замість $q_{2,\infty}$ маємо параметр $\Gamma_B = 2\tau q_{2,\infty}$ та [13], де слід врахувати, що $q_{1,\infty}^{-1} = \Gamma p / \xi(T)$, $q_{2,\infty}^{-1} = \Gamma q / \xi(T)$, які присвячені дослідженню ефектів розпаровування у відповідних надпровідних контактах. Якщо ж брати до уваги параметри контакту, за яких ефекти розпаровування, викликані струмом є несуттєвими ($D \ll 1, a \gg 1$), то з рис. 1 бачимо, що коефіцієнти $q_{1,\infty}$ та $q_{2,\infty}$ починають прямувати до спільного значення. Внаслідок цього, гранична умова (8) є практично незалежною від різниці фаз, а отже її внесок у формування ангармонійності струму зменшується.

Важливим є також питання про вплив довжини вільного пробігу на струм-фазову залежність. Як видно з рис. 4, зміна довжини вільного пробігу суттєво впливає на величину струму і вже при $\lambda \leq 1$ максимум струму в контакті є суттєво меншим за відповідне значення в бездомішковому випадку, а при $\lambda \geq 10$ вплив домішок є несуттєвим.

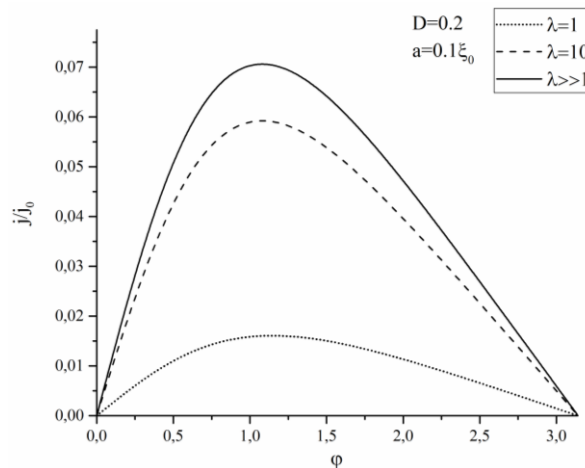


Рис. 4. Залежність струму в контакті від різниці фаз для коефіцієнта проходження електронів $D = 0.2$ і товщини нормального прошарку $a = 0.1\xi_0$ при різних значеннях довжини вільного пробігу електронів λ .

Висновки. Одержано лінійне інтегральне рівняння, що описує просторову поведінку параметра впорядкування поблизу NS-границі в надпровідному SNINS контакті. З аналізу лінійного інтегрального рівняння, використовуючи метод квазіортогональності до асимптотики, знайдено граничну умову для рівняння Гінзбурга-Ландау. Виконано чисельний аналіз залежності струму від різниці фаз для випадку довільних значень товщини нормального прошарку, коефіцієнта проходження електронів та наявності немагнітних домішок. Крім того, отримано аналітичний результат для струм-фазової залежності, який дуже добре узгоджується з результатами чисельних розрахунків. Показано, що врахування ефектів розпаровування відіграє важливу роль у формуванні струм-фазової залежності, яка стає значно складнішою у порівнянні з традиційною синусоїдальною. Також проаналізовано ряд граничних випадків переходу до простіших контактів типу SNS і SIS за наявності та відсутності немагнітних домішок, виходячи з отриманого результату для SNINS контакту. Отримані результати можуть бути використані для подальшого дослідження подібних надпровідних структур. Крім того, цікавим питанням є аналіз поведінки SNINS контактів у магнітному полі, враховуючи нетривіальну залежність струму від різниці фаз.

Список використаних джерел:

1. Svidzinskii A. V. *Spatially Inhomogeneous Problems in the Theory of Superconductivity*, Nauka, Moscow (1982).
2. Zaikin A. D. and Zharkov G. F. *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **78**, 721 (1978) [*Sov. Phys. JETP.* **51**, 364 (1980)].
3. Akhramovich L. N., Rakov Y. A., Svidzinskii A. V. *Theor Math Phys.* **77**, 450 (1988).
4. Zaikin A. D. and Zharkov G. F. *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **81**, 1781(1981) [*Sov. Phys. JETP.* **54**, 944 (1981)].
5. Golubov A. A., Kupriyanov M. Yu. *J. Low Temp. Phys.* **70**, 83 (1988).
6. Golubov A. A., Kupriyanov M. Yu. *Sov. Phys. JETP.* **69**, 4 (1989).
7. Akhramovich L. N., and Svidzinskii A. V. *Fiz. Nizk. Temp.* **14**, 815 (1988).
8. Sakhnyuk V. E., and Svidzynsky A. V. *Condens. Matter Phys.* **9**, 169 (2005).
9. Bezuglyi E. V., Bratus' E. N., Shumeiko V. S. *Phys. Rev. B.* **95**, 014522 (2017).
10. Pastukh O. Yu., Shutovskiy A. M., Sakhnyuk V. E. *Low Temp. Phys.* **43**, 664 (2017).
11. Svidzinsky A. V., and Sakhnyuk V. E. *Condens. Matter Phys.* **3**, 683 (2000).
12. Barash Y. S. *Phys. Rev. B.* **85**, 100503 (2012).
13. Ivanov G., Kupriyanov M. Yu., Likharev K. K. et al. *Fiz. Nizk. Temp.* **7**, 560 (1981) [*Sov. J. Low Temp. Phys.* **7**, 274 (1981)].
14. Nikolić B. K., Freericks J. K., Miller P. *Phys. Rev. B.* **64**, 212507 (2001).
15. Kupriyanov M. Yu. *Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **56**, 414 (1992).
16. Sols F., Ferrer J. *Phys. Rev. B.* **49**, 15913 (1994).

С.А. Федосов¹, Д.А. Захарчук², О.В. Замуруєва¹, В.Є. Сахнюк¹, Л.І. Панасюк²

Волинський національний університет імені Лесі Українки¹
Луцький національний технічний університет²

РІВЕНЬ ФЕРМІ В КРИСТАЛАХ АНТИМОНІДУ КАДМІЮ ПРИ НАЯВНОСТІ РАДІАЦІЙНИХ ДЕФЕКТІВ

За експериментальними результатами температурних залежностей концентрації носіїв струму розраховано зміни положення рівня Фермі у спеціально нелегованих кристалах антимоніду кадмію до і після опромінення гамма-квантами ⁶⁰Со. Розглянуто особливості положення рівня Фермі від температури та дози гамма-опромінення в області домішкової провідності. Дослідження базується на результатах експериментальних даних холлівських вимірювань і електропровідності. Для коректної оцінки та розрахунку температурної залежності рівня Фермі проведено аналіз розв'язків рівняння електронейтральності.

Ключові слова: рівень Фермі, антимонід кадмію, гамма-опромінення, радіаційні дефекти.

С.А. Федосов, Д.А. Захарчук, О.В. Замуруєва, В.Е. Сахнюк, Л.И. Панасюк

УРОВЕНЬ ФЕРМИ В КРИСТАЛАХ АНТИМОНИДА КАДМИЯ ПРИ НАЛИЧИИ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ

По экспериментальным результатам температурных зависимостей концентрации носителей тока рассчитаны изменения положения уровня Ферми в специально нелегированных кристаллах антимонида кадмия до и после облучения гамма-квантами ⁶⁰Со. Рассмотрены особенности положения уровня Ферми от температуры и дозы гамма-облучения в области примесной проводимости. Исследование базируется на результатах экспериментальных данных холловских измерений и электропроводимости. Для корректной оценки и расчета температурной зависимости уровня Ферми проведен анализ решений уравнения электронейтральности.

Ключевые слова: уровень Ферми, антимонид кадмия, гамма-облучения, радиационные дефекты.

S. Fedosov, D. Zakharchuk, O. Zamurujeva, V. Sakhnyuk, L. Panasjuk

THE FERMİ LEVEL IN CADMIUM ANTIMONIDE CRYSTALS IN THE PRESENCE OF RADIATION DEFECTS

According to the experimental results of the temperature dependences of the current carrier concentration, changes in the position of the Fermi level in specially undoped cadmium antimonide crystals before and after irradiation with ⁶⁰Co gamma quanta were calculated. Peculiarities of Fermi level position from temperature and gamma radiation dose in the region of impurity conductivity are considered. The study is based on the results of experimental data of Hall measurements and electrical conductivity. An analysis of the solutions of the electroneutrality equation was performed to correctly estimate and calculate the temperature dependence of the Fermi level.

Keywords: Fermi level, cadmium antimonide, gamma radiation, radiation defects.

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку фізики напівпровідників не втрачає актуальність дослідження впливу дефектів кристалічної ґратки, – починаючи від плавних просторових розподілів питомого опору в кристалах до шаруватих періодичних неоднорідностей, дефектів радіаційного походження і завершуючи неоднорідностями структури і хімічного складу таких нанооб'єктів, якими є надґратки, квантові дроти і квантові точки, – на кінетичні, оптичні, люмінесцентні та інші явища, що розвиваються в названих об'єктах. Введення вище згадуваних дефектів у кристалічну ґратку, а також різні фізико-активні впливи безумовно, в тій чи іншій мірі, змінюють такі важливі характеристики зонної структури напівпровідників, як ширина забороненої зони та положення рівня Фермі. Вивчення проблем штучного створення матеріалів з бажаними прогнозованими характеристиками зонного спектра є важливим при конструюванні різного роду напівпровідникових датчиків та пристроїв у зв'язку з жорсткими вимогами електронної техніки і новими можливостями мікро- та нанотехнологій [1].

При дослідженні зонної структури напівпровідників з глибокими рівнями цікавим є визначення положення рівня Фермі залежно від температури, що дає корисну інформацію про розподіл носіїв заряду в енергетичних зонах. Рівень Фермі залежить від температури і концентрації носіїв заряду. Його положення може сильно змінюватися при введенні домішок, що створюють локалізовані стани, оскільки рівень Фермі визначає розподіл електронів по станах. Вводячи домішку, утворюються в забороненій зоні локалізовані стани, в яких можуть знаходитися

як електрони, так і дірки. Перерозподіл електронів по станах при утворенні дискретних рівнів в забороненій зоні регулюється безпосередньо зміною положення рівня Фермі. Вивченню зонної структури CdSb присвячені роботи [2-5]. Зокрема, авторами [2] проведено дослідження положення рівня Фермі для кристалів антимоніду кадмію, легованих міддю, при низьких температурах ($T = 4,2 \div 50$ К).

Постановка завдань. В роботі поставлено мету – за експериментальними результатами температурних залежностей концентрації носіїв струму розрахувати зміни положення рівня Фермі E_F в області домішкової провідності ($T = 77 \div 300$ К) кристалів антимоніду кадмію до і після опромінення γ -квантами ^{60}Co . Для коректного визначення $E_F(T)$ провести аналіз розв'язку рівняння електронейтральності.

Викладення основного матеріалу. У напівпровідниках енергія Фермі визначається умовою розподілу електронів по рівнях енергії валентної зони, зони провідності і дискретних рівнях локалізованих станів. Розподіл електронів по станах описується рівнянням електронейтральності:

$$n + n_d - p - p_a = N_d - N_a = N_d'. \quad (1)$$

Якщо виразити n , n_d , p , p_a через E_F , то отримаємо рівняння, за допомогою якого можна визначити положення рівня Фермі в загальному випадку. Коли концентрації донорної N_d і акцепторної N_a домішки значно відрізняються, то напівпровідник поводить себе як напівпровідник з одним типом домішки.

Для спеціально нелегованого p -CdSb рівняння електронейтральності (1) приймає вид ($N_a \gg N_d$):

$$p + p_a - n = N_a, \quad \text{або} \quad p = n - p_a = n + N_a^-. \quad (2)$$

Розв'язуючи (2), положення рівня Фермі у невідродженому напівпровіднику p -типу описується двома виразами в усе можливі інтервалі температур. Вираз, коли основну роль відіграє іонізація домішки ($n \ll N_a^-$ і $p = N_a^-$)

$$E_F = E_a - kT \ln \left[\frac{1}{4} \left(\sqrt{1 + \frac{8N_a}{N_v} \exp\left(\frac{\Delta E_a}{kT}\right)} - 1 \right) \right] \quad (3)$$

справедливий в області від $T = 0$ К до температури насичення T_n . Область від T_n і вище ($N_a^- = N_a$ і $n \geq N_a$) описується:

$$E_F = E_v - kT \ln \left[\frac{N_a}{2N_v} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4n_i^2}{N_a^2}} \right) \right]. \quad (4)$$

При достатньо низьких температурах, коли у (3) виконується нерівність:

$$\frac{8N_a}{N_v} \exp\left(\frac{\Delta E_a}{kT}\right) \gg 1, \quad (5)$$

$$E_F = \frac{E_v + E_a}{2} - \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_a}{2N_v}\right). \quad (6)$$

У випадку

$$\frac{8N_a}{N_v} \exp\left(\frac{\Delta E_a}{kT}\right) \ll 1 \quad (7)$$

положення рівня Фермі визначається:

$$E_F = E_v - kT \ln\left(\frac{N_a}{N_v}\right). \quad (8)$$

Із підвищенням температури ($T \geq T_n$) концентрація електронів зростає та стає порівняна з концентрацією дірок $p = n + N_a$ і $E_F(T)$ описується (4). При виконанні у (4) граничних умов:

$$\frac{4n_i^2}{N_a^2} \ll 1 \quad \text{і} \quad \frac{4n_i^2}{N_a^2} \gg 1$$

положення рівня Фермі визначається, відповідно, ($p = N_a$, $n = \frac{n_i^2}{N_a}$) (8) та як у випадку власного напівпровідника ($p = n = n_i$):

$$E_F = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_V}{N_C}\right) = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{3kT}{4} \ln\left(\frac{m_p^*}{m_n^*}\right). \quad (9)$$

Оскільки вимірювання проводилися в області підвищених температур ($T \approx 300$ К), необхідно було оцінити можливий вклад власної провідності. Для цього розраховано температурну залежність концентрації власних носіїв струму $n_i = f(10^3/T)$ (рис. 1а) з урахуванням залежності ширини забороненої зони від температури:

$$n_i = n = p = (N_C N_V)^{1/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right),$$

де $E_g(T) = 0,535 - 3,56 \times 10^{-4} T$ еВ [6].

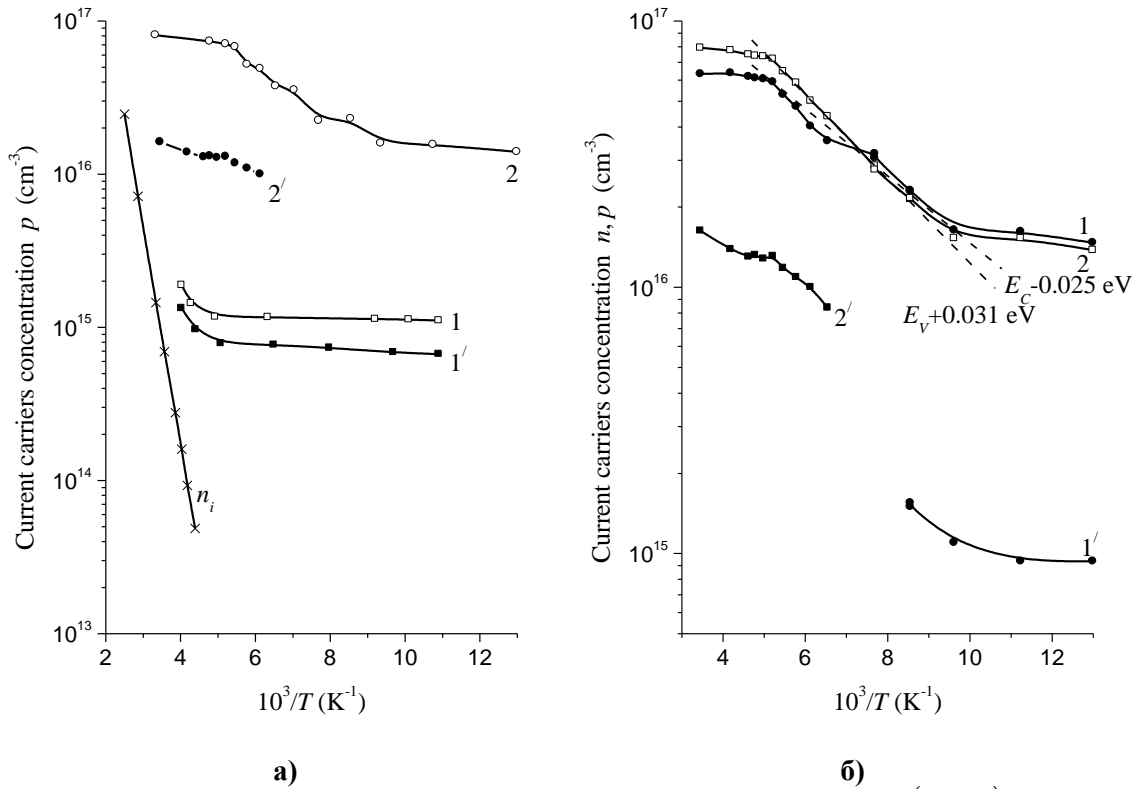


Рис. 1. Температурні залежності концентрації носіїв струму p , $n = f(10^3/T)$ у спеціально нелегованому CdSb:

- а) 1, 2 – неопромінену; 1' – γ -опромінену ($\Phi = 2 \times 10^{18}$ см⁻²); 2' – γ -опромінену ($\Phi = 10^{19}$ см⁻²);
 б) 1 – неопромінену; 1', 2' – γ -опромінену ($\Phi = 10^{19}$ см⁻²); 2 – теоретично розрахована концентрація електронів у γ -опромінену ($\Phi = 10^{19}$ см⁻²).

Ефективні густини станів в зоні провідності і у валентній зоні відповідно дорівнюють:

$$N_C = 2,510 \times 10^{19} M \left(\frac{m_n^*}{m_0}\right)^{3/2} \left(\frac{T}{300}\right)^{3/2} = 4,472 \times 10^{18} \left(\frac{T}{300}\right)^{3/2} \text{ см}^{-3},$$

$$N_V = 2,510 \times 10^{19} M \left(\frac{m_p^*}{m_0} \right)^{3/2} \left(\frac{T}{300} \right)^{3/2} = 8,216 \times 10^{18} \left(\frac{T}{300} \right)^{3/2} \text{ см}^{-3},$$

де $M = 2$ – число екстремумів зон; $m_n^* \approx 0,2 m_0$ і $m_p^* \approx 0,3 m_0$ – ефективні маси густини станів відповідно електронів та дірок [7].

Вважаючи, що концентрація акцепторів у p -CdSb (криві 1, 1' рис. 1а) до та після опромінення γ -квантами ^{60}Co ($\Phi = 2 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$), відповідно, мають значення N_a $1,11 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ і $6,7 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$, розраховано для граничних умов (криві 1-3, 1'-3' рис. 2а) положення $E_F(T)$ за формулами: 1, 1' – (6); 2, 2' – (8); 3, 3' – (9). Аналіз теоретичних розрахунків показує, що для досліджуваних кристалів температура насичення (виснаження) T_n є меншою 50 К (перетин кривих 1, 2 і 1', 2' рис. 2а), а температура переходу від виснаження домішки до власної провідності (перетин кривих 2, 3 і 2', 3' рис. 2а) $\approx 292 \text{ К}$ і $\approx 278 \text{ К}$.

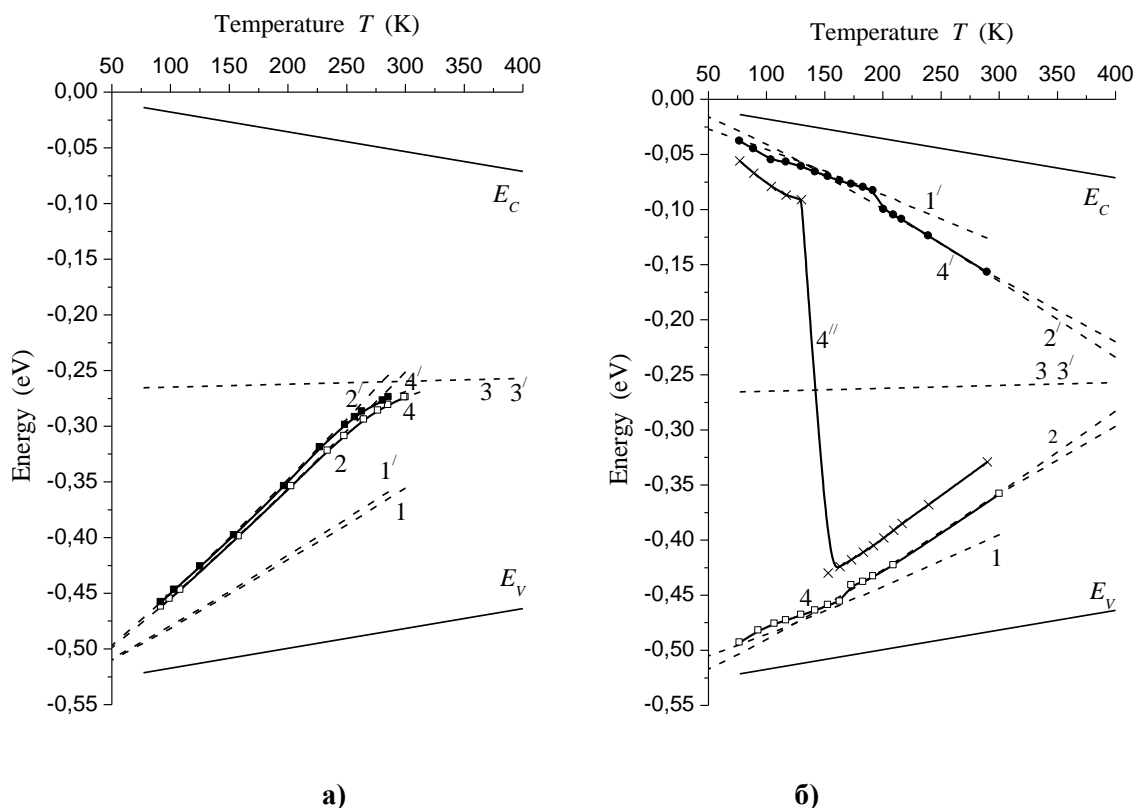


Рис. 2. Температурні залежності положення рівня Фермі $E_F = f(T)$ у нелегованому p -CdSb до (1-4) і після (1'-4') опромінення (1-3, 1'-3' – граничні умови):

- а) 4 – неопромінену ($N_a \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$); 4' – γ -опромінену ($\Phi = 2 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$);
 б) 4 – неопромінену ($N_a \approx 7 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$) з $E_V + 0,031 \text{ eV}$; 4' – γ -опромінену ($\Phi = 10^{19} \text{ см}^{-2}$) з $E_C - 0,025 \text{ eV}$; 4'' – γ -опромінену з $E_V + 0,031 \text{ eV}$ і $E_C - 0,025 \text{ eV}$.

Згідно умови (7) досліджуваний діапазон температур в основному відповідає області виснаження: домішка уся іонізована, концентрація дірок $p = N_a$ залишається сталою ($p = f(10^3/T)$ рис. 1а), концентрація електронів $n = n_i$ (неосновних носіїв струму) зростає, рівень Фермі визначається згідно (8)

$$E_F = E_V - kT \ln \left(\frac{p}{N_V} \right) \quad (10)$$

і наближається до середини забороненої зони (криві 4, 4' рис. 2а). При $T \approx 230$ К і ≈ 215 К для неопромінених та опромінених p -CdSb з подальшим ростом n відбувається і зростання p (уся домішка іонізована і необхідно враховувати іонізацію основної речовини $p = n_i + N_a$):

$$E_F = E_V - kT \ln\left(\frac{n_i + N_a}{N_V}\right).$$

Для спеціально нелегованого більш дефектного p -CdSb з $N_a \approx 6,8 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (крива 2 рис. 1а, рис. 1б) в досліджуваному діапазоні температур ($T = 77 \div 300$ К) спостерігається прояв рівня $E_V + 0,031$ еВ, що ускладнює розрахунок $E_F(T)$. На основі аналогічного p -CdSb з $N_a \approx 1,11 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ аналізу та експериментальних результатів зроблено відповідні побудови для p -CdSb з $N_a \approx 6,8 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (криві 1-4 рис. 2б). Залежність 4 рис. 2б в області низьких температур $T \leq 160$ К, коли виконується гранична умова (5), описується згідно (6):

$$E_F = \frac{E_V + E_a}{2} - \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{p}{2N_V}\right),$$

а з подальшим ростом температури умовою (10). Для цих напівпровідників іонізація основної речовини стає відчутною при $T > 300$ К.

В опромінену γ -квантами ^{60}Co ($\Phi = 10^{19} \text{ см}^{-2}$) p -CdSb з $N_a \approx 6,8 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ відбувається зміна знаку R_H , а на температурній залежності концентрації носіїв струму спостерігається дві області n і p -типу провідності (криві 1' і 2' рис. 1б), що пояснюється значною скомпенсованістю $N_a \approx N_d$. Вважаючи, що до опромінення концентрація основних носіїв визначається $p = f(10^3/T)$ (крива 1 рис. 1б), а після опромінення на рис. 1б крива 1' – $n - p = f(10^3/T)$ та крива 2' – $p - n = f(10^3/T)$, теоретично розраховано концентрацію електронів $n = f(10^3/T)$ в опромінену p -CdSb (крива 1 рис. 1б). За цією залежністю визначено глибину залягання донорного рівня $\Delta E_d = 0,025$ еВ. Отже, γ -опромінення ($\Phi = 10^{19} \text{ см}^{-2}$) p -CdSb з акцепторним рівнем $E_V + 0,031$ еВ призводить до утворення донорного рівня $E_C - 0,025$ еВ, який компенсує переходи носіїв струму.

Проводячи аналогічний p -типу аналіз розв'язку (1), положення рівня Фермі у невиродженому напівпровіднику n -типу в інтервалі температур домішкової провідності описується:

$$E_F = \frac{E_C + E_d}{2} + \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{n}{2N_C}\right), \quad E_F = E_C + kT \ln\left(\frac{n}{N_C}\right).$$

На рис. 2б залежностями 1'-4' представлено аналіз граничних умов та теоретичних розрахунків значень $E_F(T)$ CdSb з $E_C - 0,025$ еВ, а 4'' – результуюча залежність положення рівня Фермі у γ -опромінену ($\Phi = 10^{19} \text{ см}^{-2}$) p -CdSb з акцепторним $E_V + 0,031$ еВ та донорним $E_C - 0,025$ еВ рівнями в забороненій зоні. За даними розрахунків зміна типу провідності відбувається при $T \approx 142$ К. Запропонована модель узгоджується з результатами досліджень фотопровідності для цих же матеріалів, де автори [8] спостерігали розмиття максимуму фотопровідності, що пояснюється виникненням фотоструму в ширшій спектральній області за рахунок іонізації домішкових рівнів.

Висновки. Аналіз теоретичної оцінки показує, що для p -CdSb температура насичення (виснаження) T_n є меншою 50 К, а температура переходу від виснаження домішки до власної провідності ≈ 292 К і ≈ 278 К. Досліджуваний діапазон температур в основному відповідає області виснаження: домішка уся іонізована, концентрація дірок $p = N_a$ залишається сталою, концентрація електронів $n = n_i$ (неосновних носіїв струму) зростає, рівень Фермі наближається до середини забороненої зони. При $T \approx 230$ К і ≈ 215 К для неопромінених та опромінених p -CdSb з подальшим ростом n відбувається і зростання p (уся домішка іонізована і необхідно враховувати іонізацію основної речовини $p = n_i + N_a$).

У γ -опромінену ($\Phi = 10^{19} \text{ см}^{-2}$) p -CdSb з $N_a \approx 6,8 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ відбувається зміна знаку коефіцієнта Холла R_H , а на температурній залежності концентрації носіїв струму спостерігається дві області n і p -типу провідності, що пояснюється значною скомпенсованістю $N_a \approx N_d$. γ -опромінення p -CdSb з акцепторним рівнем $E_V + 0,031 \text{ eV}$ призводить до утворення донорного рівня $E_C - 0,025 \text{ eV}$, який компенсує переходи носіїв струму. За даними розрахунків зміна типу провідності відбувається при $T \approx 142 \text{ K}$.

Одержані результати мають практичне значення, зокрема для різноманітних розрахунків, в яких використовуються значення рівня Фермі в залежності від температури.

Список використаних джерел:

1. Баранський П. І., Федосов А. В., Гайдар Г. П. *Неоднорідності напівпровідників і актуальні задачі міждефектної взаємодії в радіаційній фізиці і нанотехнології*. Київ-Луцьк : РВВ Луцьк. нац. техн. ун-ту, 2006. 316 с.
2. Андроник И. К., Арушанов Э. К., Емельяненко О. В., Наследов Д. Н. Электрические свойства легированных кристаллов CdSb при низких температурах. *Физика и техника полупроводников*. 1968. Т. 2, № 9. С. 1248–1252.
3. Берча Д. М., Митин О. Б., Раренко И. М., Грицюк Б. Н. Зонная структура CdSb и ZnSb. *Укр. физ. журн.* 1983. Т. 28. С. 1523–1527.
4. Маник О. Н., Раренко И. М. Исследование зонной структуры CdSb. *Физика и техника полупроводников*. 1986. Т. 20, № 9. С. 1706–1709.
5. Bercha D. M., Slipukhina I. V., Sznajder M., Rashchanskii K. Z. Elementary Energy Bands in the Band Structure of the Narrow-band-gap Semiconductor CdSb. *Phys. Rev. B*. 2004. Vol. 70, № 23. P. 235206-1–235206-8.
6. Abraham A. Photoelectric Effect in CdSb. *Czech. J. Phys.* 1965. Vol. 15, № 2. P. 138–140.
7. Семизоров А. Ф. Об анизотропии термо ЭДС CdSb. *Термоэлектричество*. 2004. № 2. С. 25–29.
8. Федосов С. А., Давидюк Г. Е., Божко В. В. [и др.]. Влияние радиационных дефектов на некоторые электрические и оптические свойства монокристаллов антимонида кадмия. *Неорган. материалы*. 1996. Т. 32, № 11. С. 1333–1337.

М.Ю. Думанчук, Н.В. Тарельник, В.О. Пирогов

Сумський національний аграрний університет

ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МЕТОДІВ ЗАХИСТУ ГНУЧКИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРУЖНИХ МУФТ ВІД ФРЕТИНГ-КОРОЗІЇ

В роботі розглянута проблема захисту поверхонь гнучких елементів пружних муфт від фретинг-корозії. Запропоновано вдосконалення технології захисту пружних елементів від фретинг-корозії. Для підвищення фретингостійкості пружних елементів запропоновано використання металоплакуючих мастильних матеріалів на основі парафіну з додаванням порошку дисульфиду молібдену та графіту. Визначено раціональний склад мастильного матеріалу, що включає графіт та дисульфід молібдену у кількості від 5 до 25 вагових відсотків кожного. Збільшення стійкості проти фретинг-корозії підтверджується значним зниженням показників шорсткості R_a , R_z , R_{max} поверхонь тертя. Запропонована технологія відрізняється низькою собівартістю за рахунок застосування простого і дешевого обладнання, можливістю механізації роботи.

Ключові слова: пружна муфта, фретинг-корозія, поверхня, шорсткість, металоплакування, графіт, зношування

М.Ю. Думанчук, Н.В. Тарельник, В.А. Пирогов

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ ГИБКИХ ЭЛЕМЕНТОВ УПРУГИХ МУФТ ОТ ФРЕТИНГ-КОРРОЗИИ

В работе рассмотрена проблема защиты поверхностей гибких элементов упругих муфт от фретинг-коррозии. Предложено усовершенствование технологии защиты упругих элементов от фретинг-коррозии. Для повышения фретингостойкости упругих элементов предложено использование металлоплакирующих смазочных материалов на основе парафина с добавлением порошка дисульфида молибдена и графита. Определен рациональный состав смазочного материала, включающий графит и дисульфид молибдена в количестве от 5 до 25 весовых процентов каждого. Увеличение стойкости против фретинг-коррозии подтверждается значительным снижением показателей шероховатости R_a , R_z , R_{max} поверхностей трения. Предлагаемая технология отличается низкой себестоимостью за счет применения простого и дешевого оборудования, возможностью механизации работы.

Ключевые слова: упругая муфта, фретинг-коррозия, поверхность, шероховатость, металлоплакирование, графит, износ

M. Dumanchuk, N. Tarelnyk, V. Pirogov

IMPROVEMENT OF ELASTIC COUPLINGS FLEXIBLE ELEMENTS FRETTING CORROSION PROTECTION TECHNOLOGY

The problem of elastic couplings flexible elements surfaces fretting corrosion protection is considered in the work. Advanced fretting corrosion protection technology is proposed. To increase the elastic elements fretting resistance, the use of metal-clad lubricants based on paraffin with the addition of molybdenum disulfide powder and graphite is proposed. The rational composition of the lubricant, including graphite and molybdenum disulfide in the amount of 5 to 25 weight percent each, has been determined. The increase of fretting corrosion resistance is confirmed by a significant decrease of friction surfaces roughness parameters (R_a , R_z , R_{max}). The proposed technology is low cost due to the use of simple and cheap equipment, the possibility of mechanization.

Keywords: elastic coupling, fretting corrosion, surface, roughness, metal plating, graphite, wear

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

У сучасному насосному і компресорному машинобудуванні широко використовуються пружні муфти з гнучкими елементами для передачі крутного моменту від приводу на енергетичний агрегат [1]. Їх основними перевагами, у порівнянні з традиційними зубчастими і втулично-пальцевими муфтами, є значні компенсуючі можливості в плані радіальних неспіввісностей і перекосів валів приводу і агрегату, незначних осьових і радіальних реактивних сил; пружні муфти безшумні в роботі, не вимагають мастила і обслуговування в процесі експлуатації. Однак недоліком їх конструкції, а отже, і способу виготовлення, є схильність поверхонь гнучких елементів до фретинг-корозії. Традиційним способом формування пакета гнучких елементів пружних муфт є спосіб, що включає виготовлення гнучких елементів і подальше їх складання в пакет з механічним кріпленням [2]. Аналіз випадків втрати працездатності пакетів гнучких елементів пружних муфт показує, що, незважаючи на успішне вирішення оптимізаційних задач в галузі проектування пружних муфт, зокрема вирішення задач оптимізації геометричної форми, напружено-деформованого стану гнучкого елемента, міцності,

мінімізації маси, а також кутової і осьової жорсткості, недоліком таких способів є те, що гнучкі елементи муфт схильні до фретинг-корозії, яка у найвищій мірі проявляється в місцях жорсткого защемлення кріпильними елементами. Ураження фретинг корозією має велику небезпеку, оскільки може бути первопричиною втомного руйнування пружних елементів і, у кінцевому підсумку, виходу муфти з ладу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Існує спосіб формування пакета гнучких елементів пружних муфт, що включає виготовлення гнучких елементів і подальше їх складання в пакет з механічним кріпленням, у якому перед складанням на сполучні поверхні гнучких елементів наносять металоплакувальний мастильний матеріал, принаймні, в місцях їх механічного кріплення при формуванні пакета, а після складання пакет здавлюють, видаляючи надлишок металоплакувального мастильного матеріалу [3]. У результаті нанесення металоплакувального мастильного матеріалу на сполучні поверхні гнучких елементів перед їх складанням у пакет, принаймні, в місцях їх механічного кріплення, наступного здавлювання пакета після складання з подальшим видаленням надлишків металоплакувального мастильного матеріалу, може реалізуватися ефект безізносності, який проявляється у тому, що на деталях, які труться одна об одну під час роботи вузлів тертя, формується тонка і така, що важко піддається окисленню, захисна самовідновлювальна металева плівка із введених у металоплакувальний мастильний матеріал присадок у вигляді поверхнево-активних речовин, порошкоподібних металів, їх оксидів і т.п., причому товщина плівки становить від декількох атомних шарів до 1-2 мкм. Підвищена ефективність металоплакувального мастильного матеріалу обумовлена наявністю контакту поверхонь тертя через м'який і тонкий шар металу, що пластично деформується, більш ефективною реалізацією ефекту Ребіндера, перенесенням частинок зносу з однієї поверхні тертя на іншу і утриманням частинок у зоні контакту електричним полем [4]. Нанесення металоплакувального мастильного матеріалу, що складається з парафіну з додаванням порошку з міді, забезпечує практично повну безізносність поверхонь гнучких елементів, завдяки зашпаковуванню мікронерівностей поверхонь заготовок і збільшенню площі їх фактичного контакту, а також зниженню коефіцієнта тертя, що, в кінцевому підсумку, значно знижує силу тертя, а значить, ймовірність руйнування і знос контактуючих поверхонь. Найбільш раціональним процентним вмістом металоплакувальної присадки з міді є 5-25 вагових відсотків, оскільки подальше збільшення процентного вмісту присадки не впливає на якість мастила. Слід зазначити, що випробування, що демонструють досягнення позитивного ефекту, пов'язаного з поліпшенням якості пакетів гнучких елементів пружних муфт, виготовлених відповідно до одного із способів з рівня техніки, проводилися на стенді, при амплітуді вигину 2 мм і з кількістю циклів 10^7 [5].

Однак, наступними дослідженнями було встановлено, що при збільшенні амплітуди до 5 мм і кількості циклів до 2×10^7 знос поверхонь гнучких елементів значно зростає, причому більшою мірою не в зоні кріплення, а на ділянках, віддалених від неї, де поверхні, що контактують, при переміщенні проходять великі відстані відносно одна одної. При розкладанні після випробувань пакета гнучких елементів на їх поверхнях було зазначено появу слідів зносу в результаті фретинг-корозії. Продукти зносу, що з'являлися після більш тривалих випробувань, перебуваючи у замкнутому просторі між поверхнями гнучких елементів, шаржували їх і сприяли появі кратерів на окремих поверхневих ділянках.

З огляду на зазначене вище, було створено спосіб, який забезпечив більш надійний захист гнучких елементів пружних муфт від фретинг-корозії і підвищив їх довговічність у більш жорстких умовах експлуатації за рахунок зміни якісних параметрів їх поверхневих шарів шляхом нанесення корозійностійких мастильних матеріалів [6]. У зазначеному способі формування пакета гнучких елементів пружних муфт, що включає виготовлення гнучких елементів, нанесення на їх сполучні поверхні попередньо приготованого металоплакувального мастильного матеріалу, до складу якого входить парафін з додаванням порошку міді, і подальше їх складання у пакет з механічним кріпленням, при приготуванні металоплакувального мастильного матеріалу до його складу додатково додають порошок дисульфіді молібдену. Порошок міді і порошок дисульфіді молібдену додають у кількості від 5 до 25 вагових відсотків кожний. Приготований металоплакувальний мастильний матеріал можуть наносити на сполучні поверхні кожного гнучкого елемента в межах 20-30 мм від місця його механічного кріплення при формуванні пакета шляхом натирання при кімнатній температурі або шляхом занурення в розплав

металоплакувального мастильного матеріалу. Відома позитивна роль дисульфиду молібдену (MoS_2), що застосовується як тверде мастило, у вирішенні загальної проблеми підвищення надійності і довговічності машин і механізмів. Так, у роботі [7] відзначається, що за класифікацією, запропонованою Кемпбелом, дисульфід молібдену належить до групи твердих мастил, кристалічна решітка яких має шарувату структуру. Атоми кожного шару пов'язані між собою міцними хімічними зв'язками, при цьому окремі шари зв'язані між собою слабкими молекулярними силами, що забезпечує легкість ковзання по площині спайності. Товщина одного елементарного шару MoS_2 дорівнює $6,25 \text{ \AA}$. Плівка дисульфиду молібдену товщиною $0,025 \text{ мкм}$ складається з 40 шарів з 38 площинами ковзання між ними. Висока адгезія дисульфиду молібдену до металів обумовлена міцними молекулярними зв'язками, утвореними атомами сірки з металом; будова кристалічної решітки забезпечує наявність важливих для мастильних матеріалів високих адгезійних властивостей. У роботі [8] відзначається, що хороші результати дає застосування дисульфиду молібдену як наповнювача в мастилах, які запобігають фретинг-корозії. Для визначення впливу покриттів з дисульфиду молібдену на фретинг-корозію гнучких елементів пружних муфт проводилися додаткові дослідження. У результаті, було встановлено, що додавання до мастильного матеріалу, що складається з парафіну і порошку міді в кількості від 5 до 25 вагових відсотків, порошку дисульфиду молібдену в кількості від 5 до 25 вагових відсотків, значно знижує знос поверхонь гнучких елементів пружних муфт.

Недоліком прототипу є тривалий період припрацювання, який, згідно з [9] становить 10^7 циклів, що при роботі вісім годин на добу відповідає приблизно 14 діб.

Відповідно до [10], знос поверхонь тертя при експлуатації відбувається постійно, починаючи з роботи з'єднання, але протікає нерівномірно. У спеціальній літературі розрізняють три періоди зносу: первинний (припрацювання), нормальний (експлуатаційний), катастрофічний знос (рис. 1).

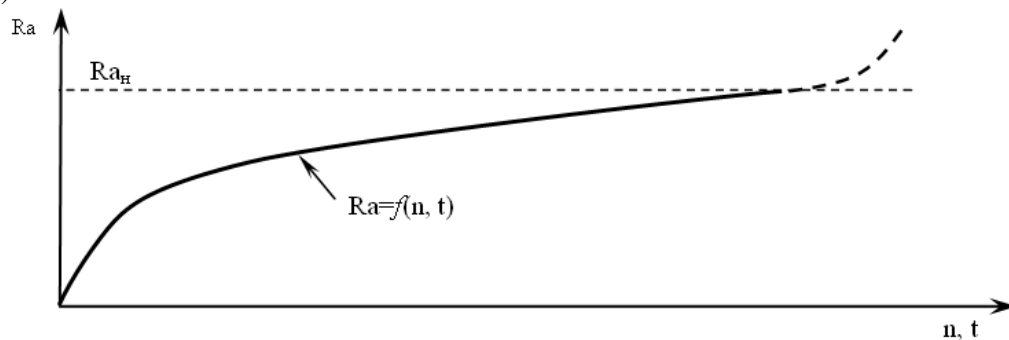


Рис. 1. Залежність зносу гнучких елементів від числа циклів (часу роботи)

У роботі [11], відмічається, що знос гнучких елементів при фретинг-корозії відбувається по експоненціальній залежності (період припрацювання, встановлений знос, який закінчується катастрофічним зносом).

Професор Суслов зазначає, що процес експлуатації деталі можна розглядати як продовження технології її обробки [12]. Тому для підвищення довговічності пар тертя необхідно максимально зменшити їх припрацювання при експлуатації.

Крім того, у прототипі запропоновано приготований металоплакувальний мастильний матеріал наносити на сполучні поверхні кожного гнучкого елемента в межах 20-30 мм від місця його механічного кріплення при формуванні пакета. Це може бути доцільним щодо муфт, діаметр яких не перевищує 200-210 мм. Для муфт, діаметр яких більше, цього недостатньо, тому що зі збільшенням діаметру муфти збільшується відстань, як між кріпильними отворами, так і між кріпильним і центральним отворами.

Слід відмітити, що муфти з гнучкими елементами при роботі в умовах виробництва повинні витримувати значно триваліший час до появи слідів зносу.

До цього слід додати, що муфти з гнучкими елементами працюють, як правило, в важких умовах оточуючих середовищ (вологість, пар, наявність у повітрі слідів кислоти або луги і таке інше), що значно збільшує зношування їх поверхонь.

Таким чином, проблема підвищення довговічності гнучких елементів в більш жорстких умовах експлуатації не втратила своєї актуальності.

В основу технічного рішення, що заявляється, поставлено задачу створення способу, який би забезпечив більш надійний захист гнучких елементів пружних муфт від фретинг-корозії і

підвищив їх довговічність в більш жорстких умовах експлуатації за рахунок покращення якісних параметрів їх поверхневих шарів шляхом нанесення корозійностійких мастильних матеріалів. Поставлена задача вирішується тим, що у способі формування пакета гнучких елементів пружних муфт, що включає виготовлення гнучких елементів, нанесення на їх сполучні поверхні попередньо приготованого металоплакувального мастильного матеріалу, до складу якого входить парафін з додаванням порошку міді і дисульфиду молібдену у кількості від 5 до 25 вагових відсотків кожний, і подальше їх складання у пакет з механічним кріпленням, згідно з технічним рішенням, що заявляється, при приготуванні металоплакувального мастильного матеріалу додатково додають порошок графіту у кількості від 5 до 25 вагових відсотків. Приготований металоплакувальний мастильний матеріал можуть наносити на сполучні поверхні кожного гнучкого елемента в межах 10-50 мм від місця його механічного кріплення при формуванні пакета.

Відома позитивна роль графіту, що застосовується як тверде мастило, у вирішенні загальної проблеми підвищення надійності і довговічності машин і механізмів.

Згідно [13] графіт збільшує площу контакту поверхонь за рахунок заповнення всіх мікронерівностей. Це зменшує коефіцієнт тертя (покращує антифрикційні властивості), збільшує несучу здатність. Завдяки графітовій добавці, матеріал краще протистоїть навантаженням, довше тримається на ділянках підвищеного тертя вузлів, а також набуває інших переважних характеристик. наприклад: водостійкість, захист вузлів від іржі; колоїдна стабільність; забезпечення плавного ходу механізмів та швидкого притирання деталей; оптимальне співвідношення ціни та ефективності; вибухобезпечність; невисока концентрація летких речовин (за високих температур випаровування не відбувається).

У роботі [14] відмічається, що графіт – це відмінний антифрикційний наповнювач, тому графітне мастило ідеально підходить для обслуговування великих та малих механізмів. Область застосування графітових мастил велика. Як правило, їх використовують для обслуговування вузлів та механізмів, що працюють при великих навантаженнях – у нафтовидобувній, автомобільній, будівельній, сільськогосподарській техніці.

У роботі [15] відмічається, що порошок міді значно покращує експлуатаційні властивості класичного графітного мастила. До особливостей складу мідно-графітного мастила відносять: здатність працювати при високих температурах; здатність витримувати високі механічні навантаження; підвищений рівень адгезії та липкості; повне виключення корозійних утворень на поверхнях, що захищаються; стійкість до дії олії та вологи; до складу мастила не входять свинець, нікель та сірка.

Таким чином, мідно-графітне мастило ефективно захищає робочі поверхні навіть в екстремальних умовах експлуатації. Найчастіше цим засобом обробляють різьбові з'єднання, перш ніж з'єднати їх. Це дає можливість надалі легко відкрутити з'єднання.

В роботі [14] показана синергетична взаємодія між графітом та дисульфідом молібдену (MoS_2). Вона заснована на заміщенні слабких сторін однієї речовини сильними за рахунок іншої. Так, графіт погано проявляє себе у сухому середовищі і незадовільно – в інертних газах. Дисульфід молібдену, у свою чергу, проявляє слабкі властивості у вологому середовищі. При з'єднанні порошоків графіту та дисульфиду молібдену виходить суміш, що значно перевершує за характеристиками кожен із цих матеріалів окремо.

Постановка завдання.

Таким чином, **метою** роботи є вдосконалення технологічного методу підвищення стійкості проти фретинг-корозії поверхонь гнучких елементів пружної муфти шляхом застосування металоплакуючих графітовмісних мастильних матеріалів та визначення їх раціонального складу.

Виклад основного матеріалу дослідження

Пружна муфта (рис. 2) складається з двох напівмуфт 1, 5 і гнучких елементів 2, 4, розділених проставкою 3. Гнучкі елементи (рис. 3) виконані у вигляді пакетів кільцевих металевих мембран заводського складання. Матеріалом для виготовлення гнучких елементів муфт служить корозійностійка холоднокатана сталь 12Х18Н9, ГОСТ 4986-79.

Дослідження впливу вмісту порошку дисульфиду молібдену на інтенсивність зношування виконувалось в наступній послідовності. У розплавленій парафін при інтенсивному перемішуванні вводили порошок з міді у кількості від 5 до 25 вагових відсотків, порошок

дисульфиду молібдену - у кількості від 5 до 25 вагових відсотків і порошок графіту (С-0) - у кількості від 5 до 25 вагових відсотків з наступним охолодженням до кімнатної температури.

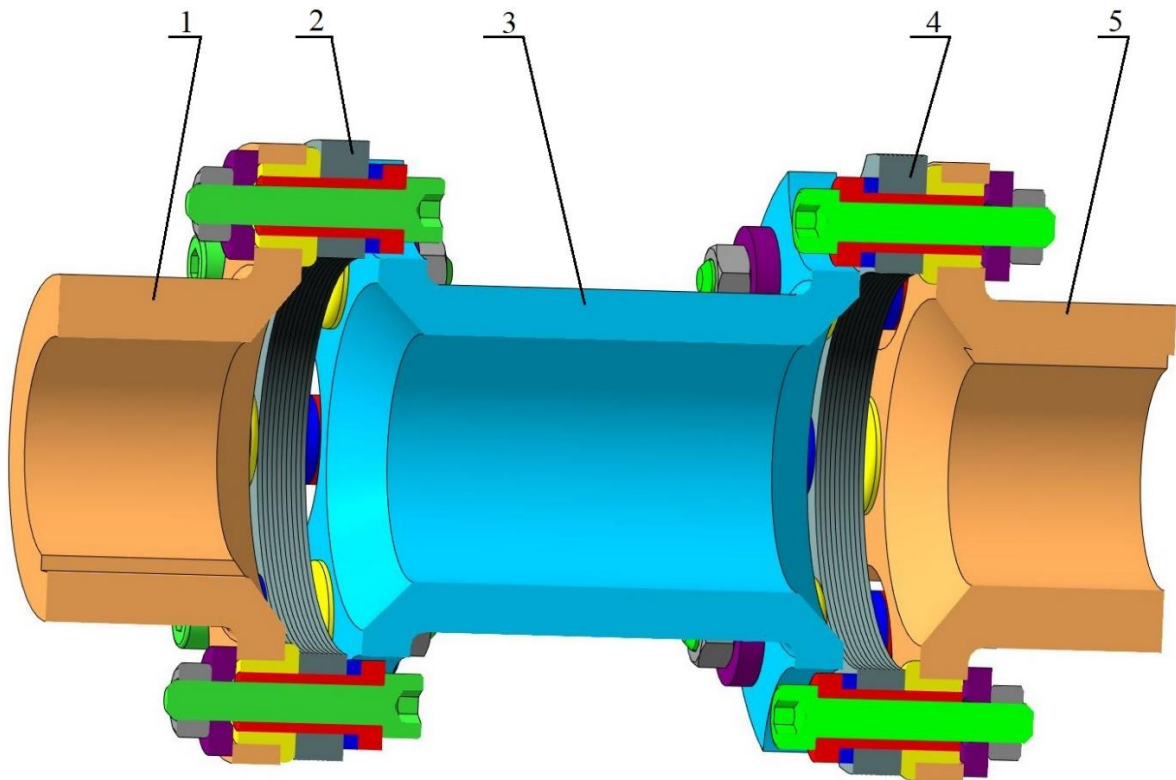


Рис. 2. Схема будови пружної муфти: 1, 5 – півмуфти, 2, 4 – пакети пружних елементів, 3 – проставка.

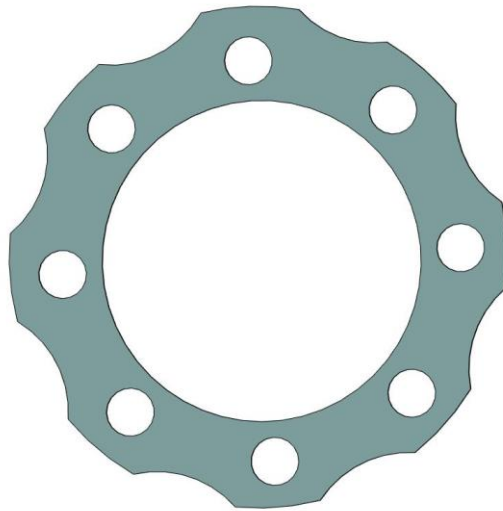


Рис. 3. Схематичне зображення гнучкого елемента

Отриманим матеріалом натирали заготовки гнучких елементів пружних муфт по всіх сполучних поверхнях кожного гнучкого елемента, принаймні, у межах 10-50 мм від місця його механічного кріплення при формуванні пакета. Далі заготовки складали в пакет. Надлишок матеріалу покриття видаляли шляхом здавлювання пакета заготовок при температурі плавлення парафіну. При цьому відбувалося як би зашпаклювання мікронерівностей поверхні зі збільшенням площі фактичного контакту. Далі пакет обробляли за традиційною технологією. Величину зносу вимірювали профілографами-профілометрами: моделі 252 і моделі DIAVITE DH-5 за трьома параметрами (R_a , R_z і R_{max}). Вимірювання проводилися поперек напрямку прокату. База вимірювань становила 4 мм. Вихідна шорсткість гнучких елементів муфт зі сталі 12X18H9 (ГОСТ 4986-79) становила: $R_a = 0,16$ мкм; $R_z = 1,4$ мкм і $R_{max} = 1,7$ мкм.

Для випробувань складали пакет з гнучких елементів муфти МСК-470, розрізаних навпіл. Як матеріал покриття використовували парафін з добавками з міді, дисульфиду молібдену і

графіту. Приготування мастильного матеріалу здійснювалося наступним чином. У розплавленій парафін при інтенсивному перемішуванні вводили порошок з міді дисульфід молібдену і графіту. Отриманий матеріал наносили на поверхні заготовок гнучких елементів муфти, принаймні, у межах 10-50 мм від місця їх механічного кріплення при формуванні пакета. При цьому використовували наступні серії покриттів, виконаних у співвідношеннях:

- 1-й пакет - без покриття;
- 2-й пакет - 25 % мідь + 25 % MoS₂ + 50 % парафін;
- 3-й пакет - 5 % мідь + 5 % MoS₂ + 5 % графіт + 85 % парафін;
- 4-й пакет - 5 % мідь + 5 % MoS₂ + 25 % графіт + 55 % парафін;
- 5-й пакет - 5 % мідь + 5 % MoS₂ + 50 % графіт + 40 % парафін;
- 6-й пакет - 25 % мідь + 25 % MoS₂ + 5 % графіт + 45 % парафін;
- 7-й пакет - 25 % мідь + 25 % MoS₂ + 25 % графіт + 25 % парафін;
- 8-й пакет - 20 % мідь + 20 % MoS₂ + 50 % графіт + 10 % пар;
- 9-й пакет - 30 % мідь + 30 % MoS₂ + 30 % графіт + 10 % парафін.

Потім заготовки склали у пакет. Надлишок матеріалу покриття видаляли шляхом здавлювання заготовок при температурі плавлення парафіну. Результати досліджень наведені у таблиці 1. Результати вимірювання шорсткості поверхонь гнучких елементів пружних муфт, пошкоджених фретинг-корозією (амплітуда 5 мм, кількість циклів 2×10^7)

Табл. 1

Результати досліджень

№	Матеріал поверхонь контакту	Ra, мкм	Rz, мкм	Rmax, мкм
1	сталь 12X18H9	1,63	6,25	7,19
2	25% мідь + 25% MoS ₂ + 50% парафін	0,26	2,13	2,93
3	5% мідь + 5% MoS ₂ + 5% графіт + 85% парафін	0,28	2,50	3,11
4	5% мідь + 5% MoS ₂ + 25% графіт + 55% парафін	0,25	2,42	3,05
5	5% мідь + 5% MoS ₂ + 50% графіт + 40% парафін	0,23	2,45	3,09
6	25% мідь + 25% MoS ₂ + 5% графіт + 45% парафін	0,18	2,03	2,63
7	25% мідь + 25% MoS ₂ + 25% графіт + 25% парафін	0,13	1,84	2,27
8	20% мідь + 20% MoS ₂ + 50% графіт + 10% парафін	0,13	1,77	2,30
9	30% мідь + 30% MoS ₂ + 30% графіт + 10% парафін	0,12	1,75	2,21

Аналіз результатів дослідження (рис. 4) показав, що, згідно з технічним рішенням, що заявляється, при застосуванні плакувальних мастильних матеріалів у вигляді парафіну з добавками з міді, дисульфід молібдену і графіту, у порівнянні з прототипом, знос зменшується, приблизно, на 50 %.

Найбільш раціональний процентний вміст металоплакувальної добавки як з міді, так і з дисульфід молібдену та графіту становить 5-25 вагових відсотків, оскільки подальше збільшення процентного вмісту кожної з добавок не впливає на якість мастила.

Реалізація запропонованої технології можлива з механізованим нанесенням досліджуваних металоплакувальних мастильних матеріалів на гнучкі елементи пружних муфт. Для цього застосовується спеціалізована установка для металоплакування (рис. 5), що включає підйомне кільце 1, ємність з парафіном 2, оправку з пакетом заготовок 3, мішалку 4, теплоносій (воду) 5, ТЕН 6, електродвигун 7, підставку 8.

При механізованому способі заготовки гнучких елементів пружних муфт занурювали в розплав мастильного матеріалу, що знаходився у ємності установки для металоплакування. Установка працює у такий спосіб. У ємності 2 за рахунок нагрівання води ТЕНами 6 розігрівається парафін до температури 80-900С. Після цього включають електродвигун 7 мішалки 4, а до парафіну додають розрахункову кількість порошку міді, порошку дисульфід молібдену і порошку графіту. На наступному етапі формують пакет шляхом нанизування заготовок гнучких елементів по одній на оправку. Сформований занурений пакет заготовок стискають на оправці, у результаті чого видаляється надлишок матеріалу мастила з простору між заготовками. Далі оправку піднімають над ємністю для охолодження до кімнатної температури. При цьому залишки мастила стікають у ємність.

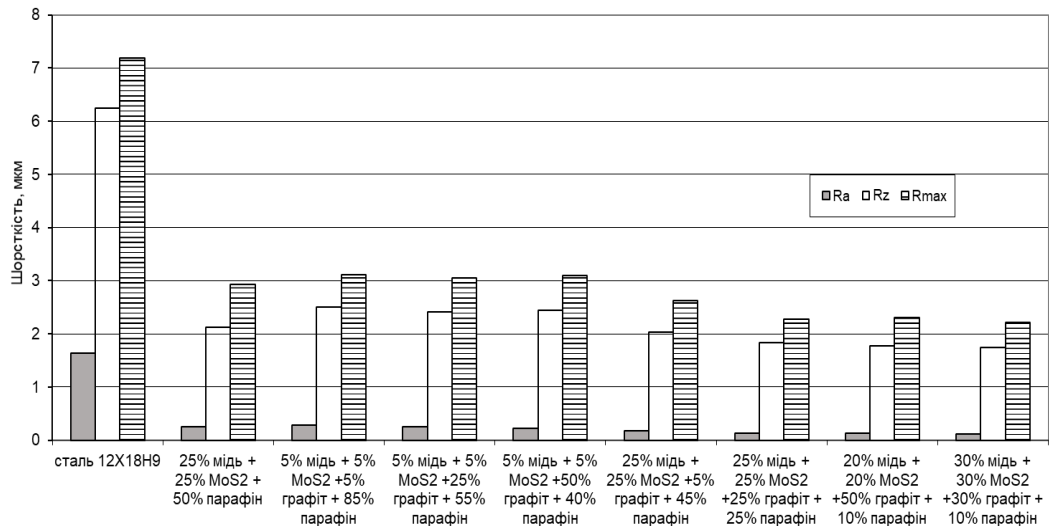


Рис. 4. Діаграма шорсткості поверхонь випробовуваних зразків

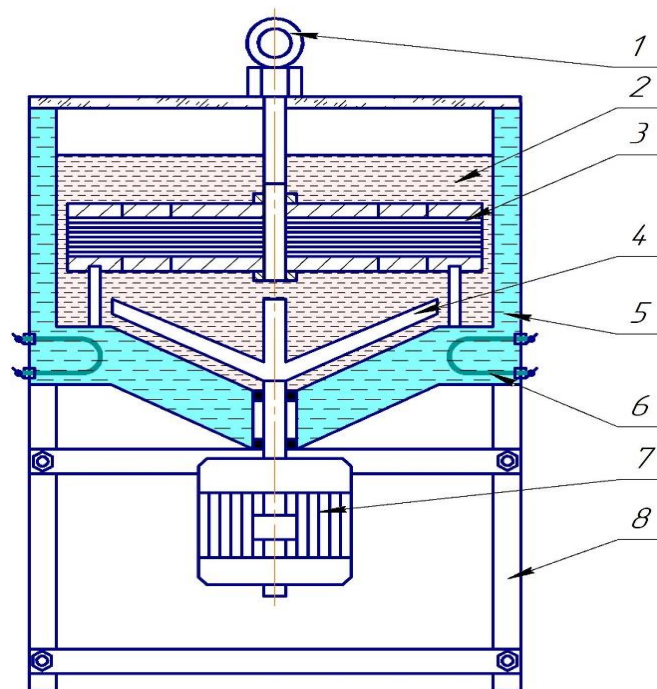


Рис. 5. Спеціалізована установка для металоплакування гнучких елементів пружних муфт

Висновок

В представленій роботі запропоновано спосіб формування пакета гнучких елементів пружних муфт, що включає виготовлення гнучких елементів, нанесення на їх сполучні поверхні попередньо приготованого металоплакувального мастильного матеріалу, до складу якого входить парафін з додаванням порошку міді і порошку дисульфиду молибдену у кількості від 5 до 25 вагових відсотків кожного і подальше їх складання у пакет з механічним кріпленням.

Список використаних джерел:

1. John Crane. Power Transmission Couplings. TLK Membrane Coupling for High Power Applications in the Process Industry. www.johncrane.co.uk. John Crane. Power Transmission Couplings. M Series Membrane Coupling for the Oil & Gas. www.johncrane.co.uk.

2. Гульй А.Н. О возможности применения соединительных муфт ГОСТ 26455-97 в насосных агрегатах для взрывоопасных зон. Сборник материалов XI Международной научно-технической конференции ГЕРВИКОН 2005, Сумы, Украина
3. UA № 92832 С2, F16D 3/50, C10M 103/00, надрук. 10.12.2010
4. Польцер Г., Майсснер Ф. Основы трения и изнашивания: Пер. с нем. - М.: Машиностроение, 1984. - С. 199-204.
5. В.С. Марцинковский, В.Б. Тарельник, М.П. Братушак, С.А. Горовой, Технология повышения долговечности гибких элементов упругих муфт // Компрессорное и энергетическое машиностроение. - 2008. - № 2(12). - С. 77-80
6. Патент України на корисну модель № 137273 «Спосіб формування пакетів гнучких елементів пружних муфт» МПК: F16D3/70; C10M 103/100. Дата публікації: 10.10.2019.
7. В.В. Иванов, Ю.В. Марченко. Перспективы применения дисульфида молибдена для формирования вибрационных механохимических твердосмазочных покрытий. Вестник ДГТУ, 2010. - Т. 10. № 3(46). - С. 381-385
8. Папок К.К. Моторные и реактивные масла и жидкости, (nglib.ru)
9. Думанчук М.Ю. Підвищення ефективності виготовлення деталей пружних муфт: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Думанчук Михайло Юрійович. - Харків, 2021. - 263 с.
10. И. В. Крагельский, Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М. Н. Добычин, В.С. Комбалов – М: Машиностроение, 1977. -526 с.
11. V Melnyk et al 2021 *J. Phys.: Conf. Ser.* 1741 012030, DOI: 10.1088/1742-6596/1741/1/012030
12. Суслов, А. Г. Разработка новых конкурентоспособных технологий [Текст] / А. Г Суслов // Авиационная и ракетно-космическая техника с использованием новых технических решений: Материалы Международной школы-конференции молодых ученых, аспирантов и студентов им. П. А. Соловьева и В. Н. Кондратьева. - Ч. 1. - Рыбинск: РГАТА, 2006. – С. 169-175.
13. Смазка графитовая https://smazki.guru/14_smazka_grafitovaya.html
14. Зачем нужна графитная смазка? <https://vils.ru/articles/zachem-nuzhna-grafitnaya-smazka/>
15. Графитовая смазка — для чего используется <https://7road.ru/drugoe/grafitnaya-smazka-eto.html>

Рецензент: д.т.н., завідувач кафедрою тракторів та сільськогосподарських машин Сумського національного аграрного університету Зубко В.М.

М.В. Глобчак¹, О.Л. Мастикаш¹, М.М. Борис²

Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна¹
Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, Україна²

ПРИКЛАДНІ ЗАСАДИ ЗАСТОСУВАННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МЕТОДІВ У ДОСЛІДЖЕННІ ВЗАЄМОДІЇ ПУНКТИВ РЕМОНТУ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

З'ясовано, що одним із найефективніших методів ремонту автотранспортних засобів є агрегатний. Встановлено, що ремонт агрегатів, зокрема двигунів, зазвичай проводиться на ремонтних постах знеособленим методом. При цьому множинні фактори, що впливають на надійність автомобільної техніки, а саме, структура та ефективність технічного обслуговування і ремонту, враховуються досить обмежено, а вплив їх кореляційних зв'язків є дуже приблизним.

Ефективність виконання ремонту агрегатів значною мірою залежить від взаємодії окремих ремонтних ланок (відділень). У поданому дослідженні розглядається випадок недостатньої кількості оборотних двигунів та проблему організації їх ремонту. Оскільки ефективність виконання ремонту істотно залежить від згаданої вище взаємодії, доцільно розглядати організацію роботи моторного відділення з урахуванням його взаємодії у формі обміну двигунами з зоною ремонту. Тому актуальним стає пошук альтернативних організаційно-технологічних рішень, зокрема, запровадження індивідуального методу, за якого знеособлення не відбувається.

Досліджено одну з важливих проблем організації процесу ремонту, що виникає за умови роботи комплексу "зона ремонту – моторне відділення". Для забезпечення умов мінімізації сукупних втрат часу, ця задача вирішується у формі матриці гри і доповнюється розрахунком параметрів марковських процесів, що дозволить перевести задачу аналізу в рамки ігрової моделі.

Запропонована методика аналізу процесу безпосередньо призначена для пошуку раціональних варіантів роботи у випадку запровадження індивідуального методу ремонту, як одного із шляхів подолання відсутності оборотних агрегатів.

Ключові слова: агрегатний метод ремонту, надійність автотранспортних засобів, індивідуальний метод ремонту; відмови елементів; організація процесу ремонту; матриця гри; марковські процеси; оборотні агрегати.

M.V. Hlobchak, O.L. Mastykach, M.M. Borys

APPLIED PRINCIPLES OF APPLICATION OF MATHEMATICAL METHODS IN THE STUDY OF THE INTERACTION OF MOTOR VEHICLE REPAIR POINTS

It has been found that one of the most effective methods of repairing vehicles is aggregate. It is established that the repair of units, in particular engines, is usually carried out at repair stations by the impersonal method. However, multiple factors that affect the reliability of automotive equipment, namely, the structure and efficiency of maintenance and repair, are taken into account quite limited, and the impact of their correlations is very approximate.

The efficiency of repair of units largely depends on the interaction of individual repair units (offices). The present study considers the case of insufficient number of revolving engines and the problem of organizing their repair. Since the efficiency of the repair significantly depends on the above-mentioned interaction, it is advisable to consider the organization of the engine room, taking into account its interaction in the form of exchange of engines with the repair area. Therefore, the search for alternative organizational and technological solutions becomes relevant, in particular, the introduction of an individual method in which depersonalization does not occur.

One of the important problems of the organization of the repair process, which arises under the condition of the complex "repair zone – engine room" is studied. To ensure the conditions for minimizing the total loss of time, this problem is solved in the form of a game matrix and is supplemented by calculating the parameters of Markov processes, which will translate the problem of analysis into the game model.

The proposed method of process analysis is directly designed to find rational options for work in the case of the introduction of an individual method of repair, as one of the ways to overcome the lack of revolving units.

Keywords: aggregate method of repair, reliability of vehicles, individual method of repair; failure of elements; organization of the repair process; game matrix; Markov processes; reversible units.

Постановка проблеми. Ведення бойових дій в сучасних умовах і досвід проведення Операції Об'єднаних Сил (ООС) на території нашої держави свідчить, що забезпечення Збройних Сил України (ЗС України) справною військовою автомобільною технікою є важливим елементом виконання ними бойових завдань. За результатами проведеного аналізу сукупності експлуатаційних властивостей військової автомобільної техніки та їх складових частин з позицій дослідження складних технічних систем, можна зробити висновок, що основним показником ефективності під час розв'язування задачі оцінювання та прогнозування зміни у часі технічного стану систем доцільно розглядати надійність [1-3].

Проведена низка досліджень показує, що питанню надійності та забезпеченню її в автомобільній техніці завжди приділялася значна увага [4-7]. При цьому фактори, що визначають умови та режими експлуатації технічних систем, у тому числі особливості їх застосування за

призначенням, структуру й ефективність технічного обслуговування та ремонту, враховуються досить обмежено, а вплив кореляційних зв'язків цих факторів враховується дуже приблизно. Такий підхід призводить, зазвичай, до отримання лише наближених оцінок поточного рівня експлуатаційних властивостей технічних систем і динаміки їх зміни за результатами прогнозованих оцінок.

На озброєнні ЗС України перебуває низка колісних транспортних засобів, які відрізняються між собою бойовими технічними характеристиками та конструктивним виконанням. Зважаючи на це, з урахуванням необхідності подальшого комплектування ЗС України сучасними зразками такої техніки, актуальним є питання введення в дію перспективних видів транспортних засобів. Відповідно до цього, у військах з'явилася низка транспортних засобів, призначених для забезпечення тактичних дій, патрулювання тощо.

Велика кількість пошкодженої військової техніки свідчить про значне навантаження на систему її відновлення. Ситуація ускладнюється збільшенням номенклатури транспортних засобів після прийняття на озброєння нових та модернізованих зразків. Відповідно, це призводить до збільшення потужностей виробничо-технічної бази (ВТБ), необхідної для відновлення пошкодженої техніки. Дані обставини, безумовно, впливають на систему логістичного забезпечення ЗС України, однією із функцій якої є підсистема відновлення. Її функціонування безпосередньо залежить від підсистеми матеріально-технічного забезпечення, а її раціональне розташування і транспортування елементів істотно впливає на час їх подачі [8-9].

Таким чином, для зменшення навантаження на систему логістичного забезпечення ЗС України і відповідні її підсистеми з відновлення авто- та бронетехніки, виникає необхідність пошуку нових та ефективних шляхів створення комплексів “зона ремонту – моторне відділення”. Вони повинні бути уніфікованими і забезпечувати можливість ремонту на їх базі автомобільної техніки залежно від специфіки та завдань родів військ та служб ЗС України. Зазначені комплекси повинні забезпечувати ремонт і швидку заміну пошкоджених вузлів та агрегатів. Тому такі комплекси повинні за своєю структурою містити модулі силової установки, трансмісії, ходової частини, а кожен з них повинен бути оснащений відповідним місцем для їх монтажу. Таким чином, створення комплексів за таким принципом дасть змогу їх уніфікації, забезпечення швидкої заміни агрегатів, що в кінцевому результаті сприятиме зменшенню часу та обсягу ремонту.

Для визначення завдань щодо створення комплексів було сформовано загальну методологію на основі розроблення та реалізації відповідних інноваційних технологій. В її основу покладено загальні положення розроблення та дослідження складних технічних систем [2,10]. При цьому враховувалося, що така система має складатися з окремих елементів, кожен з яких має вирішувати часткові завдання, а їх сукупність – головне завдання – якісний ремонт автомобільної техніки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Сучасний стан ремонту автомобільної техніки, особливо в зоні бойових дій, обумовлює активну роботу з розгортання комплексів ремонту, розташованих у безпосередній близькості до цієї зони. Такі комплекси повинні забезпечити в найкоротші терміни проведення необхідних технологічних операцій з відновлення роботоздатності пошкоджених транспортних засобів та їх високої бойової готовності [11].

Отже, для виконання поставлених задач, вказані вище комплекси ремонту повинні розгортатися з використанням найраціональніших підходів, одним із яких може бути агрегатний метод ремонту. Спробуємо доказати доцільність використання даного методу ремонту.

Агрегатний метод є найрозповсюдженішим серед застосовуваних методів організації технологічного процесу ремонту. Він передбачає зняття ушкодженого агрегату, зокрема двигуна, з автотранспортного засобу з подальшою його заміною на отриманий з оборотного фонду. В моторному відділенні ремонт виконується у режимі, характерному перебігу подій у зоні ремонту і, фактично, для “знеособлених” силових агрегатів [1,2,4]. Такий принцип організації робіт має свої переваги. Проте з причин недостатньої кількості оборотних агрегатів постійне підтримання фонду силових агрегатів (двигунів) на рівні, що задовольняє потреби сьогодення, стає проблематичним. До того ж “знеособлення” тягне за собою заміну нового, хоч і ушкодженого двигуна, на інший, зі своїм ресурсом, що створює значні додаткові перешкоди. Тому пошук альтернативних організаційно-технологічних рішень стає актуальним.

Головна ж перевага агрегатного методу порівняно з індивідуальним полягає у можливості значного скорочення терміну вимушеного простою автотранспортних засобів в ремонті. У разі

застосування агрегатного методу ремонту питання розроблення моторного відділення, як одного з основних, вирішується за принципом раціонального зосередженого розташування технологічного обладнання [1,2,4]. Беруться до уваги (див. рис. 1, а) горизонтальні проекції окремих одиниць обладнання (1), які розташовують у рекомендованій послідовності в межах наявних виробничих площ уздовж умовної технологічної лінії (2) руху двигуна в процесі ремонту. Альтернативне рішення полягає в створенні у відділенні одного або декількох універсальних ремонтних постів, на яких передбачатиметься розташування повного комплексу технологічного обладнання.

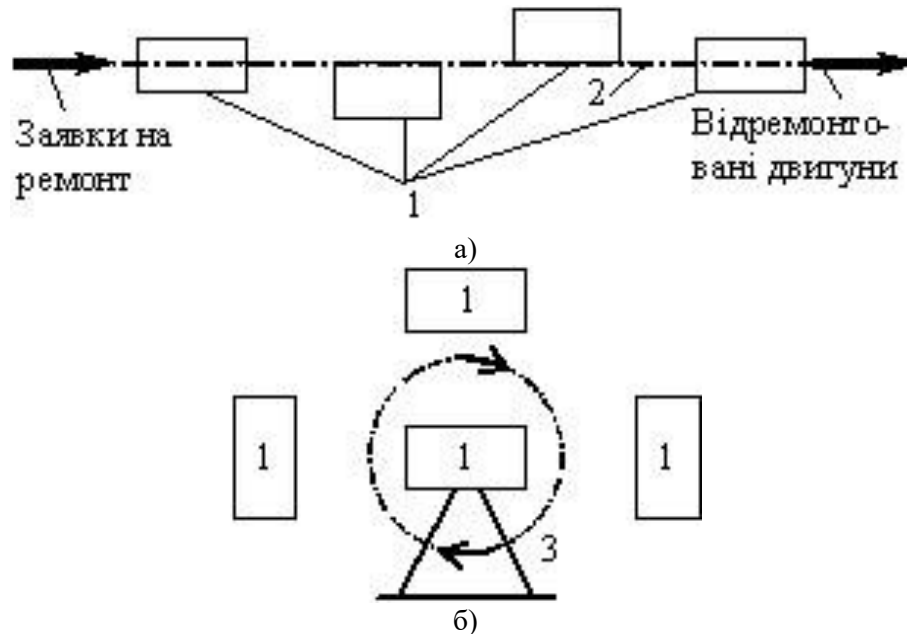


Рис. 1. Умовні схеми розташування обладнання моторного відділення у випадках, коли основний технологічний рух двигуна: а) поступальний; б) обертвий

В цьому разі варто відмовлятися від переважно долівкового (на підлозі) розміщення обладнання і переходити до просторового – з максимальним використанням бокових поверхонь стін, навісного кріплення, реалізувати ярусні компоувальні схеми, тобто переходити до об'ємного принципу. Об'ємний компоувальний принцип відповідатиме необхідному технологічному руху двигуна у відділенні, що схематично показано на рис. 1, б. За рахунок наявності на постах монтажно-демонтажних обертювих стендів 3 – замість традиційного долівкового (рис. 1, а) поступального переміщення двигуна в горизонтальній площині, основним технологічним рухом стає відносний обертальний рух навколо нерухокої або обмежено рухокої осі стенда, що обумовить мінімальну виробничу площу, скоротить допоміжний час, а отже, й загальний час ремонту [1,2,4].

Такий організаційно-технологічний варіант дасть змогу істотно скоротити транспортні операції з силовими агрегатами всередині відділення, а також паузи в очікуванні на звільнення зайнятого обладнання. Завдяки цьому, враховуючи сучасні реалії, досягається ефективне використання робочого часу ремонту силового агрегату, оскільки швидке і якісне повернення силового агрегату будь якого транспортного засобу є запорукою високої бойової готовності.

Одним із чинників затримок є час транспортування об'єкта між зоною ремонту і моторним відділенням, а для його мінімізації необхідна чітка взаємодія між двома елементами комплексу (їх схема показана на рис. 2), яка стає предметом аналізу. Тому метою дослідження стане пошук раціональної чисельності універсальних ремонтних постів, необхідних для відділення ремонту силових агрегатів в цілому.

Постановка завдання. Об'єкт дослідження – підходи до обґрунтування надійності автотранспортних засобів шляхом вдосконалення структури і підвищення ефективності технічного обслуговування та ремонту.

Предмет дослідження – прикладні методи розрахунку та обґрунтування надійності автотранспортних засобів для пошуку раціональних варіантів організації моторної дільниці за умови запровадження індивідуального методу ремонту як засобу подолання браку оборотних агрегатів. Взаємодію виробничих підрозділів, що схематично показана на рис. 2, оберемо за предмет аналізу.

Метою дослідження є розвиток існуючих підходів до пошуку раціональної чисельності універсальних ремонтних постів, необхідних для відділення ремонту силових агрегатів.

Основними завданнями є застосування математичних методів, зокрема матриці гри для розв'язування задачі аналізу взаємодії моторного відділення із зоною поточного ремонту автотранспортних засобів, опис методики розв'язання цієї задачі, а також подання прикладу розрахунків за реальними спостереженнями, проведеними на АТП, що дає змогу на підставі запропонованої методики дослідити взаємодію місця демонтажу і моторного відділення.

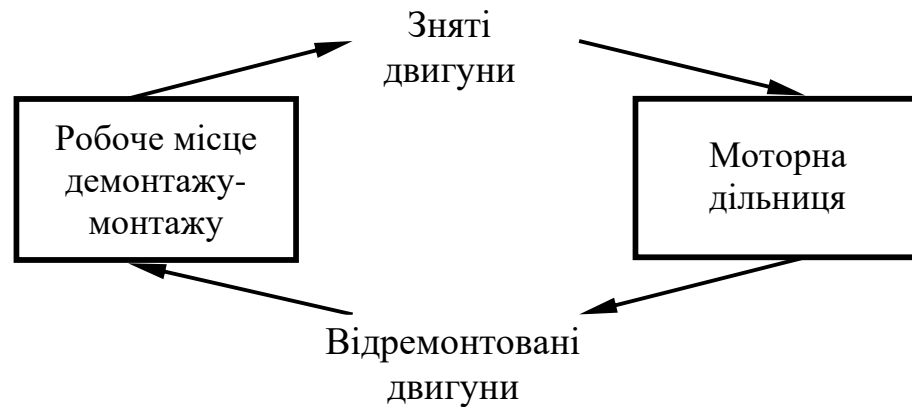


Рис. 2. Схема взаємодії місця демонтажу і моторного відділення

Наукова новизна дослідження полягає в актуалізації пошуку шляхів підвищення надійності транспортних засобів в процесі експлуатації. В роботі запропоновано оригінальний підхід до підтримання надійності систем і агрегатів автотранспортних засобів, що опирається на паралельний до експлуатації процес матеріально-технічного забезпечення.

Практична значимість отриманих результатів роботи полягає у забезпеченні здійснення аналізу для пошуку раціональних варіантів організації комплексу “зона ремонту – моторна дільниця” за умови запровадження індивідуального методу ремонту в якості засобу подолання браку оборотних агрегатів.

Викладення основного матеріалу дослідження. За умов необхідності виконання ремонтних робіт у великому обсязі істотним чинником взаємодії виступає випадковість моментів появи автотранспортних засобів з відмовами або пошкодженнями силових агрегатів, а також випадковість обсягів і часу робіт з усунення відмов (пошкоджень).

Наслідками випадковостей стають: прості технологічного обладнання відділення в періоди тимчасової відсутності потреби в ремонті; вимушені перерви у циклі ремонту силового агрегату, знятого з автомобіля, у разі зайнятості постів відділення попередніми роботами. Обидва види часових затримок є небажаними. У першому випадку затримки усувають шляхом використання меншої кількості технологічне обладнання, а в другому – уповільнюють поступлення двигунів.

Враховуючи наведені обставини, необхідно відшукати для відділення таку чисельність m постів, яка би задовільнила умови мінімізації сукупних втрат часу. Йдеться про виявлення компромісного проектного рішення, котрим, за умови регулярного, але стохастичного (технологічного) руху силових агрегатів між елементами комплексу, обмежуються затримки обох видів.

Для кількісного відображення наслідків руху об'єктів введемо поняття про стан комплексу “зона ремонту – моторне відділення”. Параметрами стану задамо пару чисел – i та j , де i – кількість постів зони ремонту, на яких перебувають автотранспортні засоби з відмовами (пошкодженнями) двигунів, а j – кількість постів моторного відділення, на яких здійснюється їх ремонт.

Вище сказане підтверджує подвійну випадковість початкових умов, а це переводить аналіз в клас ігрових: взаємовідносини між кількостями постів у комплексі “зона ремонту – моторне відділення”.

В зв'язку з цим задаємося скінченною множиною допустимих стратегій формування основного елемента комплексу – моторного відділення (P_1, P_2, P_3, \dots). З урахуванням змісту задачі аналізу, стратегія P_m ($m = 1, 2, \dots$) полягатиме у створенні на дільниці m універсальних ремонтних постів. Дію неконтрольованого зовнішнього чинника задаємо стратегіями D_0, D_1, \dots, D_i . За змістом задачі аналізу

стратегія D_i ($i = 0..I$) полягатиме у присутності в зоні ремонту одночасно і транспортних засобів з відмовами (пошкодженнями) двигунів.

Задачу аналізу подамо у вигляді матриці гри (рис. 3), котра відповідає випадку оснащення зони ремонту шістьма універсальними постами. Як припущення, за умови відсутності черги автомобілів з відмовами (пошкодженнями) у зоні ремонту, можна прийняти $I = 6$. Це припущення дасть змогу обмежити множину можливих варіантів $m = 1..I$. У клітинах матриці міститься запис параметрів стану для випадків поєднання стратегій P_m з D_i ($m, i = var$).

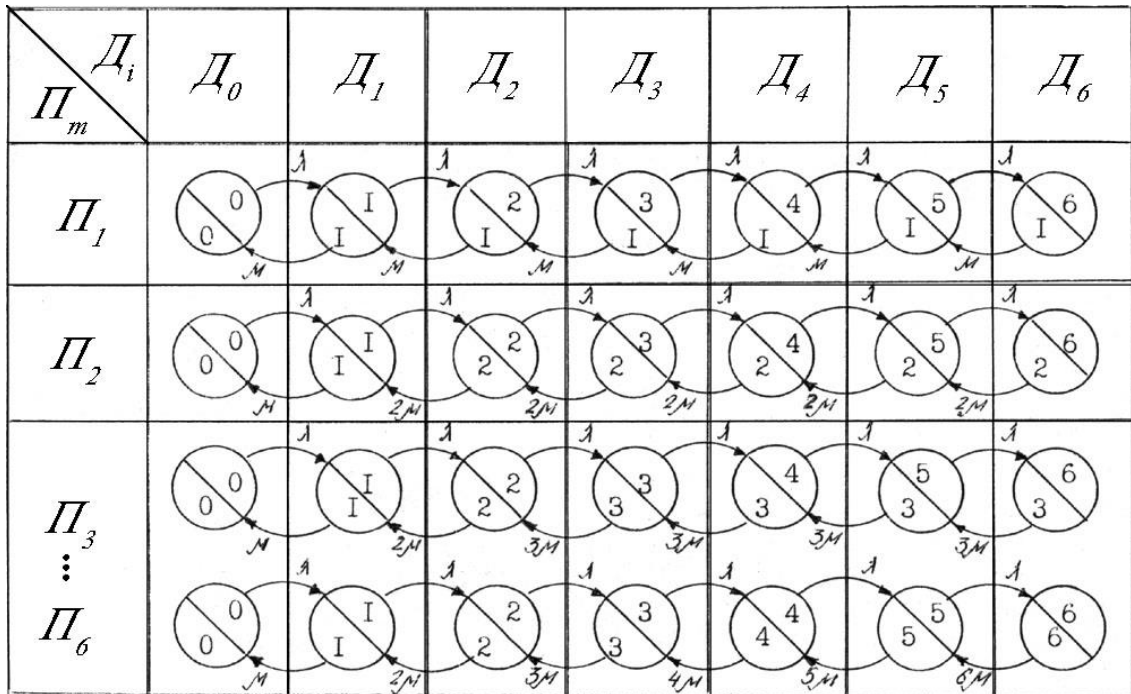



Рис. 3. Матриця гри у задачі аналізу взаємодії моторного відділення із зоною ремонту для випадку $i = 6$

Використаний у матриці (рис. 3) принцип запису чисел  дасть змогу отримати наступне: у разі застосування в моторному відділенні трьох постів (рядок P_3), виникатимуть такі комбінації параметрів стану:

- $i = 0; j = 0$ – відсутня потреба у ремонті силових агрегатів в зоні ремонту, відсутні ремонтвані двигуни у відділенні;
- $i = 1; j = 1$ – одна потреба в зоні, один двигун у відділенні;
- $i = 2; j = 2$ – дві потреби в зоні, два двигуни у відділенні;
- $i = 3; j = 3$ – три потреби в зоні, три двигуни у відділенні;
- $i = 4; j = 3$ – чотири потреби в зоні, три двигуни у відділенні;
- $i = 5; j = 3$ – п'ять потреб в зоні, три двигуни у відділенні;
- $i = 6; j = 3$ – шість потреб в зоні, три двигуни у відділенні.

Вище сказане формує якісну оцінку гри. Для кількісної оцінки необхідно визначити ймовірності появи окремих станів. У зв'язку з цим звернемо увагу, що вибір деякої чистої стратегії P_m фактично задає статистичний закон дії неконтрольованого чинника [12,13]. Цей закон визначається властивостями дискретних марковських ланцюгів міжстанових переходів. Ланцюги, накладені на матрицю гри (рис. 3) означають, що ігрова задача аналізу доповнюється задачею розрахунку параметрів марковських процесів.

На графах міжстанових переходів, позначення λ , однієї частини дуг відноситься до інтенсивності заповнення постів зони ремонту автотранспортними засобами – потребами в ремонті двигунів. Для визначення інтенсивності використаємо залежність [11,14]:

$$\lambda = \frac{A_c \times \alpha_B \times \varpi \times M(\ell)}{1000}, \tag{1}$$

де A_c – спискова кількість автотранспортних засобів; a_B – коефіцієнт випуску рухомого складу; ω – параметр потоку відмов, 1/1000 км; $M(l)$ – математичне сподівання середньодобового пробігу автотранспортного засобу, км.

В той же час, позначення μ стосується інтенсивності виконання ремонту на одному посту моторного відділення. Тому розрахунок часу цього ремонту t_p необхідно здійснювати з урахуванням часу додаткових технологічних операцій: демонтаж двигуна і його монтаж після проведення ремонту. Якщо вважати t_p випадковою величиною, що визначає розподіл часу між незаконними подіями, які появляються з постійною інтенсивністю, то застосуємо експоненціальний закон її статистичного розподілу [15,16]:

$$\mu = \rho / M(t_p), \quad (2)$$

де $M(t_p)$ – математичне сподівання t_p ; ρ – коефіцієнт приведення одиниць виміру часу ремонту до одиниць виміру інтенсивності подій в комплексі “зона ремонту – моторне відділення”.

За умови одновимірних часу ремонту і подій в потоках переходів, коефіцієнт приведення $\rho = 1$. Якщо реєстрація тривалості ремонту визначається годинами, а потоки подій календарними днями, то формула (2) набуде вигляду:

$$\rho = t_{zm} \times n_{zm}, \quad (3)$$

де t_{zm} – тривалість однієї робочої зміни; n_{zm} – кількість робочих змін в добу.

Для визначення ймовірностей $P_m(i,j)$ появи параметрів стану комплексу “зона ремонту – моторне відділення” скористаємося залежностями [15]:

$$P_m(0,0) = \left[\sum_{i=0}^m \left(\frac{\lambda}{\mu i!} \right)^i + \frac{1}{m!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^m \sum_{r=1}^v \left(\frac{\lambda}{\mu m} \right)^r \right]^{-1};$$

$$P_m(i, j=1) = \frac{1}{i!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^i \times P_m(0,0), \dots (1 \leq i \leq m); \quad (4)$$

$$P_m(i = m+r, j = m) = \frac{1}{m!} \left(\frac{\lambda}{\mu m} \right)^r \times \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^m \times P_m(0,0), \dots (1 \leq r \leq v, v = I - m).$$

Формули (4) є не що іншим, як розв’язком рівнянь Колмогорова для стаціонарного режиму переходів між станами [15,17]. Використовуючи результати розрахунків за вище поданими формулами (4), зможемо кількісно оцінити різні варіанти комплексу. З метою мінімізації сукупних втрат часу в основу оцінки закладемо показник Q_{mi} , що визначається за формулою:

$$Q_{mi} = \gamma_n \Delta_n(j, m) + \gamma_o \Delta_o(i, m), \quad (5)$$

де $\Delta_n(\cdot)$ і $\Delta_o(\cdot)$ – відносні втрати часу від вимушеного простою одного поста моторного відділення і затримки ремонту двигуна; γ_n, γ_o – “вагові” коефіцієнти, якими кількісно встановлюється важливість втрат часу кожного виду.

Втрати часу для кожного стану визначаємо за формулами:

$$Q_{mi} = \gamma_n \Delta_n(j, m) + \gamma_o \Delta_o(i, m); \quad (6)$$

$$Q_{mi} = \gamma_n \Delta_n(j, m) + \gamma_o \Delta_o(i, m). \quad (7)$$

Дані вирази мають право на існування лише за припущення, що у режимі неперервного чередування станів умовні ймовірності $P_m(i,j)$ стають еквівалентними тривалості збереження відповідної комбінації параметрів стану.

Результати розрахунку за формулами (5-7) дають змогу заповнити матрицю гри $\|Q_{mi}\|$ даними про “недоцільність” і тим самим знову перевести задачу аналізу в рамки ігрової моделі. Це означає, що бажаний розв’язок слід шукати з умов мінімізації показника Q_{mi} . Якщо мати на увазі структуру матриці гри (рис. 3), то оптимальною вважається стратегія проектування моторного відділення P_m , якою забезпечуються найнижчі часові “недоцільні” варіанти за стовпцями. Проте у нашому випадку на такий розв’язок не варто очікувати, оскільки мінімізація обох складових правої частини рівняння (5) є практично неможливою.

У якості оптимальної стратегії P_m можна також розглядати мінімізацію верхньої ціни гри:

$$q(m) = \max_m \min_i Q_{mi} \rightarrow \min. \tag{8}$$

За умови незадовільності мінімальної стратегії (умова 8) остаточну оцінку проектних варіантів здійснюватимемо за результатами порядкового сумування показників Q_{mi} . Такий спосіб забезпечить визначення середніх часових втрат [15]:

$$F(m) = \frac{1}{I+1} \sum_{i=0}^I Q_{mi} \tag{9}$$

Результатом оптимальної стратегії стосовно моторного відділення буде визначення числа його постів:

$$m = \text{Arg min } F(m). \quad m \in (\overline{1, I}) \tag{10}$$

Власне це і є результатом розв’язку поставленої задачі. Цю методику необхідно перевірити та підтвердити практично.

Апробація методики розрахунку необхідної кількості постів моторного відділення. Для прикладу розглянемо моторне відділення, що наближено відповідатиме умовам сучасного АТП-14630 у м. Львові. Як початкові дані використаємо результати звітів технічного відділу за останні роки. На їх основі констатуємо: параметр потоку відмов двигунів ω з 90%-ою ймовірністю перебуває в діапазоні 0,015-0,06 (1/тис. км). Досліджувалися автобуси БАЗ-А049, БАЗ-А079.

Використавши середні значення параметра ω , спискову чисельність рухомого складу A_c ($A_c = 100$ одиниць), коефіцієнта випуску $\alpha_e = 0,85$ з урахуванням очікуваного рівня математичного сподівання середньодобового пробігу одного автобуса $M(l) = 400$ км за формулою (1) визначаємо інтенсивність заповнення постів зони ремонту: $\lambda = 2$ 1/день.

Інтенсивність виконання ремонту на посту моторного відділення μ визначаємо за формулами (2) і (3), опираючись на передбачувані рівні середнього часу одного ремонту. За умови $M(t_p) = 2$ години за однозмінного режиму роботи матимемо: $\mu = 4$ 1/день.

Використовуючи визначені значення λ і μ , на підставі формули (4) визначимо ймовірність появи допустимих станів в дискретних марковських ланцюгах, накладених на матрицю гри. Результати розрахунків подано в табл. 1. Розрахунки показали, що матрицю $\|Q_{ij}\|$ можна істотно скоротити.

Варіювання параметром $m = \overline{1, 6}$ на стратегії D_0, D_1, D_2, D_3 припадало від 94,5% до 99,9% всього часу роботу комплексу “зона ремонту – моторна дільниця”. Зростання $i \geq 4$ призводить до швидкого падіння значень ймовірності $P_m(i, j)$, а отже в таблицю результатів їх не внесено.

Табл. 1.

Результати розрахунку ймовірностей виникнення допустимих станів комплексу “зона ремонту – моторна дільниця”

Стратегія P_m формування відділення	Ймовірність $P_m(i, j)$			
	$P_m(0, 0)$	$P_m(1, j)$	$P_m(2, j)$	$P_m(3, j)$
P_1	0,504	0,252	0,126	0,063
P_2	0,592	0,296	0,074	0,018
P_3	0,005	0,303	0,076	0,013

На підставі даних табл. 1, розраховано показники оцінки ефективності використання робочого часу (табл. 2). Дана матриця містить лише ті комбінації параметрів стану, що володіють достатньо високою ймовірністю, а отже реально впливають на показники роботи всього комплексу “зона ремонту – моторна дільниця”.

Слід зауважити, що в процесі розрахунку показників Q_{mi} (5) значення “вагових” коефіцієнтів приймалися на підставі співвідношення $\gamma_n / \gamma_0 = 1 / 10$ та нормувальною умовою $\gamma_n + \gamma_0 = 1, 0$.

Відношення “вагових” коефіцієнтів прийняте, на основі приблизного співвідношення між вартостями обладнання поста і одного двигуна автобуса великого класу.

Табл. 2.

Дані для оцінки ефективності проектних рішень

$P_m \backslash D_i$	D_0	D_1	D_2	D_3	$F(m)$
P_1	0,05	0	0,126	0,126	$4,31 \times 10^{-2}$
P_2	0,118 <i>min max</i>	0,03	0	0,018	$2,37 \times 10^{-2} = \min_i$
P_3	0,182	0,06	0,008	0	$3,57 \times 10^{-2}$

Аналіз отриманих результатів (табл. 2) свідчать, що оптимальною для впровадження виступатиме стратегія P_2 для якої $q(2) = 0,118 = \min_i \max_m$.

Це вказує на переваги варіанту з двопостовим ($m = 2$) виконанням моторного відділення. Для констатації правильності висновку за формулою (9) отриманих результатів, розраховуємо середньостатистичні значення показників Q_{ij} за кожною із стратегій P_m . В результаті приходимо до висновку: функція $F(m)$ має один глобальний мінімум в діапазоні $m = 1, j$

$$F(2) = 2,37 \times 10^{-2} = \min_i$$

Координата екстремуму $F(m)$ співпадає з попередньо отриманим числом $m = 2$. Тобто вибір на користь запропонованого варіанту моторного відділення з двома постами підтвердився.

Висновки. Подано оригінальну методику аналізу прийнятих проектних рішень, що насамперед призначена для пошуку раціональних варіантів організації комплексу “зона ремонту – моторна дільниця” за умови запровадження індивідуального методу ремонту в якості засобу подолання браку оборотних агрегатів.

Описаний підхід до розв’язання проектної задачі у поєднаннях ігрової моделі та моделі марковського дискретного процесу може бути реалізований і в інших практичних випадках, зокрема в процесі виявлення способів раціональної організації взаємодії різних груп стохастичних об’єктів з технологічним рухом заявок поміж ними. Такі групи, наприклад, можуть утворювати засоби ремонту підприємства і суб’єктів ремонту (профілактичних робіт).

Запропоновані в роботі підходи та отримані результати досліджень можна застосовувати в процесі виконання технічного обслуговування і ремонту різних видів спеціалізованих транспортних засобів, що використовуються в галузях народного господарства.

Список використаних джерел

1. Технічна експлуатація та надійність автомобілів / Форнальчик Є.Ю., Оліскевич М.С., Мاستикаш О.Л., Пельо Р.А.: Навч. посібник. – Львів: Афіша, 2004. – 492 с. ISBN 966-325-029-1
2. Румянцев С.И., Боднев А.Г., Бойко Н.Г. и др. Ремонт автомобилей. Издание 2. – М.: Транспорт, 2010. – 327 с.
3. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни і визначення. – К.: Держстандарт України, 1994. – 36 с.
4. Лесько В.І., Кузьмінець М.П., Міщук Є.О. Експлуатація і ремонт машин: конспект лекцій. Частина 1 / В.І. Лесько, М.П. Кузьмінець, Є.О. Міщук. – К.: КНУБА, 2015. – 83 с.
5. Савін Ю.Х. Методика визначення доцільності створення виробничих підрозділів з обслуговування та ремонту транспортних засобів / Ю.Х. Савін, М.В. Митко // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. – Луцьк: Луцький НТУ, 2016. – № 2. – С. 130–138.
6. Шаша И.К. Выбор критерия оценки эксплуатационной надежности автомобилей / И.К. Шаша, А.О. Иванченко, И.В. Рогозин // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2014. – № 3(40) – С. 149-151.
7. Удосконалення математичної моделі зміни технічного стану автобронетанкової техніки / І.К. Шаша, А.О. Иванченко, В.О. Темніков, І.В. Цебрюк // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2015. – № 4(21). – С. 138-142.
8. Андрусенко С.І. Технології підвищення ефективності виробничо-технічної бази підприємств автомобільного транспорту: Навч. посібник / С.І. Андрусенко, О.С. Бугайчук // К.: “Медін-форм”, 2017. – 212 с.
9. Кіндрацький Б.І. Програмне регулювання виробничих процесів на підприємствах автомобільного транспорту / Б.І. Кіндрацький, О.Л. Мاستикаш: Монографія. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2012. – 114 с. ISBN 978-966-7585-10-5
10. Рогозін І.В. Проблеми технічного обслуговування і ремонту засобів рухомості озброєння та військової техніки Повітряних Сил Збройних Сил України за технічним станом / І.В. Рогозін, О.Б. Куренко, С.М. Новічонок // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2012. – № 3. – С. 150-152.
11. Мاستикаш О.Л. Оптимізація параметрів шинного комплексу методами математичного моделювання // Машинознавство, 2006. – № 3. – С. 41-46.

-
12. Дослідження операцій. Ч. 3. Ухвалення рішень і теорія ігор / М.Я. Бартіш, І.М. Дудзяний. – Львів: Видавничий центр Львівського національного університету ім. Івана Франка, 2011. – 277 с.: іл. – Бібліогр.: с. 271-272 (36 назв).
 13. Павленко П.М. Математичне моделювання систем і процесів / Павленко П.М., Філоненко С.Ф., Чередніков О.М., Трейтяк В.В.: Навч. посібник. – К.: НАУ, 2017. – 392 с.
 14. Теорія ймовірностей та математична статистика: Навч. Посібник / Г.І. Кармелюк. – К.: Центр учбової літератури, 2017. – 576 с.
 15. Теорія ймовірностей та математична статистика / В. Барковський, Н. Барковська, О. Лопатин. – К.: Центр учбової літератури, 2019. – 424 с.
 16. Голоскоков О.Є. Основи теорії експоненціальних систем масового обслуговування. Навч. посібник / О.Є. Голоскоков, А.О. Голоскокова, Є.О. Мошко. – Харків.: НТУ “ХПІ”, 2017. – 312 с.
 17. Катренко А. В. Дослідження операцій: Підручник. – Львів: Магнолія Плюс, 2015. – 352 с.

УДК 539.3

DOI 10.36910/775.24153966.2022.73.24

O.A. Mikulich

*Lutsk National Technical University, Applied Mathematics and Mechanics Department***MODELING OF DYNAMIC STRESS STATE FOAM MEDIA UNDER THE ACTION OF CONCENTRATED LOAD**

The influence of impulse concentrated load on the distribution of normalized dynamic hoop stresses in the foam medium is investigated in this paper. For the solving of the non-stationary problem in the case of plane deformation for the structurally inhomogeneous materials, the model of Cosserat continuum is applied. This model enables accounting for the influence of shear-rotation deformation of micro-particles of the medium. In the framework of Cosserat elasticity with the applying of the Fourier transforms for time variable and developing of the boundary integral equation method the solving of the non-stationary problem reduces to the system of singular integral equations, where the components that determining the influence of shear-rotation deformations are selected. The numerical calculations were performed for the polyurethane closed-cell foam with tunnel cavity of circular cross-section under the action of localized impulse load. The developed approach can be used to predict the mechanical behaviour of foam materials under the action of time-variable load based on the analysis of the distribution of dynamic stresses.

Keywords: Impulse Load, Non-stationary Plane Problem, Cosserat Elasticity.

O.A. Мікуліч

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНОГО НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ПІНИСТИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ДІЇ КОНЦЕНТРОВАНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

У роботі досліджується вплив імпульсного зосередженого навантаження на розподіл нормованих динамічних кільцевих напружень у пінистому середовищі. Для розв'язання нестационарної задачі у випадку плоскої деформації для структурно неоднорідних матеріалів використана модель континууму Коссера. Ця модель дозволяє врахувати вплив зсувно-обертальної деформації мікрочастинок середовища. У рамках теорії пружності Коссера із застосуванням перетворень Фур'є для змінної часу та модифікації методу граничних інтегральних рівнянь розв'язання нестационарної задачі зводиться до системи сингулярних інтегральних рівнянь, де виділені компоненти, що визначають вплив деформації зсуву-обертання. Чисельні розрахунки виконано для пінополіуретану із закритими порами у випадку, коли середовище послаблено тунельною порожниною круглого перерізу під дією локалізованого імпульсного навантаження. Розроблений підхід може бути використаний для прогнозування механічної поведінки піноматеріалів під дією змінного у часі навантаження на основі аналізу розподілу динамічних напружень.

Ключові слова: імпульсне навантаження, нестационарна плоска задача, теорія пружності Коссера.

Introduction. In modern production, the creation and using of new structurally heterogeneous composite materials, which have low thermal conductivity, low density, long life and resistance to corrosive environments, is growing significantly. This applies foam materials based on polyurethane in particular.

Also, a lot of manufacturing processes associate with the necessity of applications of localized or concentrated mechanical effect on construction elements containing foam materials. Particularly urgent is the problem when transporting and moving construction elements which manufactured of foam materials. This necessitates the development of methods for calculating of the dynamic stress state of such construction elements, especially under the action of localized dynamic loads, which is due to technological and mechanical influences.

Literature review. In [1-3] shown that under the action of non-stationary distributed load investigation of stress state of foam materials (polyurethane, foam polimethacrylamide, etc.) can be performed in the framework of couple stress elasticity [4]. Under the action of this type of load, the vectors of macro-rotation of the medium and micro-rotation of particles can be considered almost identical.

Along with this, under the action of localized or concentrated forces, such an assumption gives significant errors in numerical calculations. Several numerical and experimental studies show that the distribution of stress fields under the action of concentrated load differs from the corresponding stress fields under distributed load [5-7]. To study such effects in foam materials, it is necessary accounting for the micro-rotations of the particles of the medium, which significantly differ in the vicinity of the application of the load and at remote points of the medium.

The studying of the dynamic stress state of structurally inhomogeneous media under the action of a localized load, the Cosserat moment elasticity is used [8, 9]. In the framework of Cosserat elasticity, the micro-rotation of each particle does not depend on its translational displacement. For describing the elastic behaviour of isotropic linear medium, six physical constants are used: two Lamé's constants and four new constants characterizing the microstructure of the material. In the works of Erofeev V.I. [10] it is shown that for a quadratic-nonlinear medium the number of new constants increases to nine.

This necessitates the development of methods for calculating the dynamic stress state of such structurally inhomogeneous media, especially under the action of localized dynamic loads, which is due to technological and mechanical influences.

There are several works on the construction of solutions of these types of problems, which is associated with a significant complexity of both analytical and numerical calculations. Within the Cosserat continuum, Pal'mov V.A. [11] obtained a solution of the static problem of stress concentration near a circular hole. In the works of Sandru N., the problem of the action of a concentrated force and a concentrated moment in infinite elastic space is solved.

Therefore, the building of solutions of non-stationary problems under the action of concentrated forces, it is necessary to use methods accounting for the influence of defects on the stress state of the medium. Such methods include the method of boundary integral equations.

In [12] the development of the boundary integral equation method to solving time-domain problems of Cosserat elasticity was presented. The numerical implementation of the proposed approach is performed in [2, 12] for the case of a second exterior dynamic problem.

Therefore, **the aim of the research** is developing of boundary integral equation approach for the modelling of the dynamic stress state of foam media with tunnel defects under the action of localized impulse loads. For achieving this aim the apparatus of Cosserat elasticity is used.

Research methodology. Constructive relations. For the solution of non-stationary problem for the case of structurally inhomogeneous medium we use apparatus of Cosserat elasticity where the motion equations of continuum are written as [1-3]:

$$\sigma_{ji,j} + X_i = \rho \ddot{u}_i, \tag{1}$$

$$\epsilon_{kji} \sigma_{ij} + \mu_{jk,j} + Y_k = J \ddot{\phi}_k, \tag{2}$$

where σ_{ji} is the force stress, μ_{ji} is the couple stress, ρ is the material density, $X=\{X_i\}$ is the mass forces vector, $Y=\{Y_k\}$ is the couple forces vector, J is the inertia of unit volume rotation, ϵ_{klm} is the permutation symbol, $u=\{u_i\}$ is the displacement vector, $\phi=\{\phi_k\}$ is the rotation vector. Functions u and ϕ are continuous functions. Here and further the Einstein summation convention is used. A comma at subscript denotes differentiation with respect to a coordinate indexed after the comma, i.e. $u_{,i}=\partial u_j/\partial x_i$. Under the condition of plane strain indices vary from 1 to 2, and $k=3$.

The relations for determining force and couple stresses are written as [4]:

$$\sigma_{ji} = (\mu + \alpha)\gamma_{ji} + (\mu - \alpha)\gamma_{ij} + \lambda\gamma_{kk}\delta_{ij}, \tag{3}$$

$$\mu_{ji} = (\gamma + \varepsilon)\kappa_{ji} + (\gamma - \varepsilon)\kappa_{ij} + \beta\kappa_{kk}\delta_{ij},$$

where $\alpha, \beta, \gamma, \kappa$ are the elastic constant required to describe an isotropic constrained Cosserat elastic solid, λ, μ are Lamé parameters, $\gamma_{ij}=u_{i,j} - \epsilon_{kji}\phi_k$ is the asymmetric deformation tensor, $\kappa_{ij}=\phi_{i,j}$ is the torsion bending tensor.

Statement of the problem. Let's consider a foam medium with tunnel cavity of sufficiently small diameter under a plane strain condition (Fig. 1, a). We denote a configuration of medium by Ω and the boundary of tunnel cavity with constant cross-section by L . The center of gravity is placed at the origin of Cartesian coordinate system $x_1Ox_2x_3$.

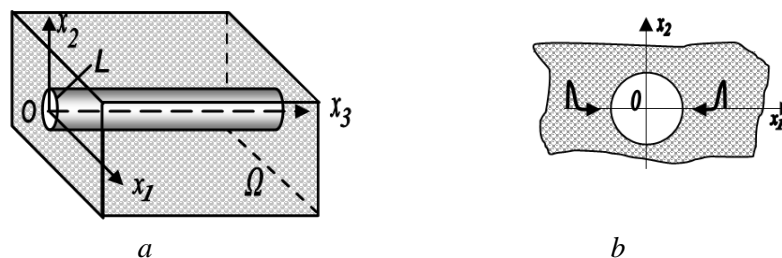


Fig. 1. Model of the research object

The problem consists in the determination of the dynamic stresses at foam medium with tunnel cavity of circular cross-section under the action of impulse localized loads, which are applied in internal points (Fig. 1, b).

The boundary conditions in Cosserat elasticity are written as:

$$\sigma_n|_L = \sigma(t, \delta), \quad \tau_{sn}|_L = \tau(t, \delta), \quad \mu_n|_L = 0, \tag{4}$$

where $\sigma(t, \delta)$ and $\tau(t, \delta)$ are the function that describes stresses, which are caused action of an impulse load $P(t)$, which is applied on the distance δ to the cavity's boundary in radial direction, n is the normal to the boundary of the cavity.

Solution of the non-stationary problem. For the solving non-stationary problem Fourier transforms for time variable [5] and modification boundary integral equation method [6] were used. The representations for transforms of displacements and microrotations are written [6]:

$$\hat{u}_i = \int_L p_j \cdot U_{ij}^* dL + \int_L m_k \cdot \Phi_{kj}^* dL + \int_\Omega X_j \cdot U_{ij}^* d\Omega + \int_\Omega Y_k \cdot \Phi_{kj}^* d\Omega, \quad (5)$$

$$\hat{\phi}_k = \int_L p_j \cdot U_{kj}^{**} dL + \int_L m_k \cdot \Phi_{kk}^{**} dL + \int_\Omega X_j \cdot U_{kj}^{**} d\Omega + \int_\Omega Y_k \cdot \Phi_{kk}^{**} d\Omega, \quad (6)$$

where U_{ij}^* , U_{kj}^{**} , Φ_{kj}^* , Φ_{kk}^{**} are the fundamental functions for displacements and microrotations [6], p_j , m_k are unknown functions.

Inserting the representations of displacements (5) and microrotations (6) to the force and couple stress formulas (3) we obtain the integral dependencies for absent of couple forces:

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_n &= \int_L (f_1(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) p_1 + f_2(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) p_2 + f_3(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) m_3) dL(\mathbf{x}^0) + \int_\Omega (\Phi_1(\mathbf{x}, \delta) P + \Phi_2(\mathbf{x}, \delta) \bar{P}) d\Omega; \\ \hat{\tau}_n &= \int_L (g_1(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) p_1 + g_2(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) p_2 + g_3(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) m_3) dL(\mathbf{x}^0) + \int_\Omega (\Gamma_1(\mathbf{x}, \delta) P + \Gamma_2(\mathbf{x}, \delta) \bar{P}) d\Omega; \\ \hat{\mu}_n &= \int_L (G_1(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) p_1 + G_2(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) p_2 + G_3(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) m_3) dL(\mathbf{x}^0), \end{aligned} \quad (7)$$

where f_m , g_m , G_m , Φ_k , Γ_k are known functions, which contain Bessel function of third kind.

Integration of functions f_m , g_m , G_m for the small value of argument leads to the singularity. To establish their characteristic we used the asymptotic expressions for Bessel function of the third kind for small values of the argument [7].

For the obtaining of integral equations of the problem the developed in [8] approach for the time-domain problem of classical theory of elasticity are used. For the determining of the unknown functions p_1 , p_2 , m_3 the Fourier transforms of boundary condition (4) are satisfied. We obtain the system of integral equations:

$$\begin{aligned} \frac{\text{Re}(q)}{2} + \mathbf{v} \cdot \mathbf{p} \cdot \int_L (f_1(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) q d\zeta + f_2(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) \bar{q} d\bar{\zeta} + f_3(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) m_3 dL) &= - \int_\Omega (\Phi_1(\mathbf{x}, \delta) P + \Phi_2(\mathbf{x}, \delta) \bar{P}) d\Omega; \\ \frac{\text{Im}(q)}{2} \mathcal{A}_1 + \mathbf{v} \cdot \mathbf{p} \cdot \int_L (g_1(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) q d\zeta + g_2(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) \bar{q} d\bar{\zeta} + g_3(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) m_3 dL) &= - \int_\Omega (\Gamma_1(\mathbf{x}, \delta) P + \Gamma_2(\mathbf{x}, \delta) \bar{P}) d\Omega; \\ \frac{m_3}{2} I + \mathbf{v} \cdot \mathbf{p} \cdot \int_L (G_1(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) q d\zeta + G_2(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) \bar{q} d\bar{\zeta} + G_3(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) m_3 dL) &= 0, \end{aligned} \quad (8)$$

where $p dL = -I q d\zeta$, $p = p_1 + I p_2$ is the unknown complex function, $\zeta = x_1^0 + I x_2^0$, $\mathcal{A}_1 = (1 - (\alpha / \mu)^2)$ is the constants. Here the integrals are understood in the sense of Cauchy principal value.

For the numerical solving of the system of integral equations (8) the algorithm [8] was applied. It was used method of mechanical quadrature and collocation method.

Calculations of the hoop stress transforms on the boundary of the cavity of the medium are performed by formulas [6]. Substituting in these formulas the potential representations for displacements (5) and microrotations (6), selecting irregular parts and completing limit transition the transforms of the hoop stresses on the boundary are written:

$$\hat{\sigma}_\theta = \frac{\text{Re}(q)}{2} \mathcal{A}_2 + \mathbf{v} \cdot \mathbf{p} \cdot \int_L (h_1(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) q d\zeta + h_2(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) \bar{q} d\bar{\zeta} + h_3(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) m_3 dL); \quad (9)$$

where $h_k = h_k(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0)$ are known functions, \mathcal{A}_2 is the constant ($\mathcal{A}_2 = \nu / (1 - \nu)$ for plane strain).

Modified discrete Fourier transform is used for calculation of originals of the dynamic hoop and radial stresses [5].

Numeric calculation. Within the framework of the Cosserat elasticity, based on the developed boundary integral equation method [6] for elastic foam medium, we investigate the distribution of dynamic hoop stresses at the boundary of a circular cross-section cavity. Numerical calculations are performed for the case of the dynamic stress state of the medium is caused by the action of the system of concentrated non-stationary forces $P_j = P_j^{(1)} + i P_j^{(2)}$. Systems of these forces are applied at the internal points of the medium (a_{1j}, a_{2j}) , $j = \overline{1, J}$. The vector of mass forces can be represented as:

$$X_1 = \sum_{j=1}^N P_{1j} \delta(x_1 - a_{1j}) \delta(x_2 - a_{2j}), \quad X_2 = \sum_{j=1}^N P_{2j} \delta(x_1 - a_{1j}) \delta(x_2 - a_{2j}). \quad (10)$$

The functions $P_{1j}(t)$ and $P_{2j}(t)$ in (10) describing change of impulse loads over the time are chosen in form [8]:

$$\varphi(\tilde{t}) = p_* \tilde{t}^{n_*} e^{-\alpha_* \tilde{t}}, \quad \tilde{t} > 0, \quad n_* \geq 0, \quad (11)$$

where $\tilde{t} = \frac{t \cdot c_l}{a}$ is a dimensionless time parameter, $c_l = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$ is the speed of expansion wave, p_* , n_* , α_* are the constants, which are characterized duration of impulse load, a is some characteristic scale. For numerical calculations the value of characteristic scale is chosen as $a = a_1 \cdot 10^3$ m, where a_1 is radius of cavity cross-section.

For numerical calculations it was assumed that the concentrated dynamic forces were applied in the internal points of the foam medium on a distance of $(\pm 1.5a_1; 0)$ from the centre of gravity. Here a_1 is the radius of the cavity cross-section. The intensity change of the concentrated forces over the time was taken in the form (11) for the values of constants $\alpha_* = 4$, $n_* = 2$, $p_* = 30$. The calculation of normalized hoop stresses on the boundary of the cavity was performed for the interval of a dimensionless time parameter $\tilde{t} \in [0; 20]$ with impulse duration $t_* = 2$.

Numerical calculations were performed for the case of the cavity cross-section has diameter is 1 cm, which corresponds to the conditions of plane strain. For ensuring the accuracy of the calculations, 120 points on the boundary of the cavity cross-section were selected [8].

Dynamic hoop stresses were calculated for polymethacrylamide closed-cell foam (Rohacell WF300) [1]. For the numerical determining of the dynamic hoop stresses the physic characteristics of the closed-cell foam were chosen [1]: cell size $d = 0.6$ mm, material density $\rho = 380$ kg / m³, Poisson's ratio $\nu = 0.13$, Young's modulus $E = 637$ MPa, characteristics of material microstructures are $\alpha = 2.85$ MPa, $\gamma = 182$ N, $\varepsilon = 494$ N.

Fig. 2, a shows the results of numerical calculations of the normalized dynamic hoop stresses at the boundary of the circular cross-section tunnel cavity for the different values of the angle θ . Here, curve 1 corresponds to the stress values at point $\theta = 90^\circ$ on the boundary of the cross-section of the cavity, curve 2 and 3 correspond to the case $\theta = 45^\circ$ and $\theta = 0$ accordingly. It was assumed that $\bar{\sigma}_\theta = \sigma_\theta / \sigma_0$, where σ_0 is the maximum values of stresses arising from the action of impulse concentrated forces in the medium in the absence of a hole.

For the evaluation of the efficiency of using the model of Cosserat elasticity for the investigation of the dynamic stress state of the foam materials, we compare the results obtained based on moment theory elasticity equations with the results, which are calculated based on classical elasticity of theory. We use the approach described in [9] for the calculation of dynamic stress distribution in the framework of classical elasticity. For the numerical calculations, we used the same values of the physic characteristics of polymethacrylamide foam without accounting for the characteristics of the microstructure of the material.

According calculation results for closed-cell Rohacell WF300 foam [1] in the framework of classical theory of elasticity are shown in Fig. 2, b. Here, curves 1-3 correspond to the same values as those chosen for the Cosserat elasticity.

The comparing of the curves of Fig. 2 is shown that distribution of normalized hoop stresses on the boundary of the tunnel cavity differs not only by them magnitudes but also the character of their distributions. However, maximum values of the hoop dynamic stresses arise around same points on the boundary of the cavity.

Based on the numerical calculation results it was establish that in the case of accounting for the influence of the microstructure of the material in the framework of Cosserat elasticity, the maximum values of the normalized hoop dynamic stresses on the boundary of the tunnel cavity are smaller in 1.5 times than without accounting for the influence of the microstructure of medium. Such vibration-absorbing properties of foam materials are confirmed on the basis of experimental studies [18].

Fig. 2, a shows, that the attenuation of wave processes occurring in a foam medium under the action of a non-stationary loads can be more correctly described on the basis of the equations of the theory of moment elasticity (Cosserat continuum). Such effects cannot be described within the framework of classical elasticity of theory.

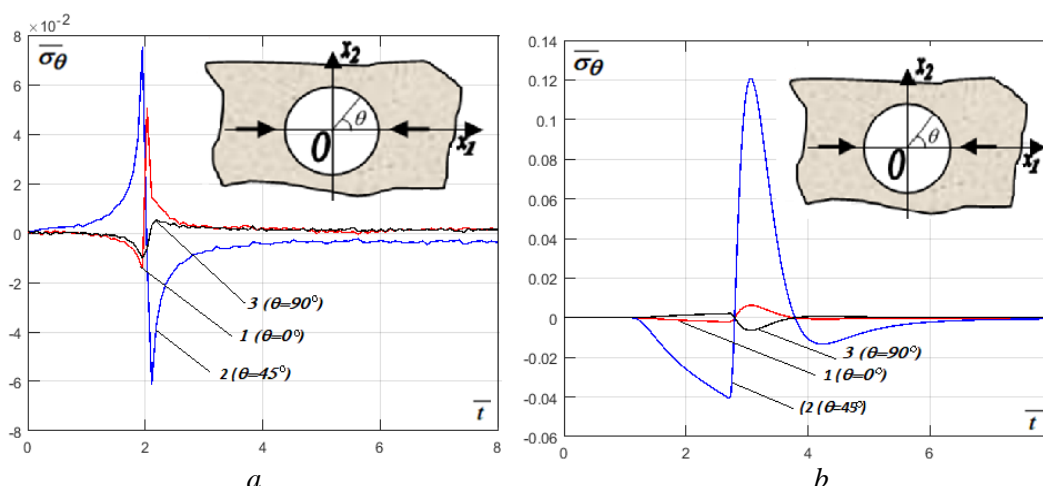


Fig. 2. The distribution of normalized hoop stresses on the boundary of a circular tunnel cavity in foam polyurethane WF 300 (Cosserat elasticity –a, classical elasticity - b)

Conclusions. Basic on the developing for Cosserat elasticity modify boundary integral equation method [6] and according to developed approach in the framework of classical elasticity [10] the comparison of the distribution of normalized dynamic hoop stresses in foam materials is performed. The results of the numerical calculations confirm the necessity of using the refined theories of the continuum mechanics (moment theory of elasticity – Cosserat elasticity) for investigation the dynamic stress state of foam materials under the action of time-variable concentrated loads.

Based on the numerical calculations, it is established that the distributions of the normalized hoop stress in foam media with accounting for the influence of material microstructure (Cosserat elasticity) and without accounting for this influence (classical elasticity) have not only distinctive types of stress distribution but also by their magnitudes. Besides, using the apparatus of Cosserat elasticity permit more correctly to describe vibration-absorbing properties of foam materials, which is confirmed by several experimental studies [1-3, 10].

An adaptive approach can be used for the investigation of the effect of time-variable load on the distribution of hoop stresses in foam media and for prediction of the mechanical behaviour of these types of materials.

References

1. W.B. Anderson, R.S. Lakes, Size effects due to Cosserat elasticity and surface damage in closed-cell polymethacrylimide foam, *J. Mater. Sci.* 29 (1994) 6413–6419.
2. R.S. Lakes, Experimental microelasticity of two porous solids, *Int. J. Solids Struct.* 22 (1986) 55–63.
3. W.B. Anderson, R.S. Lakes, M.C. Smith, Holographic evaluation of warp in the torsion of a bar of cellular solid, *Cell. Polym.* 14 (1995) 1–13.
4. W. Nowacki, *Linear Theory of Micropolar Elasticity*, Springer, New York, 1974.
5. Ramamohan, K.; Kim, D.; Hwang, J.: *Fast Fourier Transform: Algorithms and Applications*, Springer, New York, 2010.
6. H. Sulym, O. Mikulich, V. Shvabyuk, Investigation of the Dynamic Stress State of Foam Media in Cosserat Elasticity, *Mechanics and Mechanical Engineering* 22(3) (2018) 739-750.
7. N.N. Lebedev, *Special Functions & Their Applications*, Prentice-Hall, Englewood Cliff, N.J, 1965.
8. O. Mikulich, V. Shvabyuk, H. Sulym, Dynamic Stress Concentration at the Boundary of an Incision at the Plate under the Action of Weak Shock Waves, *Acta Mechanica et Automatica* 11(3) (2017) 217-221.
9. O.A. Mikulich, V.I. Shab'yuk, Interaction of weak shock waves with rectangular meshes in plate, *Odes'kyi Poliethnichnyi Universytet. PRASTI* 2(49) (2016) 104-110.
10. R.S. Lakes, Experimental methods for study of Cosserat elastic solids and other generalized elastic continua, *Continuum models for materials with micro-structure* 1 (1995) 1–22.

Рецензент: Шваб'юк Василь Іванович, доктор технічних наук, професор

Д.А Гончарук¹, О.М. Гріпачевський², О.В. Хоменко¹, Г.М. Молчановська¹,
Г.О. Максимова¹

¹ Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича, НАН України

² Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ СПЛАВУ Fe - 55 % мас. Ga

Отримано сплав Fe-Ga зі складом, близьким до еквіатомного в процесі спікання суміші порошку розпиленого заліза марки ПЖР 2.200.26 та литого галію марки Гл-1 в масовому співвідношенні компонентів відповідно як 45:55, в нейтральному середовищі (аргоні високої чистоти) при температурі 1300 °C протягом 2-х год. Досліджено особливості сплавоутворення в даних умовах та встановлено, що структура сплаву складається переважно з кристалів інтерметалідів Fe₃Ga₄, Fe₆Ga₅ та Fe₃Ga. Встановлено, що незважаючи на відносно низьку температуру сплавлення та нетривалу ізотермічну витримку фазовий склад сплаву близький до рівноважного, що ймовірно обумовлено прискоренням фізико-хімічних процесів сплавоутворення при використанні порошкового заліза.

Ключові слова: сплави системи Fe-Ga, фазоутворення, інтерметаліди, діаграми стану

Д.А Гончарук, А.М. Грипачевский, Е.В. Хоменко, Г.М. Молчановская,
Г.А. Максимова

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ СПЛАВА Fe- 55 % мас. Ga

Получен сплав Fe-Ga, состава, близкого к эквипотомному, в процессе спекания в нейтральной среде (аргоне высокой чистоты) при температуре 1300 °C в течение 2-х часов. В качестве исходных компонентов использовали порошок распыленного железа марки ПЖР 2.200.26 и литой галлий марки Гл-1 в массовом соотношении 45:55 соответственно. Исследованы особенности сплавообразования в данных условиях и показано, что структура сплава состоит преимущественно из кристаллов интерметаллидов Fe₃Ga₄, Fe₆Ga₅ и Fe₃Ga. Установлено, что, несмотря на относительно низкую температуру сплавления и непродолжительную изотермическую выдержку, фазовый состав сплава близок к равновесному, что вероятно обусловлено ускорением физико-химических процессов при использовании порошкового железа.

Ключевые слова: сплавы системы Fe-Ga, фазообразование, интерметаллиды, диаграммы состояния

D.A. Goncharuk, A.M. Gripachevsky, E.V. Khomenko, G.M. Molchanovskaya,
G.A. Maksimova

INVESTIGATION OF THE FEATURES OF THE FORMATION OF THE STRUCTURE OF THE ALLOY Fe 55 % wt. Ga

Possibilities of obtaining Fe-Ga alloy with a composition close to equiatomic by powder metallurgy have been investigated. Peculiarities of structure and phase formation in the Fe-Ga system in the conditions of sintering of a mixture of sprayed iron powder ПЖР 2.200.26 2.200.26 and cast gallium brand GL-1 at a mass ratio of components of 45:55, respectively, in a neutral medium (high purity argon) at temperature 1300 °C for 2 hours. It was found that despite the relatively low sintering temperature and short isothermal holding, the structure of the powder alloy is close to equilibrium, in contrast to cast alloys, which, according to numerous literature data, require several weeks of exposure to equilibrium. It is probable that the acceleration of physicochemical processes of alloying is due to the use of powder metallurgy methods. It was determined that the alloy structure consists mainly of large and dispersed, probably secondary crystals, the composition of the central part of which is close to the composition of the intermetallic Fe₃Ga₄, and the peripheral zones - to the intermetallic Fe₆Ga₅. It was determined that the microhardness of these crystals, ranges from 4 to 7 MPa. In the structure of the obtained alloy, a number of ultrafine crystals with a composition close to the composition of the intermetallic Fe₃Ga were also found. The variable composition of intermetallics that make up the structure of the obtained alloy is probably due to the peculiarities of the kinetics of phase transformations in this system under nonequilibrium conditions.

Keywords: alloys of the Fe-Ga system, phase formation, intermetallic compounds, phase diagrams

Постановка проблеми. Сплави металів з галієм наразі мають привабливі перспективи для використання у різних галузях техніки. Унікальні характеристики галію, які знаходяться на межі металів і неметалів, та його відносна біологічна безпека, визначають унікальні можливості для створення на його основі матеріалів із вдалим поєднанням функціональних характеристик [1]. В цьому сенсі особливий інтерес становлять дослідження матеріалів подвійної системи Fe-Ga з високим вмістом галію, що характеризуються складним характером взаємодії і формуванням цілого ряду інтерметалідів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Діаграму стану системи Fe-Ga почали активно вивчати з другої половини минулого сторіччя. Найбільш відомими є роботи С. Desarathy та W. Hume-Rothery [2], W. Koster [3,4], що були об'єднані та проаналізовані О. Kubaschewski О. [5], і потім дещо уточнені Н. Okamoto [6]. На початку 2000 р. інтерес до системи Fe-Ga був стимульований розробкою галфенолів - феромагнітних сплавів на основі заліза з аномально високою магнітострикцією, що вміщують 17-18 або 28-30 ат. %, галію [7]. З того часу активно проводяться роботи, пов'язані із технологіями отримання цих матеріалів, тому не дивно, що акценти наукових досліджень наразі змістилися на концентраційні області діаграми стану системи Fe-Ga з високим вмістом заліза [8]. В той же час, області з більшими концентраціями галію залишилися дещо поза увагою. Як показано Е. Мооге і інш. [9], досі існують певні розбіжності щодо фазових перетворень у вказаній системі, зокрема в області поблизу еквіатомного складу. Це пов'язано із існуванням інтерметалідів різного складу, особливості формування яких в структурі матеріалу, вочевидь, залежать від того, наскільки умови термообробки далекі від рівноважних (рис.1).

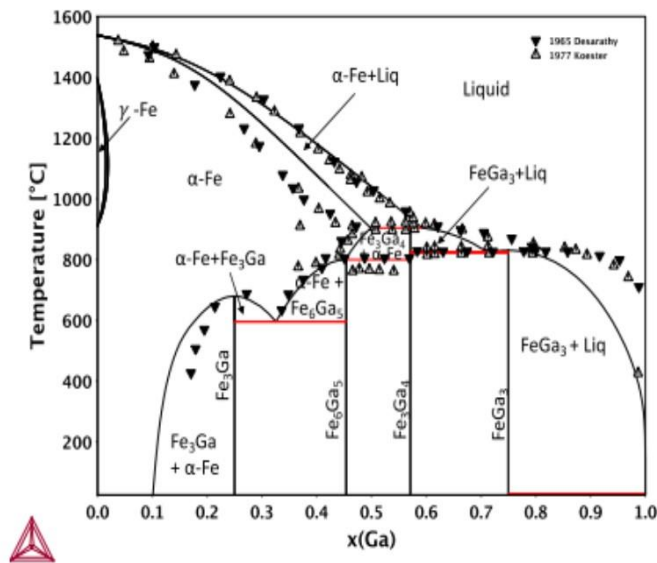


Рис.1. Рівноважна фазова діаграма Fe-Ga, побудована за розрахунками CALPHAD (суцільні лінії), у порівнянні з експериментальними даними, отриманими С. Desarathy та Koster , [10].

На практиці встановлено, що для концентраційної області до 30 % мас. Ga, характерною є низька швидкість дифузійно-контрольованих перетворень, що сприяє збереженню при кімнатній температурі нерівноважних високотемпературних фаз, та сильна залежність властивостей сплавів від режимів їхньої обробки. Тому для отримання рівноважної структури сплавів потрібний тривалий відпал (часто впродовж тижнів або навіть місяців) [8]. В той же час мало вивченими залишаються матеріали з більшим вмістом галію, отримання яких згідно діаграми стану потребує нижчих температур. Такі матеріали мають значний потенціал як легуючі добавки, лігатури, та функціональні матеріали різноманітного призначення. До того ж, в літературі є малочисельні відомості щодо спроб використати методи порошкової металургії при отриманні даного класу матеріалів, незважаючи на відомий факт, що використання порошоків в якості вихідних матеріалів прискорює фізико-хімічні процеси сплавоутворення. Наприклад, в роботі [10], встановлено, що механоактивація суміші порошкового заліза із галієм сприяє утворенню мікроструктури за механізмами рідкофазного спікання вже в області твердофазних реакцій. Це може стати перспективним напрямком в області технічних розробок, орієнтованих на підвищення ефективності виробництва цих матеріалів.

Постановка завдань дослідження. Метою роботи є дослідження особливостей структуроутворення сплаву Fe-55 % мас. Ga, отриманого з використанням порошку заліза, що забезпечує умови відносно низьких температур та нетривалих ізотермічних витримок для сплавлення компонентів.

Викладення основного матеріалу. В якості вихідних компонентів в роботі використовували порошок заліза розпилений марки ПЖР 2.200.26 ГОСТ 9849-86 (99,9 % мас. Fe) і галій у зливках марки Гл-1 ГОСТ 12797-77 (99,9 % мас. Ga).

Наважку твердого галію поміщали в контейнер з графіту марки МПГ-7, який нагрівали в середовищі очищеного азоту до температури $31 \pm 0,5^\circ\text{C}$. В отриманий розплав засипали порошок заліза, попередньо відсіяний через сито з розмірами чарунок 0,100 мм. Масове співвідношення заліза і галію було розраховане таким чином, щоб отримати склад суміші, близький до еквіатомного, і становило 45 : 55. Компоненти змішували розтиранням вручну в агатовій ступці протягом 30 хв. Необхідно відзначити, що досягти повністю рівномірного розподілу компонентів не вдається завдяки диспергуванню розплаву галію і оксидної плівки, що миттєво виникає на його поверхні і перешкоджає змочуванню розплавом частинок заліза. З метою видалення залишкових забруднень і вологи підготовлену суміш поміщали у контейнер з графітовою перфорованою кришкою, і витримували у вакуумній шафі при залишковому тиску 10^{-1} Па при температурі 200°C протягом 2-х годин. Охолодження контейнера до кімнатної температури проводили в середовищі аргону вищого гатунку (99,993 % мас. Ar, ДСТУ 10157:2019). Потім контейнер нагрівали у вакуумній індукційній печі до 1300°C з середньою швидкістю $7,5$ град/хв при залишковому тиску 10^{-1} Па. По досягненню температури витримки у робочу камеру печі напускали аргон вищого гатунку під тиском $0,2$ МПа і підтримували ці умови термообробки до 2-х годин. Режим сплавлення компонентів було вибрано за даними діаграми стану системи Fe-Ga, згідно якої розплав еквіатомного складу кристалізується при температурах нижчих 1037°C (див. рис. 1) і враховуючи необхідний ступень перегріву і час для гомогенізації розплаву. Охолодження контейнера до кімнатних температур здійснювали разом з піччю.

Фазовий склад отриманого сплаву визначали за методиками рентгенофазового аналізу та використовуючи локальний мікрорентгеноспектральний аналіз. Для металографічного аналізу зливок виготовляли стандартні шліфи, які вивчали методами оптичної та растрової електронної мікроскопії. Для визначення мікроструктури зливку використовували травлення поверхні шліфів реактивом складу: FeCl_2 – 25 г, HCl (розчин, 50 мл на 120 мл води). Мікродіюметричні вимірювання виконували мікротвердоміром ПМТ-3 при навантаженні $0,49$ Н.

В результаті експерименту було отримано компактні щільні зливки, що легко руйнуються з характерним крихким зломом (рис.2).



Рис. 2. Зовнішній вигляд зливка з плівкою на поверхні (а) та без неї (б)

На зовнішній стороні злитків виявлено тонку плівку, що має чорний колір і подібна до графіту (рис. 2а - через відбиття світла від гладкої поверхні плівка виглядає світлою). Основна частина поверхні руйнування має множинні фасетки, утворені через руйнування структурних складових з різним ступенем крихкості (рис.3, а), та ділянки інтерметалітного зламу (рис. 3, б). В місцях виходу пор на поверхню спостерігаються кристалічні утворення, які, можливо, несуть у собі спадкові ознаки первісної форми частинок заліза (рис.3, в, г).

Аналізуючи характер структуроутворення матеріалу в першу чергу необхідно керуватися рівноважними діаграмами, які дозволяють встановити зміни фазового складу, характер взаємодії між компонентами, області існування та складу рівноважних фаз. У відповідності до діаграми стану системи Fe-Ga (див. рис.1), охолодження нижче лінії ліквідусу призводить до кристалізації сплаву, яка починається з виділення з розплаву α -Fe фази – твердого розчину галію в α -

модифікації заліза. Склад первинних кристалів по мірі їх зростання, збіднюється тугоплавким компонентом (вздовж лінії солідуса) при охолодженні аж до температури 906 °С, при якій за перитектичною реакцією з твердо-рідкої суміші фаз починають утворюватися інтерметалід Fe_3Ga_4 , а нижче температури 800 °С – Fe_6Ga_5 . Таким чином, рівноважні сплави із складом близьким до еквіатомного повинні мати 2-хфазну структуру, що складається з кристалів Fe_3Ga_4 та Fe_6Ga_5 .

Плівка на поверхні зливоків достатньо щільна і відносно легко відокремлюється від основи без розкрошування, що дало можливість провести рентгенівський аналіз її складу, який показав наявність переважно вуглецю (в межах чутливості методу інших елементів в складі плівки не виявлено) (рис.4, б). Водночас з цим, в донній частині графітового контейнера в місці його безпосереднього контакту зі зливком є ознаки ерозії, що, ймовірно, пов'язано із розчиненням матеріалу тигля в розплаві в процесі сплавлення компонентів. Контрольне зважування зливка, ретельно зачищеного від плівки механічною обробкою та ультразвуком в середовищі етилового спирту, показало відсутність втрати ваги (в межах похибки аналітичних ваг) в процесі термообробки зразків. Плівка не реагує з сумішшю концентрованих азотної та сірчаної кислот при кімнатній температурі протягом 10 годин і тільки обробка гарячою сумішшю (60 °С) азотної кислоти з бертолетовою сіллю близько 4-х годин за методом Броді дозволила виділити характерні волокна мелітової кислоти (графітової кислоти).

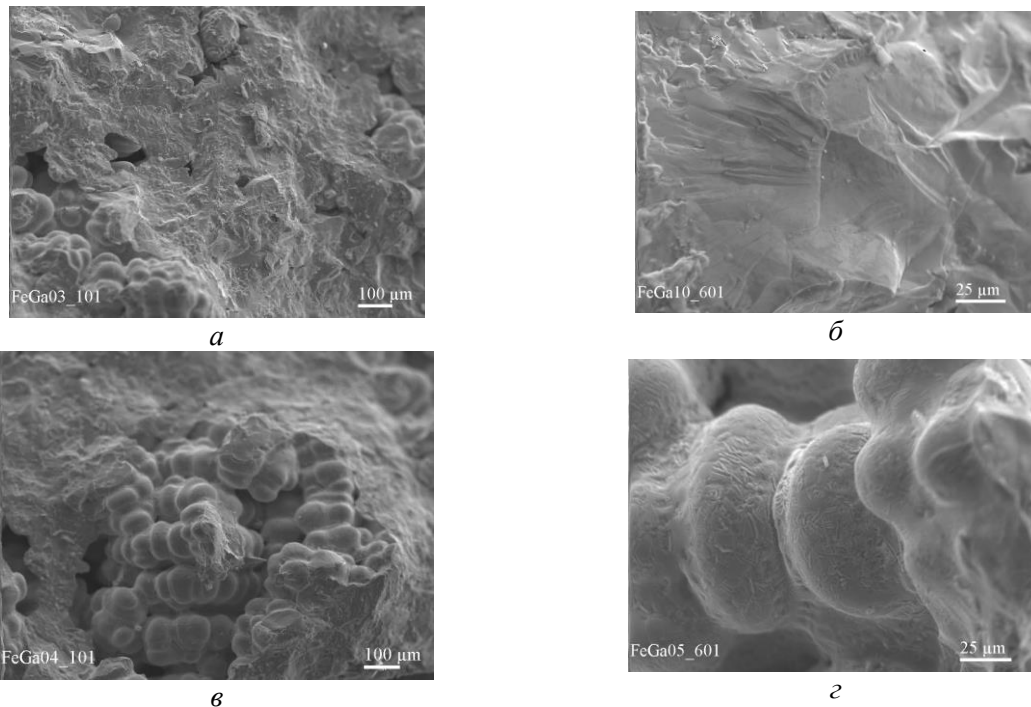


Рис 3. Електронно-мікроскопічне зображення поверхні зламу зливка: загальний рельєф руйнування (а), інтеркристалітний злам (б); кристалічні утворення на поверхні зламу (в, г).

Рентгенофазовий аналіз отриманого зливка показав, що його структура за фазовим складом подібна до рівноважної і складається переважно з цих двох фаз - Fe_6Ga_5 та Fe_3Ga_4 (рис. 4, а).

Металографічний аналіз шліфів показав, що основний об'єм зливка займає світла фаза Ph1 - у вигляді як крупних протяжних так і дрібних голкоподібних кристалів, які окантовані на поверхні прошарком дифузійної зони іншого складу Ph2 (рис. 5, а).

Крупні виділення фази Ph1 мають полізеренну структуру з множинними субмікроскопічними пластинчастими утвореннями в об'ємі, склад яких визначити не вдається через їхні малі розміри (рис.5, б). Простір між кристалами світлої фази Ph1 заповнений дисперсними кристалами темної фази Ph 3 (рис.5, в).

Додатково слід зазначити, що при обробці поверхні шліфа реактивом, чутливим саме до заліза, стійкість до травлення в ряду фаз Ph 1 - Ph 2 - Ph 3 зменшується, що опосередковано вказує на збільшення в них вмісту заліза.

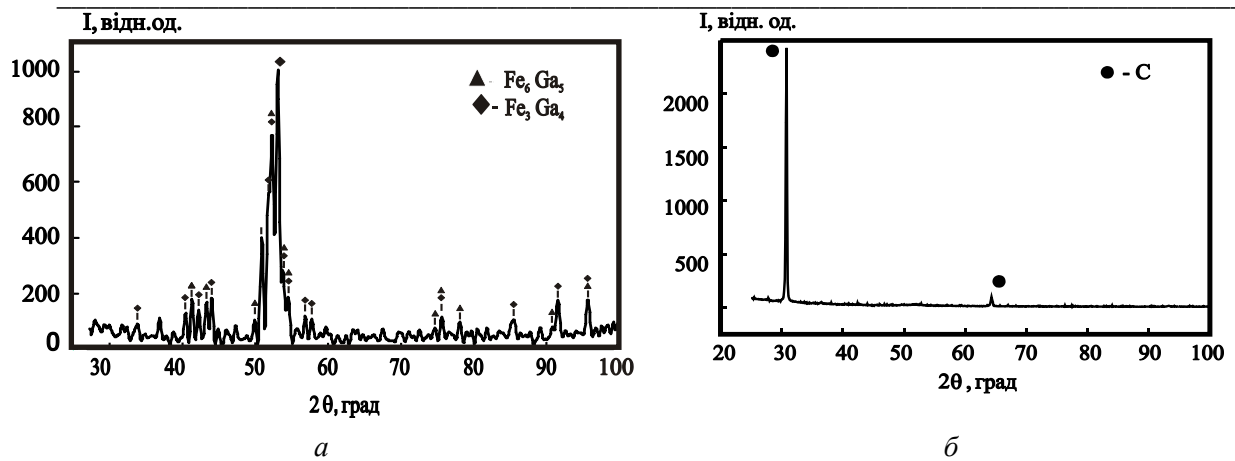


Рис. 4. Дифрактограми зливка (а) та плівки, утвореної на його поверхні під час сплавлення компонентів (б) (Co-K_α-випромінювання).

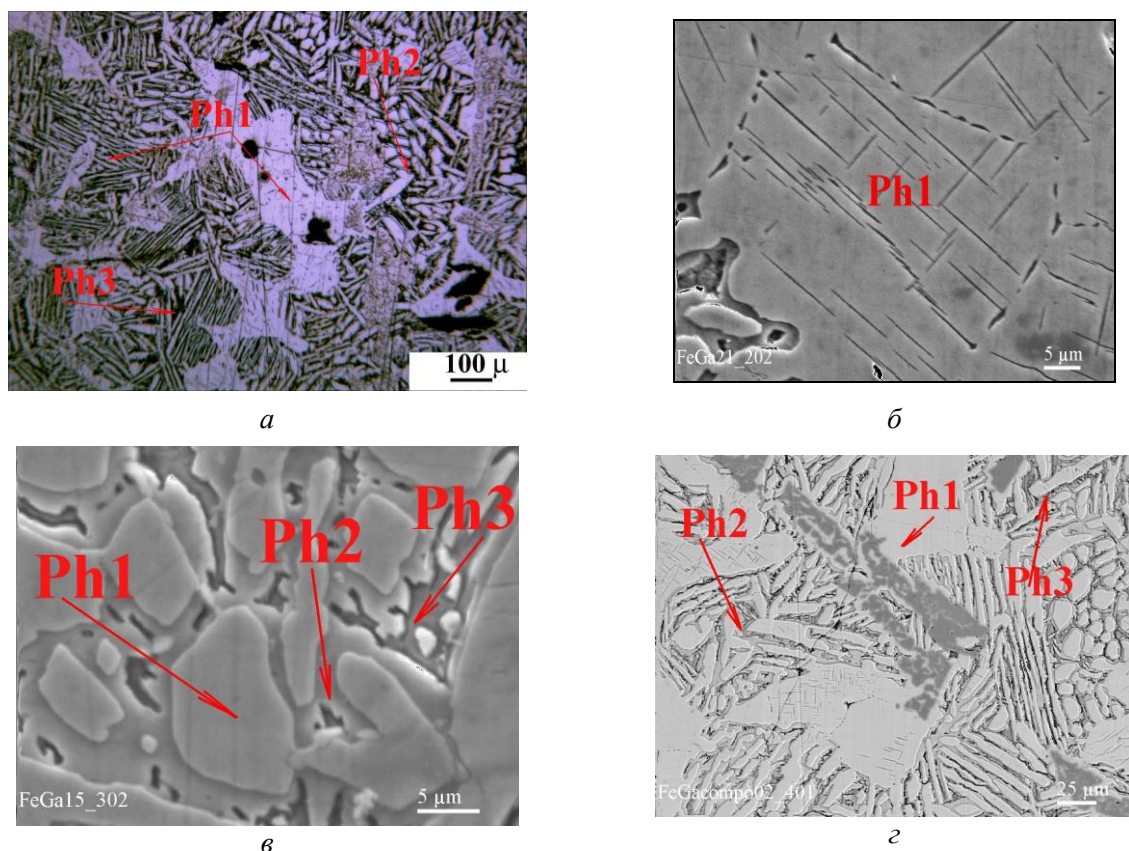


Рис. 5. Мікроструктура сплаву з позначенням фаз, склад яких описаний в тексті: (а, в) - оптична мікроскопія; (б, г) – растрова електронна мікроскопія, режим вторинних та зворотних електронів відповідно.

Деяку якісну інформацію про розподіл хімічних елементів між фазами можна отримати також в режимі «зворотних електронів», в якому області концентрації елементів з більшою атомною масою виглядають на зображенні світлішими через більшу в цьому випадку інтенсивність відбитого пучка електронів. Судячи з фото (рис.5, г) має місце зміна складу кристалів фази Ph1 із збільшенням концентрації заліза на їх поверхні, однак локальне скупчення цього елементу іноді спостерігається і в внутрішніх об'ємах кристалів (рис.5, г).

Виходячи з результатів мікрорентгеноспектрального аналізу, вміст галію в фазі Ph1 становить 54...57 % ат., що близько до складу інтерметаліду Fe₃Ga₄, із вмістом галію від 55 до 59 ат.% згідно [5, 7]. Необхідно відмітити досить високу мікротвердість інтерметаліду в структурі отриманого сплаву, яка в середньому складає 5,5 ГПа, сягаючи на окремих ділянках значень до 7 ГПа. Фазова зона Ph 2, що виявлена на поверхні кристалів Ph1 має у складі галію в кількості

44...46 % ат., що більш відповідає складу інтерметаліду Fe_6Ga_5 , який згідно діаграми стану системи Fe-Ga утворюється в процесі розкладання α' -Fe твердого розчину при температурах нижче 800 °C, і має область розчинності в широкому інтервалі температур на рівні 44,5-45,5 ат.% Ga згідно [9]. У складі дисперсної фази Ph3 кількість галію виявлена на рівні 32...33 % ат., що найвірогідніше вказує на формування інтерметаліду Fe_3Ga , що утворюється ймовірно при розпаді залишків α -Fe твердого розчину при температурах нижче 680 °C. Мікротвердість цих ділянок, як і зон на поверхні кристалів Ph1, визначити не вдається через їхні малі розміри – максимум до 5 мкм. Згідно рівноважної діаграми стану системи Fe-Ga в температурному інтервалі 906–800 °C з α -Fe твердого розчину виділяється Fe_3Ga_4 , при 800–625 °C – Fe_6Ga_5 , а при 625 °C евтектоїдний склад розпадається на Fe_3Ga та Fe_6Ga_5 . В роботі [8] зазначається, що область існування інтерметаліду Fe_3Ga в нерівноважних структурах, принаймні в концентраційних областях з боку залізного кута діаграми, відчутно ширше ніж це передбачається усіма існуючими рівноважними діаграмами. Очевидно, що кінетичні аспекти фазових перетворень в порошкових сплавах системи Fe-Ga накладають свої особливості на характер фазових перетворень і потребують подальших досліджень.

Висновки. Структура сплаву Fe-Ga зі складом, близьким до еквіатомного, отриманого в умовах сплавлення порошкового заліза із галієм при 1300 °C в середовищі аргону складається з кристалів інтерметаліду Fe_3Ga_4 , на поверхні яких формується дифузійна зона іншого складу, подібного до складу інтерметаліду Fe_6Ga_5 . Крупні кристали фази оточені дрібнокристалічною сумішшю інтерметалідів Fe_6Ga_5 та Fe_3Ga . Наявність деякої кількості інтерметаліду Fe_3Ga в концентраційних областях, що межують з еквіатомним складом, очевидно, визначається особливостями кінетики фазових перетворень в нерівноважних умовах і потребує подальших досліджень.

Список використаних джерел:

1. С.П. Яценко, Л.А. Пасечник, В.М. Скачков, Г.М. Рубинштейн. *Галлий: Технологии получения и применение жидких сплавов*. М.: РАН, 2020. 344 с.
2. Dasarathy, C.; Hume-Rothery, W. The system iron-gallium. *Proceedings of the Royal Society. Seria A. (London)*, 1965, V. 286, P. 141–157. <https://doi.org/10.1098/rspa.1965.0135>
3. Köster, Werner and Gödecke, Tilo. "Über den Aufbau des Systems Eisen-Gallium zwischen 10 und 50 At.-% Ga und dessen Abhängigkeit von der Wärmebehandlung / On the Constitution of the System Fe-Ga between 10 and 50 at.% Ga and its Dependence on Heat Treatment" *International Journal of Materials Research*, 1977, V. 68, no. 9, P.582-589. <https://doi.org/10.1515/ijmr-1977-680902>
4. Köster, Werner and Gödecke, Tilo. "Über den Aufbau des Systems Eisen-Gallium zwischen 10 und 50 At.-% Ga und dessen Abhängigkeit von der Wärmebehandlung" *International Journal of Materials Research*, 1977, V. 68, no. 10, P. 661-666. <https://doi.org/10.1515/ijmr-1977-681003>
5. Kubaschewski, O. *Iron-Binary Phase Diagrams*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg. 1982. <http://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-662-08024-5>
6. Okamoto, H. The Fe-Ga (Iron-Gallium) system. *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, 1990, V.115, P. 76–581. <https://doi.org/10.1007/BF02841721>
7. E. Clark, J. B. Restorff, M. Wun-Fogle, T. A. Lograsso and D. L. Schlagel, Magnetostrictive properties of body-centered cubic Fe-Ga and Fe-Ga-Al alloys. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2000, V. 36, no. 5, P. 3238-3240. doi: 10.1109/20.908752
8. Головин И. С., Палачева В. В., Мохамед А. К., Балагуров А. М. Структура и свойства Fe-Ga сплавов —перспективных материалов для электроники. *Физика металлов и металловедение*, 2020, T.121. С. 937-980. DOI:[10.31857/S0015323020090053](https://doi.org/10.31857/S0015323020090053)
9. Emily E. Moore, Patrice E.A. Turchi, Alexander Landa, Per Söderlind, Benoit Oudot, Jonathan L. Belof, Stephen A. Stout and Aurélien Perron. Development of a CALPHAD Thermodynamic Database for Pu-U-Fe-Ga Alloys. *Applied Sciences*. 2019, 9(23), 5040 <https://doi.org/10.3390/app9235040>
10. Grigorieva T., Kovaleva S., Senyut V., Vityaz P., Lyakhov N. Thermobaric Sintering of Mechanocomposites of the System Fe-Ga. *Journal of Materials Science and Engineering B*. 2015, V.5 (7-8). P. 270-276.

Рецензент: Дудник Олена Вікторівна, завідувач відділом Інституту проблем матеріалознавства НА України, доктор хімічних наук, старший науковий співробітник.

УДК 621:95.08: 62-4

DOI 10.36910/775.24153966.2022.73.26

В.О. Колесник, А.В. Божко, А.О. Нешта, Д.Г. Малимоненко

Сумський державний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ НА ТЕМПЕРАТУРНЕ РОЗШИРЕННЯ СВЕРДЛА ТА ТОЧНІСТЬ ОТВОРІВ СВЕРДЛІННІ ПАКЕТІВ «ВУГЛЕПЛАСТИК/ТИТАНОВИЙ СПЛАВ»

У цій роботі представлені та проаналізовані результати експериментального дослідження по вивченню впливу технологічних параметрів (режимів різання) на геометричну точність отворів та температурне розширення свердла в процесі свердління. Планування експерименту здійснювалось за методикою Тагучі за варіювання швидкості різання, подачі та часу відтермінування на трьох рівнях. Контрольованими параметрами була точність отворів, що вимірювалась за координатним методом на координатно-вимірвальній машині. Крім того у процесі свердління контролювалась температура свердління за допомогою бездротового пристрою WICUTEM, що поєднує метод штучної термопари та технологію Bluetooth. Перевірка гіпотези про вплив температурного розширення свердла та точність отворів в залежності від технологічних параметрів здійснювалась за допомогою методу скінчених елементів.

Ключові слова: пакети вуглепластик/титановий сплав; метод штучної термопари, температура свердління; температурне розширення; метод скінчених елементів; пристрій WICUTEM

В.А. Колесник, А.В. Божко, А.А. Нешта, Д.Г. Малимоненко

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРНОЕ РАСШИРЕНИЕ СВЕРЛА И ТОЧНОСТЬ ОТВЕРСТИЙ ПРИ СВЕРЛЕНИИ ПАКЕТОВ «УГЛЕПЛАСТИК/ТИТАНОВЫЙ СПЛАВ»

В данной работе представлены и проанализированы результаты экспериментального исследования по изучению влияния технологических параметров (режимов резания) на геометрическую точность отверстий и температурное расширение сверла в процессе сверления. Планирование эксперимента осуществлялось по методике Тагучи с варьированием скорости резания, подачи и времени отсрочки на трех уровнях. Контролируемыми параметрами была точность отверстий, измеряемая по координатному методу на координатно-измерительной машине. Кроме того, в процессе сверления контролировалась температура сверления с помощью беспроводного устройства WICUTEM, сочетающего метод искусственной термопары и технологию Bluetooth. Проверка гипотезы о влиянии температурного расширения сверла и точность отверстий в зависимости от технологических параметров осуществлялась при помощи метода конечных элементов.

Ключевые слова: пакеты углепластик/титановый сплав; метод искусственной термопары, температура сверления; температурное расширение; метод конечных элементов; устройство WICUTEM

V. Kolesnyk, A. Bozhko, A. Neshta, D. Malymonenko

INVESTIGATION OF CUTTING PARAMETERS INFLUENCE ON THERMAL EXPANSION OF DRILL AND HOLE ACCURACY WHEN DRILLING CFRP/ TI ALLOY STACKS

This paper presents the results of an experimental study which investigates the influence of technological parameters (cutting parameters) on the accuracy of holes and thermal expansion of the drill during drilling. The experiment was planned at three levels by varying the cutting speed, feed, and time delay according to the Taguchi method. During the experiment the controlled parameters were the holes' accuracy, which was measured by the coordinate method on a CNC coordinate measuring machine. In addition, during machining the drilling temperature was controlled via WICUTEM wireless device that combined an artificial thermocouple method with Bluetooth technology. The finite element method tested the hypothesis about the influence of thermal expansion of the drill and the accuracy of the holes depending on the technological parameters. According to the results of the study, it was determined that the value of thermal expansion of the drill does not significantly affect the accuracy of holes when drilling CFRP layer, which was mostly affected by sliding titanium chips on the hole walls. However, thermal expansion is an essential factor in determining the accuracy of the holes in the titanium alloy layer.

Keywords: CFRP/ Ti alloy stack; artificial thermocouple method; drilling temperature; thermal expansion, finite element method, WICUTEM device.

Постановка проблеми. На сьогоднішній день залишається не вирішеною інженерна проблема забезпечення точності отворів при з'єднанні пакетів вуглепластик/ титановий сплав, обумовлена низькою оброблюваністю складових пакету та труднощами з вибором раціональних режимів різання при свердлінні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вуглепластик використовуються при виготовленні зубчатих коліс [1], автомобільних компонентів, та найчастіше при виготовленні аерокосмічних компонентів [2]. В аерокосмічних компонентах вуглепластик зазвичай з'єднують з

© В.О. Колесник, А.В. Божко, А.О. Нешта, Д.Г. Малимоненко

титановими та/ або алюмінієвими сплавами, утворюючи так звані пакети [2]. Свердління є найбільш поширеною механічною операцією при виготовленні отворів для з'єднання шарів пакету вуглепластик/ метал в аерокосмічній промисловості [3,4]. Високі вимоги до точності та якості отворів у пакетах обумовлені необхідністю забезпечення належного терміну служби з'єднань [5,6]. Параметри якості отворів у пакетах вуглепластик / метал контролюються на забезпечення розмірної точності отвору [7-10], геометричної точності, зокрема відхилення від округлості та циліндричності [11,12], шорсткості поверхні [13-15], коефіцієнтом розшарування (F_d) [7,16,17], термічного руйнування [18] та величини пошкодження (Q_d) [19] та висоти задирок для титанового сплаву [20-22].

Дослідження останнього десятиліття, зосереджені на забезпеченні параметрів якості отворів у пакетах вуглепластик/ титановий сплав, вивченню впливу різних факторів. Здебільшого дослідження були присвячені вивченню зношування свердла [23-27], впливу покриття ріжучого інструменту на зношування [28-30], режимів різання [31], геометрії свердла [32,33], динамічні характеристики вуглепластику [34], стратегії та техніки свердління, а саме: однопрохідне свердління [35], свердління з ступінчастою геометрією свердла [20], свердління пілотного отвору [36], криогенне свердління [37,38], техніка малого змащення (MQL) [39], спіральне свердління [40].

На основі вищезгаданих досліджень можна зробити висновок, що найбільш значущими факторами, які впливають на якість отвору при свердлінні пакетів вуглепластик/ титановий сплав режими різання. Режими різання, а саме швидкість різання, змінювалась у діапазоні від 10 м/хв до 150 м/хв, а подача – від 0,025 мм/об до 0,1 мм/об [2]. Параметри геометрії свердла впливали на коефіцієнт розшарування [41], а покриття свердла впливало на стійкість та ресурс інструменту. На основі досліджень було визначено раціональною геометрією свердла для однопрохідної технології свердління з подвійним головним кутом в діапазоні 135° - 140° [42], кут підйому гвинтової лінії 22° - 35° [36], задній кут 5° - 10° [12]. Наразі важко зробити певні висновки щодо впливу покриття свердла при свердлінні пакетів, оскільки дослідники дають досить суперечливі висновки щодо ефективності того чи іншого покриття [43]. Технологію спірального свердління для виготовлення отворів можна вважати перспективним методом механічної обробки. Недоліком цього методу є порівняно великий час обробки, що обмежує широке впровадження цієї техніки у виробництво [44]. Технологія малої змащення (MQL) дозволяє зменшити зношення інструменту до 20% [45]. Проте складність подачі MQL в зону різання все ще є основним обмежуючим фактором для його використання у виробничих умовах [39]. Техніка криогенного свердління не доводить свою ефективність у забезпеченні якості отворів у пакетах вуглепластик/ титановий сплав. Менше з тим, вплив низьких температур призводить до зниження втомних характеристик вуглепластик. Таким чином, можна підсумувати, що одноразове свердління пакетів за допомогою твердосплавних інструментів з покриттям і без покриття все ще є основною технологією виготовлення отворів. Щоб краще зрозуміти фізику технології однопрохідного свердління отворів у пакетах є дослідження: крутного моменту [31], осьової сили [46], температури свердління [47], дослідження теплоти тертя [48], акустичної емісії [49], швидкість зношування [50] та утворення стружки [51]. Температуру свердління досліджують методом термопар шляхом встановлення термопар [52] та оптичного волокна [53] в свердло та в заготовку [46]. Розподіл температури також досліджували за допомогою термографічного методу [54,55] скінченно-елементного аналізу для свердла [10] та пакету вуглепластик/ титановий сплав [12]. Визначено, що на сьогодні одним із найнадійніших методів дослідження температури свердління при обробці пакета вуглепластик/ титановий сплав є термопарний метод [52].

Спираючись на результати дослідницьких робіт присвячених вивченню процесу свердління пакетів вуглепластик /титановий сплав можна зробити висновок, що хоча вплив режимів різання, геометрії інструменту та механізмів зношення інструменту на якість отворів добре вивчено, залишається мало вивченим явище впливу температури різання на точність отворів у вищезазначених пакетах.

Постановка завдання. Метою роботи є експериментально перевірити гіпотезу про вплив температурного розширення свердла на точність отворів у пакетах вуглепластик/ титановий сплав, що дозволить поглибити розуміння можливих резервів для технологічного забезпечення точності отворів при обробці пакетів вуглепластик/ титановий сплав.

Результати дослідження. Дослідження впливу температурного розширення різального

інструменту при свердлінні здійснювалось на прикладі пакету вуглепластик/титановий сплав. Вуглепластик, що використовувався у дослідженні, являє собою пакет із 45 односпрямованих шарів вуглецевого волокна IM7 товщиною 0,20 мм, у якості матриці використовувалася епоксидна смола Larit (LR 285). Вуглепластик було виготовлено за технологію вакуумного формування з ручною укладкою шарів вуглецевого волокон за схемою 0°/90°. Загальна товщина вуглепластика становила $9 \pm 0,01$ мм із вмістом волокна 60 %. Загальна товщина пакету вуглепластик/титановий сплав складає 17 мм. У якості металевого шару пакету було використано титановий сплав - (OT-4) Ti-2.5Al-2Mn із механічними властивостями: межа міцності (σ_e) – 735 МПа; модуль пружності (E) – 115 ГПа; густина (ρ) – 4550 кг/м³; подовження (-) – 10 %; коефіцієнт теплопровідності (-) – 9,63 (Вт/(м·К)); твердість (H) – 178 HV. Хімічний склад титанового сплаву було визначено за допомогою методу енергодисперсійної рентгеноскопії на смачнючому електронному мікроскопі JSM-7600F. Фактичний склад титанового сплаву: Ti - 96,42 %, Al - 1,92 %, C - 0,21 %, O - 0,19 %, Si - 0,17 %, Mn - 0,89 %, Fe - 0,20 %.

Виходячи з плану експерименту (табл.2), для експериментального дослідження було використано дев'ять свердл WC9 з покриттям TiN - TiAlN (5510-R-RT100U Guhring) Ø10 мм з внутрішніми каналами для подачі змащуючо - охолоджуючої рідини (ЗОР). Контроль параметрів свердла здійснювався на універсальній автоматичній вимірювальній машині Zoller Genius 3s. У результаті вимірювання було визначено основні геометричні параметри свердел (табл. 1).

Експеримент було сплановано на основі ортогонального масиву Тагучі L₉, що включав три фактори: швидкість різання (v , м/хв), подачу (s , мм/об) та час відтермінування при свердлінні сусідніх отворів (T_d , с), що змінюється на трьох рівнях (табл. 2).

Табл. 1.

Геометрія свердла 5510-R-RT100U Guhring [10]

Геометричні параметри	Умовний номер свердла згідно нумерації дослідів								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D , (мм)	10.008	10.003	10.003	10.003	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
Радіальне биття, (мм)	0.010	0.012	0.016	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
Подвійний головний кут у плані, (θ°)	140.52	140.61	140.35	140.30	140.84	140.60	140.60	140.60	140.60
Передній кут, (γ_r°)	7.54	7.42	8.18	20.14	7.58	7.54	8.26	8.52	7.50
Кут нахилу поперечної різальної кромки, (ψ°)	44.21	45.33	55.17	24.62	55.62	54.40	52.27	53.59	58.33
Кут підйому гвинтової лінії, (ω°)	30.00	30.09	29.92	29.93	29.91	29.99	29.81	29.97	30.06

Табл. 2.

План експерименту за методикою Тагучі L₉ [56]

Назва фактору	Номер дослідів								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Швидкість різання, v (м/хв)	15	15	15	40	40	40	65	65	65
Подача, s (мм/об)	0,02	0,05	0,08	0,02	0,05	0,08	0,02	0,05	0,08
Час відтермінування, T_d (с)	120	10	5	10	5	120	5	120	10

Свердління пакету вуглепластик/титановий сплав здійснювалось з постійною швидкістю різання для обох шарів пакету. Для вивчення впливу накопичення теплоти в свердлі, та впливу тепла на можливе розширення інструменту було запропоновано час відтермінування між свердліннями сусідніх отворів. На першому рівні свердління здійснювалось за умов так званої

"холодної обробки" (CDM), коли свердло охолоджували до кімнатної температури перед свердлінням наступного отвору. На другому рівні свердління виконувалось із затримкою в 10 с між сусідніми отворами. На третьому рівні свердління здійснювалося без затримки свердла, що враховуючи час на вихід свердла з отвору та підводу до наступного отвору складало 5 с.

Експериментальна установка була реалізована на базі 5-осьового фрезерного оброблювального центра DMU 85V CNC (рис. 1).

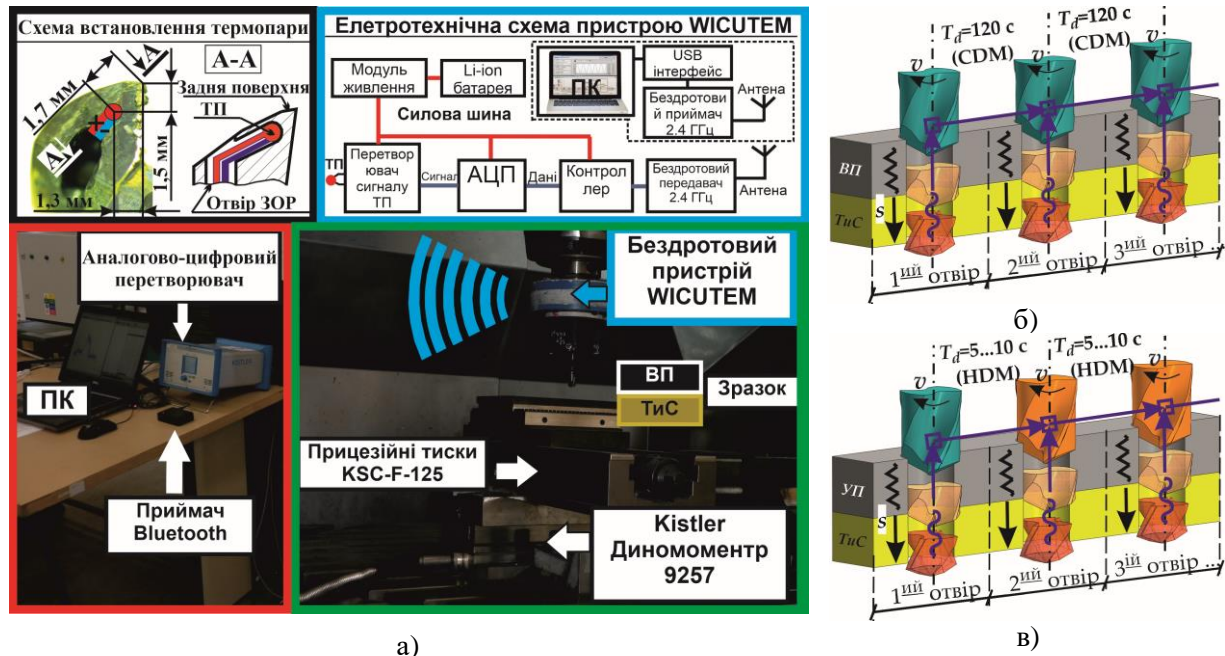


Рис.1. Принципова схема свердління пакетів вуглепластик/ титановий сплав: а) експериментальна установка на базі п'яти осьового верстата DMU-85V; б) технологічна схема свердління отворів з відтермінуванням (CDM); в) технологічна схема свердління отворів з відтермінуванням (HDM) [56]

Заготовка була зафіксована в прецизійних машинних лещатах Schunk Konte's KSC-F-125 з похибкою базування 0,02 мм, що були встановлені на динамометр Kistler 9257 на столі верстата. Безпосередньо у ході досліду контрольованим параметром був температура свердління, що визначалася у тілі свердла на відстані 1,3 мм від головної різальної кромки (рис.1). Вимірювання осової сили необхідно для визначення моменту початку свердління з метою співвідношення положення свердла у отворі та температури свердла у момент часу, що досягалося шляхом синхронізації результатів вимірювання за машинним часом персонального комп'ютера. Температура свердла вимірювалася з використанням бездротового пристрою для вимірювання температури, що був закріплений на цанговій оправці HSK40. Функціонування пристрою базується на поєднанні вимірювання ефекту Зеебека з компенсацією холодного з'єднання та бездротовою передачею сигналу від термопарі з високою частотою (2,4 ГГц) через канал Bluetooth. Живлення пристрою здійснювалося за допомогою літій-іонних акумуляторів. Вимірювальний блок складався з термопарі хромель-алюмель (К-типу), підключеної до підсилювача сигналу, який передає сигнал на модуль Bluetooth з частотою 200 Гц. Після цього бездротовий приймач сигналу Bluetooth, приєднаний до ПК через USB COM порт фіксував сигнал температури свердління. Діапазон вимірювань температури термопарі типу К становив від 40 °С до 1036 °С з точністю $\pm 1,1$ °С. Розміщення термопарі якнайближче до задньої поверхні свердла здійснювалося через канал для підводу ЗОР. З метою наближення термопарі до різальної кромки та захисту сенсора від стружки під задньою поверхнею свердла було оброблено канал, що дозволило розмістити термопару на відстані 1,3 мм від ріжучої кромки та 1,7 мм від зовнішнього кута (рис.1 а).

Фактичний діаметр отвору вимірювали на координатно-вимірювальній машині ZEISS PRISMO ULTRA. Програма числового керування вимірювання була виготовлена за допомогою програмного продукту ZEISS CALYPSO. Діаметр щупа вимірювальної головки машини становив

3 мм. Вимірювання проводили при кімнатній температурі (20 ± 2 °C) з точністю до 1 мкм за схемою (рис. 2).

У ході дослідження згідно плану експерименту було проведено дев'ять дослідів у результаті яких було просвердлено по п'ять отворів для кожної серії випробувань. Свердління отворів у кожному досліді здійснювалося новим свердлом, що дозволило виключити вплив зношення свердла від попередніх дослідів. За результатами вимірювання геометрії свердла було визначено, що відстань від вершини свердла до початку робочої частини складає 1,82 мм. Знизу під графіками на рисунку зображені свердла з розташуванням на них термопари (ТП), що позначені червоною крапкою.

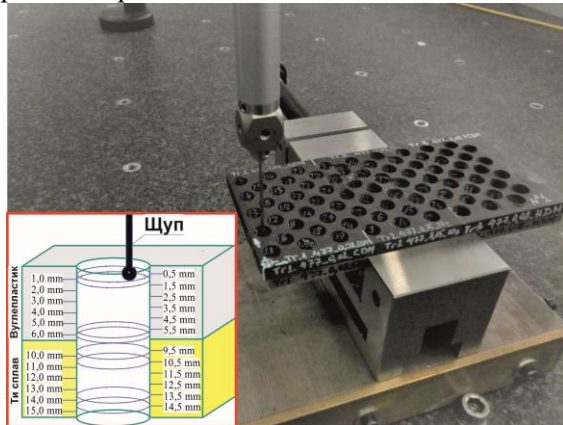


Рис. 2. Схема вимірювання точності отвору

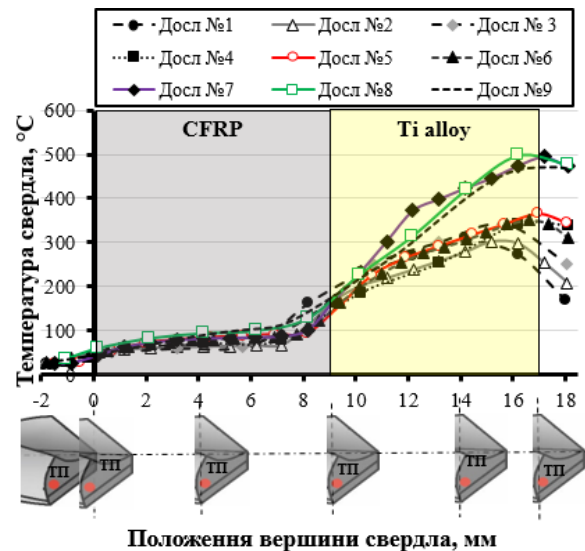


Рис. 3. Залежність температури свердла від режимів різання при обробці отвору №1

Аналіз графіку температур свердління при обробці отвору № 1 для всіх дослідів виявив, що температура свердла при обробці вуглепластику коливалася від 48,6 °C до 104,9 °C, а при обробці шару титанового сплаву - від 189,8 °C до 461,4 °C. Максимальні значення температури у вуглепластику було виміряно при $v = 65$ м/хв і $s = 0,08$ мм/об, тоді як у титановому сплаві $v = 65$ м/хв і $s = 0,05$ мм/об. Треба зауважити, що під час свердління отвору № 1, час відтермінування свердла ще не вплинув на температуру свердління, а отже, можна зробити висновок, що на температуру в основному впливала швидкість різання.

Менша швидкість різання створювала більш сприятливі умови для переходу тепла, що утворюється в зоні різання, в матеріалі заготовки та стружку, ніж у свердло (рис.3). При заглибленні свердла в пакет вуглепластик/ титановий сплав на глибину 0,5 мм мінімальний фактичний діаметр отвору складав 10,118мм (дослід № 8), на глибині 6 мм - 10,1 (дослід № 8), на глибині 10 мм параметри точності отвору - 10,03 мм і на 15 мм - 10,04 мм (дослід № 2). Розміри отворів у шарі вуглепластику коливаються від 10,118 до 11,2 мм (рис. 4 (а)). Максимальне поле розкиду точності між максимальними та мінімальними розмірами вимірювали при свердлінні з режимами різання $v = 65$ м/хв і $s = 0,08$ мм/об (дослід № 9). Під час аналізу кривих діаметрів отворів було помічено, що максимальні відхилення вимірюються у отворах № 1, № 3, № 4, № 9. Це можна пояснити ковзанням жорсткої стружки що утворилася при свердлінні титанового сплаву по стінках отвору в шарі вуглепластику. Така стружка утворювалася у дослідях № 3, № 9 з подачею 0,08 мм/об. Фактичний розмір отвору в шарі титанового сплаву варіювався від 10,028 мм до 10,081 мм. Максимальне поле допуску - 0,021 мм між максимальними ($\varnothing 10,057$ мм) та мінімальними ($\varnothing 10,036$ мм) розмірами вимірювали при свердлінні з режимами різання $v = 65$ м/хв і $s = 0,05$ мм/об (дослід № 8) (Рис. 4 (б)).

На основі аналізу температури свердла під час свердління отвору № 5 (рис. 5 (а)) для дослідів № 1, № 6 та № 8, при свердлінні вуглепластику температура свердла змінювалася в діапазоні (80,9°C - 126,23°C), якщо порівняти її з результатами для отвору №1 (70,30 °C - 99,60 °C) можна зробити висновок, що на підвищення температури впливає зношення інструменту. Температура свердла при свердлінні в титанового сплаву варіювалася в діапазоні від (320,6 °C - 461 °C) для отвору №1, а для отвору (356,6 °C - 477,27 °C). Однак для дослідів №2 - №5 і №7, №9 вплив зношення інструменту на температуру свердла не був настільки очевидним, оскільки він був

прихований під впливом накопичення тепла через умови витримки свердла 120 с перед свердлінням наступного отвору.

Якщо не брати до уваги зношення інструменту то найкращий режим для обробки пакетів з титанового сплаву та вуглепластику є режим для досліду №1 і має такі параметри $v=15$ (м / хв), подача, $s=0,02$ (мм / об), час витримки свердла $T_d=120$ (с).

На основі аналізу діаметрів отвору № 5 (рис. 5 (б)) спостерігається вплив часу відтермінування свердління на збільшення відхилення діаметра отвору. У вуглепластику діаметр отвору, отриманий при 5 с часу відтермінування, коливався від 46 мкм до 150 мкм, а при 120 с та 10 с - в діапазоні 39 - 754 мкм залежно від швидкості різання.

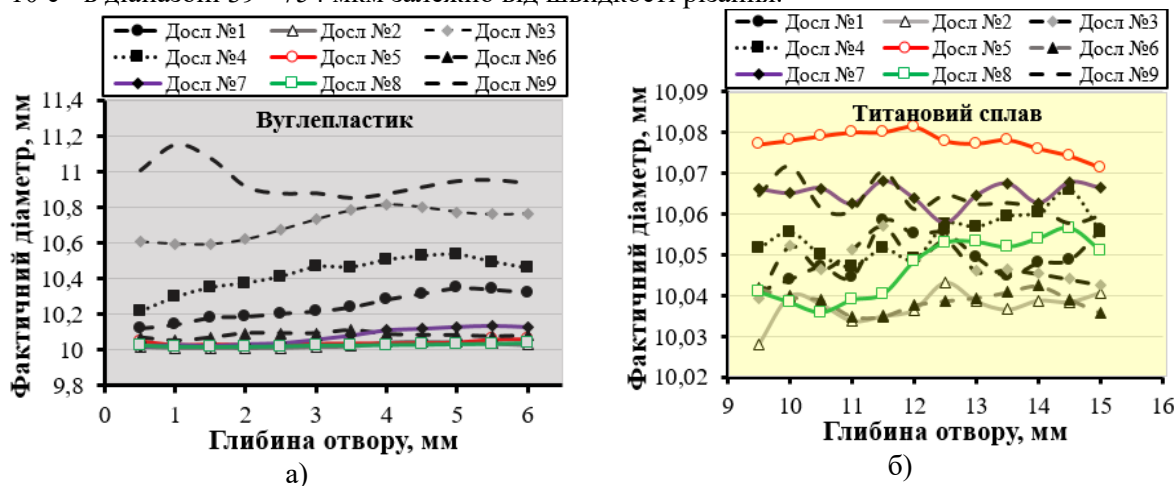


Рис.4. Вплив режимів різання на точність отворів

У шарі титанового сплаву ефект часу відтермінування (як для 5 с, так і для 120 с) був не таким значним, і відхилення діаметра отвору коливалося від 3 мкм до 27 мкм. Тим не менш, у досліді № 7, де температура свердління досягала понад 600 °С, відхилення було 43 мкм, що в 4 рази більше порівняно з 10 мкм у отворі № 1 для цього ж досліду.

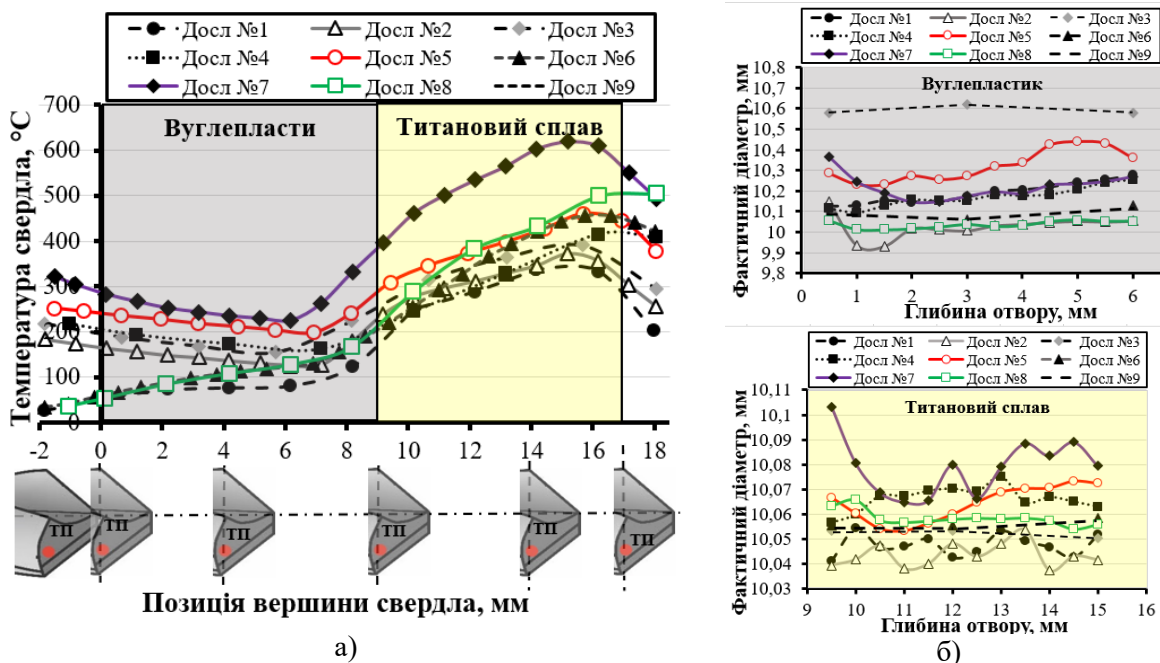


Рис.5. Залежність температури свердла (а) та точності отворів (б) від режимів різання при обробці отвору № 5

З метою перевірки припущення про наявність температурного розширення інструменту було проведено моделювання цього процесу методом скінчених елементів у програмному продукті Ansys Workbench 17.2. З цією метою у програмному середовищі було створено проект що складався з трьох компонентів Steady-State Thermal, Transient Thermal, що використовувався для

розрахунку температурного градієнту свердла та в подальшому результати імпортувалися в компонент Transient Structural для розрахунку лінійного розширення інструменту (рис.6).

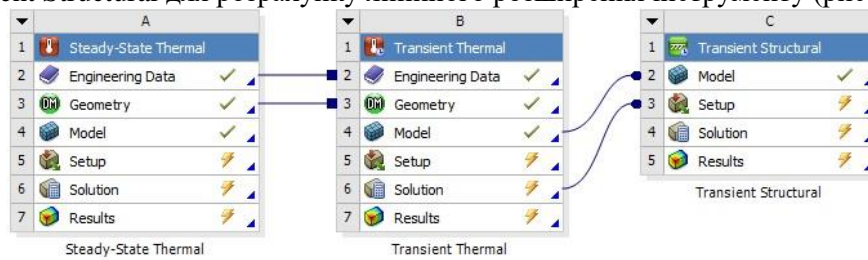


Рис.6. Проект розрахунку методом скінчених елементів

При створенні проекту були задані граничні умови скінчено – елементної моделі. Зокрема, у якості навантаження було задано температуру на головній різальній кромці (рис.7 (а)), умови закріплення (рис. 7 (б)), та визначено розмір скінчено - елементної сітки (рис.7 (в)).

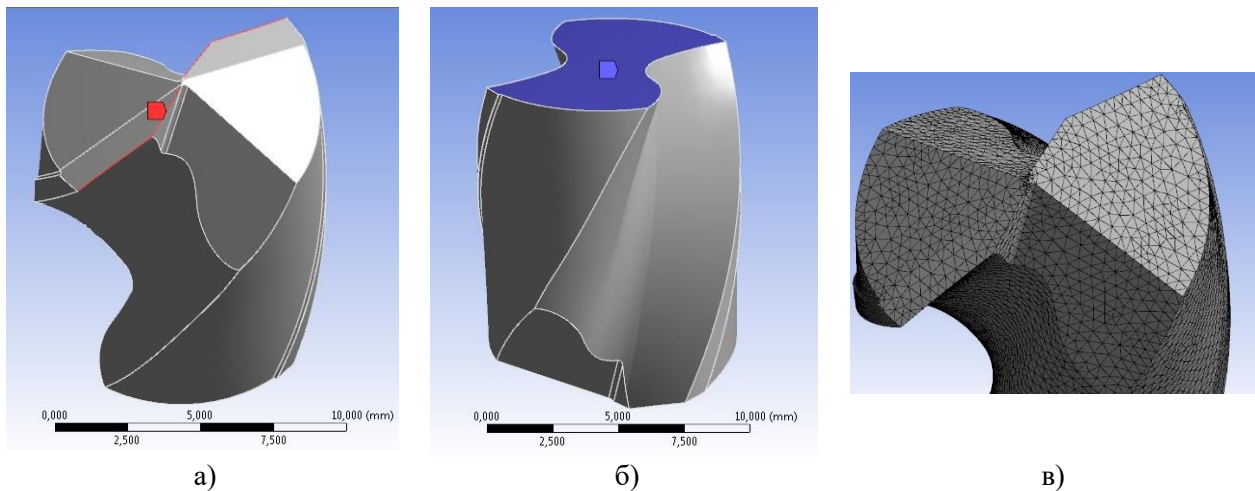


Рис. 7. Граничні умови скінчено - елементної моделі

Фізико-механічні та термічні властивості твердого сплаву для моделювання було задано згідно таблиці 3.

Табл. 3.

Фізико-механічні та термофізичні властивості ВК9 [57]

Густина, кг·м ³	Нульове температурне розширення, °С	Модуль Юнга, ГПа	Коеф. Пуассона, ГПа	Модуль об'ємної пружності, ГПа	Модуль зсуву, ГПа	Міцність на стиснення, МПа	Межа міцності при розтягненні, МПа	Питома теплоємність, Дж·кг ⁻¹ ·°С ⁻¹
15700	22	615	0.24	643	274	4780	350	480

У якості вхідних даних про температурне навантаження свердла при скінчено -елементному моделюванні було використано експериментальні дані вимірювання температури свердла. Зокрема дані про значення температури свердла в залежності від режимів різання на проміжку часу механічної обробки для отвору №1 для всіх дев'яти серій дослідів. Оскільки вимірювання здійснювалося на відстані від різальної кромки, а при задачі граничних умов температурне навантаження, що моделювало тепло у зоні різання прикладалося до головної різальної кромки було виконано перерахунок отриманих даних згідно з математичною моделлю (1) [58].

$$T_{p.k.} = \frac{(T_0 - 6,21 \cdot 10^{-2} \cdot (71,5t^{0,284} + 20))}{1,87 \cdot 10^{-3} \cdot (71,5t^{0,284} + 20)}, \quad (1)$$

де T_0 - температура, що була виміряна у точці закладання термопар, °С;

t – час з моменту початку процесу різання, с

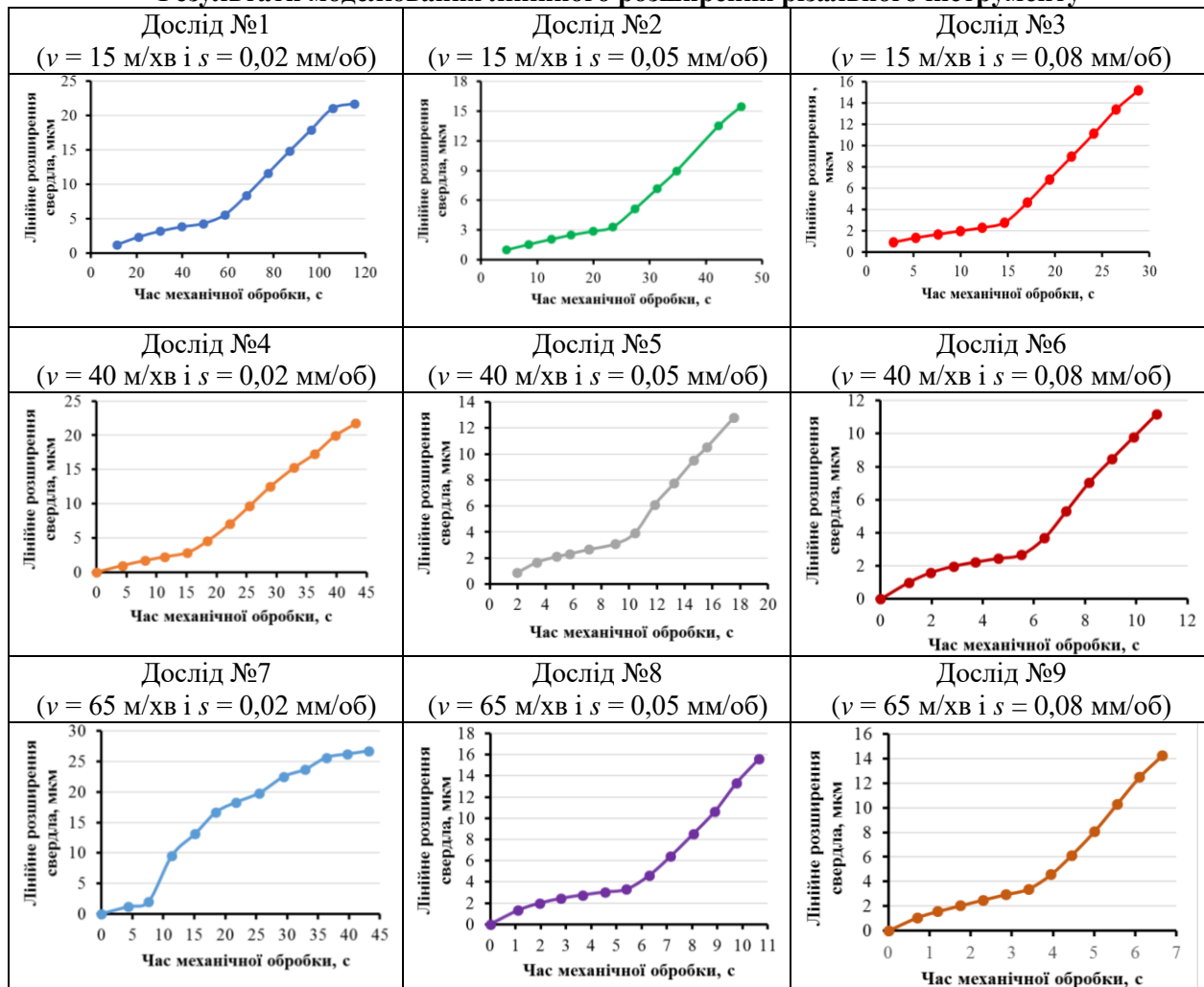
В результаті моделювання було отримані епюри лінійного розширення свердла в умовах свердління отвору №1 для дев'яти дослідів. Візуалізація отриманих результатів представлено у

вигляді графіків залежності (табл. 4) лінійного розширення різального інструменту та часу механічної обробки, що безпосередньо залежить в режимів різання. Таким чином було змодельоване температурне розширення інструменту з прив'язкою до моменту часу, що дозволило в подальшому синхронізувати отримані дані з результатами вимірювання показників точності отворів у дослідних зразках.

Таким чином було визначено, що в залежності від режиму різання і як наслідок часу механічної обробки (основного часу) лінійне розширення інструменту в максимальних значеннях варіювалося в діапазоні від 11 до 27 мкм. З графіків чітко прослідковується зміна кута нахилу кривою параметру відносно осі абсцис при переході свердла із шару вуглепластику у шар титанового сплаву. На основі попереднього аналізу можна зробити висновок, що на зміну значення лінійного розширення інструменту у більшій мірі впливає подача, оскільки порівняння результатів вимірювання по вертикалі (табл.4), вказує на несуттєві відмінності в показниках дослідів №1, №4, №7 - ~21 мкм, дослідів №2, №5, №8- ~14 мкм, та дослідів №3, №6, №9 - ~13 мкм.

Табл. 4.

Результати моделювання лінійного розширення різального інструменту



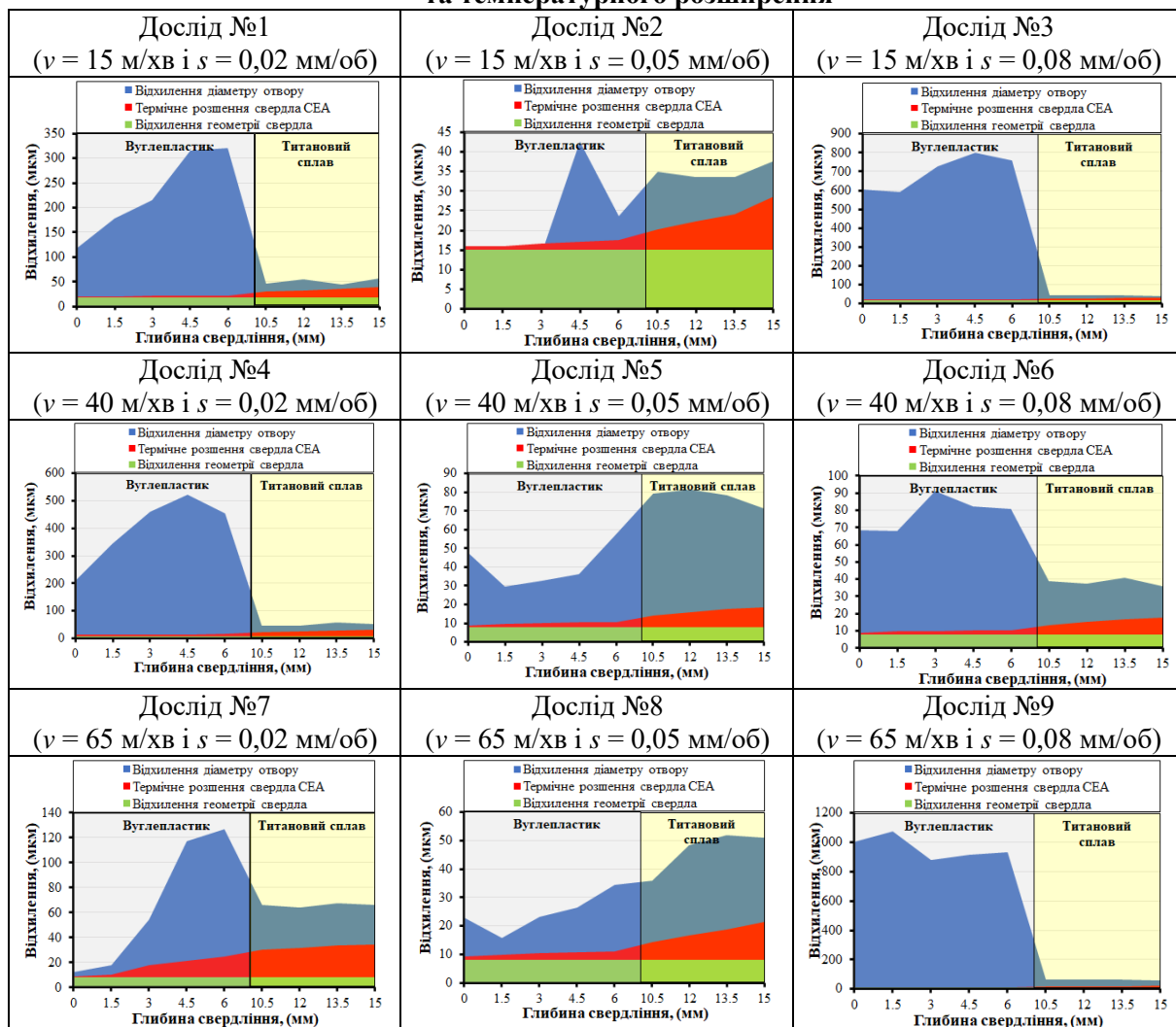
Для зручності подальшого аналізу результатів експериментального дослідження та моделювання методом скінчених елементів отримані дані представлено у вигляді графічних залежностей (табл. 5).

На основі узагальнюючого аналізу можна зробити висновок що температурне розширення свердла не є значущим фактором що впливає на зниження точності розміру та форми отвору у шарі вуглепластику, оскільки як описувалось у п.3.1 приваблюючим стохастичним аспектом що впливає на точність отворів є довга суставчата стружка, що утворюється при свердлінні титанового шару пакету. Натомість, при свердлінні шару титанового сплаву, де розсіювання

відхилень номінального розміру коливається в межах від 28 мкм до 81 мкм, відхилення від круглості 4,8 мкм – 122 мкм, визначені значення температурного розширення є вагомим фактором. На основі аналізу залежності між відхиленням номінального діаметру отвору, геометрії інструмента та температурного розширення свердла під впливом швидкості різання, подачі та часу відтермінування свердління можна підсумувати, що температурне розширення свердла суттєво не впливає на точність отворів у шарі вуглепластику, оскільки його вплив навіюється ковзанням титанової стружки у процесі свердління. Поєднання низької швидкості різання та низького значення подачі призводить до збільшення часу контакту титанової стружки, що обумовлює зростання відхилення номінального розміру. Менше з тим, підвищення подачі, призводить до збільшення товщини стружки, підвищення її жорсткості і як наслідок збільшення механічного впливу на стінки отворів у шарі вуглепластику.

Табл. 5.

Взаємозв'язок відхилень геометричної точності отворів та геометричних параметрів свердла та температурного розширення



Висновок

1. На основі огляду наукової літератури сформульовано гіпотезу про вплив температурного розширення свердла на точність отворів при свердлінні пакетів вуглепластик/титановий сплав
2. Запропонована в роботі методика дослідження дозволила виконати співставлення результатів вимірювання температури свердла, здійсненого за допомогою бездротового вимірювального пристрою WICUTEM за методом штучної термопари, та розмірної точності отворів. Синхронізація результатів вимірювання температури свердла і його положення у оброблюваному отворі здійснювалася за параметром машинного часу персонального комп'ютера шляхом розрахунку.

3. Було визначено, що на конусність отворів у вуглепластику впливає поєднання ефекту ковзання титанової стружки та температурного розширення інструменту. У той же час на

конусність отвору у титановому сплаві формується під впливом поєднання радіального биття свердла та термічного розширення інструменту. На підставі вимірювання діаметра отвору в поєднанні з результатами вимірювання температури свердла було виявлено, що підвищення температури до $\approx 600^\circ\text{C}$ призводить до збільшення відхилення діаметра отвору в титановому сплаві до 56 мкм, в той час як в інших дослідях, де температура свердла знаходилася в діапазоні (350°C - 500°C), відхилення діаметра отвору коливалося від 8 мкм до 22 мкм.

4. В результаті моделювання методом скінчених елементів визначено величину лінійного розширення свердла з урахуванням впливу температури на головній різальній кромці та основного часу обробки для дев'яти дослідів. Зростання швидкості різання до 65 м/хв призводить до збільшення впливу температурного розширення свердла на точність отворів у титановому сплаві.

5. Виконано співставлення результатів вимірювання точності розмірів з значеннями температурного розширення інструменту. Визначено, що при свердлінні шару вуглепластику значення температурного розширення свердла значним чином не впливає на точність отворів, оскільки зниження точності отворів обумовлено ковзанням титанової стружки по стінкам отвору. Однак температурне розширення є вагомим фактором що обумовлює точність отворів у шарі титанового сплаву.

Список використаних джерел

1. Nekrasov, S.; Zhyhylii, D.; Dovhopolov, A.; Karatas, M.A. Research on the manufacture and strength of the innovative joint of FRP machine parts. *Journal of Manufacturing Processes* **2021**, *72*, 338-349, doi:10.1016/j.jmapro.2021.10.025.
2. Xu, J.Y.; Mkaddem, A.; El Mansori, M. Recent advances in drilling hybrid FRP/Ti composite: A state-of-the-art review. *Composite Structures* **2016**, *135*, 316-338, doi:10.1016/j.compstruct.2015.09.028.
3. Giasin, K.; Hawxwell, J.; Sinke, J.; Dhakal, H.; Koklu, U.; Brousseau, E. The effect of cutting tool coating on the form and dimensional errors of machined holes in GLARE (R) fibre metal laminates. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2020**, *107*, 2817-2832, doi:10.1007/s00170-020-05211-2.
4. Xu, C.Y.; Wang, Y.W.; Xu, J.Z.; Liu, X.L. Design of internal-chip-removal drill for CFRP drilling and study of influencing factors of drilling quality. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2020**, *106*, 1657-1669, doi:10.1007/s00170-019-04698-8.
5. Denysenko, Y.; Ivanov, V.; Luscinski, S.; Zaloga, V. AN INTEGRATED APPROACH FOR IMPROVING TOOL PROVISIONING EFFICIENCY. *Management and Production Engineering Review* **2020**, *11*, 4-12, doi:10.24425/mper.2020.136115.
6. Wojciechowski, S. Estimation of Minimum Uncut Chip Thickness during Precision and Micro-Machining Processes of Various Materials—A Critical Review. *Materials* **2022**, *15*, doi:10.3390/ma15010059.
7. Jia, Z.Y.; Zhang, C.; Wang, F.J.; Fu, R.; Chen, C. Multi-margin drill structure for improving hole quality and dimensional consistency in drilling Ti/CFRP stacks. *Journal of Materials Processing Technology* **2020**, *276*, 9, doi:10.1016/j.jmatprotec.2019.116405.
8. Wang, B.; Zhao, H.; Zhang, F.; Wang, M.; Zheng, Y. Comparison of the geometric accuracy of holes made in CFRP/Ti laminate by drilling and helical milling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2021**, *112*, 3343-3350, doi:10.1007/s00170-021-06594-6.
9. An, Q.; Dang, J.; Li, J.; Wang, C.; Chen, M. Investigation on the cutting responses of CFRP/Ti stacks: With special emphasis on the effects of drilling sequences. *Composite Structures* **2020**, *253*, doi:10.1016/j.compstruct.2020.112794.
10. Kolesnyk, V.; Peterka, J.; Kuruc, M.; Simna, V.; Moravcikova, J.; Vopat, T.; Lisovenko, D. Experimental Study of Drilling Temperature, Geometrical Errors and Thermal Expansion of Drill on Hole Accuracy When Drilling CFRP/Ti Alloy Stacks. *Materials* **2020**, *13*, 17, doi:10.3390/ma13143232.
11. Zhou, L.; Ke, Y.L.; Dong, H.Y.; Chen, Z.P.; Gao, K.Y. Hole diameter variation and roundness in dry orbital drilling of CFRP/Ti stacks. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2016**, *87*, 811-824, doi:10.1007/s00170-016-8528-1.
12. Qiu, X.Y.; Yu, Z.; Li, C.P.; Niu, Q.L.; Li, S.J.; Li, P.N.; Ko, T.J. Influence of main cutting edge structure on hole defects in CFRP/titanium alloy stacks drilling. *Journal of Manufacturing Processes* **2021**, *69*, 503-513, doi:10.1016/j.jmapro.2021.07.061.

13. Wang, Q.; Jia, X.L. Optimization of cutting parameters for improving exit delamination, surface roughness, and production rate in drilling of CFRP composites. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2021**, *117*, 3487-3502, doi:10.1007/s00170-021-07918-2.
14. Yasar, N.; Korkmaz, M.E.; Gupta, M.K.; Boy, M.; Gunay, M. A novel method for improving drilling performance of CFRP/Ti6Al4V stacked materials. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2021**, *117*, 653-673, doi:10.1007/s00170-021-07758-0.
15. Nie, P.; Ma, Y.; Liu, S. Research on CFRP inner wall roughness during vibration drilling of CFRP/Ti based on acoustic emission. *Journal of Physics: Conference Series* **2021**, *1952*, doi:10.1088/1742-6596/1952/3/032060.
16. Rajkumar, G.M.; Bhardwaj, D.; Kannan, C.; Oyyaravelu, R.; Balan, A.S.S. Effect of chilled air on delamination, induced vibration, burr formation and surface roughness in CFRP drilling: a comparative study. *Materials Research Express* **2019**, *6*, doi:10.1088/2053-1591/aaf47d.
17. Liu, S.; Wang, N.; Zhang, K.; Luo, B. A subjective-objective evaluation method of hole surface quality in drilling CFRP-Ti stacks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* **2020**, doi:10.1177/0954405420971076.
18. Li, J.; Zou, P.; Qiao, C.; Dong, L. Temperature Field Distribution Model in Drilling of CFRP/Ti Stacks Structure. In Proceedings of the Journal of Physics: Conference Series, 2020.
19. Voss, R.; Henerichs, M.; Rupp, S.; Kuster, F.; Wegener, K. Evaluation of bore exit quality for fibre reinforced plastics including delamination and uncut fibres. *Cirp Journal of Manufacturing Science and Technology* **2016**, *12*, 56-66, doi:10.1016/j.cirpj.2015.09.003.
20. Alonso, U.; Calamaz, M.; Girot, F.; Iriondo, E. Influence of flute number and stepped bit geometry when drilling CFRP/Ti6Al4V stacks. *Journal of Manufacturing Processes* **2019**, *39*, 356-370, doi:10.1016/j.jmapro.2019.02.006.
21. Kuo, C.L.; Soo, S.L.; Aspinwall, D.K.; Carr, C.; Bradley, S.; M'Saoubi, R.; Leahy, W. Development of single step drilling technology for multilayer metallic-composite stacks using uncoated and PVD coated carbide tools. *Journal of Manufacturing Processes* **2018**, *31*, 286-300, doi:10.1016/j.jmapro.2017.11.026.
22. Poor, D.I.; Geier, N.; Pereszlai, C.; Xu, J.Y. A critical review of the drilling of CFRP composites: Burr formation, characterisation and challenges. *Composites Part B-Engineering* **2021**, *223*, 17, doi:10.1016/j.compositesb.2021.109155.
23. Han, C.W.; Kim, K.B.; Lee, S.W.; Jun, M.B.G.; Jeong, Y.H. Thrust Force-Based Tool Wear Estimation Using Discrete Wavelet Transformation and Artificial Neural Network in CFRP Drilling. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* **2021**, *22*, 1527-1536, doi:10.1007/s12541-021-00558-2.
24. Ivchenko, O.; Zhyhylii, D.; Zaloha, O.; Zaloga, V.; Dehtiarenko, O. Resolution of the Friction Coefficient of Adhesion Under Cutting. *Advanced Manufacturing Processes (Interpartner-2019)* **2020**, 98-107, doi:10.1007/978-3-030-40724-7_10.
25. Wang, Q.; Wang, F.; Zhang, C.; Chen, C. Combined effects of various materials on tool wear in drilling of Ti/CFRP stacks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* **2020**, *234*, 2750-2759, doi:10.1177/0954406219868246.
26. Sathish Rao, U.; Raj Rodrigues, L.L. An application of dissimilar ann algorithms to improve the simulation performance of flank wear extrapolation in GFRP composite drilling. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development* **2018**, *8*, 325-336, doi:10.24247/ijmperdoct201837.
27. Hou, G.Y.; Qiu, J.P.; Zhang, K.F.; Cao, S.P.; Cheng, H.; Luo, B.; Cheng, Y. Comparative tool wear and hole quality investigation in drilling of aerospace grade T800 CFRP using different external cooling lubricants. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2020**, *106*, 937-951, doi:10.1007/s00170-019-04554-9.
28. Kulesh, E.A.; Piliptsov, D.G.; Rogachev, A.V.; Hong, J.X.; Fedosenko, N.N.; Kolesnyk, V. Boron-Carbon Coatings: Structure, Morphology and Mechanical Properties. *Journal of Engineering Sciences* **2020**, *7*, C1-C9, doi:10.21272/jes.2020.7(2).c1.
29. Kim, D.; Swan, S.R.; He, B.; Khominich, V.; Bell, E.; Lee, S.W.; Kim, T.G. A study on the machinability of advanced arc PVD AlCrN-coated tungsten carbide tools in drilling of CFRP/titanium alloy stacks. *Carbon Letters* **2021**, *31*, 497-507, doi:10.1007/s42823-020-00180-8.
30. Liu, L.; Jiang, X.H.; Ermakov, S.F.; Nikolaev, V.I.; Yarmolenko, M.A.; Piliptsov, D.G.; Shershnev, E.B. Effect of Lubricants with Different Nature and Properties on Friction in a DLC-

UHMWP Endoprosthesis Pair. *Journal of Friction and Wear* **2021**, *42*, 146-151, doi:10.3103/s1068366621030107.

31. Kayihan, M.; Karaguzel, U.; Bakkal, M. Experimental analysis on drilling of Al/Ti/CFRP hybrid composites. *Materials and Manufacturing Processes* **2020**, doi:10.1080/10426914.2020.1819545.

32. Bañon, F.; Sambruno, A.; Batista, M.; Fernandez-Vidal, S.R.; Salguero, J. Study of the one-shot drilling of CFRP/Ti6Al4V stacks with a double tip angle cutting-tool geometry. In Proceedings of the AIP Conference Proceedings, 2019.

33. Kuntoğlu, M.; Aslan, A.; Pimenov, D.Y.; Giasin, K.; Mikolajczyk, T.; Sharma, S. Modeling of cutting parameters and tool geometry for multi-criteria optimization of surface roughness and vibration via response surface methodology in turning of AISI 5140 steel. *Materials* **2020**, *13*, doi:10.3390/MA13194242.

34. Kim, C.J. Temperature-Dependent Dynamic Characteristics of Carbon-Fiber-Reinforced Plastic for Different Spectral Loading Patterns. *Materials* **2020**, *13*, doi:10.3390/ma13225238.

35. Luo, B.; Zhang, K.; Liu, S.; Cheng, H.; Wang, R. Investigation on the interface damage in drilling low-stiffness CFRP/Ti stacks. *Chinese Journal of Aeronautics* **2019**, *32*, 2211-2221, doi:10.1016/j.cja.2019.04.017.

36. Dahnel, A.N.; Ascroft, H.; Barnes, S. An investigation of hole quality during drilling of carbon fibre reinforced plastic and titanium (Ti6Al4V) using tungsten carbide drills. In Proceedings of the Materials Today: Proceedings, 2019; pp. 161-167.

37. Tang, L.Y.; Li, P.N.; Yu, Z.; Li, C.P.; Ko, T.J.; Niu, Q.L.; Li, S.J.; Qiu, X.Y. New drilling method for damage reduction of CFRP/Ti stacks drilling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2021**, *115*, 595-602, doi:10.1007/s00170-021-07216-x.

38. Iqbal, A.; Zhao, G.; Zaini, J.; Gupta, M.K.; Jamil, M.; He, N.; Nauman, M.M.; Mikolajczyk, T.; Pimenov, D.Y. Between-the-holes cryogenic cooling of the tool in hole-making of Ti-6Al-4V and CFRP. *Materials* **2021**, *14*, 1-19, doi:10.3390/ma14040795.

39. Fernandez-Perez, J.; Cantero, J.L.; Diaz-Alvarez, J.; Miguelez, M.H. Hybrid Composite-Metal Stack Drilling with Different Minimum Quantity Lubrication Levels. *Materials* **2019**, *12*, 13, doi:10.3390/ma12030448.

40. Sun, L.; Gao, H.; Wang, B.; Bao, Y.; Wang, M.; Ma, S. Mechanism of reduction of damage during helical milling of titanium/CFRP/aluminium stacks. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2020**, *107*, 4741-4753, doi:10.1007/s00170-020-05177-1.

41. Fu, Q.; Wu, S.J.; Li, C.H.; Xu, J.Y.; Wang, D.Z. Delamination and chip breaking mechanism of orthogonal cutting CFRP/Ti6Al4V composite. *Journal of Manufacturing Processes* **2022**, *73*, 183-196, doi:10.1016/j.jmapro.2021.11.015.

42. An, Q.; Zhong, B.; Wang, X.; Zhang, H.; Sun, X.; Chen, M. Effects of drilling strategies for CFRP/Ti stacks on static mechanical property and fatigue behavior of open-hole CFRP laminates. *Journal of Manufacturing Processes* **2021**, *64*, 409-420, doi:10.1016/j.jmapro.2021.01.036.

43. Xu, J.Y.; Ji, M.; Davim, J.P.; Chen, M.; El Mansori, M.; Krishnaraj, V. Comparative study of minimum quantity lubrication and dry drilling of CFRP/titanium stacks using TiAlN and diamond coated drills. *Composite Structures* **2020**, *234*, 13, doi:10.1016/j.compstruct.2019.111727.

44. Voss, R.; Henerichs, M.; Kuster, F. Comparison of conventional drilling and orbital drilling in machining carbon fibre reinforced plastics (CFRP). *Cirp Annals-Manufacturing Technology* **2016**, *65*, 137-140, doi:10.1016/j.cirp.2016.04.001.

45. Xu, J.Y.; Ji, M.; Chen, M.; El Mansori, M. Experimental investigation on drilling machinability and hole quality of CFRP/Ti6Al4V stacks under different cooling conditions. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2020**, *109*, 1527-1539, doi:10.1007/s00170-020-05742-8.

46. Karpat, Y.; Karaguzel, U.; Bahtiyar, O. A thermo-mechanical model of drill margin-borehole surface interface contact conditions in dry drilling of thick CFRP laminates. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* **2020**, *154*, 15, doi:10.1016/j.ijmachtools.2020.103565.

47. Shao, Z.; Jiang, X.; Geng, D.; Liu, Y.; Zhou, Z.; Li, S.; Zhang, D.; Zheng, W. The interface temperature and its influence on surface integrity in ultrasonic-assisted drilling of CFRP/Ti stacks. *Composite Structures* **2021**, *266*, doi:10.1016/j.compstruct.2021.113803.

48. Xu, J.Y.; Li, C.; El Mansori, M.; Liu, G.Y.; Chen, M. Study on the Frictional Heat at Tool-Work Interface when Drilling CFRP Composites. *46th Sme North American Manufacturing Research Conference, Namrc 46* **2018**, 26, 415-423, doi:10.1016/j.promfg.2018.07.049.
49. Leng, S.; Wang, Z.; Min, T.; Dai, Z.Q.; Chen, G. Detection of Tool Wear in Drilling CFRP/TC4 Stacks by Acoustic Emission. *Journal of Vibration Engineering & Technologies* **2020**, 8, 463-470, doi:10.1007/s42417-019-00190-5.
50. Wang, B.; Yin, W.D.A.; Wang, M.H.; Zheng, Y.H.; Li, X.P.; Ma, Z.B. Edge chipping mechanism and failure time prediction on carbide cemented tool during drilling of CFRP/Ti stack. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2017**, 91, 3015-3024, doi:10.1007/s00170-017-0017-7.
51. Emel'yanov, S.G.; Yatsun, E.I.; Remnev, A.I.; Shvets, S.V. Chip curling in metal cutting. *Russian Engineering* **2011**, 31, 679-683, doi:10.3103/S1068798X11060086.
52. Xu, J.Y.; Li, C.; Chen, M.; El Mansori, M.; Davim, J.P. On the analysis of temperatures, surface morphologies and tool wear in drilling CFRP/Ti6Al4V stacks under different cutting sequence strategies. *Composite Structures* **2020**, 234, doi:10.1016/j.compstruct.2019.111708.
53. Zitoune, R.; Cadorin, N.; Collombet, F.; Sima, M. Temperature and wear analysis in function of the cutting tool coating when drilling of composite structure: In situ measurement by optical fiber. *Wear* **2017**, 376, 1849-1858, doi:10.1016/j.wear.2016.12.015.
54. Moghaddas, M.A.; Yi, A.Y.; Graff, K.F. Temperature measurement in the ultrasonic-assisted drilling process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2019**, 103, 187-199, doi:10.1007/s00170-019-03487-7.
55. Wang, H.X.; Zhang, X.H.; Duan, Y.G. Effects of drilling area temperature on drilling of carbon fiber reinforced polymer composites due to temperature-dependent properties. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2018**, 96, 2943-2951, doi:10.1007/s00170-018-1810-7.
56. Kolesnyk, V.; Peterka, J.; Alekseev, O.; Neshta, A.; Xu, J.Y.; Lysenko, B.; Sahul, M.; Martinovic, J.; Hrbal, J. Application of ANN for Analysis of Hole Accuracy and Drilling Temperature When Drilling CFRP/Ti Alloy Stacks. *Materials* **2022**, 15, 21, doi:10.3390/ma15051940.
57. Kurlov, A.S.; Gusev, A.I. Tungsten Carbides: Structure, Properties and Application in Hardmetals. *Tungsten Carbides: Structure, Properties and Application in Hardmetals* **2013**, 184, 1-242, doi:10.1007/978-3-319-00524-9.
58. Колесник, В.О. Технологічне забезпечення якості при свердлінні циліндричних отворів в пакетах "вуглепластик/титановий сплав" Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т", Харків, 2016.

UDK 539.3

DOI 10.36910/775.24153966.2022.73.27

O. Guda, T. Kradinova, V. Timoshchuk

*Lutsk National Technical University***A VARIATIONAL METHOD OF LEADINGOUT OF EQUATIONS OF MOTION BOUNDARY TERMS IN A ROUND PLATE**

For the obtain of equations of equilibrium and boundary terms in a round plate, variation principle of Lagrange is used for complete energy of the stress system. The got equalizations fully coincide after a form with the proper terms and equalizations for the plates of classic theory. A difference is brought in only by coefficients which take into account a transverse shear and compression. These equations take into account inertia of rotation of cross section of plate and influence of normal stress additionally.

Keywords: transtropic plates, equilibrium of thin plates, transverse shear, compression, equations of equilibrium.

О.В. Гуда, Т.А. Крадінова, В.М. Тимошук

ВАРІАЦІЙНИЙ МЕТОД ВИВЕДЕННЯ РІВНЯНЬ РУХУ ТА ГРАНИЧНИХ УМОВ У КРУГЛІЙ ПЛАСТИНІ

Для виведення рівнянь рівноваги та граничних умов у круглій плиті, використано варіаційний принцип Лагранжа для повної енергії пружної системи. Отримані рівняння цілком співпадають за формою з відповідними умовами та рівняннями для пластин класичної теорії. Відмінність вносять лише коефіцієнти, що враховують поперечний зсув та обтиснення. Дані рівняння враховують додатково інерцію обертання поперечних перерізів пластини та вплив нормального напруження.

Ключові слова: транстропні пластини, рівновага тонких пластин, поперечний зсув, обтиснення, рівняння рівноваги.

О.В. Гуда, Т.А. Крадінова, В.Н. Тимошук

ВАРИАЦИОННЫЙ МЕТОД ВЫВОДА УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ И ПРЕДЕЛЬНЫХ УСЛОВИЙ В КРУГЛОЙ ПЛАСТИНЕ

Для получения уравнений равновесия и граничных условий в круглой пластине используется вариационный принцип Лагранжа для общей энергии упругой системы. Полученные уравнения вполне согласуются по форме с соответствующими условиями и уравнениями для пластин классической теории. Разница производится только коэффициентами, которые учитывают поперечный сдвиг и обжимку. Эти уравнения учитывают дополнительную инерцию вращения поперечных сечений пластины и влияние нормального напряжения.

Ключевые слова: транстропные пластини, равновесие тонких пластин, поперечный сдвиг, обжимка, уравнения равновесия.

Raising of a problem. There are different methods of outputing of differential equations of equilibrium of thin plates. One of the basic and most widespread methods of outputing of such equations is the use of equations of equilibrium in moments and efforts. The lack of this method is unmotivated recording of boundary terms on the edges of plate. More perfect are variation methods (Lagrange, Reyssner, mixed method) are power explained, which allow, together with equations of equilibrium, to destroy boundary terms. In many articles of domestic and foreign researchers use calculation equations of plates and shells in the nonclassical raising [1, 6]. The most existent nonclassical theories of plates and shells take into account deformation of transverse displacement, and some, partly, take into account and transversal compression. However, as researches show, in calculations for the actions of the contact and local loadings, it should be absolutely taken into account transversal compression, that allows to satisfy most terms on-the-spot contact of plate with other bodies or bases [6].

A research purpose is a leadingout of equations of motion of transtropic plates of medium thickness, which take into account both the effects of transverse shear and deformation of transverse compression, transverse normal tension and inertia of rotation of cross sections.

For the leadingout of equations of motion and boundary terms in a round plate, a will take the a dvantage of variation principle of Lagrange for complete energy of the elastic system [2, 4]

$$\delta\Pi = \delta A, \quad (1)$$

where

$$\delta\Pi = \iiint_{V_p} (\sigma_r \cdot \delta\varepsilon_r + \sigma_\theta \cdot \delta\varepsilon_\theta + \sigma_z \cdot \delta\varepsilon_z + \tau_{r\theta} \cdot \delta\gamma_{r\theta} + \tau_{rz} \cdot \delta\gamma_{rz} + \tau_{\theta z} \cdot \delta\gamma_{\theta z}) dV_p \quad - \text{variation of}$$

potential energy of deformation; $dV_p = r dr d\theta dz$ it is a volume of plate;

$$\delta A = \iiint_{V_p} (F_r \delta U + F_\theta \delta V + F_z \delta W) dV_p + \iint_S (q^- \delta W^- - q^+ \delta W^+) dS \quad - \text{variation of work of volume}$$

and superficial forces; $dS = r d\theta dr$ - it is an element of surface of a plate; W^\pm -are components of the vector of elastic displacement moving on the external surfaces $z = \pm h$ of plate $F_r = -\rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}$;

$F_\theta = -\rho \frac{\partial^2 V}{\partial t^2}$; $F_z = -\rho \frac{\partial^2 W}{\partial t^2}$ - are projections of forces of inertia on the proper co-ordinate axes, attributed to unit of volume, which carry out the role of volume forces legalistically; ρ - it is a closeness.

Using the formulas of Koshi for component of deformation

$$\varepsilon_r = \frac{\partial U}{\partial r}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{U}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial W}{\partial z},$$

$$\gamma_{r\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta} + \frac{\partial V}{\partial r} - \frac{V}{r}, \quad \gamma_{rz} = \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial r}, \quad \gamma_{z\theta} = \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial \theta},$$

but carrying out a varying taking into account the formulas of integration parts and of correlations of type

$\delta\left(\frac{\partial U}{\partial r}\right) = \frac{\partial}{\partial r}(\delta U)$, variation of potential energy will be

$$\begin{aligned} \delta\Pi = & \iiint_{V_p} \left[\frac{\partial}{\partial r}(\sigma_r \delta U) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\sigma_\theta}{r} \delta V \right) + \frac{\partial}{\partial z}(\sigma_z \delta W) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\tau_{r\theta}}{r} \delta U \right) + \frac{\partial}{\partial r}(\tau_{r\theta} \delta V) + \right. \\ & + \frac{\partial}{\partial z}(\tau_{rz} \delta U) + \frac{\partial}{\partial r}(\tau_{rz} \delta W) + \frac{\partial}{\partial z}(\tau_{z\theta} \delta V) + \left. \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\tau_{\theta z}}{r} \delta W \right) \right] dV_p - \iint_{V_p} \left(\frac{\tau_{r\theta}}{r} \delta V - \frac{\sigma_\theta}{r} \delta U + \right. \\ & + \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} \delta U + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} \delta V + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \delta W + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} \delta U + \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} \delta V + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} \delta U + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} \delta W + \\ & + \left. \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} \delta V + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} \delta W \right) dV_p = \iint_{S_r} r \sigma_r \delta U d\theta dz + \iint_{S_\theta} \sigma_\theta \delta V dr dz + \iint_{S_z} r \sigma_z \delta W dr d\theta + \\ & + \iint_{S_\theta} \tau_{r\theta} \delta U dr dz + \iint_{S_r} r \tau_{r\theta} \delta V d\theta dz + \iint_{S_z} r \tau_{rz} \delta U dr d\theta + \iint_{S_r} r \tau_{rz} \delta W d\theta dz + \iint_{S_z} r \tau_{z\theta} \delta V dr d\theta + \\ & + \iint_{S_\theta} \tau_{z\theta} \delta W dr dz - \iint_V \left(\frac{\sigma_r}{r} \delta U + \frac{\tau_{r\theta}}{r} \delta V + \frac{\tau_{rz}}{r} \delta W + \frac{\tau_{r\theta}}{r} \delta V - \frac{\sigma_\theta}{r} \delta U + \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} \delta U + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} \delta V + \right. \\ & + \left. \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \delta W + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} \delta U + \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} \delta V + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} \delta U + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} \delta W + \frac{\partial \tau_{z\theta}}{\partial z} \delta V + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{z\theta}}{\partial \theta} \delta W \right) dV_p. \end{aligned} \quad (2)$$

Variation of potential of external forces

$$\delta A = -\rho \iiint_{V_p} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \delta U + \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \delta V + \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} \delta W \right) dV_p + \iint_S q_2 \delta \tilde{W} ds. \quad (3)$$

If to put to equality (2) and (3) in variation equalization (1) and to equate with a zero in a triple integral expressions near independent variations, δU , δV , δW , then will be got differential equalizations of motion of voxel of plate in cylindrical coordinate system:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} &= \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}, \\
\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} &= \rho \frac{\partial^2 V}{\partial t^2}, \\
\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} &= \rho \frac{\partial^2 W}{\partial t^2}.
\end{aligned} \tag{4}$$

In an order to get equation of equilibrium through forces and moments, and also boundary terms on the edges of a plate, will take expressions for the stresses of presentation through internal forces and moments:

$$\begin{aligned}
\sigma_r &= \frac{N_r}{2h} + \frac{M_r z}{I} + \frac{(1-\alpha)\tilde{E}}{G'} f_0(z) \left(\frac{\partial Q_r}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial Q_\theta}{\partial \theta} + \frac{v}{r} Q_r \right) + \\
&+ \frac{(1-\alpha)\tilde{E}h^2}{2E'} f_0(z) \left(\frac{\partial^2 q_2}{\partial r^2} + \frac{v}{r^2} \frac{\partial^2 q_2}{\partial \theta^2} + \frac{v}{r} \frac{\partial q_2}{\partial r} \right) + A'(q_1 + q_2 (f_0(z) - 1)) + zA'\rho \frac{\partial^2 W}{\partial t^2}; \\
\sigma_\theta &= \frac{N_\theta}{2h} + \frac{M_\theta z}{I} + \frac{(1-\alpha)\tilde{E}}{G'} f_0(z) \left(v \frac{\partial Q_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial Q_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{r} Q_r \right) + \\
&+ \frac{(1-\alpha)\tilde{E}h^2}{2E'} f_0(z) \left(v \frac{\partial^2 q_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 q_2}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial q_2}{\partial r} \right) + A'(q_1 + q_2 (f_0(z) - 1)) + zA'\rho \frac{\partial^2 W}{\partial t^2}; \\
\tau_{r\theta} &= \frac{N_{r\theta}}{2h} + \frac{H_{r\theta} z}{I} + \frac{(1-\alpha)\tilde{E}}{G'} f_0(z) \left(\frac{\partial Q_\theta}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial Q_r}{\partial \theta} + \frac{1}{r} Q_\theta \right) + \\
&+ \frac{(1-\alpha)\tilde{E}h^2}{2E'} f_0(z) \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial q_2}{\partial \theta} + \frac{\partial q_2}{\partial r} \right); \\
\tau_{rz} &= \frac{G'}{K'} \left(1 - \frac{z^2}{h^2} \right) Q_r; \quad \tau_{\theta z} = \frac{G'}{K'} \left(1 - \frac{z^2}{h^2} \right) Q_\theta;
\end{aligned} \tag{5}$$

where $f_0(z) = \frac{z}{4h^3} (0,6h^2 - z^2)$.

Write down expressions for component of the elastic displacement, in the following kind:

$$U(r, \theta, z) = u + \gamma_r z + \psi_r \left(\frac{z}{5} - \frac{z^3}{3h^2} \right);$$

$$V(r, \theta, z) = v + \gamma_\theta z + \psi_\theta \left(\frac{z}{5} - \frac{z^3}{3h^2} \right); \tag{5a}$$

$$\begin{aligned}
W(r, \theta, z) &= w + \frac{2\alpha_0}{E'} q_1 z + \frac{3\alpha_0}{4hE'} \tilde{q}_2 z^2 \left(1 - \frac{z^2}{6h^2} \right) - A' \left(z\theta_0 + \frac{z^2\theta_1}{2} - \frac{z^4\theta_3}{4h^2} \right) = \\
&= w + \frac{2\alpha_0}{E'} q_1 z + \frac{3\alpha_0}{4hE'} \tilde{q}_2 z^2 \left(1 - \frac{z^2}{6h^2} \right) - A' z\theta_0 + \frac{1}{2} A' z^2 \theta_3 \left(3h^2 + \frac{z^2}{2h^2} \right) + \frac{1}{2} A' z^2 \Delta w,
\end{aligned}$$

where γ_r, γ_θ – are the generalized corners of turn; ψ_r, ψ_θ – are functions of transversal change.

Using formulas (5), formulas for deformations and expressions for component of the elastic displacement (5a), find expression for variation of potential energy:

$$\begin{aligned} \delta\Pi &= \iint_S \int_{-h}^h (\sigma_r \cdot \delta\varepsilon_r + \sigma_\theta \cdot \delta\varepsilon_\theta + \sigma_z \cdot \delta\varepsilon_z + \tau_{r\theta} \cdot \delta\gamma_{r\theta} + \tau_{rz} \cdot \delta\gamma_{rz} + \tau_{\theta z} \cdot \delta\gamma_{\theta z}) dz dS = \\ &= \iint_S \left(N_r \delta \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right) + M_r \delta \left(\frac{\partial \gamma_r}{\partial r} \right) + \frac{N_\theta}{r} \delta u + \frac{M_\theta}{r} \delta \gamma_r + N_\theta \delta \left(\frac{\partial v}{r \partial \theta} \right) + M_\theta \delta \left(\frac{\partial \gamma_\theta}{r \partial \theta} \right) + \right. \\ &+ N_{r\theta} \delta \left(\frac{\partial u}{r \partial \theta} \right) + H_{r\theta} \delta \left(\frac{\partial \gamma_r}{r \partial \theta} \right) + N_{r\theta} \delta \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right) + H_{r\theta} \delta \left(\frac{\partial \gamma_\theta}{\partial r} \right) - \frac{N_{r\theta}}{r} \delta v - \frac{H_{r\theta}}{r} \delta \gamma_\theta + \\ &\left. + Q_r \delta \gamma_r + Q_r \delta \left(\frac{\partial \tilde{w}}{\partial r} \right) + Q_\theta \delta \gamma_\theta + Q_\theta \delta \left(\frac{\partial \tilde{w}}{r \partial \theta} \right) \right) dS. \end{aligned}$$

Using the formulas of integration of part and varying on independent variables $u, v, \tilde{w}, \gamma_r, \gamma_\theta$, will get for $\delta\Pi$ and δA :

$$\begin{aligned} \delta\Pi &= - \iint_S \left[\left(\frac{\partial N_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial N_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{N_r - N_\theta}{r} \right) \delta u + \left(\frac{\partial N_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial N_\theta}{\partial \theta} + \frac{2N_{r\theta}}{r} \right) \delta v + \right. \\ &+ \left(\frac{\partial Q_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial Q_\theta}{\partial \theta} + \frac{Q_r}{r} + q_2 \right) \delta \tilde{w} + \left(\frac{\partial M_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_{\theta r}}{\partial \theta} + \frac{M_r - M_\theta}{r} - Q_r \right) \delta \gamma_r + \\ &+ \left. \left(\frac{\partial H_{\theta r}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial M_\theta}{\partial \theta} + \frac{2}{r} H_{r\theta} - Q_\theta \right) \delta \gamma_\theta \right] dS + \int_L [(N_r l + N_{r\theta} m) \delta u + (N_{r\theta} l + N_\theta m) \delta v + \\ &+ (Q_r l + Q_\theta m) \delta \tilde{w} + (M_r l + H_{r\theta} m) \delta \gamma_r + (H_{r\theta} l + M_\theta m) \delta \gamma_\theta] dL. \\ \delta A &= -2\rho h \iint_S \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \delta u + \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \delta v + \frac{h^2}{3} \frac{\partial^2 \gamma_r}{\partial t^2} \delta \gamma_r + \frac{h^2}{3} \frac{\partial^2 \gamma_\theta}{\partial t^2} \delta \gamma_\theta \right) dS + \iint_S \tilde{q}_2 \delta \tilde{w} dS. \end{aligned} \tag{6}$$

Here L – is a limit of the contour of area, S , l and m - are direction cosines of normal to the contour of plate.

If to equate expressions near independent variations in (6), obsessed system of equations of motion through internal forces and moments:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial N_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{N_r - N_\theta}{r} &= 2\rho h \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial N_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial N_\theta}{\partial \theta} + \frac{2N_{r\theta}}{r} &= 2\rho h \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial M_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_{\theta r}}{\partial \theta} + \frac{M_r - M_\theta}{r} - Q_r &= \frac{2}{3} \rho h^3 \frac{\partial^2 \gamma_r}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial H_{\theta r}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial M_\theta}{\partial \theta} + \frac{2}{r} H_{r\theta} - Q_\theta &= \frac{2}{3} \rho h^3 \frac{\partial^2 \gamma_\theta}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial Q_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial Q_\theta}{\partial \theta} + \frac{Q_r}{r} &= -q_2 + 2\rho h \frac{\partial^2 \tilde{w}}{\partial t^2}, \end{aligned} \tag{7}$$

where $\tilde{w} = w + \frac{1}{6} A' \Delta w h^2 + \frac{9\alpha_0 h A_2 q_2}{40E'}$; $\{N_r, N_\theta, N_{r\theta}, Q_r, Q_\theta\} = \int_{-h}^h \{\sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{r\theta}, \tau_{rz}, \tau_{\theta z}\} dz$;

$\{M_r, M_\theta, H_{r\theta}\} = \int_{-h}^h \{\sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{r\theta}\} z dz$; $Q_r = K' \cdot \psi_r$; $Q_\theta = K' \cdot \psi_\theta$; q^+, q^- – it is loading on the external surfaces of plate ($z = \pm h$), which are directed downward, in direction of axis Oz ; G' – it is the module of transversal shear of material of plate; ψ_r, ψ_θ – are deformations of transversal shear of middle surface of a plate.

Equation (7) can be got from the system (4), if, inheriting S.O.Ambartsumyan [1], to increase all equalizations of the system (4) on dz , and first two yet and on $z dz$ and to integrate them in limits from $-h$ to h . Together with that, such method does not allow to get power correct boundary terms on verge of plate.

Boundary terms will get from contour to the integral which is included in equation (6):

$$\begin{aligned} (N_r l + N_{r\theta} m) \delta u = 0; \quad (N_{r\theta} l + N_\theta m) \delta v = 0; \quad (Q_r l + Q_\theta m) \delta w = 0; \\ (M_r l + H_{r\theta} m) \delta \gamma_r = 0; \quad (H_{r\theta} l + M_\theta m) \delta \gamma_\theta = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

From the system of equations (8) it is possible to get static or geometrical boundary terms, depending on what multiplier to equate with a zero.

Putting an equation (4) in place of internal forces and moments their expressions, taking into account previous remarks, will get equalization of motion through moving u, v, w_τ and corners of turn γ_r, γ_θ :

$$\begin{aligned} \Delta u + \frac{1+\nu}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial v}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{v}{r} \right) - \frac{1}{r^2} \left(u + 2 \frac{\partial v}{\partial \theta} \right) &= -\frac{\nu''(1+\nu)}{E} \frac{\partial q_1}{\partial r} + 2\rho h \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}; \\ \Delta v + \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{u}{r} \right) - \frac{1}{r^2} \left(v - 2 \frac{\partial u}{\partial \theta} \right) &= -\frac{2\nu''(1+\nu)}{E(1-\nu)} \frac{1}{r} \frac{\partial q_1}{\partial \theta} + 2\rho h \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}; \\ \Delta \gamma_r + \frac{1+\nu}{2r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial \gamma_\theta}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial \gamma_r}{\partial \theta} + \frac{\gamma_\theta}{r} \right) - \frac{1}{r^2} \left(\gamma_r + 2 \frac{\partial \gamma_\theta}{\partial \theta} \right) &= \\ = \frac{4\psi_r}{5\varepsilon_\tau} - \frac{3\nu''(1+\nu)}{5} \frac{\partial q_2}{hE} + \frac{\rho}{\tilde{E}} \frac{\partial^2 \gamma_r}{\partial t^2} - A' \frac{\rho}{\tilde{E}} \frac{\partial^3 \tilde{W}}{\partial r \partial t^2}; & \\ \Delta \gamma_\theta + \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial \gamma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \gamma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\gamma_r}{r} \right) - \frac{1}{r^2} \left(\gamma_\theta - 2 \frac{\partial \gamma_r}{\partial \theta} \right) &= \\ = \frac{8\psi_\theta}{5\varepsilon_\tau(1-\nu)} - \frac{6\nu''(1+\nu)}{5(1-\nu)hE'} \frac{1}{r} \frac{\partial q_2}{\partial r} + \frac{\rho}{\tilde{E}} \frac{\partial^2 \gamma_\theta}{\partial t^2} - A' \frac{\rho}{r\tilde{E}} \frac{\partial^3 \tilde{W}}{\partial \theta \partial t^2}; & \\ K' \Delta w_\tau = -q_2 + 2\rho h \frac{\partial^2 \tilde{w}}{\partial t^2}. & \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{Here } \psi_r = \frac{\partial w_\tau}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial \Omega}{\partial \theta}; \quad \psi_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial w_\tau}{\partial \theta} + \frac{\partial \Omega}{\partial r}; \quad \gamma_r = -\frac{\partial \bar{w}}{\partial r} - \frac{4}{5} \frac{1}{r} \frac{\partial \Omega}{\partial \theta}; \quad \gamma_\theta = -\frac{1}{r} \frac{\partial \bar{w}}{\partial \theta} + \frac{4}{5} \frac{\partial \Omega}{\partial r}; \\ \bar{w} = w - \frac{2.4 + \chi_0}{3 + \chi_0} w_\tau + \frac{q_2 h}{E_0}; \quad E_0 = \frac{40}{9} (3 + \chi_0) E'; \quad \chi_0 = \frac{3\nu''}{2G/G' - \nu''}; \end{aligned}$$

$$\tilde{W} = w + 0.3A'h^2 \Delta w + 0.43\alpha_0 A_2 q_2 h/E'; \quad \Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}.$$

Thus we got the system of five equations of motion in the sought after functions $u, v, w_\tau, \gamma_r, \gamma_\theta, \Omega$. To these equations maximum terms (8) and initial conditions must be added at $t = 0$:

$$\begin{aligned} w = w_0(r, \theta), \quad \frac{\partial w}{\partial t} = w_1(r, \theta), \\ u = u_0(r, \theta), \quad \frac{\partial u}{\partial t} = u_1(r, \theta), \\ v = v_0(r, \theta), \quad \frac{\partial v}{\partial t} = v_1(r, \theta), \end{aligned} \quad (10)$$

where $w_0, v_0, u_0, u_1, v_1, w_1$ – are given components of the initial displacement and initial velocity from a point (r, θ) .

System of equations of equilibrium (9) in that part, where they describe the bend of plate, it is possible to erect to more usual kind, if in place of sizes $\gamma_r, \gamma_\theta, \psi_r, \psi_\theta$ to put their expressions through functions w, w_τ, Ω :

$$D\Delta^2 w_q = \left(1 - \varepsilon_1 \Delta + \frac{\varepsilon' \rho h^4}{4G} \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) q_2 - m(1 - \varepsilon_1 h^2 \Delta) \frac{\partial^2 \tilde{w}(r, t)}{\partial t^2} - m \varepsilon' \frac{\rho h^2}{4G} \frac{\partial^4 \tilde{w}}{\partial t^4}; \quad (11)$$

$$K' \Delta w_\tau = -q_2 + m \frac{\partial^2 \tilde{w}}{\partial t^2}; \quad \Delta \Omega - k^2 \Omega = \frac{\rho}{G} \frac{\partial^2 \Omega}{\partial t^2},$$

where $\varepsilon_1 = \frac{h^2}{10(1-\nu)} \left(8 \frac{G}{G'} - 3\nu''\right)$; $D = \frac{2}{3} \frac{Eh^3}{1-\nu^2}$; $m = 2\rho h$ – is mass of unit of surface of plate;

$$\varepsilon' = 0.1 \left(8 \frac{G}{G'} + \nu''\right); \quad w_q = w + \varepsilon_2 q_2 / D; \quad k^2 = \frac{5}{2} \frac{G'}{G} h^{-2};$$

$$\varepsilon_2 = \frac{h^4}{20(1-\nu^2)} (1-\alpha) \left(\frac{E}{E'} + A' \frac{E}{G'}\right); \quad \alpha = \frac{\nu'' \cdot G'}{2G}.$$

The got equations (11) take into account inertia of rotation of cross sections of plate and effect of normal tension additionally σ_z . If we set the parameters ε' , A' and $\Delta' \equiv 1 - \varepsilon \Delta$, to zero, then these factors in these equations (11) will not be taken into account. The unaccount of inertia conduces to the loss of right part in equalization of Helmholtz.

Conclusions. For the obtain of equations of equilibrium and boundary terms in a round plate, variation principle of Lagrange is used for complete energy of the stress system. The got equalizations fully coincide after a form with the proper terms and equalizations for the plates of classic theory. A difference is brought in only by coefficients which take into account a transverse shear and compression. These equations take into account inertia of rotation of cross section of plate and influence of normal stress additionally.

Список використаних джерел

1. Амбарцумян С.А. Теория анизотропных пластин. Прочность, устойчивость и колебания / С.А. Амбарцумян. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1987. – 360 с.
2. Васильев В.В. Механика конструкций из композитных материалов / В.В. Васильев. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.
3. Гринченко В.Т. Равновесие и установившиеся колебания упругих тел конечных размеров / В.Т. Гринченко. К.: Наукова думка, 1978. – 264 с.
4. Лурье А.И. Пространственные задачи теории упругости / А.И. Лурье. – М.: Гостехиздат, 1955. – 491 с.
5. Мелконян А.П. О колебаниях трансверсально-изотропных круглых пластинок / А.П. Мелконян, А.А. Хачатрян // Известия АН Армянской ССР. Механика. – 1966. – Т. 19. – №3. – С. 26–34.
6. Швабюк В.И. Учет эффекта сжимаемости нормали в контактных задачах для трансверсально-изотропных плит / В.И. Швабюк // Прикладная механика. – 1980. – Т. 16. – №9. – С. 71–77.

Рецензент: Гануліч Борис Костянтинович, доцент кафедри фізики та вищої математики, к.т.н., доцент

УДК: 537.312.52; 537.312.8

DOI 10.36910/775.24153966.2021.72.28

В.М. Максимич

Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

ЕЛЕКТРОПРОВІДНІ ТА ПОЛЯРИЗАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ГЕТЕРОФАЗНОГО КОМПОЗИТУ ІЄРАРХІЧНОЇ АРХІТЕКТУРИ ДІОКСИД КРЕМНІЮ<ТІОСЕЧОВИНА<ДИХЛОРИД КОБАЛЬТУ>>

Сформовано клатрат $MCM-41<CH_4N_2S<CoCl_2>>$ із ієрархічною архітектурою типу субгосподар<господар<гість>> та досліджено його електропровідні властивості. Методом імпедансної спектроскопії досліджено частотну поведінку дійсної та уявної частини комплексного опору в діапазоні $10^{-3} - 10^6$ Гц. Вимірювання проводилися за нормальних умов, за накладання постійного магнітного поля напруженістю 220 кА/м та за освітлення (освітлення проводилося імітатором сонячного спектру потужністю 982 Вт/м²). Методом термостимульованого розряду в температурному інтервалі від 240 до 340 К досліджено будову домішкового енергетичного спектру біля рівня Фермі. Встановлено, що ВАХ одержаного інкапсуляту $MCM-41<CH_4N_2S<CoCl_2>>$ вказує на здатність накопичувати електричну енергію, яке має важливе практичне значення і свідчить про перспективність даної структури для створення квантового акумулятора

Ключові слова: клатрат, ієрархічна архітектура, кремнеземна матриця, діелектрична проникність, система «господар-гість».

V.M. Maksymych

ELECTRICAL CONDUCTIVITY AND POLARIZATION PROPERTIES OF HETEROPHASE COMPOSITE OF HIERARCHICAL ARCHITECTURE SILICON DIOXIDE<THIOUREA<COBALT(II) CHLORIDE>>

MCM-41<CH₄N₂S<CoCl₂>> clathrate with a hierarchical subhost<host<guest>> type architecture was formed and its electrically conductive properties were studied. The method of impedance spectroscopy studied the frequency behavior of the real and imaginary parts of the complex total impedance in the range of $10^{-3} - 10^6$ Hz. The measurements were performed under normal conditions, in a permanent magnetic field (220 kA/m), or under light illumination (lighting was performed by a solar spectrum simulator with a power of 982 W/m²). The structure of the impurity energy spectrum at the Fermi level was investigated by the method of thermostimulated discharge in the temperature range from 240 to 340 K. It was found that the voltage-current characteristic of the obtained incapsulate of MCM-41<CH₄N₂S<CoCl₂>> indicates the ability to accumulate electrical energy, which has important practical value and indicates the prospects of this structure for the creation of a quantum accumulator.

Keywords: clathrate, hierarchical architecture, silica matrix, dielectric constant, host-guest system.

Постановка проблеми. Останнім часом формування неорганічно/органічних наногібридів вийшло на чільне місце у дослідженнях як один із перспективних способів отримання структур з унікальними фізико-хімічними властивостями та характеристиками. Дані комплекси можуть формуватися за інтеркаляційною технологією, яка дозволяє інкапсулювати гостьові компоненти у порожнини матеріалів-«господарів», в яких молекулярні центри налаштовані на селективне зв'язування певного визначеного «гостя» за так званим принципом «замок-ключ». Також, за допомогою цієї методики можна синтезувати клатрати із складною ієрархічною архітектурою, типу субгосподар<господар<гість>>, що відкриває абсолютно нові можливості у формуванні наноструктурованих систем та розвитку наноінженерії в цілому. У сформованих таким чином клатратах всі компоненти зв'язуються між собою слабкими силами взаємодії, що дозволяє зберегти унікальні властивості кожної з них. Використання неорганічних матриць не тільки дозволяє структурувати супрамолекулярні комплекси, а й дозволяє забезпечити надійну антикоагуляційну матричну ізоляцію наносистем та стабілізацію їх властивостей [1, 2]. Підтвердженням перспективності такого підходу є те, що у сформованих структурах можуть проявлятися досить цікаві з практичної точки зору ефекти, такі як: «від'ємна» ємність, магніторезистивний та магнітоємнісний ефекти [3, 4], високі значення діелектричної проникності з поєднанням тангенса кута електричних втрат меншим за 1 при низьких частотах. Останнє може свідчити про можливість накопичення електричної енергії і використання даної структури для виготовлення квантового акумулятора [5, 6].

Постановка завдань. Квантові механізми дозволяють накопичувати електричну енергію значно вищої густини, що дасть поштовх до значного розвитку систем відновлювальної енергетики та підвищення характеристик існуючих автономних джерел енергії. А такі, вище

наведені, неординарні властивості ієрархічних клатратів безперечно актуалізують подальше розвинення досліджень, насамперед – вивчення залежності перебігу фізичних процесів від виду матриці субгосподаря та супрамолекулярного гостя, а також з'ясування впливу на них власне ієрархічності архітектури. Цьому і присвячена дана робота.

Методологія досліджень. В експериментах як матеріал субгосподар була використана кремнеземна порожниста матриця МСМ-41 [7] (рис.1). Вона має гексагональну структуру типу бджолиних сот з товщиною стінок 0,6—0,8 нм і каліброваним розміром пор, який можна направлено змінювати в діапазоні 3—10 нм.

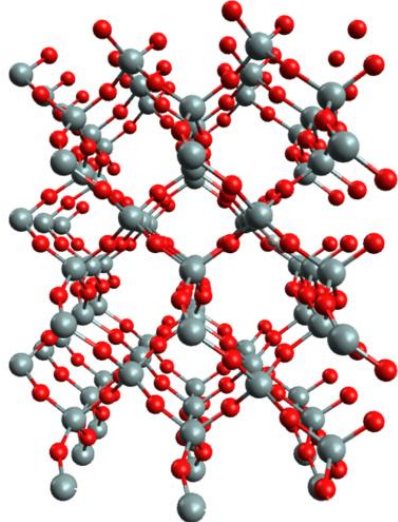


Рис.1. Просторове представлення структури МСМ-41.

ван-дер-ваальсовим діаметром $5,5 \div 5,8$ Å. Дипольний момент тіосечовини становить $18,86 \cdot 10^{-30}$ С*м, відносна діелектрична проникність тіосечовини становить 2,224 [11]. Тіосечовина широко використовується в різних електрохімічних процесах [12]. У цю трубку можуть увійти «гості» з невеликим перерізом. [13, 14].

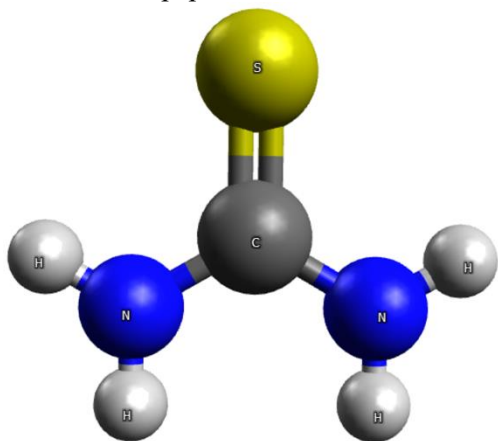


Рис.2. Молекулярна структура тіосечовини.

вимірювального сигналу. Така геометрія вимірювань була обрана з метою колінеарної дії постійного магнітного поля та струму вимірювального сигналу.

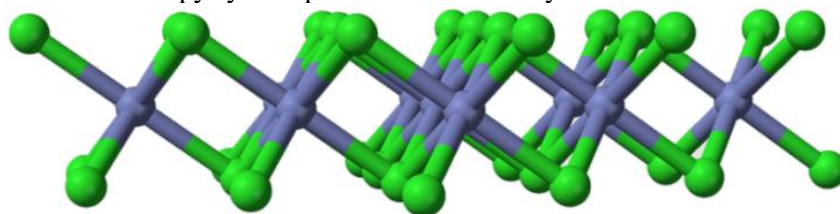


Рис.3. Молекулярна структура дихлориду кобальту.

Згідно з даними електронної мікроскопії, діаметр пор становив ~ 37 Å, питома поверхня каналів становить 984 м²/г. Стінки пор МСМ-41 аморфні, але на великих масштабах молекулярні ґратки володіють далекосяжним порядком. Гостьовим контентом, як проміжний господар, був вибраний органічний кавітанд тіосечовина (СН₄Н₂С) (рис.2).

Тіосечовину також називають тіокарбамідом, 2-тіосечовиною, ізотіосечовиною [8]. Відстань зв'язку С=С становить $1,71$ Å, відстані С-Н в середньому $1,33$ Å [9]. «Господар»-тіосечовина утворюється водневим зв'язком, і він може включати різноманітні «гості»-молекули відповідного розміру та форми [10]. Він може виступати як проміжний «господар» завдяки міцним міжмолекулярним водневим зв'язкам між кислотними протонами груп NH₂ і атомами кисню або сірки сусідніх молекул. В результаті з молекул сечовини утворюється хіральна спіральна порожниста трубка з мінімальним ван-дер-ваальсовим діаметром $5,5 \div 5,8$ Å. Дипольний момент тіосечовини становить $18,86 \cdot 10^{-30}$ С*м, відносна діелектрична проникність тіосечовини становить 2,224 [11]. Тіосечовина широко використовується в різних електрохімічних процесах [12]. У цю трубку можуть увійти «гості» з невеликим перерізом. [13, 14].

«Гостем» був неорганічний компонент дихлорид кобальту (CoCl₂) [15, 16] (рис.3).

З метою дослідження механізмів струмопроходження та їх зміни при впровадженні супрамолекулярного комплексу CS(NH₂)₂<C₁₄H₁₀> в напівпровідникову матрицю GaSe, були виміряні імпедансні спектри за допомогою вимірювального комплексу «AUTOLAB» фірми «ECO CHEMIE» (Нідерланди) в напрямку кристалографічної осі С монокристалів в діапазоні частот $10^{-3} \div 10^6$ Гц. Вимірювання імпедансних спектрів проводили за нормальних умов, в постійному магнітному полі (220 кА/м), та за освітлення (для стандартного сонячного спектру AM 1,5G загальна доступна потужність становить 982 Вт/м²). Дія відповідних фізичних полів була направлена в напрямку пропускання

З метою встановлення будови електронної енергетичної топології домішкових рівнів вимірювалися спектри термостимульованого розряду в режимі короткозамкнених контактів при лінійному нагріванні зі швидкістю $5\text{ }^\circ\text{C}/\text{хв}$.

Впровадження гостьового контенту відбувалося за допомогою методики інкапсуляції, описаної, наприклад, в роботі [17]. При цьому, кавітат $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}<\text{CoCl}_2>$ формувався попередньо при змішуванні насичених розчинів відповідних компонент у молярному співвідношенні 1:1.

Викладення основного матеріалу. Для вихідної десорбованої матриці МСМ-41 отримуємо спадну поведінку $\text{Re}Z(\omega)$, яка характеризується частотозалежністю у всьому досліджуваному частотному діапазоні (крива 1 на рис. 4). Після інкапсуляції тіосечовини та дихлориду кобальту незвичним чином міняється електропровідність (крива 2 на рис. 4). В інтервалі частот $0,001\div 0,002$ Гц зафіксоване невелике зростання реальної складової комплексного імпедансу, після якого відбувається її зменшення у 5 раз; в діапазоні $0,003\div 1$ Гц крива $\text{Re}Z(\omega)$ паралельна до аналогічної ділянки вихідної матриці МСМ-41. В середньочастотному діапазоні $1\div 200$ Гц реальна частина комплексного імпедансу набуває осциляційної поведінки, що, як свідчать роботи [18, 19] є властиве даному типу клатратів. В діапазоні $200\div 10^4$ Гц $\text{Re}Z(\omega)$ зростає більш як в 4 рази. Це може бути зумовлено тим, що супрамолекулярний «гість» $<\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}<\text{CoCl}_2>$ призводить до перебудови домішкового енергетичного спектру, який, окрім широких смуг енергетичних рівнів, формує також глибокі квантові ями та більш дрібні рівні прилипання в забороненій зоні. Останні спричиняють середньочастотні осциляції $\text{Re}Z(\omega)$ за рахунок захоплення та утримування носіїв заряду протягом часу співмірного з півперіодом синусоїдального вимірювального сигналу [20].

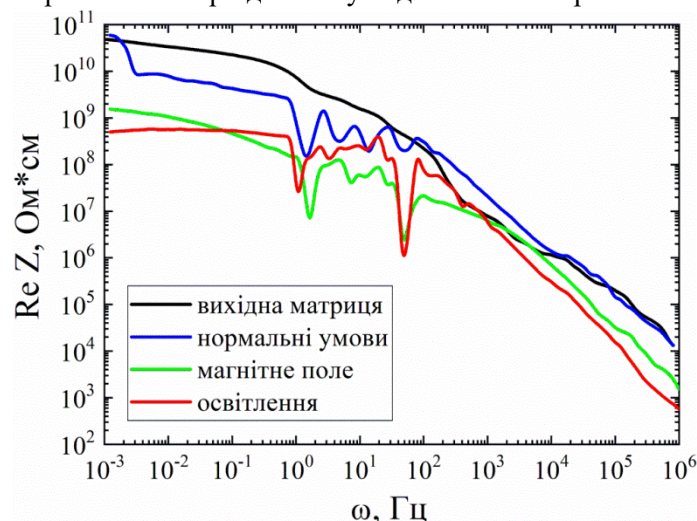


Рис. 4. Частотні залежності дійсної складової питомого імпедансу вихідної десорбованої матриці МСМ-41 та клатрату МСМ-41 $<\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}<\text{CoCl}_2>$, виміряні за нормальних умов, в магнітному полі та за освітлення.

У постійному магнітному полі реальна частина комплексного імпедансу зменшується у 40 раз (крива 3 на рис.4). Також, зникає незвична поведінка $\text{Re}Z(\omega)$ в низькочастотному діапазоні, що може бути зумовлено зсувом енергетичного спектру відносно рівня Фермі постійним магнітним полем, в результаті якого відбувається делокалізація значної частини носіїв, а також їхнє вивільнення з глибоких квантових ям. Швидше за все, асиметрія густини станів зумовлена супрамолекулярним «гостем», який містить магнітоактивний компонент, оскільки вихідна десорбована матриця нечутлива до магнітного поля. Важливим в даному випадку є отриманий магніторезистивний ефект, який на практиці може бути використаний для виготовлення надчутливих головок зчитування в магнітних запам'ятовуючих пристроях. Це дозволить записувати інформацію із набагато більшою густиною. Під час освітлення реальна частина комплексного опору зменшується на 2 порядки (крива 4 на рис. 4), яке спричинене фоточутливістю впроваджених тіосечовини та дихлориду кобальту. При цьому, також згладжується низькочастотна ділянка $\text{Re}Z(\omega)$ та зростає амплітуда середньочастотних осциляцій за рахунок активації додаткових пасткових центрів. Фоторезистивний ефект теж представляє великий інтерес з точки зору практичного застосування.

Впровадження в пори МСМ-41 супрамолекулярного гостьового компоненту $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}\langle\text{CoCl}_2\rangle$ призводить до неординарних змін електропровідності (крива 2 на рис. 4). В найнижкочастотному діапазоні $0,001\div 0,002$ Гц спостерігається незначне зростання $\text{Re}Z$, після чого відбувається різке 5-кратне зменшення $\text{Re}Z$ та встановлення в частотному діапазоні $0,003\div 1$ Гц ділянки, яка практично паралельна аналогічній ділянці для вихідної десорбованої матриці МСМ-41. Наступний, середньочастотний інтервал $1\div 200$ Гц, характеризується осциляційною поведінкою $\text{Re}Z(\omega)$, що, як свідчать роботи [18, 19] притаманно даному типу клатратів. В частотному інтервалі $200\div 10^4$ Гц спостерігається зростання $\text{Re}Z$, яке досягає більш як 4-кратного значення. Така поведінка $\text{Re}Z(\omega)$ клатрату $\text{MSM-41}\langle\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}\langle\text{CoCl}_2\rangle\rangle$ спричинена значною перебудовою домішкового енергетичного спектру за рахунок впровадження саме супрамолекулярної гостьової підсистеми, яка, окрім широких смуг енергетичних рівнів, формує також глибокі квантові ями та більш дрібні рівні прилипання в забороненій зоні. Останні спричиняють середньочастотні осциляції $\text{Re}Z(\omega)$ за рахунок захоплення та утримування носіїв протягом часу співмірного з півперіодом синусоїдального вимірювального сигналу [20].

Накладання постійного магнітного поля призводить до максимально 40-кратного зменшення $\text{Re}Z$ (крива 3 на рис.4). При цьому, повністю зникає неординарна низькочастотна ділянка спектру. Це може свідчити про певний зсув енергетичного спектра відносно рівня Фермі постійним магнітним полем, в результаті якого відбувається делокалізація значної частини носіїв, а також вивільнення носіїв з глибоких квантових ям. Так як вихідна матриця є нечутливою до магнітного поля, то можна припустити, що асиметрія густини станів відбувається саме за рахунок супрамолекулярного компоненту, який містить магнітоактивний гість. Можемо припустити, що саме він і є відповідальним за низькочастотну ділянку $\text{Re}Z(\omega)$, яка в магнітному полі повністю згладжується, натомість середні осциляції $\text{Re}Z(\omega)$ зберігаються. Важливим в даному випадку є отриманий магніторезистивний ефект, який на практиці може бути використаний для виготовлення надчутливих головок зчитування в магнітних запам'ятовуючих пристроях. Це дозволить записувати інформацію із набагато більшою густиною. Дія освітлення призводить до зменшення $\text{Re}Z$ на два порядки величини (крива 4 на рис. 4), що в даному випадку є результатом високої fotocутливості супрамолекулярного компоненту $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}\langle\text{CoCl}_2\rangle$. При цьому, також згладжується низькочастотна ділянка $\text{Re}Z(\omega)$ та зростає амплітуда середньочастотних осциляцій за рахунок активації додаткових пасткових центрів. Фоторезистивний ефект теж представляє великий інтерес з точки зору практичного застосування.

З метою більш детального дослідження енергетичної будови домішкових рівнів було виміряно струми термостимульованого розряду (рис. 5). Як бачимо, за низьких температур спектр представляє собою вузькі смуги з суттєво вищою густиною станів і добре вираженим мінізонним характером. Однак, за кімнатної температури спектр переходить до квазінеперервного вигляду. В даному випадку спостерігається релаксація гомозаряду.

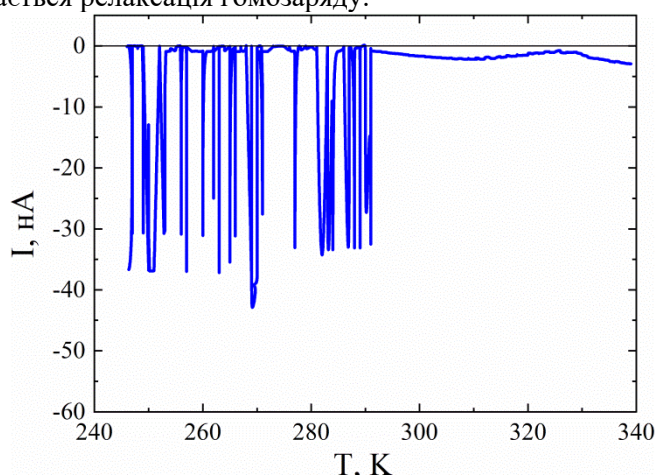


Рис. 5. Струми термостимульованого розряду, виміряні для клатрату $\text{MSM-41}\langle\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}\langle\text{CoCl}_2\rangle\rangle$.

Беручи до уваги вищенаведені результати слід очікувати неординарних поляризаційних властивостей сформованого клатрату $\text{MSM-41}\langle\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}\langle\text{CoCl}_2\rangle\rangle$. Розглянемо поведінку годографу імпедансу на діаграмах Найквіста, які представлені на рис. 6. Діаграма Найквіста як для вихідної матриці МСМ-41, так і для інкапсуляту $\text{MSM-41}\langle\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}\langle\text{CoCl}_2\rangle\rangle$ (криві 1 та 2 на рис. 6) представляють собою яскраво виражені два півкола, які відображають перенесення електричного заряду через саму матрицю МСМ-41 та між частинками матриці. При моделюванні таку імпедансу

картину можна представити послідовним підключенням двох паралельних $R||C$ ланок (вставка до рис. 6). Для наногібриду $MCM-41<CH_4N_2S<CoCl_2>>$ діаграма Найквіста теж зберігає дводуговий характер, проте менш яскраво виражений.

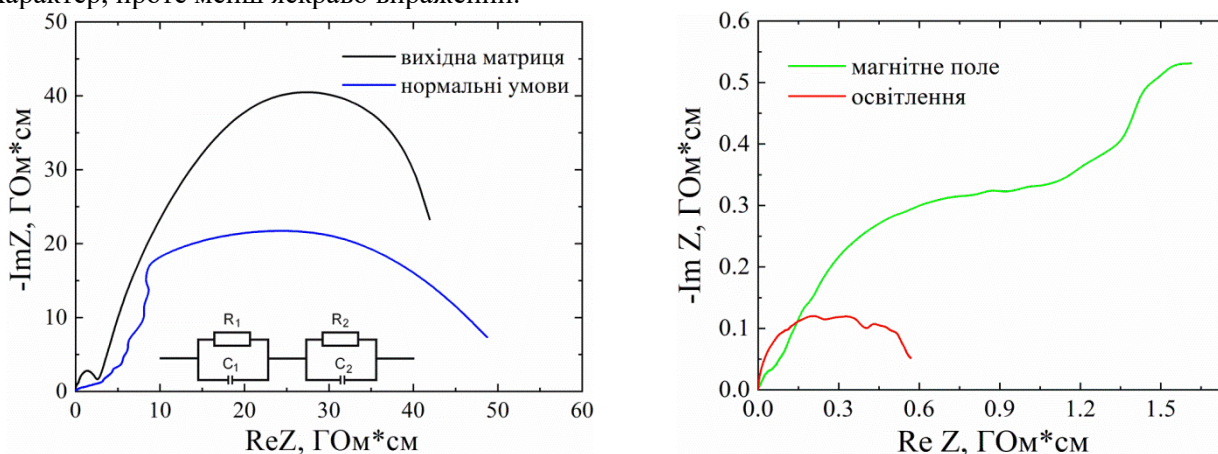


Рис. 6. Діаграми Найквіста виміряні для вихідної десорбованої матриці МСМ-41 та клатрату $MCM-41<CH_4N_2S<CoCl_2>>$ за нормальних умов, в магнітному полі та за освітлення.

Перше від початку координат півколо ($R_1||C_1$), що відповідає високочастотній частині спектру, представляє процеси струмопроходження через об'єм частинок матеріалу, а друге півколо ($R_2||C_2$), що відповідає низькочастотній частині спектру, представляє процеси струмопроходження в просторі між частинками. Провівши моделювання відповідних діаграм Найквіста відповідними еквівалентними електричними схемами були отримані наступні значення відповідних величин (таблиця 1). Як можемо бачити, інтеркаляція тіосечовини та дихлориду кобальту призводить до зростання опору R_1 та зменшення R_2 . Невеликий ріст спостерігається C_1 . Однак, великої зміни набуває ємності C_2 величина якої зростає на два порядки. Це свідчить про зростання поляризації частинок та накопичення електричного заряду на їх межах.

Табл. 1.

Параметри еквівалентної електричної схеми отримані при моделюванні імпедансних спектрів.

	R_1 , Ом	C_1 , Ф	R_2 , Ом	C_2 , Ф
MCM-41	$2.978 \cdot 10^9$	$1.379 \cdot 10^{-12}$	$6.650 \cdot 10^{10}$	$1.024 \cdot 10^{-11}$
$MCM-41<TS<CoCl_2>>$	$3.816 \cdot 10^9$	$1.586 \cdot 10^{-12}$	$3.968 \cdot 10^{10}$	$1.080 \cdot 10^{-9}$

Більш детально дослідити поляризаційні властивості інкапсуляту $MCM-41<CH_4N_2S<CoCl_2>>$ можна при розгляді частотних залежностей діелектричної проникності ϵ (рис. 7). З точки зору практичного значення отриманих результатів нас цікавили високі значення ϵ в частотних інтервалах, в яких тангенс кута діелектричних втрат менший за 1 (рис. 8). Такій умові відповідає низькочастотна ділянка частотного спектру. Як можемо бачити, впровадження гостьового компонента призводить до зростання $\epsilon(\omega)$ частотному діапазоні $10^{-3} \div 2 \cdot 10^{-2}$ Гц приймаючи максимальні значення більші за $2.8 \cdot 10^5$ (крива 2 на рис. 15). Така поведінка $\epsilon(\omega)$, найімовірніше, виникає за рахунок максвелл-вагнерівської сегментарної поляризації та додаткової поляризації, що виникає при перескоках носіїв заряду по локалізованих станах поблизу рівня Фермі. Підтвердження цього отримуємо за накладання постійного магнітного поля, в результаті чого сильно зростає значення ϵ (крива 3 на рис. 7), проте, перестає виконуватися умова $\tan \delta < 1$ (крива 3 на рис. 8). Те ж саме спостерігаємо і за освітлення (крива 4 на рис. 7 та 8). Отриманий результат свідчить про перспективність даного інкапсуляту $MCM-41<CH_4N_2S<CoCl_2>>$ як матеріалу для виготовлення квантового акумулятора електричної енергії.

Підтвердження здатності інкапсуляту $MCM-41<CH_4N_2S<CoCl_2>>$ накопичувати електричну енергію отримуємо при вимірюванні ВАХ (рис.9).

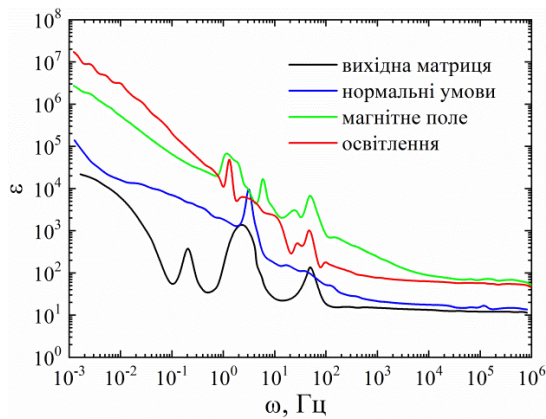


Рис. 7. Частотні залежності діелектричної проникності вихідної десорбованої матриці MCM-41 та клатрату MCM-41<CH₄N₂S<CoCl₂>>, виміряні за нормальних умов, в магнітному полі та за освітлення.

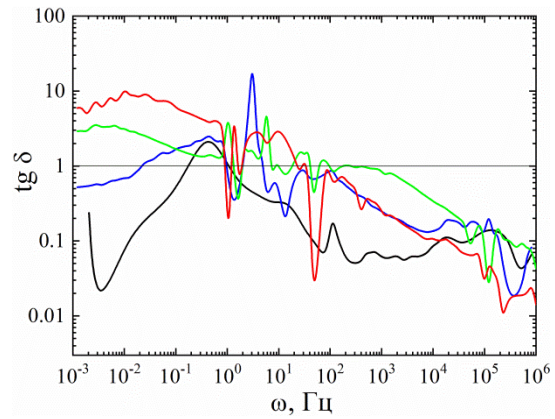


Рис. 8. Частотні залежності тангенса кута діелектричних втрат вихідної десорбованої матриці MCM-41 та клатрату MCM-41<CH₄N₂S<CoCl₂>>, виміряні за нормальних умов, в магнітному полі та за освітлення.

В даному випадку ВАХ приймає відмінний від лінійного, що характерно для вихідної десорбованої матриці MCM-41, вигляд гістерези, яка характерна для нефарадеїських накопичувачів електричної енергії (крива 1 на рис. 9). Такі пристрої, як наприклад, суперконденсатори, що працюють на ефекті подвійного електричного шару, де розділення зарядів проходить на межі тверде тіло – електроліт. В нашому ж випадку накопичення електричного заряду відбувається на міжзеренних межах за рахунок поляризації. Даний результат досліджень відкриває перспективу створення неелектрохімічних джерел накопичення енергії, із значно вищими питомими енергоємнісними показниками, які можна безпосередньо інкорпорувати в структуру пристроїв мікро- та наноелектроніки.

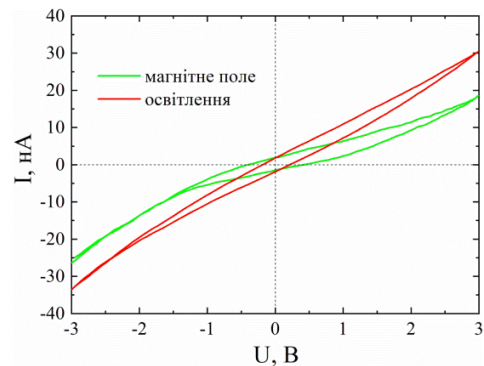
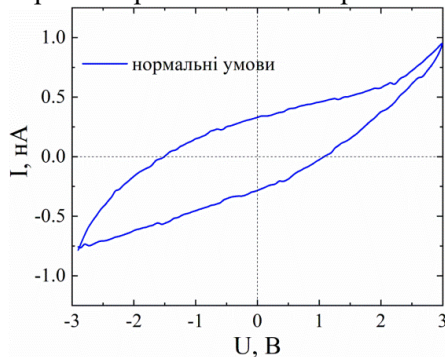


Рис. 9. ВАХ клатрату MCM-41<CH₄N₂S<CoCl₂>>, виміряні за нормальних умов, в магнітному полі та за освітлення.

Висновки:

1. Для клатрату MCM-41<CH₄N₂S<CoCl₂>> були зафіксовані фоторезистивні та магніторезистивні ефекти. Останній може мати вагоме практичне значення для виготовлення надчутливих головок зчитування в магнітних запам'ятовуючих пристроях.
2. В інкапсуляті MCM-41<CH₄N₂S<CoCl₂>> у всій досліджуваній температурній області відбувається релаксація гомозаряду. При цьому, спектр термостимульованого розряду за низьких температур набуває вузькосмугового мінізонного вигляду з високою густиною станів, який за кімнатних температур переходить до практично неперервних наборів часів релаксації.
3. ВАХ отриманого клатрату MCM-41<CH₄N₂S<CoCl₂>> має гістерезисний вигляд, що свідчить про його здатність до акумулювання електричної енергії на міжзеренних межах.
4. Вимірювання поляризаційних вимірів інкапсуляту MCM-41<CH₄N₂S<CoCl₂>> зафіксували високе значення діелектричної проникності $2.8 \cdot 10^5$ у низькочастотному діапазоні, що свідчить про перспективність використання даної структури як матеріалу для виготовлення квантового акумулятора.

Список використаних джерел:

1. Choy, J.-H. Intercalative route to heterostructured nanohybrid / *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2004. 65(2-3), p. 373–383. doi:10.1016/j.jpcs.2003.10.047 ,
2. Choi, G., Eom, S., Vinu, A., & Choy, J.-H. 2D Nanostructured Metal Hydroxides with Gene Delivery and Theranostic Functions; A Comprehensive Review / *The Chemical Record*, 2018. 18(7-8), p. 1033–1053. doi:10.1002/tcr.201700091
3. Chabecki, Dariusz Calus, Fedir Ivashchyshyn, Anna Pidluzhna, Orest Hryhorchak, Ihor Bordun, Oleksandr Makarchuk and Andriy V. Kityk Functional Energy Accumulation, Photo- and Magnetosensitive Hybridity in the GaSe-Based Hierarchical Structures / *Energies*, 2020. Vol. 13(17), p. 4321(1-16). doi:10.3390/en13174321
4. I. Grygorchak, D. Calus, A. Pidluzhna, F. Ivashchyshyn, O. Hryhorchak, P. Chabecki, R. Shvets Thermogalvanic and local field effects in SiO₂<SmCl₃> structure / *Applied Nanoscience*, 2020. doi:10.1007/s13204-020-01447-2
5. Tomasz Popławski, Anna Pidluzhna, Fedir Ivashchyshyn, Piotr Chabecki, Roman Shvets Properties and Application of Nanoporous Silica Filled with Polyaniline and Iodine / *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 2019. Vol. 11(6), p. 06023(1-5). doi: 10.21272/jnep.11(6).06023
6. F. Ivashchyshyn, A. Pidluzhna, D. Calus, O. Hryhorchak, P. Chabecki, O. Makarchuk Multivoltaic GaSe clathrate as new hybrid functional nanostructure / *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 2021. Vol. 69(2). doi: 10.24425/bpasts.2021.136726
7. Xuefeng Guo, Min Lai, Yan Kong, Weiping Ding, Qijie Yan and Peter C. T. Novel Coassembly Route to Cu-SiO₂ MCM-41-like Mesoporous Materials / *Langmuir*, 2004. Vol. 20, No. 7. P. 2879–2882
8. Huang F, Li Z & Jiang H, 1997. Analysis and control of thiourea content in ammonium containing zinc plating bath. *Cailiao Baohu* 30: 23–25
9. Mullen D, Hellner E.A. Simple Refinement of Density Distributions of Bonding Electrons. IX. Bond Electron Density Distribution in Thiourea, CS(NH₂)₂, at 123K *Acta Crystallogr* , 1978. (9): 2789–2794. doi:10.1107/S0567740878009243
10. Takemoto K, Sonoda N. Inclusion Compounds of Urea, Thiourea and Seleneurea, *Inclusion Compounds*. IJ.L. Atwood, J.E.D. Davies and D.D. MacNicol (Eds.), 1984, Vol. 2, p. 47-67.
11. Pluta T, Sadlej A.J. Electric properties of urea and thiourea. / *J. Chem. Phys*, 2001. 114(1): 136-146. doi:10.1063/1.1328398
12. Puzzarini C, 2012. Molecular Structure of Thiourea. / *J. Phys. Chem. A*. 116, 4381–4387. doi:10.1021/jp301493b
13. Samia Kausar, Ataf Ali Altaf, Muhammad Hamayun, Amin Badshah and Abdul Razzaq. Supramolecular Chemistry and DNA Interaction Studies of Ferrocenyl Ureas and Thioureas, 2020. doi:10.5772/intechopen.84412
14. Shang X, Yang Z, Fu J, Zhao P, & Xu XThe. Synthesis and Anion Recognition Property of Symmetrical Chemosensors Involving Thiourea Groups: Theory and Experiments. / *Sensors*, 2015. 15(11): 28166–28176. doi:10.3390/s151128166
15. З. Д. Ковалюк, В. В. Шевчик, В. Б. Боледзюк, В. В. Нетяга. Дослідження електричних властивостей InSe інтеркальованого кобальтом / *Журнал нано- та електронної фізики*, 2014. Т. 6, № 4, с. 04038-1-04038-5
16. В. Б. Боледзюк, А. Д. Шевченко, З. Р. Кудринський. Вплив інтеркалювання кобальтом на властивості шаруватих кристалів In₂Se₃ / *Журн. нано- та електрон. фізики*, 2012. Т.4, № 3, с. 03017.
17. Бішанюк, Т. М., & Григорчак, І. І. Формування та властивості МСМ-41 з інкапсульованим в його пори β-циклодекстрином, FeSO₄ та їх кавітатом. / *Журнал фізики та інженерії поверхні*, 2017. 12(2), 169-183.
18. F.O. Ivashchyshyn, G.V. Baryshnikov, R. Galagan, V. Litvin, D. Calus, R.Ya. Shvets, P. Chabecki, N.T. Pokladok. Electroconductive and polarization properties of inorganic-organic MCM-41<PTHQ> encapsulant / *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 2020. Vol. 12(3), p. 03032(1-5). doi:10.21272/jnep.12(3).03032
19. Fedir Ivashchyshyn, Dariusz Calus, Anna Pidluzhna, Piotr Chabecki Electric Properties of MCM-41 SmCl₃ Nanohybrid Encapsulate / *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 2020. Vol. 12(3), p. 03014(1-5). doi:10.21272/jnep.12(3).03014
20. Kostrobij P., Grygorchak I., Ivashchyshyn F., Markovych B., Viznovych O., Tokarchuk M. Generalized Electrodiffusion Equation with Fractality of Space-Time: Experiment and Theory. / *Journal of Physical Chemistry A*, 2018. Vol. 122(16), p. 4099-4110.

Рецензент: д.т.н., головний науковий співробітник кафедри «Прикладної фізики і наноматеріалознавства» Національного університету «Львівська політехніка» Іващишин Федір Олегович.

М. С. Ткаченко

*Студент кафедри інформаційних систем та технологій (ICT) Факультету інформатики та обчислювальної техніки (ФІОТ) Національного технічного університету України "Київський Політехнічний Інститут ім. Ігоря Сікорського", Київ, Політехнічна 41, корп. 18,
appdev.max@gmail.com
+380973743174, 0000-0002-5372-0883*

ЗАСТОСУВАННЯ R-CNN ПРИ АВТОМАТИЧНОМУ ПОЗИЦІОНУВАННІ ОБ'ЄКТІВ ЧЕРЕЗ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИЙ АНАЛІЗ ГРАФІЧНИХ ДАНИХ

Визначено найбільш актуальні підходи, що використовуються у рамках побудови систем оптичного моніторингу та автоматичного контролю, на базі масивів даних відеореєстрації шляхом застосування алгоритмів нейромережевого аналізу. Зазначено переваги застосування при вирішенні даного класу задач згорткових нейромережевих архітектур, що здійснюють аналіз на основі визначення областей інтересу, а також методу опорних векторів та регресійних моделей. Метою розробки концепції оптимізації відповідних алгоритмів машинного аналізу стало зменшення навантаження на обчислювальний ресурс у процесі виділення і класифікації візуального об'єкту через застосування процедури вибіркового пошуку великого області інтересу для кожної матриці зображення та подальшого визначення вектора ознак для кожної області інтересу. Розроблений математичний апарат може бути ефективно використано при вирішенні широкого класу задач геолокації та надає можливість провести оцінку оптимізації системи машинного аналізу відповідно цільових показників точності, зменшення часу обробки вхідного запиту та зменшення навантаження на обчислювальний ресурс апаратного комплексу.

Ключові слова: система відеореєстрації, позиціонування візуального об'єкту, машинний аналіз, згорткова нейромережа, метод опорних векторів, регресійний аналіз, функція втрат.

Tkachenko Maksym

APPLICATION OF R-CNN IN AUTOMATIC IN-DOOR POSITIONING THROUGH ANNS ANALYSIS OF GRAPHICAL DATA

The most relevant approaches used in the framework of the construction of optical monitoring and automatic control systems based on video registration data arrays by applying neural network analysis algorithms have been determined. The advantages of using convolutional neural network architectures for solving this class of problems, which perform analysis based on the definition of areas of interest, as well as the method of support vectors and regression models, are indicated. The purpose of the machine analysis relevant algorithms optimization concept development was to reduce the load on the computing resource in the process of selection and classification of the visual object through the application of the procedure of selective search of regions of interest for each image matrix and subsequent determination of the feature vector for each region of interest. The developed mathematical apparatus can be effectively used in solving a wide class of geolocation problems and provides an opportunity to evaluate the optimization of the machine analysis system in accordance with the target accuracy indicators, reducing the processing time of the incoming request and reducing the load on the computing resource of the hardware complex.

Keywords: video surveillance systems, visual object positioning, machine analysis, convolutional neural network, support vector method, regression analysis, loss function.

Вступ. Розвиток транспортних систем, підвищення рівня життя громадян та впровадження заходів по збільшенню рівня інклюзивності міського простору для людей з особливими потребами, що є характерним для багатьох країн, призвели до необхідності розробки засобів оптичного моніторингу у рамках систем автоматизованого контролю, які надають можливість проводити координацію громадян, запобігати потенційним правопорушенням, тощо. На рівні інформаційних технологій зазначена проблема може бути вирішена через машинний аналіз у режимі реального часу масивів даних, що надходять від систем відеореєстрації та мобільних засобів зв'язку громадян.

На основі нейромережевих алгоритмів може бути здійснено відновлення та уніфікація відеоданих, що надходять від набору пристроїв фотореєстрації з різною якістю фотоматриці, а також виділено та класифіковано візуальні об'єкти і визначено їх положення та траєкторію руху у межах тривимірної сцени у рамках вирішення задачі позиціонування [1-4]. Слід зазначити, що вказана задача може бути спрощена через проведення додаткових процедур машинного аналізу аудіоданих, а також даних геолокації, але це додатково збільшує ресурсомісткість задачі позиціонування та, відповідно, час обробки вхідних даних.

Аналіз сучасних досліджень і публікацій присвячених проблемам нейромережевого аналізу відеоданих з метою позиціонування візуального об'єкту у межах тривимірної сцени вказав на пріоритет застосування алгоритмів на основі архітектури згорткової нейромережі (CNN) та,

зокрема методів вибіркового пошуку областей інтересу (RoI), що у рамках загальноприйнятої класифікації визначається як клас R-CNN [5-8]. Методи, що базуються на вибіркового пошуку областей інтересу дозволяють зменшити ресурсомісткість алгоритмів машинного аналізу на основі згорткових нейромереж, але за умов необхідності аналізу великих об'ємів даних у режимі реального часу при обмеженні обчислювального ресурсу апаратної платформи зазначений підхід не забезпечує достатній рівень оптимізації системи.

Тому на сьогоднішній день більш активно використовуються комбіновані моделі, що включають у себе метод опорних векторів (SVM) та регресійний аналіз, формуючі у рамках класу нейромережових архітектур R-CNN такі моделі, що є спеціалізованими для виділення візуальних об'єктів, як «Fast R-CNN» [9, 10], «Faster R-CNN» [11, 12], «R-CNN-JS» [13], «Mask R-CNN» [14, 15] і «YOLO: You Look Only Once» [16, 17]. Як показали експериментальні результати, наведені у відповідних публікаціях, алгоритми машинного аналізу на основі зазначених моделей нейромережової архітектури здатні суттєво зменшити час обробки графічних даних і відеоданих. Тим не менш, при роботі з масивом даних систем відеоспостереження суттєво зменшується точність машинного аналізу з метою виділення, класифікації та позиціонування візуального об'єкту, у зв'язку з меншою якістю набору зображень які представляють відеопотік, невідповідністю якості окремих зображень між собою, рівня освітлення, ракурсу візуальних об'єктів, тощо. Тому в рамках даного дослідження в якості *невирішеної частини загальної проблеми* розглядається саме адаптація алгоритмів на основі архітектури згорткової нейромережі при вирішенні задачі виділення, класифікації і позиціонування візуального об'єкту у межах тривимірної сцени.

Таким чином, **метою дослідження** стала розробка цілісної методології побудови і оптимізація відповідно цільових показників алгоритмів машинного аналізу відеоданих на основі згорткових нейромережових архітектур, що здійснюють аналіз на основі визначення областей інтересу, з метою вирішення позиціонування об'єктів у рамках приватних та громадських закладів міської інфраструктури.

1. Застосування нейромережових алгоритмів при вирішенні задачі позиціонування візуальних об'єктів

Узагальнена схема згідно якої здійснюється аналіз потокових даних систем відеоспостереження та мобільних пристроїв з метою проведення процедур виділення, класифікації і позиціонування візуальних об'єктів у межах тривимірної сцени включає у себе такі функціональні компоненти як складові системи відеоспостереження об'єкту цивільної інфраструктури, платформа машинного аналізу, база даних, що включає у себе відкриту інформацію про користувачів закладу та мобільні пристрої користувачів закладу з підсистемами відеореєстрації та прийому-передачі даних (рис. 1).

Відповідно до наведеної на рис. 1 схеми дані відеопотоку, що надходять від камер системи відеоспостереження та мобільних електронних пристроїв відвідувачів закладу поступають до системи нейромережового аналізу. Зазначена система виділяє візуальні об'єкти і співвідносить їх з інформацією представленою базою даних (по відношенню до користувачів закладу це включатиме біометричні дані), що дозволяє надійно ідентифікувати кожного окремого відвідувача, провести процедуру його позиціонування у інфраструктурі закладу, надати допоміжну інформацію, сформувати персональне рекламне оголошення, оцінити ризик здійснення правопорушення, тощо.

Як було зазначено вище, обробка набору відеопотоків, що включає у себе реконструкцію вхідних даних значно збільшує навантаження на обчислювальний ресурс системи, що у багатьох випадках унеможливує роботу у режимі реального часу навіть при застосуванні оптимізованих алгоритмів, що базуються на згорткових нейромережових архітектурах з попереднім визначенням областей інтересу, стійких до зміни масштабу матриці зображення, зсуву і зміни ракурсу зйомки, наявності типових оптичних аберацій, тощо.

Адаптація системи машинного аналізу на основі нейромережових алгоритмів відповідно конкретної задачі виділення, класифікації та позиціонування візуальних об'єктів в умовах обмеження на обчислювальний ресурс та час обробки даних вимагає розробити відповідний математичний апарат, на основі якого адекватно моделюються зазначені операції. Нехай відеопотік складається з набору $i \in [1; L]$ зображень, представлених двовимірними матрицями розмірності $M_i: X_{iM} \times Y_{iM}$. При навчанні згорткової матриці формується ядро згортки розмірністю $CK: X_{CK} \times Y_{CK}$, причому слід зазначити, що $X_{CK} \times Y_{CK} \ll X_{iM} \times Y_{iM}$ і для більшості завдань ядро

згортки формується як квадратне за формою, тобто $X_{СК} = Y_{СК} = L_{СК}$ незалежно від співвідношення між $X_{ІМ}$ і $Y_{ІМ}$.

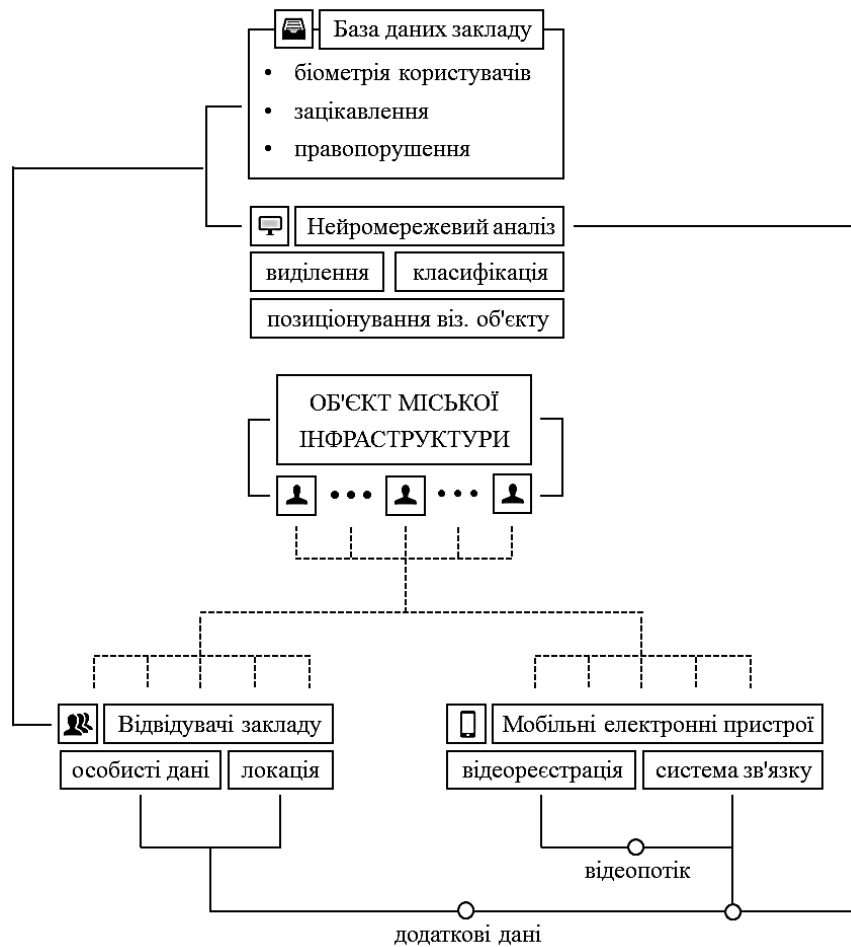


Рис. 1. Узагальнена схема машинного аналізу поточкових відеоданих з метою позиціонування відвідувачів закладу

Через квадрат цього значення $(L_{СК})^2$ визначається вага ядра згортки. Відповідно, процедура згортки здійснюється через накладання матриці $СК$ на всі області матриці зображення M_i з частковим перетином ядер згортки, що дозволяє виділити окремі ознаки і, отже, сформувати карту ознак у багатоканальному режимі для зменшення часу обробки вхідних даних. На математичному рівні часткове перекриття визначається через крок сканування $S_{СК} < L_{СК}$. Навантаження на обчислювальний ресурс системи машинного аналізу поточкових відеоданих на основі неймережевих згорткових алгоритмів розраховується через визначення загальної кількості параметрів N_{Σ} , що використовуються у рамках виконання даної процедури, як добуток ваги згортки $(L_{СК})^2$, кількості каналів згортки $n_{СК} \in [1; N_{СК}]$ і кількості каналів виділених ознак згортки $n_{CF} \in [1; N_{CF}]$, отже, відповідно — $N_{\Sigma} = N_{СК} \cdot N_{CF} \cdot (L_{СК})^2$.

Крім того математичне моделювання процесу машинного аналізу за допомогою алгоритму на основі згорткової неймережі включає у себе формалізацію процедури субдискретизації. На етапі субдискретизації зменшується розмірність карти ознак матриці зображення, що виділяються неймережевим алгоритмом.

Це безпосередньо впливає як на точність машинного аналізу, так і на загальний час обробки системою вхідного запиту. У загальному вигляді неймережевий аналіз може бути представлений у вигляді сандвіч-структури, де процедури згортки чергуються з процедурами субдискретизації, як це показано на рис. 2. Оптимізація відповідних неймережевих алгоритмів має базуватись на схемі, що включає у себе оцінку параметрів процедур згортки та субдискретизації, а також схему навчання неймережі.

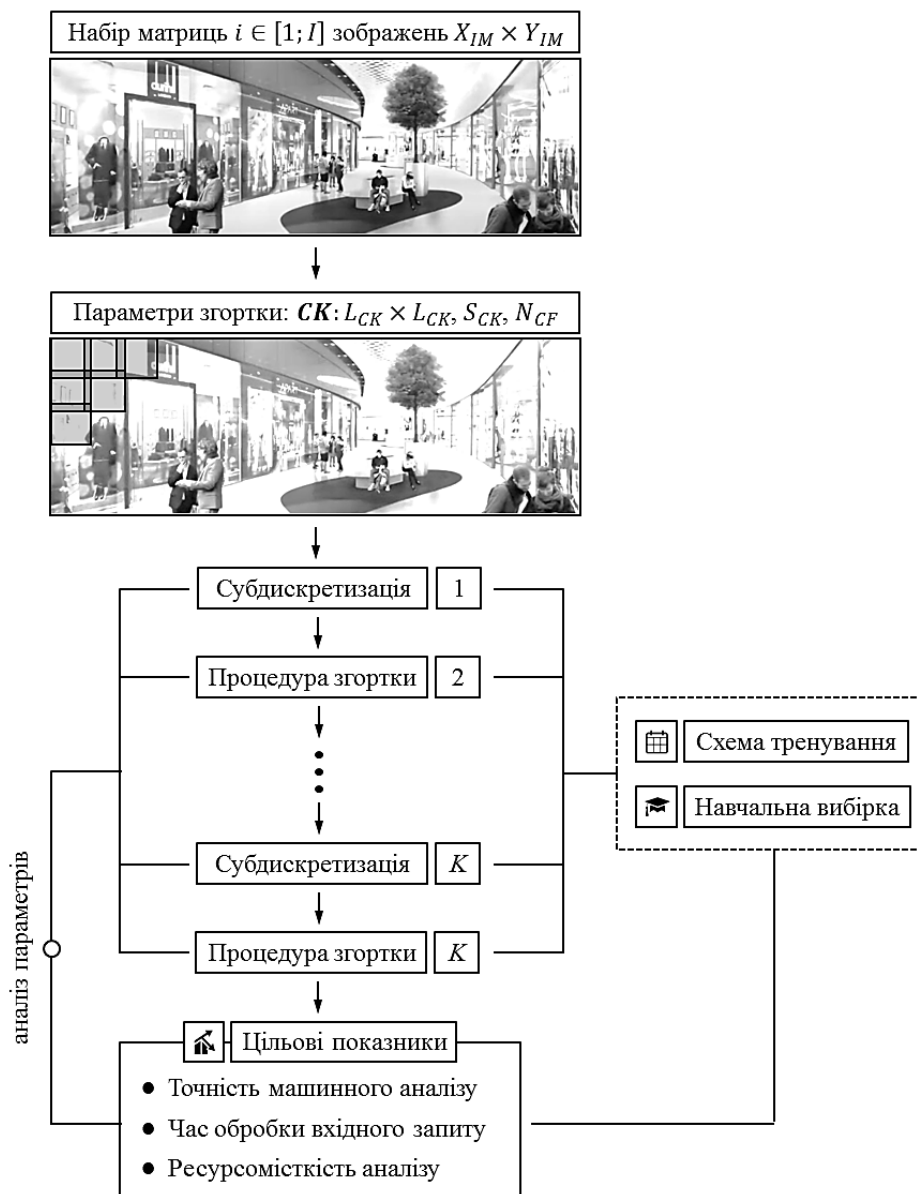


Рис. 2. Базова схема визначення цільових показників неймережевого аналізу поточкових відеоданих

2. Неймережевий аналіз поточкових відеоданих через вибіркового пошуку областей інтересу

Як було вказано вище основним підходом по оптимізації роботи згорткових неймереж при виділенні, класифікації та позиціонуванні візуальних об'єктів є вибіркового пошуку областей інтересу, на які поділяються матриці вхідного набору даних. У рамках даного дослідження пропонується розглянути спрощену схему неймережевого аналізу, що обмежується поділом матриці зображення на області інтересу, та подальше застосування для кожної області класичного набору процедур згортки та субдискретизації. Це дозволяє запобігти подальшого ускладнення методики машинного аналізу, а також спростити оптимізації неймережевих алгоритмів відповідно до визначення глобальних екстремумів цільових показників.

Відповідна схема роботи алгоритму машинного аналізу, що базується на неймережевій архітектурі класу R-CNN у загальному випадку складається з наступних етапів (рис. 3):

1. Підготовка навчальної вибірки виділення, класифікації та позиціонування візуальних об'єктів. Застосування отриманої навчальної вибірки та додаткових алгоритмів для тренування базової моделі згорткової неймережі.

2. Проведення процедури вибіркового пошуку областей інтересу, що потенційно можуть включати у себе візуальні об'єкти, які підлягають виділенню, класифікації та позиціонуванню.

3. Проведення процедури уніфікації розмірності областей інтересу відповідно до актуальних параметрів нейромережевої архітектури. Визначення областей інтересу, що не містять візуальні об'єкти, які підлягають виділенню, класифікації та позиціонуванню. Видалення відповідних областей інтересу.

4. Налаштування параметрів нейромережевої архітектури відповідно параметрів областей інтересу, що пройшли процедуру уніфікації та містять візуальні об'єкти, які підлягають виділенню, класифікації та позиціонуванню.

5. Виділення набору ознак для кожної області інтересу. Визначення для кожної області інтересу функціональних векторів за допомогою метода опорних векторів. Оптимізація точності проведення процедури визначення областей інтересу на основі регресійної моделі.

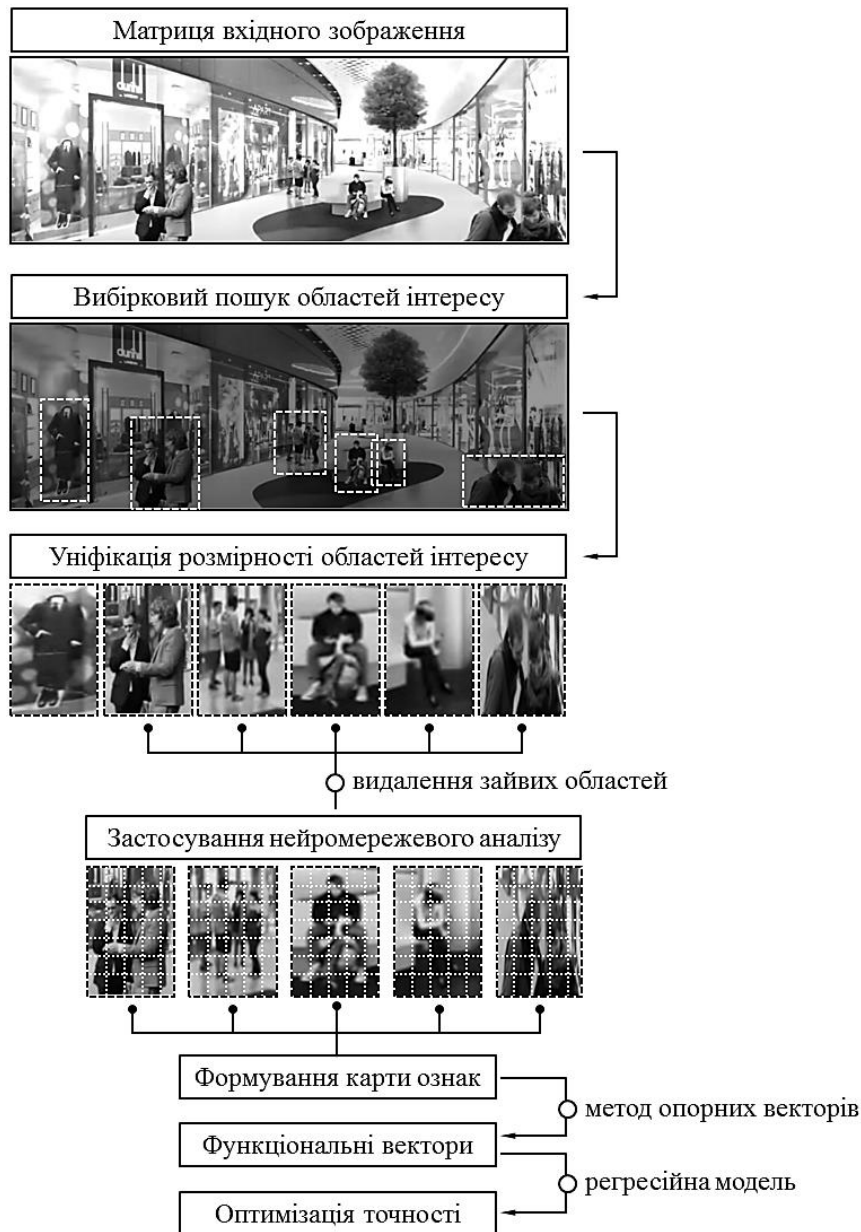


Рис. 3. Алгоритм аналізу поточкових відеоданих через вибірковий пошук областей інтересу

Особливість адаптації архітектури згорткової нейромережі з вибірковим пошуком областей інтересу до аналіз поточкових відеоданих у режимі реального часу полягає побудові алгоритму, що включає у себе застосування метод опорних векторів та регресійну модель з метою зменшення навантаження на обчислювальний ресурс. Вхідні дані відеопотоку представлені як набір двовимірних розмірності $X_{IM} \times Y_{IM}$ поділяються відповідно областей уніфікованого розміру $X_U \times Y_U$ на множину $(X_{IM}/X_U) \times (Y_{IM}/Y_U)$. Виконання відповідного нейромережевого алгоритму,

таким чином, включає у себе (i) проведення вибіркового пошуку областей інтересу; (ii) перехід від пулінгового шару класичної згорткової нейромережі до пулінгового шару, що визначається через область інтересу; (iii) заміна останнього повнозв'язного шару на повнозв'язний шар фонового класу; (iv) заміна логістичної функції Softmax на функцію Softmax фонового класу; (v) визначення дискретної функції розподілу ймовірності для кожної з областей інтересу; (vi) застосування для областей інтересу регресійної моделі.

Якщо у рамках розширення математичного апарату ввести такі показники як набір міток класу $m \in [1; M]$ для кожного з яких за допомогою нормованої експоненційної функції визначається функція розподілу ймовірності як набір $\{P_1, P_2, \dots, P_m, \dots, P_M\}$, а також алгоритми мінімальної обмежувальної коробки для значень $B: \{B_{XA}, B_{YA}, B_{XB}, B_{YB}\}$ та відповідні прогнозовані набори для значень $B_m: \{B_{XA}(m), B_{YA}(m), B_{XB}(m), B_{YB}(m)\}$, функцію втрат LF як кількісний цільовий показник точності машинного аналізу можна визначити через розрахунок суми функції CL , на основі якої визначаються втрат та функції BB , на основі якої прогнозуються втрати:

$$LF = CL(P_m) + BB(B_m), \text{ де } \begin{cases} P_m \in [P_1; P_M] \\ B_m: \{B_{XA}(m), B_{YA}(m), B_{XB}(m), B_{YB}(m)\} \end{cases} \quad (1)$$

Функція $CL(P_m)$ визначається через функцію логарифму, функція $BB(B_m)$ через робастну функцію втрат RL прогумовану для всіх значень міток класу $m \in [1; M]$:

$$CL = -\log(P_m), \quad (2)$$

$$F_{BB}(B_m) = \sum_{m=1}^M (RL(\Delta B_m)). \quad (3)$$

Таким чином, відповідно до побудованої моделі математичний апарат надає можливість перевести задачу оптимізації нейромережевого алгоритму до математичної задачі пошуку глобальних мінімумів функції втрат $LF(B_m, P_m)$ та середнього часу обробки вхідного запиту.

Висновки

У результаті проведеної роботи було розглянуто основні методи побудови нейромережевих алгоритмів машинного аналізу, що базуються на архітектурі згорткової нейромережі з вибіркоким аналізом областей інтересу, з метою виділення, класифікації та позиціонування візуальних об'єктів у рамках вирішення задачі геолокації у міському просторі у режимі реального часу та за умов обмеження обчислювального ресурсу апаратної платформи.

У рамках проведеного дослідження для вирішення задачі розробки цілісної методології побудови нейромережевих алгоритмів машинного аналізу було розроблено:

- узагальнену схему машинного аналізу потокових відеоданих з метою позиціонування відвідувачів об'єкту міської інфраструктури на основі потокових даних системи відеоспостереження та мобільних електронних пристроїв відвідувачів;
- базову схему визначення цільових показників нейромережевого аналізу потокових відеоданих на основі класичної архітектури згорткової нейромережі;
- узагальнений алгоритм аналізу потокових відеоданих через вибіркоким пошук областей інтересу матриць зображень через які представлено відеодані;
- алгоритм вирішення задачі оптимізації нейромережевого алгоритму через пошук глобальних мінімумів функції втрат та середнього часу обробки вхідного запиту.

Список використаних джерел:

21. Rego, M., & Fonseca, P. (2021). OCC based indoor positioning system using a smartphone camera. *2021 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC)*. <https://doi.org/10.1109/icarsc52212.2021.9429782>.
22. Jackermeier, R., & Ludwig, B. (2019). Door transition detection for long-term stability in pedestrian indoor positioning. *2019 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*. <https://doi.org/10.1109/ipin.2019.8911810>.

23. Zhu, C., Joerger, M., & Meurer, M. (2020). Quantifying Feature Association error in camera-based positioning. *2020 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*. <https://doi.org/10.1109/plans46316.2020.9109919>.
24. Xiong, Q., Yang, L., & Chen, Q. (2021). Research on positioning algorithm of binocular camera based on multi-media. *The 2nd International Conference on Computing and Data Science*. <https://doi.org/10.1145/3448734.3450476>.
25. Cartwright, H. M. (2021). *Artificial Neural Networks*. Humana Press.
26. Rajchakit, G., Agarwal, P., & Ramalingam, S. (2021). *Stability Analysis of Neural Networks*. Springer.
27. Gajja, M. (2020). Brain tumor detection using mask R-CNN. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, 12 (SP8), 101–108. <https://doi.org/10.5373/jardcs/v12sp8/20202506>.
28. Rizki, Y., Medikawati Taufiq, R., Mukhtar, H., Apri Wenando, F., & Al Amien, J. (2020). Comparison between faster R-CNN and CNN in recognizing weaving patterns. *2020 International Conference on Informatics, Multimedia, Cyber and Information System (ICIMCIS)*. <https://doi.org/10.1109/icimcis51567.2020.9354324>.
29. Yang, R. (2022). Retraction note: UAV landmark detection on Fast Region-based CNN. *Arabian Journal of Geosciences*, 15 (8). <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10069-7>.
30. Chaudhuri, A. (2021). Hierarchical modified fast R-CNN for object detection. *Informatica*, 45 (7). <https://doi.org/10.31449/inf.v45i7.3732>.
31. Ye, M., & Li, J. (2022). Abalone counting based on improved faster R-CNN. *2022 2nd International Conference on Bioinformatics and Intelligent Computing*. <https://doi.org/10.1145/3523286.3524542>.
32. Farhat, H. J., Sakr, G. E., Kilany, R., Smayra, T., & Mallak, I. (2022). Pneumonia and COVID-19 classification in chest X-rays using faster region-based convolutional neural networks (Faster R-CNN). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1285679/v1>.
33. Kızılluluk, S., & Sert, E. (2022). Hurricane-faster R-CNN-JS: Hurricane Detection with faster R-CNN using artificial Jellyfish Search (JS) optimizer. *Multimedia Tools and Applications*. <https://doi.org/10.1007/s11042-022-13156-9>.
34. Zhu, H., Wang, Y., & Fan, J. (2022). IA-mask R-CNN: Improved Anchor Design Mask R-CNN for surface defect detection of automotive engine parts. *Applied Sciences*, 12(13), 6633. <https://doi.org/10.3390/app12136633>.
35. Zhu, H., Wang, Y., & Fan, J. (2022). IA-mask R-CNN: Improved Anchor Design Mask R-CNN for surface defect detection of automotive engine parts. *Applied Sciences*, 12(13), 6633. <https://doi.org/10.3390/app12136633>.
36. Levy, C., Čiprijanović, A., Drlica-Wagner, A., Mutlu-Pakdil, B., Nord, B., & Tanoglidis, D. (2021). Detecting low surface brightness galaxies with mask R-CNN. *Fourth Workshop on Machine Learning and the Physical Sciences (NeurIPS 2021)*. <https://doi.org/10.2172/1825283>.
37. Yan, W., Liu, T., & Fu, Y. (2021). Yolo-tight: An efficient dynamic compression method for Yolo Object Detection Networks. *2021 13th International Conference on Machine Learning and Computing*. <https://doi.org/10.1145/3457682.3457740>.

О.В. Загородній

*спеціаліст кафедри автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій
Факультету інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький
національний технічний університет*

МОЖЛИВОСТІ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДІАГНОСТУВАННЯ ЗАХВОРЮВАНЬ ЛЕГЕНЬ ЗА РЕНТГЕНІВСЬКИМИ ЗНІМКАМИ

У статті розкрито можливості штучних нейронних мереж діагностування захворювань легень за рентгенівськими знімками. Підкреслено, що розвиток алгоритмів машинного навчання надає широкі можливості у галузі автоматизації вирішення медичних завдань, а комп'ютерна обробка рентгенівських знімків підвищує точність аналізу зображень, знижує роль людського фактору при прийнятті рішень, дозволяє оцінити ефективність застосування терапії та в цілому покращує якість життя людей. В результаті досліджень було підтверджено, що рентгенівські знімки грудної клітки можуть мати велике значення для постановки діагнозу пацієнтам і також можуть бути корисні для діагностики різних видів пневмонії, розроблено архітектуру нейронної мережі для діагностики захворювань легень. Описано структуру мережі, з відокремленням кожного окремого шару, наголошено, що вся обробка інформації в прихованому шарі полягає у використанні системи ваг, а саме, використання системи певних коефіцієнтів під час передачі від одного шару іншому. Сила ваги або по-іншому важливість інформації визначається величиною даного коефіцієнта, чим він більше, тим більш важлива інформація передається між нейронами. Підкреслено, що підсумкова інформація, яку видасть нейронна мережа, залежатиме від безлічі факторів: через які нейрони проходить інформація, як виглядає внутрішня архітектура мережі, а також наявність якої кількості прихованих шарів у архітектурі мережі. Ззначається, що головною перевагою представленого методу є те, що машину опорних векторів можна легко інтегрувати в архітектуру глибокого навчання. Навчена модель формує вектори ознак з останньої повністю підключеної моделі глибокого навчання та надає оцінки кожному класу, що є вагомим фактором у загальній системі діагностування. Також наголошено, що використання машини опорних векторів замість класифікатора дозволяє підвищити точність класифікації для діагностування захворювань. У статті відокремлено і недоліки, до яких віднесено той факт, що моделі глибокого навчання у поєднанні з моделями машини опорних векторів вимагають як мінімум двох навчальних наборів даних.

Ключові слова: нейронна мережа, рентгенівський знімок, діагностика, модель, фактор, захворювання, модифікація.

O. V. Zahorodnii

POSSIBILITIES OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS FOR DIAGNOSING LUNG DISEASES BY X-RAY

The article reveals the possibilities of artificial neural networks for diagnosing lung diseases on X-rays. It is emphasized that the development of machine learning algorithms provides ample opportunities in the field of automation of medical problems, and computer processing of X-rays increases the accuracy of image analysis, reduces the role of the human factor in decision making, evaluates the effectiveness of therapy and improves quality of life. Studies have confirmed that chest X-rays can be important for diagnosing patients and can also be useful for diagnosing various types of pneumonia, and a neural network architecture has been developed to diagnose lung disease. The structure of the network is described, with the separation of each individual layer, it is emphasized that all information processing in the hidden layer is to use a system of weights, namely, the use of certain coefficients during transmission from one layer to another. The strength of gravity or otherwise the importance of information is determined by the value of this factor, the greater it is, the more important information is transmitted between neurons. It is emphasized that the final information provided by the neural network will depend on many factors: through which neurons will pass information, what the internal architecture of the network looks like, as well as the number of hidden layers in the network architecture. It is noted that the main advantage of the presented method is that the machine of reference vectors can be easily integrated into the architecture of deep learning. The trained model forms feature vectors from the last fully connected model of deep learning and provides grades to each class, which is an important factor in the overall system of diagnosis. It is also emphasized that the use of the machine of reference vectors instead of the classifier allows to increase the accuracy of classification for diagnosing diseases. The article also highlights the shortcomings, which include the fact that deep learning models in combination with models of reference vector machines require at least two training data sets.

Key words: neural network, X-ray, diagnosis, model, factor, disease, modification.

Вступ та постановка завдання. Враховуючи постійні зміни навколишнього середовища, зміни клімату, способу життя сучасної людини та інші фактори, що мають суттєвий вплив на здоров'я людей, ризик виникнення хвороб швидко зростає. Приблизно 3,6 мільйона людей по всьому світу померли у 2021 році від хронічного обструктивного захворювання легень (ХОЗЛ), на розвиток якого в основному впливає забруднення навколишнього середовища та паління [1].

Ризик захворювань легенів величезний, особливо в країнах, що розвиваються, і країнах з низьким середнім рівнем доходів, де мільйони людей стикаються з бідністю та забрудненням повітря. За оцінками ВООЗ, понад 4 мільйони передчасних смертей щорічно трапляються від захворювань, пов'язаних із забрудненням повітря, включаючи астму та пневмонію. Отже, необхідно вжити необхідних заходів для зменшення забруднення повітря та викидів вуглецю. Важливо також запровадити ефективні діагностичні системи, які можуть допомогти у діагностуванні захворювань легенів. З кінця грудня 2019 року нова хвороба COVID-19 спричиняє серйозні ураження легенів і проблеми з диханням. Крім того, пневмонія, як певна форма захворювання легенів, може бути викликана вірусом, що викликає COVID-19, або може бути спричинена іншою вірусною чи бактеріальною інфекцією. Тому, раннє виявлення захворювань легень стало як ніколи важливим. Машинне навчання та глибоке навчання можуть відігравати життєво важливу роль для вирішення окресленого завдання враховуючи, що останнім часом цифрові технології набувають все більшого значення у всьому світі.

Методи машинного навчання добре пристосовані до інтерпретації складних даних, які вирішують прості клінічні питання, наприклад, ймовірність виникнення раку, тощо. У ситуаціях, коли питання діагностування захворювання є не під силу цифровим системам, діагностика й надалі залежатиме від лікарів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Публікації стосовно застосування штучних нейронних мереж для діагностування захворювань є популярним напрямком досліджень на протязі останніх 10-ти років.

А. С. Грицай та Т. О. Левицька описують моделі виявлення патологічних структур за допомогою нейронних мереж, які дозволяють прискорити процес діагностики захворювань і знижують частину помилок та повторних обстежень пацієнтів. У свою чергу, О. Бармак та П. Радюк запропонували інформаційну технологію візуального аналізу рентгенівських зображень для пояснення результатів діагностування пневмонії. В основі технології закладено модель класифікації на основі згорткової нейронної мережі для вилучення слабо виражених ознак ранньої вірусної пневмонії та модифікований метод відмінної локалізації для інтерпретації результатів класифікації.

Є. М. Федорченко, А. О. Олійник, С. К. Корнієнко, А. С. Харченко та Д. А. Гончаренко запропонували модифікований генетичний метод оптимізації параметрів моделі на основі згорткової нейронної мережі для вирішення завдання розпізнавання діагностично значущих ознак пневмонії на рентгенівському знімку легень. Практичне використання розробленого методу дозволить знизити трудомісткість, підвищити достовірність пошуку, прискорити процес діагностики захворювань і знизити частину помилок і повторних обстежень пацієнтів.

Систему підтримки прийняття діагностичних рішень на основі рентгенівських знімків запропонували Д. А. Пеліх та С. В. Коваленко. Авторами розроблено програмне забезпечення для обробки та аналізу рентгенограм грудної клітини для розпізнавання патологій з метою виявлення методу підвищення контрасту, що найкраще сприяє роботі нейронної мережі.

Із зарубіжних авторів варто відзначити такі роботи як: Kedar, Seema & Shirsat, Sanika [6], Bharati, Subrato & Podder, Prajoy & Mondal, M. Rubaiyat [7], Cheng, Ching-Hsue & Chen, Hsien-Hsiu & Chen, Tai-Liang [8], Gairola, Siddhartha & Tom, Francis & Kwatra, Nipun & Jain, Mohit [9], Ke, Qiao & Zhang, Jiangshe & Wei, Wei & Połap, Dawid & Woźniak, Marcin & Kośmider, Leon & Damasevicius, Robertas [10], Albahli, Saleh & Yar, Ghulam Nabi [11], Hazra, Abhishek & Choudhary, Prakash [12], Kareem, Omer & Al-sulaifanie, Ahmed [13] та інші.

Проте, враховуючи описані наукові набутки, за темою, питання розкриття можливостей штучних нейронних мереж щодо діагностування захворювань легень за рентгенівськими знімками залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

Постановка завдання. Розкрити можливості штучних нейронних мереж щодо діагностування захворювань легень за рентгенівськими знімками. Проаналізувати процес діагностування захворювань легень за рентгенівськими знімками та пов'язані з ним фактори. Враховуючи складність побудови моделі нейронної мережі, запропонувати модель нейронної мережі, яка використовується для діагностування захворювань легень за рентгенівськими знімками на основі компонування основних показників.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для діагностування захворювань легень можна використовувати численні діагностичні інструменти, такі як цитологія мокротиння або комп'ютерна томографія (КТ), МРТ або рентгенографія грудної клітки. Тим не менш, згадані методики займають багато часу, іноді віддалені від пацієнтів і вважаються дорогими. Більше

того, згадані системи ідентифікують захворювання на пізніх стадіях розвитку, коли у пацієнта мало шансів вижити [1-5]. Зазвичай лікарі намагаються виявити різні види захворювання легень на початкових стадіях.

Обробка зображень та застосування методики штучної нейронної мережі дають перевагу для покращення досліджень у діагностиці захворювань легень за рентгенівськими знімками, за рахунок автоматизації діагностичної практики.

Протягом останніх кількох років у всьому світі для покращення медичної діагностики захворювань легень використовувалися численні методи обробки рентгенівських знімків разом із застосуванням комп'ютерних інструментів. Механізми штучних нейронних мереж використовуються для забезпечення додаткової точності певних функцій у порівнянні з тими, які реалізує людський мозок.

Система діагностування захворювань легень за рентгенівськими знімками складається з шести головних етапів (рис. 1).



Рис. 1. Етапи реалізації системи діагностування захворювань легень за рентгенівськими знімками

система, органи, кістки та різні види тканин. Мета сегментації полягає в тому, щоб спростити або змінити символ зображення в більш значуще і нескладне зображення задля оцінки під час використання в діагностичних операціях або на інших етапах. Загалом процес сегментації можна пояснити поділом усієї області зображення Z на сукупність незначних сегментів $\{Z_1, Z_2, \dots, Z_s\}$. У

Захоплення рентгенівського знімка або формування базового зображення є початковою фазою в умовах реалізації системи діагностування захворювань легень за рентгенівськими знімками.

КТ-зображення є оптимальним вибором, яке найбільш чітко показує картину та забезпечує мінімальне розрізнення. Комп'ютерну томографію можна визначити як рентгенівський знімок, який використовує комп'ютерну систему, щоб зібрати максимальну кількість рентгенівських променів для створення поперечних та тривимірних зображень частин людського тіла, які піддаються діагностиці. Крім того, КТ є найбільш небезпечним методом, який використовується для діагностичних операцій, оскільки він має хорошу роздільну здатність, нескладний, з мінімальними аберациями, на додаток до простоти модифікації та швидкості обчислення середнього для відсканованого зображення.

Наступним кроком виступає попередня обробка базового зображення, яка необхідна для покращення освітлення пікселів, коли з одного зображення можуть бути відокремлені або виділені найбільш значущі характеристики, які включають внутрішні особливості цих пікселів. Завдяки використанню цього процесу, як-от шумозаглушення, можна використовувати численні функції різного роду шумів зображення, посилюючи дисперсію між сусідніми областями або характеристиками, що робить зображення менш складним, використовуючи функції згладжування або видалення в певних масштабах і зберігаючи характеристики в певних необхідних масштабах. Численні методи, такі як медіана, фільтр Габора, фільтр Вінера та морфологічні функції, можуть бути використані для маніпуляції із зображенням на етапі попередньої обробки [8].

Основним етапом аналізу зображень є сегментація зображень. Процес сегментації розподілить зони зображення на різні об'єкти або частини, такі як судинна

сегментації використовується кілька методів, таких як вододіловий алгоритм, методи кластеризації, метод порогового обмеження, метод виявлення меж і алгоритм маркування зв'язаних компонентів [7].

Вилучення ознак є основним механізмом попередньої обробки, він використовує алгоритми та процедури для виявлення та виділення певного бажаного плану або області визначеного зображення. На цьому етапі важливо класифікувати та відокремити області, що представляють інтерес, та містять важливі характеристики, отримані із рентгенологічних зображення легень. Використовуються методи бінаризації та маскування за даними аналізу легень та їх особливостей.

Завершальними етапами є результати екстракції та діагностики захворювань. На цьому етапі використовуються численні алгоритми для упорядкування даних у класифікованій формі шляхом розробки спеціальних алгоритмів, які розпізнаються як класифікатори. Може використовуватися кілька видів класифікації: методи розпізнавання та організації під наглядом і без нагляду. Метод зворотного поширення помилки, нейронна мережа Хопфілда, теорія адаптивного резонансу, згорткова нейронна мережа, метод опорних векторів, штучні нейронні мережі – це методи розпізнавання та організації під наглядом. Методи неконтрольованого розпізнавання та класифікації включають кластеризацію методом k-середніх, нечітку нейронну мережу, алгоритм «Переможець забирає все» на додаток до алгоритму Хебба.

На рисунку 2 наведено архітектуру штучної нейронної мережі призначеної для системи діагностування захворювань легень за рентгеновськими знімками навчання мережі здійснюється за допомогою рентгеновських знімків грудної клітки. Під час навчання вхідні зображення проходять через згорткові шари, а потім через повністю пов'язані шари. Згорткові шари генеруються за допомогою фільтрів розміром 3x3. Однак кількість фільтрів різна для кожного з шарів згортки. Кількість фільтрів, використаних у першому та другому згорткових шарах, становить 64. Крім того, третій та четвертий шари отримані за допомогою 128 фільтрів. Більше того, п'ятий і наступний згортковий шари використовують 256. Потім 512 фільтрів використовуються для шарів малої розмірності. На виході отримуємо 4096 розмірних векторів із шару FC2 моделі. Ці вектори використовуються як вхідні дані для мультикласових машин опорних векторів для прогнозування / діагностики захворювань легень.

Відхилення від норми рентгенологічного знімку грудної клітки на зображенні отримують за допомогою глибоких мереж, а потім класифікують за допомогою машин опорних векторів. Зовнішній вигляд рентгеновських знімків грудної клітки позначають x_1, \dots, x_n , а відповідні типи рентгенографії грудної клітки позначаються y_1, \dots, y_n . Кожне окреме рентгеновське зображення грудної клітки аналізується за допомогою апарату опорних векторів

$$f(x) = w \cdot x + b$$

де $f(x)$ – це рентгеновське зображення грудної клітки. Вага та зміщення w , b , відповідно. Значення ваги та зміщення оцінюються шляхом оптимізації

$$\min_{w, b, \xi} \frac{1}{2} w w^T + C \sum_{i=1}^n \xi_i$$

$$\begin{cases} y_i (w^T \phi(x_i) + b) \geq 1 - \xi_i \\ \xi_i \geq 0, i = 1, \dots, n \end{cases}$$

$\phi(x_i)$ – функція приналежності точок; ξ_i – граничні змінні; C – регуляризація.

Однією з переваг представленого методу є те, що машину опорних векторів можна легко інтегрувати в архітектуру глибокого навчання. Навчена модель формує вектори ознак з останньої повністю підключеної моделі глибокого навчання та надає оцінки кожному класу. Ще одна перевага полягає в тому, що використання машин опорних векторів замість класифікатора дозволяє підвищити точність класифікації для діагностування захворювань. Проте запропоновані методи мають і певні недоліки. Моделі глибокого навчання у поєднанні з моделями машин опорних векторів вимагають як мінімум двох навчальних наборів даних. Спочатку навчаються моделі глибокого навчання, а потім створюються моделі.

Висновки. У роботі розкрито можливості штучних нейронних мереж щодо діагностування захворювань легень за рентгеновськими знімками. Зазначено, що використання зображень комп'ютерної томографії є оптимальним вибором у порівнянні з рентгенографією грудної клітки або магнітно-резонансним дослідженням. У разі сегментації алгоритм опорних векторів дає

максимально точний результат діагностики та за рахунок інтеграції в архітектуру глибокого навчання є програмно виконуваним.

Перспективи подальших досліджень ґрунтуються на розробці програмного додатку здатного з максимальною точністю діагностувати захворювання легень за рентгенівськими знімками на ранніх стадіях захворювання.

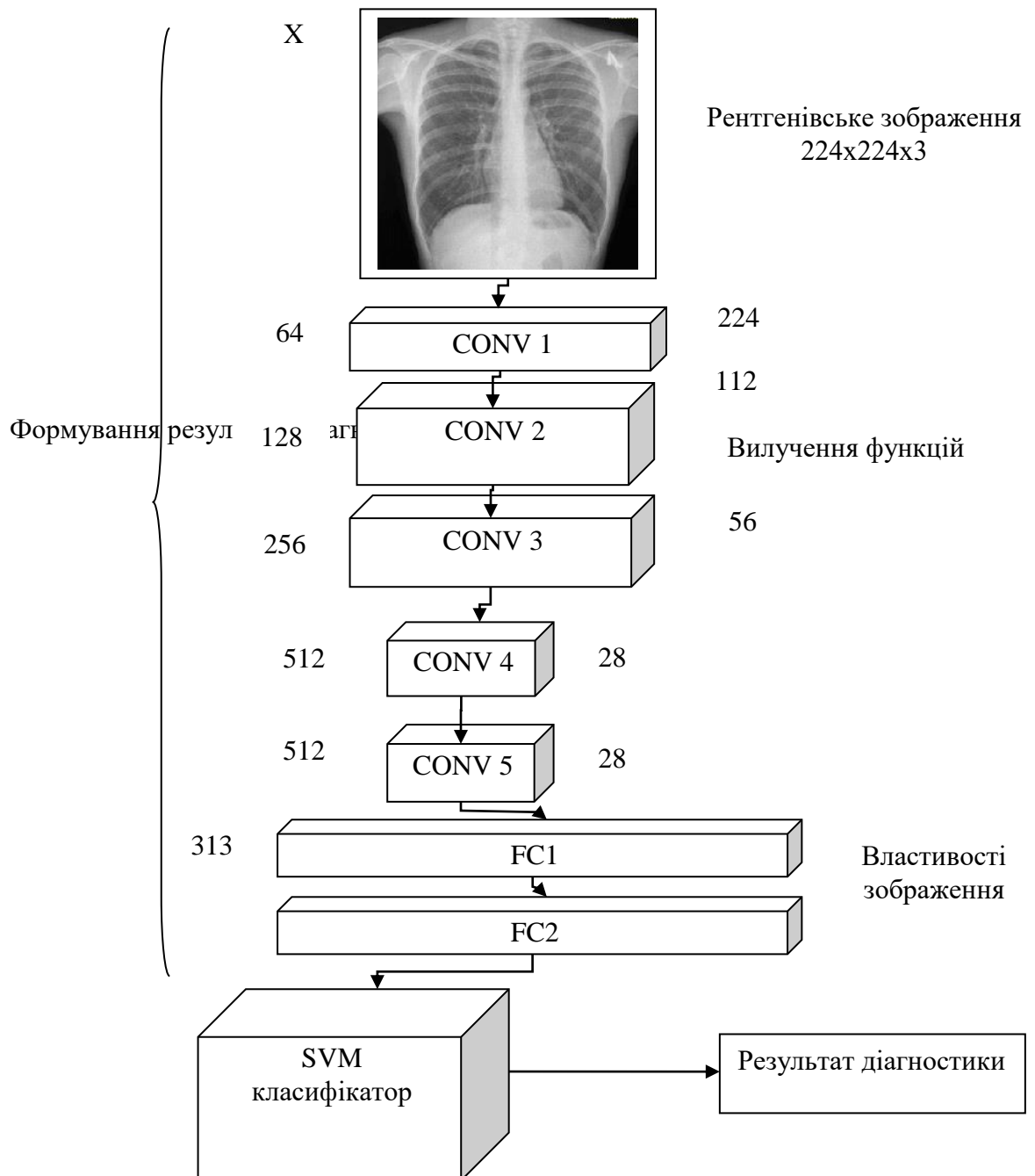


Рис. 2. Архітектура штучної нейронної мережі призначеної для системи діагностування захворювань легень за рентгенівськими знімками

Література

1. Abbas, A., Abdelsamea, M. M., & Gaber, M. M. (2021). Classification of COVID-19 in chest X-ray images using DeTraC deep convolutional neural network. *Applied Intelligence*, 51(2), 854-864.

2. Khan, A. I., Shah, J. L., & Bhat, M. M. (2020). CoroNet: A deep neural network for detection and diagnosis of COVID-19 from chest x-ray images. *Computer methods and programs in biomedicine*, 196, 105581.
3. Nixon, M., & Aguado, A. (2019). *Feature extraction and image processing for computer vision*. Academic press.
4. Ozturk, T., Talo, M., Yildirim, E. A., Baloglu, U. B., Yildirim, O., & Acharya, U. R. (2020). Automated detection of COVID-19 cases using deep neural networks with X-ray images. *Computers in biology and medicine*, 121, 103792.
5. Moujahid, H., Cherradi, B., El Gannour, O., Bahatti, L., Terrada, O., & Hamida, S. (2020). Convolutional neural network based classification of patients with pneumonia using X-ray lung images. *Transfer*, 2(99.41), 16.
6. Bharati, S., Podder, P., & Mondal, M. R. H. (2020). Hybrid deep learning for detecting lung diseases from X-ray images. *Informatics in Medicine Unlocked*, 20, 100391.
7. Cheng, C. H., Chen, H. H., & Chen, T. L. (2020). A clinical decision-support system based on three-stage integrated image analysis for diagnosing lung disease. *Symmetry*, 12(3), 386.
8. Gairola, S., Tom, F., Kwatra, N., & Jain, M. (2021, November). Respirenet: A deep neural network for accurately detecting abnormal lung sounds in limited data setting. In *2021 43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC)* (pp. 527-530). IEEE.
9. Ke, Q., Zhang, J., Wei, W., Połap, D., Woźniak, M., Kośmider, L., & Damaševičius, R. (2019). A neuro-heuristic approach for recognition of lung diseases from X-ray images. *Expert systems with applications*, 126, 218-232.
10. Albahli, S., & Ahmad Hassan Yar, G. N. AI-driven deep convolutional neural networks for chest X-ray pathology identification. *Journal of X-Ray Science and Technology*, (Preprint), 1-12.
11. Chaudhary, A., Hazra, A., & Chaudhary, P. (2019, July). Diagnosis of chest diseases in x-ray images using deep convolutional neural network. In *2019 10th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)* (pp. 1-6). IEEE.
12. Kareem, O. S., & Al-Sulaifanie, A. K. (2022). Modify Convolutional Neural Network Model for The Diagnosis of Multi-classes Lung Diseases Covid-19 And Pneumonia Based on X-ray Images. *Journal of Duhok University*, 25(1), 63-73.

УДК 678.549

DOI 10.36910/775.24153966.2022.73.31

В.П. Кашицький, В.М. Малець, О.Л. Садова, В.О. Шегинський

Луцький національний технічний університет

**ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЛЮТИНОВИХ БІОКОМПОЗИТІВ,
НАПОВНЕНИХ ДЕРЕВНИМ БОРОШНОМ**

В статті визначено міцність при стисканні біокомпозитних матеріалів на основі глютинової матриці, наповненої порошком деревного борошна в умовах тривалого впливу підвищених та понижених температур. Досліджено інтенсивність деструкції біокомпозитних матеріалів в середовищі холодної та гарячої води, хімічних речовин та розчинів солей. Встановлено підвищення стійкості біокомпозитів до дії статичних навантажень під впливом понижених температур через зниження рухливості сегментів макромолекул глютинової матриці, а також високу стійкість в середовищі розчину хлориду натрію через зниження адсорбційної здатності розчину. Показано довготривалу стійкість глютинових біокомпозитів до впливу вологи та достатню стійкість до короткотривалого впливу холодної води.

Ключові слова: біополімерна матриця; органічний наповнювач; фізичне поле; міцність при стисненні; екологічна безпека; біодеградабельність.

V. Kashytskyi, V. Malets, O. Sadova, V. Shehynskyi

**PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF GLUTIN BIOCOMPOSITES FILLED WITH
WOOD FLOUR**

The compressive strength of biocomposite materials based on glutine matrix filled with wood flour powder under conditions of prolonged exposure to high and low temperatures is determined. The intensity of destruction of biocomposite materials in the environment of cold and hot water, chemicals and salt solutions has been studied. An increase in the resistance of biocomposites to the action of static loads under the influence of low temperatures due to a decrease in the mobility of segments of macromolecules of the gluten matrix has been established. High stability in the medium of sodium chloride solution was also established due to the decrease in the adsorption capacity of the solution. Long-term resistance of gluten biocomposites to moisture and sufficient resistance to short-term exposure to cold water are shown.

Key words: biopolymer matrix; organic filler; physical field; compressive strength; ecological safety; biodegradability.

Постановка проблеми. Синтетичні полімери та композитні матеріали на їх основі широко використовують в техніці для виготовлення деталей машин та механізмів, які характеризуються високою корозійною стійкістю та питомою міцністю. Однак матеріали даного класу після експлуатації складно піддаються утилізації, тому в основному потрапляють на сміттєві полігони, що призводить до забруднення навколишнього середовища та погіршення екологічної безпеки. На сьогодні існують нові підходи щодо розробки біокомпозитних матеріалів конструкційного призначення, які вирізняються високою екологічною безпекою та мають високі показники міцнісних характеристик. Впровадження біокомпозитних матеріалів на основі компонентів природного походження дозволяє вирішити проблему утилізації відпрацьованих біокомпозитних виробів або окремих деталей, які мають високу сумісність з навколишнім середовищем, оскільки здатні руйнуватися під впливом атмосферних факторів на екологічно безпечні компоненти. Це дозволить зменшити обсяг використання та знизити шкідливий вплив синтетичних полімерів, що є стійкими до деструкції та виступають джерелом забруднення. Актуальність досліджень в даному напрямку визначається необхідністю розробки хімічного складу, технології формування, особливостей структури та властивостей біокомпозитних матеріалів, які мають високу біодеградабельність та безпечність в процесі виробництва, експлуатації та утилізації.

Біокомпозитні матеріали, які мають високий вміст компонентів природного походження або повністю складаються з натуральних інгредієнтів піддаються руйнуванню або біодеструкції під впливом бактерій, вологи та температури. Це значно знижує тривалість експлуатації виробів на основі біокомпозитів за умови, якщо вироби перебувають під впливом атмосферних факторів, циклічної зміни температур та хімічно активних середовищ. Тому виникає потреба у проведенні експериментальних досліджень, які дозволять визначити міцність біокомпозитів під впливом підвищених або понижених температур, а також їх стійкість до водних розчинів хімічних речовин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Під час переробки рослинної сировини важливим фактором є освоєння безвідходних технологій. Зараз практично повсюдне використання традиційних, іноді застарілих, технологій призводить до накопичення великої маси відходів від перероблення різної біосировини [1].

© В.П. Кашицький, В.М. Малець, О.Л. Садова, В.О. Шегинський

Майбутнє розширення напрямків практичного використання відходів нерозривно пов'язане з комплексним підходом до переробки, який базується на оптимальному використанні їх можливостей як цінного сировинного джерела в поєднанні з науково обґрунтованими технологічними рішеннями [2-3].

Зараз все більше уваги приділяється проблемі створення біодеградабельних полімерних матеріалів для зниження екологічного навантаження на навколишнє середовище. Розробка і дослідження таких матеріалів є одним з пріоритетних напрямків розвитку науки. Сьогодні існує кілька наукових напрямків в області створення біодеградабельних полімерних матеріалів, які займаються дослідженнями біополімерів і біокомпозитів на основі природних і синтетичних полімерів, а також модифікацією синтетичних полімерних композицій для прискорення деструкції полімерної матриці [1].

Найбільш ефективним і поширеним способом забезпечення біологічної деградації є введення в полімерну композицію різних природних наповнювачів, що є живильним середовищем для мікроорганізмів, а також добавок, що прискорюють деструкцію полімерного матеріалу. Всупереч тому, що існує велика кількість робіт, присвячених створенню біокомпозитних матеріалів, де описані способи їх отримання та сфери застосування, створення нових матеріалів є актуальним завданням сучасного матеріалознавства [4].

В останнє десятиліття багато країн світу вводили обмеження і заборони на використання полімерного пакування. В результаті з'явилися технології створення більш екологічного пакування. Сьогодні для виробництва безпечних пакетів, плівок та іншої пластикової продукції найбільш ефективними засобами визнані як біорозкладні матеріали, точніше біорозкладні пластики [5-10].

Біорозкладність сполук є пріоритетним напрямом, який вирішує значну кількість проблем із утилізацією «пластмасового сміття», що виникають при використанні виробів з пластмас. Літературні джерела показали, що активний розвиток ведеться в напрямку виробництва полімерів на основі оксикарбонових кислот [10]. В результаті детального вивчення цього класу сполук було встановлено, що полігідроксимаєляна кислота є живильною речовиною і середовищем для зберігання різних видів мікроорганізмів. Під їх впливом полімер на основі гідроксимаєляної кислоти розкладається до CO_2 і H_2O [11-13]. Полієфіри на основі інших гідроксикарбонових кислот – гліколевої, молочної, валеріанової або капронової поведуться аналогічно [13-15]. До числа основних застосувань біополімерів відносять вироби для пакування харчових продуктів: плівки, контейнери, пакети тощо [13, 15].

У першій половині минулого століття активно використовували рослинну сировину для створення біополімерних композицій, наприклад, полімерних матеріалів на основі сої [12]. Велика кількість робіт, проведених ще в 70-х та 80-х роках ХХ століття, присвячені отриманню полімерних матеріалів з наповнювачем у вигляді крохмалю [10-16]. Зараз кількість біополімерної продукції в порівнянні із синтетичними полімерами є досить малою (близько 0,1 % від усіх вироблених полімерів). Однак обсяг виробництва біополімерів активно зростає (у 2010 \approx 700 тис. т., в 2011 \approx 1 млн. т., в 2015 \approx 1,7 млн. т.). При цьому варто відзначити, що саме ринок біополімерів є одним з найбільш швидко зростаючих серед інших сегментів світової економіки [6, 13, 14, 15].

Постановка завдань. Метою роботи є визначення стійкості глютинових біокомпозитних матеріалів, наповнених дрібнодисперсним порошком деревного борошна, в умовах впливу підвищених або понижених температур та хімічно активних середовищ.

Викладення основного матеріалу. Біокомпозитні зразки отримували шляхом гарячого пресування композиції на основі розчину глютину, наповненого деревним борошном, в прес-формі під тиском 10 МПа. Міцність при стисненні визначали згідно ASTM D695 «Тестування на стиск жорстких пластмас». Біокомпозитні зразки витримували в камері сушильної шафи або холодильної установки, після чого піддавали стисненню зі швидкістю переміщення траверси преса 2 мм/хв. Дослідження на деградабельність проводили згідно стандарту ASTM D6340, який дозволяє проводити випробування для визначення аеробного біорозкладання пластикових матеріалів у водному середовищі або в середовищі компосту. Випробування здійснювали шляхом занурення зразків у дистильовану гарячу (50 ± 5 °C), холодну воду (20 ± 5 °C) та 10 %-ові розчини NaCl та HCl (23 ± 2 °C). Для випробування застосовували зразки у формі диска діаметром (50 ± 1) мм і товщиною ($3,0 \pm 0,2$) мм. Перед випробуванням зразки сушили за (50 ± 2) °C протягом (24 ± 1) год, а потім охолоджували в ексикаторі за температури (23 ± 2) °C. Зразки поміщали в посудину з реагентом та фіксували час повного розчинення матеріалу.

Експериментально встановлено, що найнижчу міцність при стисканні (20 МПа) мають біокомпозитні зразки, які піддаються впливу температури 70 °С протягом 96 год, що пояснюється наявністю високих внутрішніх напружень в системі (рис. 1). До температури 50 °С границя міцності при стисканні зменшується поступово на 20-30 %, а при наступному підвищенні температури дана характеристика різко знижується.

Експериментально встановлено, що максимальні значення міцності при стисканні (57,1 МПа) мають біокомпозитні зразки, що піддаються впливу мінімальної температури 40 °С та за мінімального часу витримки 0,5 год.

За температури витримки 40 °С границя міцності при стисканні становить 60-70 % його величини за кімнатної температури. Механічні властивості матеріалів залежать від тривалості випробування. За деяких температур випробуваний зразок може бути зруйнований за меншого ступеня напруженого стану, що виникає за кімнатної температури, якщо структурні елементи біокомпозитного матеріалу будуть сприймати напруження досить тривалий період.

Межа міцності при стисканні матеріалів за високих температур характеризується не величиною звичайної межі міцності, яка визначається шляхом короточасних випробувань, а величиною так званої межі тривалої міцності.

Вплив температури на зміну різних властивостей можна легко виміряти природою цих змін, що полягає головним чином у впливі температури на гнучкість макромолекул. Питання про вплив температури ускладняється, якщо під час нагрівання матеріал розкладається. Найбільш важливими реакціями, що відбуваються при розкладанні, є деструкція і структування, дані реакції здійснюють протилежний вплив на властивості полімеру. Так, при старінні на повітрі в результаті деструкції відбувається розм'якшення матеріалу, в той час, як структування призводить до утворення крихкого продукту.

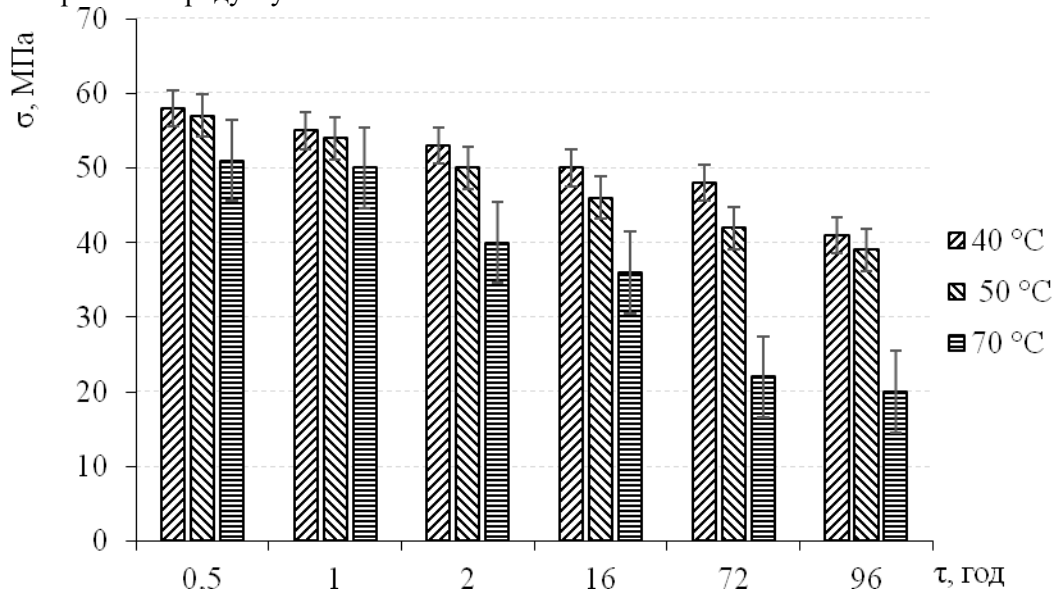


Рис. 1. Залежність міцності при стисканні біокомпозитів від температури нагрівання та тривалості витримки в тепловому полі

При тривалій витримці полімеру за постійної температури або при поступовому підвищенні температури його міцність може спочатку зменшитися через деструкцію ланцюгів, а потім знову збільшитися внаслідок структування. Зрештою міцність знову знижується в результаті повного розкладання полімеру. Безперервний тривалий високотемпературний піроліз може викликати карбонізацію, яка зазвичай зумовлює підвищення діелектричних втрат і зниження електричної міцності [12].

Аналіз експериментальних результатів (рис. 2) показує, що при стисканні різке падіння даної характеристики відбувається за температур, вищих межі теплостійкості.

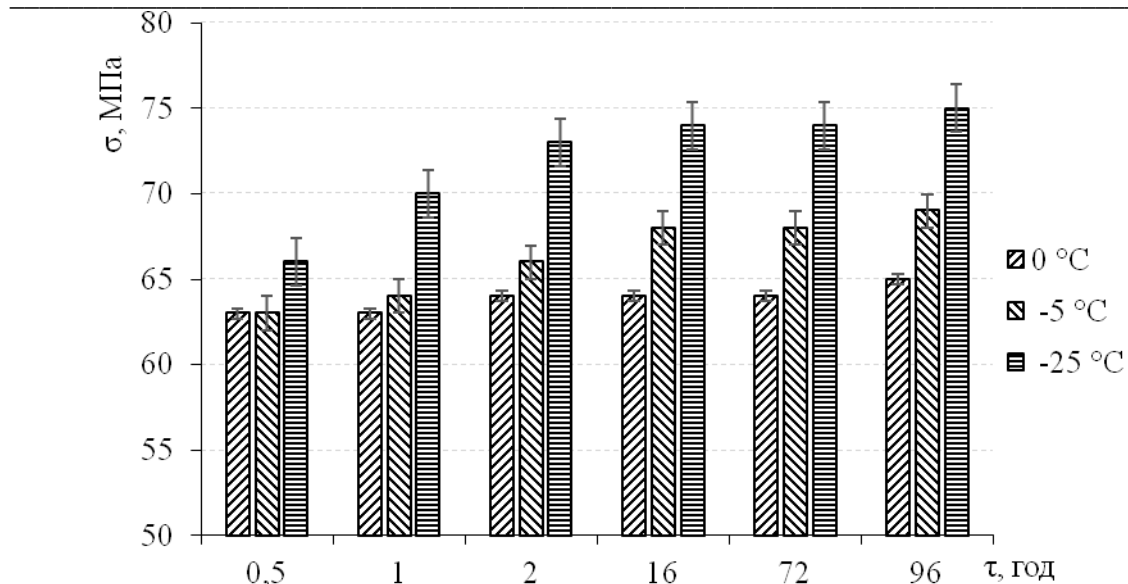


Рис. 2. Залежність границі міцності при стисканні біокомпозитів від температури охолодження та тривалості витримки в умовах понижених температур

Залежно від виду впливу фізичного поля (підвищена або понижена температура, циклічна зміна температури) і хімічної структури полімеру може відбуватися суттєва зміна фізико-механічних характеристик. При цьому, характеристики можуть підвищуватися або значно знижуватися, що можна пояснити в результаті чого знижується її термостійкість, полегшується термодеструкція і підвищується вихід горючих газоподібних продуктів. Вплив температури на полімери визначається, насамперед поведінкою матриці. Відомо, що в області склоподібного стану з підвищенням температури деформаційно-міцнісні властивості полімерів повільно знижуються до досягнення межі теплостійкості, перевищення якої супроводжується прискореним падінням характеристик. В окремих випадках в температурному інтервалі 10-20 °C значення модуля пружності і руйнівного напруження зменшується на два десяткових порядки. Наявність дисперсних наповнювачів, що надають адитивної дії на композит, дещо згладжує дану інтенсивність зменшення, а в разі високонаповнених систем перехід полімеру з твердого, склоподібного у високоеластичний стан відбувається ще повільніше [13].

Межа міцності біокомпозитів за температури випробування 0 °C становить 63-65 МПа, при цьому тривалість витримки незначно впливає на дану характеристику. Охолодження до температури -5 °C забезпечує зростання межі міцності при стисненні на 5-13 %, що пов'язано зі зміною параметрів структурних елементів біополімерної матриці в результаті зниження рухливості сегментів амінокислот в умовах охолодження біокомпозиту. З підвищенням тривалості витримки біокомпозитів до 96 год відбувається подальше підвищення стійкості матеріалу до статичних навантажень за температури -25 °C, що обумовлено появою кристалічних включень води у заглибинах сітки глютинового біополімеру, а також зниженням пластичності біополімерної матриці.

Експериментально встановлено, що процес руйнування біокомпозитних зразків відбувається нерівномірно, що пов'язано із особливостями формування структури біополімерної матриці та залежить від хімічного складу та температури середовища, в якому перебувають біокомпозитні зразки. Високу швидкість руйнування мають біокомпозитні зразки, що поміщені у гарячу воду за температури 70-80 °C. При цьому тривалість деградації становить 20 хв. Це пов'язано з розчиненням біополімерної матриці, в результаті чого макромолекули глютину та частинки органічного наповнювача переходять у водне середовище. Зафіксовано, що біокомпозитні зразки, які повністю занурені у гарячу воду деградують найшвидше порівняно із іншими середовищами. Деградація біокомпозитних зразків у середовищі розчину HCl повністю відбувається через 42 хв, оскільки під дією хімічних агентів відбувається руйнування кристалічної макромолекулярної структури, яка в ряді випадків проходить до утворення мономерів. В результаті чого відбувається процес деструкції біополімерної матриці, що призводить до відділення частинок наповнювача та розшарування матеріалу [15].

Тривалість деструкції біокомпозитних зразків, що перебувають у середовищі холодної води, становить 120 хв. Експериментально встановлено, що біокомпозитні зразки, які частково занурені у холодну воду в ексікаторі деградують повільніше порівняно із зразками, які повністю занурені у

холодну воду. Це означає, що глютинова матриця повільно адсорбує вологу через високу щільність упаковки компонентів біокомпозитного матеріалу, формування якого відбувається за підвищеного тиску (10 МПа) та температури термічної обробки 150 °С. Часткове руйнування біокомпозитних зразків, що перебувають у 10 %-му розчині NaCl, відбувається протягом 650-700 хв. В результаті експериментальних досліджень встановлено, що біокомпозитні зразки, які повністю занурені у 10 %-ий розчин NaCl майже не піддаються руйнуванню порівняно із зразками, які занурені у холодну воду або гарячу воду. Механізм деградації біокомпозитних зразків обумовлений ступенем абсорбції води, що призводить до розчинення глютинової матриці, однак у випадку використання розчину хлориду натрію інтенсивність абсорбції сповільнюється через вибірку сорбцію молекул води, катіонів натрію та аніонів хлору.

Висновки та перспективи подальших досліджень.

Встановлено, що межа міцності при стисненні глютинових біокомпозитних матеріалів, наповнених порошком деревного борошна, знижується у разі підвищення температури навколишнього середовища, що обумовлено низькою теплостійкістю біополімерної матриці. Сегменти макромолекул глютину підвищують рухливість в результаті нагрівання, а також руйнуються зв'язки між неполярними групами ланцюгових ділянок макромолекул глютину, що сприяє пластичній деформації біокомпозитного матеріалу. Тому доцільно виробити на основі глютинових біокомпозитів використовувати в умовах понижених температур, що забезпечує зростання межі міцності при стисненні на 65-75 % порівняно з температурою експлуатації 50-70 °С.

Розроблені біокомпозитні матеріали є стійкими до впливу вологи та розчину хлориду натрію протягом досить тривалого часу, що обумовлено високою щільністю структурних елементів біокомпозитів. Це дозволяє використовувати біокомпозитні вироби в умовах короткотривалого впливу вологи без розшарування та деструкції біополімерної матриці.

В подальшому планується провести апретування поверхні виробів антисептичними засобами та дослідити вплив захисних лакофарбових покриттів на стійкість до впливу атмосферних факторів з метою підвищення тривалості експлуатації у складних умовах впливу хімічних агресивних речовин та циклічної зміни температури.

Список використаних джерел

1. Soghomonyan D., Akopyan K., Trchounian A. pH and oxidation-reduction potential change of environment during growth of lactic acid bacteria: Effects of oxidizers and reducers // *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2011. Т. 47. № 1. С. 27-31.
2. Sibirtsev V.S., Olekhovich R.O., Samuylova E.O. Assessment of integral toxicity of water resources by instrumental methods of analysis. // *SGEM Conference Proceedings*. 2017, V. 17, № 61, P. 507-514.
3. Vollova K., Uspenskaya M., Sivtsov E., Belukhichev E. The study of polymer composites based on polyvinylchloride film and biopolymer filler // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. 2017, Vol. 17, No. 41, P. 225-230
4. Asyakina L.K., Dolganyuk V.F., Belova D.D., Peral M.M., Dyshlyuk L.S. The study of rheological behavior and safety metrics of natural biopolymers // *Foods and Raw Materials*. 2016. Т 4. № 1. С. 70-78.
5. Grisa A.M.C., Simioni T., Cardoso V., Zeni M., Brandalise R.N., Zoppas B.C.D.A. Biological degradation of PVC in landfill and microbiological evaluation // *Polimeros*. 2011. Т. 21. № 3. С. 210-216
6. Folarin O.M. Thermal stabilizers for poly(vinyl chloride): A review // *International Journal of the Physical Science*. 2011. Vol.6(18). P. 4323 -4330.
7. Zhang L., Zhang J., Ding X., Zhu J., Liu Y., Fan Y., Wu Y., Wei Y. Synthesis and Application of a New Environmental Friendly Plasticizer // *American Journal of Biomedical Science and Engineering*. 2015. No 1. Pp. 9-19.
8. Levchik S.V., Weil E.D. Overview of the recent literature on flame retardancy and smoke suppression in PVC // *Polym Advan Technol*. 2005. №16(10). P. 707- 716. Ikeda R. Stability of infiximab in polyvinyl chloride bags // *Am. J. Health Syst. Pharm*. 2012. № 17. P. 1509-1512.

9. Benaniba M.T., Nageotte V.M. Evaluation Effects of Biobased Plasticizer on the Thermal, Mechanical, Dynamical Mechanical Properties and Permanence of Plasticized PVC // J. of Appl. Polym. Sci. 2010. V.118(6). P. 3499 – 3508.
10. Latini G., Ferri M., Chiellini F. Materials degradation in PVC medical devices, dehp leaching and neonatal outcomes // Current Medicinal Chemistry. 2010. T. 17. № 26. C. 2979-2989.
11. Focke W.W., Muiambo H., Mhike W., Kruger H.J., Ofosu O. Flexible PVC flame retarded with expandable graphite // Polymer Degradation and Stability. 2014. T. 100. № 1. C. 63-69.
12. Park, K. H., Chung D.J. Stability study of docetaxel solution (0,9%, saline) using Non-PVC and PVC tubes for intravenous in polyvinyl chloride bags for intravenous administration // Biomaterial Research. 2015. № 2 (19). P. 1-5.
13. Chaochanchaikul K., Sombatsompop N., Rosarpitak V. Structural and thermal stabilizations of PVC and wood/PVC composites by metal stearates and organotin // BioResources. 2011. T. 6. № 3. C. 3115-31
14. Yu J., Sun L., Ma C., Qiao Y., Yao H. Thermal degradation of PVC: a review // Waste Management. 2016. T. 48. C. 300-314.
15. Yoshikatsu T., Kiyoshi E. Structure and thermal degradation of poly(vinyl chloride) synthesized by various polymerization catalyst // Polymer Degradation and Stability. 2011 V. 96. I. 7. P. 1321-1326.

УДК 62-19:519.8

DOI 10.36910/775.24153966.2022.73.32

О.О. Налобіна¹, О.З. Бундза¹, М.В. Голотюк¹, В.С. Пуць², В.Л. Мартинюк²*Національний університет водного господарства та природокористування¹
Луцький національний технічний університет²***КОНЦЕПТУАЛЬНЕ КОМПЛЕКСНЕ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ КОМУНАЛЬНИХ МАШИН**

У статті викладено результати дослідження сукупності часткових показників, якими можна оцінити ефективність використання комунальних прибиральних машин із щітковим робочим органом; представлено функціональну схему формування узагальненого критерію ефективності та отримано математичний вираз для його визначення.

Ключові слова: критерій, показники, комунальна машина, ефективність використання

Е.А. Налобина, О.З. Бундза, Н.В. Голотюк, В.С. Пуць, В.Л. Мартинюк**КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМУНАЛЬНЫХ МАШИН**

В статье изложены результаты исследования совокупности частичных показателей, которыми можно оценить эффективность использования коммунальных уборочных машин со щеточным рабочим органом; представлено функциональную схему формирования обобщенного критерия эффективности и получено математическое выражение для его расчета.

Ключевые слова: критерий, показатели, коммунальная машина, эффективность использования.

О.О. Nalobina, O.Z. Bundza, M.V. Holotiuk, V.S. Puts, V.L. Martyniuk**CONCEPTUAL COMPREHENSIVE EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF THE USE OF MUNICIPAL MACHINES**

The results of a preliminary analysis of current research of use of municipal vehicles, allowed to establish that in order to ensure the efficiency and to evaluate different options for organizing the working process we need an indicator by the numerical value of which it's possible to conclude how effective the result or decision is. This indicator is called the criterion of efficiency.

The article presents the results of a conceptual study of a set of technical - economic and qualitative indicators that reflect the main aspects of the operation of municipal vehicles designed for cleaning roads and territory, taking into account the characteristics of the external environment. During research the algorithm of complex estimation of efficiency of use of municipal cars is offered. A functional diagram is proposed for visual perception of the sequence of formation of a complex efficiency indicator.

Key words: criterion, indicators, municipal machine, efficiency of use.

Постановка проблеми. Комунально-дорожня техніка має значний попит, розвивається в різних напрямках, постійно удосконалюється й представляє інтерес для машинобудівних підприємств. Зокрема в Україні відомими виробниками даної техніки є: «Альфатекс», «ГлобусАвто», ПМК «Спецмаш», Тов «Білоцерківський механічний завод», «ВІВА».

Згідно прийнятої класифікації [1] комунально-дорожні машини поділяють за призначенням, за типом робочого обладнання та за типом робіт, які вони виконують.

Зростання протяжності доріг, а також зростання вимог до якості їхнього обслуговування, зокрема очищення, привело до того, що дорожні роботи й техніка для їхнього проведення є об'єктом підвищеної уваги як виробничників так й науковців.

Для обслуговування доріг і міських територій використовують підмітальні машини, підмітально-збиральні машини, вакуумно-підмітальні й вакуумно-збиральні машини.

Робочим органом підмітальної машини є циліндрична або конічна щітка які відділяють бруд і переміщують його вбік від переміщення машини. Бруд і сміття такі машини не збирають. Застосовують їх, в основному, для прибирання замських доріг, міських дворів.

Підмітально-збиральні машини призначено для видалення бруду та сміття з території міста, з твердих дорожніх і аеродромних покриттів, збору видаленого бруду й його транспортування до сміттєзбірників.

Робоче обладнання машин – циліндричні, конічні щітки під час експлуатації зношуються, що приводить до потреби у їхній заміні. Витрати на заміну щіткового обладнання складають 25% загальних витрат на експлуатацію машини

Очищення дорожнього полотна проводять комунальні машини, в основному, з щітковими робочими органами. Ефективність роботи машин залежить від багатьох факторів. Зокрема на ефективність прибирання дорожнього покриття впливає величина плями контакту із ним щіткового обладнання. Величина плями контакту, у свою чергу, залежить від форми щітки, фізико – механічних властивостей матеріалу ворсинок, нерівностей дорожнього полотна, тощо. Пляма контакту не має постійних розмірів, що обумовлено порушенням контакту дорожнього покриття та поверхні щітки внаслідок зношення останньої [2]. Крім того, під час роботи таких машин значним чином забруднюється навколишнє середовище через створення пилу.

Застосовують також вакуумно-збиральні та вакуумно-підмітальні машини, які оснащено вакуумним підбирачем. Даний тип машин забезпечує більш якісне очищення.

Бачимо, що на ринку представлено різні моделі комунальних машин, призначених для очищення поверхонь. Господарствам складно обирати моделі машин із можливістю прогнозування ефективної їхньої експлуатації. Це потребує проведення системного оцінювання підметальних комунальних машин у декількох напрямках. По-перше, встановлення й дослідження часткових показників, які глибоко відображають основні аспекти їхньої експлуатації. По – друге, дослідження якісних показників технологічних процесів, які здійснює машина із врахуванням впливу характеристик зовнішнього середовища.

Порівняння отриманих результатів з нормативними або бажаними дасть можливість підприємствам прийняти обґрунтоване рішення щодо вибору машин базуючись на оціночних показниках їхньої роботи у різних умовах експлуатації. Метою даної роботи є формування алгоритму комплексного оцінювання ефективності використання комунальних підмітальних машин із щітковим робочим органом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання, пов'язані з підвищенням ефективності роботи комунальних машин, є предметом досліджень таких вчених як Баловнев В.І., Березюк О.В., Лепеша А. Г., Лепеша Г.В., Кусков М.П. та багатьох інших [1 - 7].

Зокрема, Г.В. Лепеш, А.Г. Лепеш [4] дослідили сутність процесу силової взаємодії щіткового агрегату комунальної машини з поверхнею, що підлягає очищенню. Авторами встановлено взаємозв'язки між параметрами щітки та параметрами її роботи.

Авторами також розроблено методику вибору характеристик робочого процесу щітки комунальної машини. Також виконано практичну перевірку розробленої методики та надано рекомендації щодо вибору раціональних характеристик робочого процесу [5]. Експериментальним шляхом також доведено, що для здійснення ефективного робочого процесу очищення дорожнього покриття швидкість руху комунальної машини повинна знаходитись у діапазоні 6-12 км/год. [5].

У ході досліджень встановлено, що ефективність процесу очищення поверхні дорожнього покриття залежить не лише від параметрів машини та параметрів робочого процесу, а й від величини плями контакту ворсу щітки та покриття [7]. З іншого боку дослідники розглядають у якості фактору впливу на ефективність роботи комунальної щіткової машини стан поверхні дорожнього покриття.

Зокрема Беляков В.В. [8] та інші для оцінювання взаємодії поверхні щіткового робочого органу, його зношування розглядали різні моделі поверхонь доріг. Авторами [8, 9] обґрунтовано перелік статистичних характеристик, якими можна оцінити нерівність дороги, а саме: середня ордината мікропрофілю або математичне очікування, середнє квадратичне відхилення або дисперсія, кореляційна функція і спектральна щільність.

Тетерина І.А. та ін. [9] стверджують, що ефективність процесу прибирання дорожнього покриття залежить від декількох факторів які визначаються конструкцією щітки, характеристиками волокнистого матеріалу та умовами її експлуатації, а саме швидкості взаємодії з поверхнею, яка очищується.

Лінійна та кутова швидкості щітки, а також її конструктивні параметри, як основні фактори впливу на ефективність процесу прибирання доріг, обрано також у роботі Єрмілова А.Б. [10].

Задачу підвищення ефективності процесу прибирання доріг Кусков М.П. запропонував вирішити за рахунок застосування широкого діапазону режимних параметрів [7].

Ряд авторів задачу підвищення ефективності процесу прибирання дорожнього полотна вирішували за рахунок обґрунтування нових конструктивних рішень елементів.

Постановка завдання. Метою даної роботи є формування алгоритму комплексного оцінювання ефективності використання комунальних підмітальних машин із щітковим робочим органом.

Викладання основного матеріалу. Процес прибирання дорожнього полотна характеризується впливом багатьох зовнішніх факторів на комунальну машину в цілому й на її робочі органи, зокрема. До них віднесемо: стан забруднення поверхні, характеристики забруднення (вологість, щільність, питома вага, тощо), нерівності мікрорельєфу поверхні дороги. Відносно до ефективності технологічного процесу очищення перераховані фактори за умови їхнього зростання є негативними, т. т. що призводять до зменшення якості виконання процесу.

З метою забезпечення ефективного протікання процесу та оцінювання різних варіантів організації процесу роботи комунальної машини необхідним є критерій, за числовою величиною якого можна зробити висновок про те, наскільки результат або прийняте рішення є ефективними. Цей показник називається критерієм ефективності.

З врахуванням [11] сформуємо основні вимоги до критерію.

1. Критерій повинен бути комплексним, тобто відображати вплив всіх параметрів зовнішнього і внутрішнього середовища системи, яку він оцінює.

2. Повинен залежати від структури системи.

3. Критерій повинен легко обчислюватись (оцінюватись експериментально або внаслідок обробки статистичних даних).

4. Узагальнюючий критерій не повинен формуватись із дублюванням одного й того ж самого часткового фактора впливу, так як це не правомірно підніме його вагомість і негативно вплине на формування напрямків зростання ефективності процесу, який підлягає оцінюванню.

Враховуючи вище означене, робимо припущення, що основний принцип комплексного оцінювання ефективності комунальної підмітальної машини має базуватись на результатах значень сукупності часткових показників.

Розглянемо фактори, які впливають на ефективність використання комунальної підмітальної машини ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_k; y_1, y_2, y_3, \dots, y_n; z_1, z_2, z_3, \dots, z_m$). Це дасть можливість обрати часткові показники ефективності Y_i , оцінити їхню вагомість та сформувати функцію агрегування.

Далі шляхом опрацювання результатів експериментальних досліджень роботи комунальних підмітальних машин (певного типу) або на підставі експертного оцінювання часткових показників ефективності здійснимо розрахунок узагальненого критерію $K_{узг}$.

Для наочного представлення взаємозв'язків факторів, які впливають на часткові показники ефективності використання комунальної підмітальної машини, з узагальненим критерієм ефективності використання сформуємо функціональну схему. (рис. 1).

Прибирання доріг є доволі складним технологічним процесом, результат якого багато в чому залежить від ефективності застосування технічних засобів. Оцінити ефективність машини можна лише через сукупність кількісних, а також якісних показників. Ефективність використання комунальної прибиральної машини, як ми побачили вище, можна оцінити певним переліком часткових показників. Це дає нам можливість застосувати диференціальний метод, який полягає у порівнянні рекомендованих значень часткових показників із фактично отриманими їхніми значеннями за певних умов. Вибір часткових показників оцінювання ефективності використання комунальних прибиральних машин ми проводили з урахуванням рекомендацій, наданих у [12] щодо часткових критеріїв ефективності використання технічних систем:

- частковий показник має мати певну важливість і під час формування комплексного показника до його складу необхідно ввести лише найбільш важливі часткові;

- часткові показники ефективності повинні бути однорідними в групі показників, без якісного повтору;

- повинна бути забезпечена можливість перевірки часткових показників ефективності;

- всі часткові показники повинні бути сумісні з показниками якості технологічного процесу.

Всі часткові показники ефективності використання комунальних прибиральних машин являють собою сукупність показників якості роботи машини та техніко-економічних показників. Вибір показників базувався на рекомендаціях експертів.

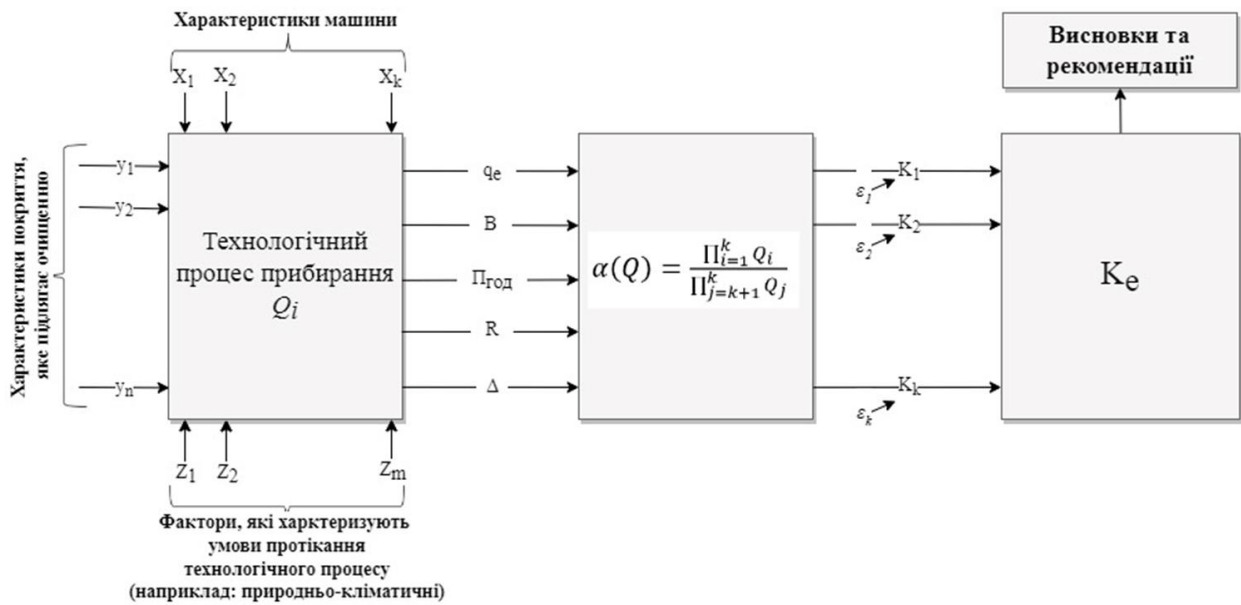


Рис 1. Схема формування узагальненого критерію ефективності використання комунальних машин із щітковим робочим органом

Мета проведеної експертизи - отримання інформації щодо впливу обраних часткових показників на ефективність використання комунальних прибиральних машин (розглядаємо машини з щітковим робочим органом). З попередньо сформованої множини часткових техніко – економічних показників роботи було обрано наступні показники:

- експлуатаційна витрата палива q_e , кг/м²;
- продуктивність виконання робіт $\Pi_{год}$, м²/год;
- витрати на технічне обслуговування і ремонт елементів щіткового робочого обладнання B , грн.;
- собівартість прибирання фіксованої одиниці площі дороги (території міської).

З показників якості роботи комунальної щіткової машини остаточно у якості часткових показників обрано наступні: радіальне зношування ворсу щітки R , мм; відносна зміна плями контакту Δ .

Аналіз часткових показників виявив, що продуктивність комунальної машини за годину основного часу та експлуатаційна витрата палива машиною взаємопов'язані з собівартістю прибирання фіксованої одиниці площі дороги (території міської), що не задовольняє вимогам до часткових показників ефективності. Враховуючи, що продуктивність комунальної машини за годину часу та експлуатаційна витрата палива можливо оцінити з високою точністю, то дані показники будемо враховувати у подальших дослідженнях, а собівартість відкидаємо. Було проведено ранжування показників ефективності використання комунальної машини. Усім частковим показникам було надано ранг у вигляді натуральних чисел від одиниці до k (k – число часткових показників ефективності).

Згідно [12] ранг 1 присвоюється найбільш впливовому показнику, а менш впливовому – ранг k . Дані, отримані внаслідок ранжування експертами часткових показників, було оброблено і визначені переваги експертів по відношенню до розглянутих часткових показників, а також розраховано коефіцієнти рангової кореляції γ .

$$\gamma = 1 - \frac{6}{k(k^2 - 1)} \sum_{i=1}^k (r_{1i} - r_{2i})^2, \quad (1)$$

де r_{1i}, r_{2i} – ранг, віднесений першим і другим експертами відповідно до i -го показника.

Далі проводили оцінювання часткових показників за коефіцієнтами відносної важливості

$$\varepsilon_i = \sum_{l=1}^n \frac{r_i^l}{\varepsilon_i} = \sum_{l=1}^n r_i^l / \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^k r_i^l, \quad (2)$$

де r_i^l – ранг, який присвоєно i -му частковому показнику l експертом m .

Найкращий показник матиме ранг $(m - 1)$, найгірший – відповідно «0».

Аналіз досліджень функціонування й оцінювання ефективності технічних систем [13 -16] виявив, що найбільш часто для формування узагальненого критерію оцінювання ефективності технічних систем використовують функцію агрегування, яка являє собою відношення часткових показників ефективності Q_i , які потребують зростання в ході виконання технологічного процесу прибирання території, до показників Q_m , які потребують зменшення

$$\alpha(Q) = \frac{\prod_{i=1}^k Q_i}{\prod_{j=k+1}^k Q_j}. \quad (2)$$

Функція (2) після приведення до скалярного виду, що дало можливість витримати викладені вище вимоги до часткових критеріїв щодо впливу їхньої розмірності на узагальнюючий критерій, ввели до (2) коефіцієнт важливості часткових показників ефективності та розділили фактичні значення прийнятих часткових показників на їхні бажані значення. При цьому отримали наступний вид функції агрегування

$$\alpha(Q) = \frac{\prod_{i=1}^k \alpha_i \frac{Q_i}{Q_i^{номп}}}{\prod_{j=k+1}^k \alpha_j \frac{Q_j}{Q_j^{номп}}}, \quad (3)$$

де

$$\begin{cases} \prod_{i=1}^k \alpha_i \frac{Q_i}{Q_i^{номп}} = K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_{k_1}, \\ \prod_{j=k+1}^k \alpha_j \frac{Q_j}{Q_j^{номп}} = K_{1+k_1} \cdot K_{2+k_1} \cdot \dots \cdot K_k. \end{cases} \quad (4)$$

З урахуванням (3), (4) функція агрегування запишеться

$$\alpha(Q) = \frac{K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_{k_1}}{K_{1+k_1} \cdot K_{2+k_1} \cdot \dots \cdot K_k}. \quad (5)$$

З врахуванням вище викладеного отримано узагальнений критерій ефективності використання комунальних прибиральних машин із щітковим робочим органом

$$K_e = \frac{K_B \cdot K_{\Pi_{200}}}{K_{q_e} \cdot K_R \cdot K_{\Delta}}, \quad (6)$$

де K_B , $K_{\Pi_{200}}$ – коефіцієнт, який оцінює важливість часткового показника, який з метою підвищення ефективності використання машини, бажано підвищувати;

K_{q_e} , K_R , K_{Δ} – коефіцієнти, які оцінюють важливість часткових показників, які з метою підвищення ефективності використання машини, бажано зменшувати.

Внаслідок розрахунку за залежністю (6) може бути отримано коефіцієнт $K_e > 1,0$. За таких умов практично неможливо виконати оцінку степені досягнення бажаного рівня показників ефективності використання комунальних прибиральних машин із щітковим робочим органом. Тому, доречно, використовувати відносний узагальнений коефіцієнт – відношення узагальненого коефіцієнта, обчисленого за (7) до його потрібного (максимально можливого) значення.

Враховуючи, що на роботу комунальної машини впливають й умови їхньої експлуатації, то задачу підвищення ефективності її експлуатації можна сформулювати наступним чином:

$$K_{\Pi_{200}}(x, y, z) \rightarrow \max K_e, \quad (7)$$

де x, y, z – характеристики поверхні, яка підлягає очищенню та стану машини, а також природно-кліматичних умов, що впливають на процес прибирання.

Висновки. У статті обрано фактори, які впливають на критерій ефективності використання комунальних прибиральних машин із щітковим робочим органом і які покладено в основу узагальненого критерію ефективності. Отримано вираз для визначення узагальненого критерію ефективності використання комунальних машин, який базується на обраній функції агрегування.

Також для наочного представлення взаємозв'язків факторів, які впливають на часткові показники ефективності використання комунальної підмітальної машини, з узагальненим критерієм ефективності у роботі запропоновано функціональну схему його формування.

Література

1. Баловнев В. И. Дорожно-строительные машины и комплексы. М. – Омск, 2001. – 528 с.
2. Березюк О. В. Методика инженерных расчётов параметров навесного подметального оборудования экологической машины на основе мусоровоза. Современные проблемы транспортного комплекса России. 2016. Т. 6. № 2. С. 39-45.
3. Лепеш А. Г. Функционирование и ресурс щеток коммунальной уборочной техники. // Вестник Российской академии естественных наук, 2011, вып. 15 № 4, с. 128–130.
4. Лепеш Г.В. Лепеш А.Г. Теоретические и методические основы повышения эффективности щеточных агрегатов коммунальных уборочных машин: монография. – СПб.: изд-во СПбГУЭСЭ, 2013. – 128 с.
5. Лепеш А.Г., Лепеш Г.В. Петренко Ю.А. Исследование влияния температуры на прочность полипропиленовой лески // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2011.-№4(18). - С. 55 – 59.
6. Куксов М.П., Нижегородов А.И. К построению математической модели рабочего процесса подметально-уборочной машины // Вестник ИрГТУ. 2013. № 12. С. 88-91.
7. Куксов М.П. Определение рациональных режимов работы малогабаритной коммунальной машины для летнего содержания дворовых территорий с использованием математического моделирования // «Вестник Иркутского Государственного Технического Университета». 2015. № 3. С. 44 – 48.
8. Беляков, В.В. Подвижность специальных транспортных средств по дорогам типа «stone-road» / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е.Алексеева. 2012. №1. С. 143–151.
9. Тетерина И.А. Летопольский А.Б. Модель взаимодействия ЩРО с обрабатываемой поверхностью: моногр. Смоленск: ООО «НОВАЛЕНСО», 2016. С. 73–75.
10. Ермилов А.Б. «Расчёт и проектирование машин для летнего содержания дорог». М., «МАДИ», 1989.
11. Налимов, В.В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. [Текст] / В.В. Налимов, Н.А. Чернова – М.: Наука, 1965. – 310 с.
12. Стативка В.С. Методика обоснования критериев оценки эффективности системы управления автопреприятием / В.С. Стативка, В.Н. Шабает // Техничко-технологические проблемы сервиса. № 2(12), 2010. – С. 81-86.
13. Дедков В.К. Принципы формирования критериев и показателей эффективности функционирования сложных технических систем / В.К. Дедков // Надежность и качество сложных систем. № 4, 2013. – С. 3-8.
14. Нарусбаев, А.А. Введение в теорию обоснования проектных решений / А.А. Нарусбаев. – Л. : Судостроение, 1976. – 224 с.
15. Анализ эффективности функционирования сложных систем [Текст] / В.Е. Кривоножко, А.И. Пропой, Р.В. Сеньков, И.В. Родченков, П.М. Анохин // Автоматизация проектирования. – 1999. – № 1. – С. 2–7.
16. Надежность и эффективность в технике [Текст]: справочник / Ред. совет: В. С. Авдудевский (пред.) и др. В 10 т. Т. 3. Эффективность технических систем / Под общ. ред. В. Ф. Уткина, Ю.В. Крючкова. – М. : Машиностроение, 1988. – 328 с.

УДК 004.896 (075.8) : 621.391.175

DOI 10.36910/775.24153966.2022.73.33

Б.О. Пальчевський*Луцький національний технічний університет***ИНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ МОНІТОРИНГ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО
ОБЛАДНАННЯ**

В роботі описано особливості оперативного моніторингу технологічних, експлуатаційних і виробничих параметрів технологічного обладнання і використання його результатів для підвищення ефективності технологічного обладнання. До них відноситься збір на локальному рівні обладнання виробничої інформації для реалізації таких функцій як керування робочим процесом, діагностування стану компонент обладнання і визначення стану готовності розхідних матеріалів для створення відповідних рішень з коректування технологічних параметрів, визначення термінів технічного обслуговування обладнання і формування замовлень на розхідні матеріали.

Ключові слова: технологічне устаткування, моніторинг, діагностика, інтелектуальна система керування, технологічні параметри, експлуатаційні параметри, виробничі параметри.

Б.А. Пальчевский**ИНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ МОНІТОРИНГ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ**

В работе описаны некоторые особенности оперативного мониторинга технологических, эксплуатационных и производственных параметров при функционировании оборудования и использование его результатов для повышения эффективности логического оборудования. К ним относится сбор на локальном уровне оборудования производственной информации для реализации таких функций как управление рабочим процессом, диагностирование состояния компонент оборудования и определение состояния готовности расходных материалов и ее анализ для создания соответствующих решений по корректировке технологических параметров, определение сроков технического обслуживания оборудования и формирование заказов на расходные материалы.

Ключевые слова: технологическое оборудование, мониторинг, диагностика, интеллектуальная система управления, технологические параметры, эксплуатационные параметры, производственные параметры.

В. Palchevskyi**INTELLECTUAL MONITORING OF PARAMETERS TECHNOLOGICAL EQUIPMENT**

The paper describes the features of operational monitoring of technological, operational and production parameters of technological equipment and the use of its results to increase efficiency of technological equipment. These include the collection at the local level of production information equipment to implement functions such as workflow management, diagnosing the state of equipment components and determining the state of readiness of consumables and its analysis to create appropriate solutions to adjust technological parameters, determine maintenance dates and form orders for consumables.

Key words: technological equipment, monitoring, diagnostics, intelligent control system, technological parameters, operational parameters, production parameters.

Постановка проблеми. Ускладнення завдань, що виконує сучасне технологічне обладнання, забезпечується модифікацією структури його системи автоматичного керування (САК). Розвинута САК включає, як правило, декілька рівнів і виконує окрім функцій керування робочим процесом, також і функції технічного діагностування і предикативного технічного обслуговування обладнання. Введення системи моніторингу параметрів технологічного обладнання дозволяє здійснювати оцінку технологічного обладнання по його фактичному стану, що забезпечує підвищення ефективності виробництва за рахунок зниження часу простоїв. Для цього САК повинна забезпечити на нижньому рівні моніторинг і збір виробничої інформації, а на вищих рівнях – її аналіз і формування впливів керування. Необхідність побудови структури таких розвинених систем керування і взаємодії їх елементів при функціонуванні, а також принципи використання математичних моделей висувають на перший план необхідність проведення аналітичних досліджень та створення відповідної методики.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Впродовж останніх десятиріч відзначається постійне зростання кількості функцій, що виконуються технологічним обладнанням [4, 5, 9, 11, 14]. При цьому спостерігається зростання питомої ваги інформаційних процесів при функціонуванні технологічного обладнання [12, 13, 15, 19]. На сьогоднішній день найкращих результатів в глобальній міжнародній конкуренції досягли виробники технологічного обладнання

принципи створення якого базуються на ідеях інтелектуального виробництва [3, 6, 17,18]. Аналіз літературних джерел показав, що більшість систем керування в технологічному обладнанні об'єднують функції керування та функції діагностування не в автоматичному режимі а, в основному, на загальному рівні технологічної машини. Оперативний моніторинг стану окремих вузлів технологічного обладнання ще не набув достатнього поширення, не кажучи про об'єднання в процесі моніторингу технологічних, експлуатаційних і виробничих параметрів [1, 7, 8, 16].

Постановка завдань. У сучасній виробничій системі при автоматизації технологічного процесу все частіше виникають завдання збору даних з різних складових елементів машини для їх аналізу відповідно до стандарту OEE (Overall Equipment Effectiveness – загальна ефективність обладнання). В такій виробничій системі необхідно забезпечити окрім функцій керування також і виконання функцій діагностування. Першочерговим завданням постає необхідність вивчення проблемних питань будови структури САК, які забезпечать взаємодію цих функцій (оперативний моніторинг і збір даних з технологічних, експлуатаційних і виробничих параметрів, їх обробку і аналіз, а також вироблення рекомендацій з технічного обслуговування). Така система керування на базі результатів моніторингу здатна виправляти "недоліки" робочого процесу, експлуатаційні відмови механічної частини технологічного обладнання і відслідковувати наявність розхідних матеріалів. Метою роботи є створення принципових підходів побудови методики та алгоритмів роботи САК, які забезпечать єдність керування робочим процесом, діагностику стану механічної частини і аналіз стану матеріального забезпечення робочого процесу при функціонуванні технологічного обладнання.

Викладення основного матеріалу. Для забезпечення в САК технологічного обладнання окрім функцій керування також і виконання функцій діагностування необхідно забезпечити збір даних на його локальному рівні і їх аналіз для формування коректуючих впливів для керування робочим процесом, здійснення технічного обслуговування і вплив на стан матеріального забезпечення протікання робочого процесу. Реалізація цих функцій забезпечується розвинутою системою керування, яка забезпечує вирішення завдань, пов'язаних з моніторингом та прогнозуванням технічного стану механізмів, вузлів та систем технологічних машин різного виду. Розвинена САК бере на себе завдання керування робочим процесом машини та визначення її технологічних, експлуатаційних та виробничих параметрів.

Технологічні параметри - параметри, пов'язані з реалізацією технологічних режимів, наприклад, температура в робочій зоні, тиск, швидкість переміщення механізмів тощо. Завдяки періодичному або безперервному моніторингу технологічних параметрів машини можуть виявлятися відхилення технологічних режимів від заданих для здійснення відповідних коректувань. Експлуатаційні параметри – це параметри, пов'язані з швидкозношуваними деталями машини. Відповідно, засобом визначення експлуатаційних параметрів може бути будь-який датчик, здатний визначати зношення відповідного компонента, причому відсоток або ступінь зносу перетворюються на електронний сигнал, який приймається пристроєм вимірювання та управління. Завдяки періодичному або безперервному моніторингу експлуатаційних параметрів машини можуть виявлятися зламані або зношені деталі або компоненти машини.

Виробничі параметри – це параметри, безпосередньо пов'язані з виробництвом виробів, наприклад кількість спожитих витратних матеріалів, якими може бути кількісно охарактеризований обсяг вироблених виробів. Інша кількісна характеристика вироблених виробів може бути отримана шляхом підрахунку кількості циклів деяких машинних компонентів, наприклад підрахунку кількості ходів циліндра при нанесенні логотипу на вироблену продукцію.

Для виконання вищевказаних функцій керування і діагностування, система керування включає верхній та нижній рівні (рис.1).

Нижній рівень керування, на якому здійснюють безперервне регулювання технологічних параметрів (температури, тиску, тощо) і програмно-логічне керування різними механізмами (робочими механізмами, засувками, клапанами, двигунами, конвеєрами тощо). На цьому рівні виконується збір виробничої інформації за допомогою датчиків. Сьогодні базою нижнього рівня є програмовані логічні контролери (Programmable Logical Controller), які є первинними засобами збору, обробки інформації, регулювання технологічних параметрів, аварійної сигналізації, захисту і блокування механізмів обладнання. Оброблена контролерами інформація передається до комп'ютеризованої системи верхнього рівня.

Верхній рівень керування – це супервізорне керування, яке полягає в ідентифікації ситуації на об'єкті і видачі завдань на нижній рівень. Для цього використовується відповідне промислове програмне забезпечення, наприклад HMI / SCADA, яке реалізує обмін даними з

контролерами, а також їх взаємодію між особою. На цьому рівні приймаються рішення які безпосередньо реалізуються системою керування.

Система верхнього рівня керування забезпечує збір даних і оперативне диспетчерське управління шляхом виконання наступних основних функцій:

- прийом інформації про контрольовані технологічні параметри від контролерів нижніх рівнів і датчиків;
- збереження прийнятої інформації в архівах;
- графічне представлення перебігу технологічного процесу, а також архівної інформації в зручній для сприйняття формі;
- сприйняття команд оператора і передача їх в адрес контролерів нижніх рівнів і виконавчих механізмів;
- реєстрацію подій, пов'язаних з технологічним процесом і діями обслуговуючого персоналу.



Рис.1. Структура технологічної машини з системою автоматичного керування і діагностування

Обробка даних, отриманих на нижньому рівні САК, дозволяє оцінити ресурс вузлів та деталей здійснити прогноз зміни технічного стану об'єкта. Оскільки поломки не завжди відбуваються через однаковий час, бо іноді вузол може продовжувати роботу в штатному режимі набагато довше, а іноді виходить з ладу раніше терміну, то методика інтелектуального обслуговування технологічної машини полягає в пошуку тієї точки часу, в якій показники роботи починають падати. Для оцінки загального стану технологічного обладнання доцільно використати широко відомий показник ефективності обладнання **OEE** (**OEE** - overall equipment effectiveness, загальна ефективність обладнання). Показник ефективності обладнання **OEE** або $E_{заг}$ - інтегрований показник ефективності роботи обладнання дає змогу провести аналіз втрат продуктивності та виявити проблемні місця в обладнанні. Розрахунок показника $E_{заг}$ проводиться за такою формулою:

$$E_{заг} = \eta_{вик} \cdot \eta_T \cdot (1 - \gamma),$$

де: $\eta_{вик}$ - критерій доступності обладнання відомий як коефіцієнт використання,
 η_T - критерій продуктивності, який описує зміну швидкості виробництва,
 γ - відсоток бракованої продукції, відповідно критерій якості складе $(1-\gamma)$.
 Світові стандарти для цих критеріїв нині такі:

- Доступність – 0,9,

- Продуктивність – 0,95.
- Якість – 0,99.
- Загальний показник ефективності обладнання $E_{заг}$ – 0,85.

У міжнародній практиці прийнято, що загальний показник ефективності обладнання $E_{заг}$ вважається при його значенні понад 0,75 – добрим, від 0,65 до 0,75 – задовільним, менше 0,65 – поганим.

Об'єктом моніторингу може бути будь-яке технологічне обладнання або його вузли, оснащені необхідними датчиками контролю параметрів стану. Для об'єкта створюється емпірична (цифрова) модель, яка будується на підставі заданих значень параметрів стану, з яким проводитиметься порівняння поведінки об'єкта для виявлення відхилень його технічного стану. Побудовану модель можна розглядати як багатовимірну поверхню у просторі параметрів стану. Раннє виявлення дефектів і відмов у роботі дозволяє діагностувати проблеми до того, як вони перетворюються в відмови (рис.2). Коли ми бачимо погіршення показників роботи, наприклад за допомогою карт індивідуальних значень Шухарта [2], то розуміємо, що потрібно готуватися до відмови обладнання, і слід проводити ремонт.

Контрольна карта Шухарта має дві статистичні визначальні контрольні межі відносно центральної лінії, які називаються верхньою контрольною межею (ВКМ) і нижньою контрольною межею (НКМ) [2]. В деяких ситуаціях аналізу робочих процесів, коли неможливо отримати більш за одне значення параметру процесу, наприклад значення характеристики ефективності обладнання, доводиться аналізувати і управляти процесом на основі індивідуальних значень. При використанні карт індивідуальних значень контрольні межі розраховують на основі міри варіації, отриманої по ковзних розмахах зазвичай двох послідовних спостережень. Ковзний розмах — це абсолютне значення різниці вимірів в послідовних парах, тобто різниця першого і другого вимірів, потім другого і третього, і так далі. На основі ковзних розмахів обчислюють середній ковзний розмах $R_{сер}$, який використовують для побудови контрольних карт. За всіма даними обчислюють загальне середнє X^0 .

В таблиці 1 наведені результати аналізу загальної ефективності технологічної машини на протязі 10 місяців.

Табл. 1

Результати аналізу загальної ефективності технологічної машини

Найменування показника	Значення									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Загальна ефективність $E_{заг}$	0,93	0,92	0,93	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,87	0,87
Ковзний розмах $R_{сер}$		0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,0

Визначимо середнє значення показника ефективності

$$E_{заг}^{сер} = \frac{1}{10} (0,93 + 0,92 + 0,93 + \dots + 0,87 + 0,87) = 0,907.$$

Середній ковзний розмах складе

$$R_{сер} = \frac{1}{9} (0,2 + 0,4 + 0,3 + \dots + 0,1) = 0,089.$$

Значення НКМ, яке вкаже на наявність наближення відмови, визначиться за формулою

$$НКМ = E_{заг}^{сер} - \frac{3}{d_2} \cdot R_{сер} = 0,907 - \frac{3}{1,128} \cdot 0,089 = 0,67.$$

Значення коефіцієнтів d_2 і $E_2 = 3/d_2$ отримані із таблиць для карт індивідуальних значень Шухарта при кількості вимірювань $n=2$ [2].

Знімаючи показники датчиків у нормальних режимах роботи, система автоматично створює математичну модель поведінки конкретного екземпляра промислового устаткування. У реальному часі здійснюється порівняння поточних показників датчиків зі значеннями, отриманими в результаті розрахунку за підготовленою математичною моделлю. Визначається аномалія-різниця між реальними та передбаченими показаннями.

Припустимо, у нас в машині є помпа, що закачує мастильно-охолоджувальну рідину. На початку експлуатації помпа виконує роботу ідеально, але з часом у неї забивається фільтр, показники падають. В один прекрасний момент показники падають до критичної точки, коли помпа вже не закачує достатню кількість рідини. В такому випадку ми говоримо про вихід обладнання з ладу. Щоб запобігти такому сценарію, класична методологія обслуговування передбачає заміну або технічне обслуговування цієї помпи через певний час – зазвичай це середній показник роботи вузла. Але в одному випадку така заміна може бути передчасною, а в іншому запізнілою – в залежності від умов роботи вузла. Саме тут і допоможе технічна діагностика стану помпи.

Основна складність у створенні системи прогнозного обслуговування - це розробка алгоритмів, здатних правильно визначити зародження дефекту та прогнозувати його подальший розвиток. Алгоритми діагностування та прогнозування можуть розроблятися не тільки для основних робочих вузлів обладнання (зварювальний вузол, шпindel, фільтр, супорт, котел, турбіна, генератор чи трансформатор), але і для допоміжних вузлів (вузли живлення машини, вузли блокування, помпи тощо).

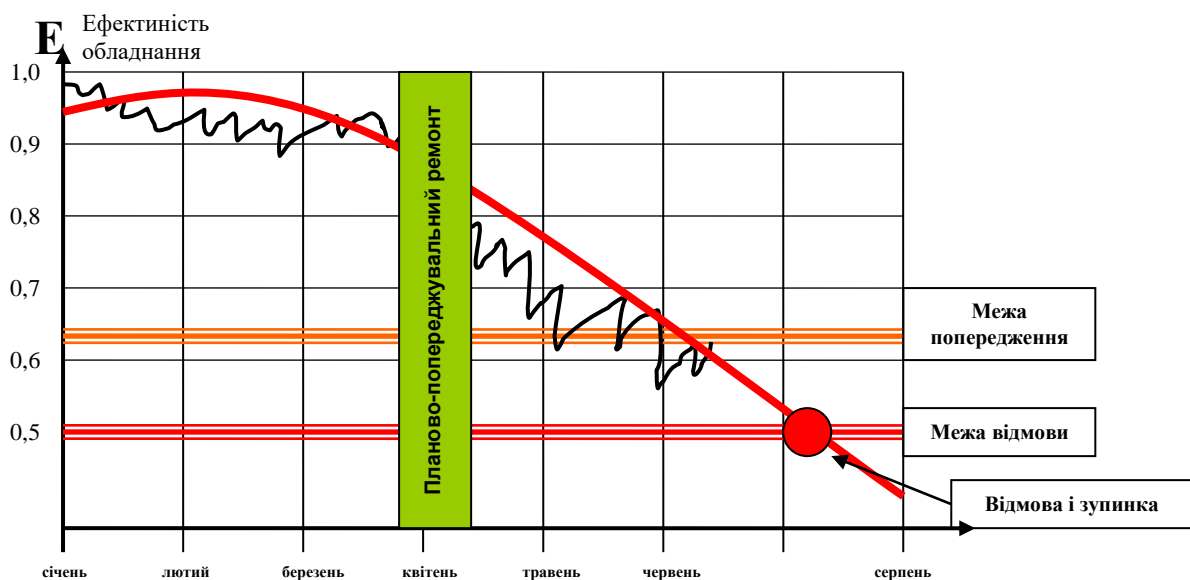


Рис.2. Приклад аналізу загальної ефективності технологічного обладнання

Висновки

1. Основою виконання узгодженої взаємодії функцій автоматичного керування робочим процесом обладнання, діагностування його стану і контролю запасів напівфабрикатів необхідно забезпечити моніторинг технологічних, експлуатаційних і виробничих параметрів, які можна використовувати для контролю запасу напівфабрикатів і виробів, складання графіків для операторів з технічного обслуговування та ремонту машин, коректування технологічних режимів, управління енергопостачанням і заміщення продукту тощо.

2. Отримані значення показників загальної ефективності технологічного обладнання можуть служити основою для прийняття рішення про подальшу його експлуатацію.

3. Показано на прикладі моніторингу і аналізу загальної ефективності технологічного обладнання як в реальному часі здійснюється порівняння поточних показників датчиків зі значеннями, отриманими в результаті розрахунку за підготовленою математичною моделлю і визначається аномалія в функціонуванні технологічного обладнання в вигляді різниці між реальними та передбаченими показаннями.

4. Для ефективного використання технологічного обладнання математична модель може надати інформацію про його працездатність не тільки в процесі експлуатації, а й у певний момент часу в майбутньому, що дозволяє вирішити проблему прогнозування працездатності.

Список використаних джерел

1. Алгоритми функціонування та програмне забезпечення багаторівневої системи моніторингу стану та технічного діагностування обладнання об'єктів електроенергетики / М. В. Мислович, Р. М. Сисак, Л. Б. Остапчук [та ін.] // Техн. електродинаміка. – 2016. – № 4. – С. 86–88.
2. ГОСТ Р 50779.42 – 99 (ИСО 8258 – 91). Статистические методы. Контрольные карты Шухарта. Введ. 1999-04-15. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1999. – 36 с.
3. Деревянченко А. Г. Интеллектуальная система диагностирования отказов и восстановления режущей части инструментов / А. Г. Деревянченко // Искусств. интеллект. 2013. – № 1. – С. 218–224.
4. Диагностирование машин-автоматов и промышленных роботов : сб. статей / АН СССР ; Ин-т машиноведения им. А. А. Благоднарова ; ред. кол. : Е. Г. Нахапетян, Е. А. Цуханова (отв. ред.) [и др.]. – М. : Наука, 1983. – 152 с.
5. Ломакина Л. С. Диагностирование сложных технических систем с использованием современных информационных технологий / Л. С. Ломакина, В. П. Губернаторов // Информатика та мат. методи в моделюванні. – 2013. – № 4. – С. 331–341.
6. Мислович М. В. Про деякі особливості побудови інтелектуальних багаторівневих систем технічної діагностики електроенергетичних об'єктів / М. В. Мислович, Р. К. Сисак // Техн. електродинаміка. – 2015. – № 1. – С. 78–85. - Бібліогр.: 9 назв.
7. Патент РФ № 2 735 171 С1 на изобретение СИСТЕМА БЕСПРОВОДНОГО МОНИТОРИНГА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ МАШИНЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ - МЕЙРАН, Йоахим (DE), ШЕДИНГ, Маркус (DE) МПК G05B 15/00,- Оpubл. 28.10.2020 Бюл. № 31
8. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение. – Москва «Машиностроение», 2007. – 256 с.
9. **Сулейменов Б.А., Мутанов Г.М., Сулейменов А.Б. Интеллектуальные системы управления: теория, методы, средства/ Алматы: 'asa' университети, 2012. – 224 с.**
10. Тимченко А. А. Основи системного проектування та системного аналізу складних об'єктів. – Київ: «Либідь», 2003. – 270 с.
11. Федин С. С. Прогнозирование и вероятностная оценка долговечности технических объектов / С. С. Федин // Систем. дослідж. та інформ. технології. – 2010. – № 2. – С. 55–63.
12. Gaines B.R., Norrie D.H. Knowledge Systematization in the International IMS Research Program // Proc. of IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics Intelligent Systems for 21st Century. -1995. - Vol.1. - P. 958 - 963.
13. Gola A., Świć. A. Design of FFMS Storage Subsystem Using Computer Simulation Method. Actual Problems of Economics/ Актуальні Проблеми Економіки 2013, 4(142), s. 312-318.
14. Groover M.P., Zimmers E.W., CAD/CAM: computer-aided design and manufacturing. New Jersey: Prentice-Hall, 1984. – 528 p.
15. Palchevsky B., Swic A., Krestianpol H., Computer integrated designing of flexible manufacturing systems, Lublin University of Technology, Lublin 2015.-376 p.
16. Patent USA № 4 670 834 SYSTEM AND METHOD FOR AUTOMATIC DIAGNOSTIC PROGRAM MODIFICATION BASED ON CONTROL PROGRAM MODIFICATION - Mark Byal; Francis G.Leo; Marvin J.Schwenke. МПК G06F 15/00, 02.06.1987.
17. Policymaker's A. Guide to Smart Manufacturing, Information Technology & Innovation Foundation (ITIF), 30 November 2016, <https://www.itif.org/publications/2016/11/30/policymakers-guide-smart-manufacturing>.
18. Prasanth, S. P.; Pramod, V.R.; Jagathy Raj, V. P. Barriers in TPM Implementation in Industries. // International Journal of Scientific & Technology Research. 2, 5(2013), pp. 28-33.
19. Schwaninger M., Intelligent Organizations. Powerful Models for Systemic Management, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

UDC 004[657+005]338.4

DOI 10.36910/775.24153966.2022.73.34

K. Zalialetdzinau*Software engineer Brimit LLC, ORCID ID: 0000-0003-1938-0122***ANALYSIS OF THE CURRENT STATE OF THE SUBJECT AREA OF DECISION SUPPORT:
AUTOMATED SUPPORT ALGORITHMS**

The decision support system is defined as the type of program that is computerized to support the judgments, determinations, and cause of actions that are in an organization or a company. This system is a huge one, oscillating through data analysis, compiling a large amount of comprehensive information, and analyzing this information to form a tool that is effective in the decision-making process. This system usually is backed up with the existing automation algorithm, a list of instructions that are used to supplement the information analysis of the decision support system to make organizational decisions. Just like the decision support system, the support algorithm is a computer program that follows the instructions that in this case are termed as algorithms to play a trade. However, having understood the meaning of these two systems, we develop an understanding they are one system, working together to help the organization make reasonable decisions to reach profits at a speed. In this paper, we are to explore the current state and trends that are surrounding the decision support; automated support algorithms area. Through the use of secondary research, we explored different government publications, business documents, technical trade journals, and other documents to formulate results that will make a solution to the research question of this paper. Through research, artificial intelligence informs machinery learning forms the most important trend in automated algorithms support.

Keywords: automated algorithms support, trends, artificial intelligence, decision making, decision support system.

К. Золялетдінов**АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ
РІШЕНЬ: АЛГОРИТМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПІДТРИМКИ**

Система підтримки прийняття рішень визначається як тип програми, яка комп'ютеризована для підтримки суджень, ухвал і причин дій, що знаходяться в організації або компанії. Ця система є величезною системою, що проходить через аналіз даних, збирання великої кількості вичерпної інформації та аналіз цієї інформації для формування інструменту, ефективного в процесі прийняття рішень. Ця система зазвичай підкріплюється існуючим алгоритмом автоматизації – списком інструкцій, які використовуються на додаток до аналізу інформації системи підтримки прийняття рішень для прийняття організаційних рішень. Як і система підтримки прийняття рішень, алгоритм підтримки є комп'ютерною програмою, яка слідує інструкціям, які в даному випадку визначаються алгоритми для торгівлі. Однак, зрозумівши значення цих двох систем, ми приходимо до розуміння того, що вони є однією системою, яка працює разом, щоб допомогти організації приймати розумні рішення для швидкого досягнення прибутку. У цій статті ми повинні вивчити поточний стан та тенденції, які оточують область підтримки прийняття рішень та автоматизованих алгоритмів підтримки. Використовуючи вторинні дослідження, ми вивчили різні урядові публікації, ділові документи, технічні журнали та інші документи, щоб сформулювати результати, які дозволяють вирішити дослідження цього питання. В результаті дослідження стає зрозумілим, що машинне навчання є найважливішою тенденцією у підтримці автоматизованих алгоритмів.

Ключові слова: автоматизована підтримка алгоритмів, тенденції, штучний інтелект, прийняття рішень, система підтримки прийняття рішень.

Introduction. Decision support; automated algorithms system is a computer-generated program that is mainly focused on generating important strategies that make up the decision-making process in organizations. These computer-generated programs usually originate from the collection and analysis of data figures that help, based on the current trends in the market today. As we are moving towards a technologically oriented regime, different changes have been created in organizations, and one of them is the changes in the decision support systems. An analysis of these changes in the decision support system makes up the research topic of this paper. Therefore, through a complete analysis of the trends in this decision support system, the research gives organizations tips and opportunities that they can implement to realize an effective and dependable decision-making process. For instance, Hellen Nisserbaum in her research about accountability in our computerized society suggested that four trends make up the current lines of accountability in decision support and automated algorithms (Nisserbaum, 1996). She suggests that the accountable nature of computers and technology nowadays is affected by the number of people that use them. Other factors and trends that she incorporates in her research include the inevitability of bugs in software, the human blame for computer failure instead of taking responsibility, and the software developer's nature of denying accountability as a result of their failed systems.

Even as Hellen diversifies through these trends, it is important to note that her research has been focused on the hardware part of this whole system, building a focus on the operators and manufacturers of this computer software. This creates a gap in the research literature, such that if we focus our attention on the trends surrounding the software part of this system, then we can build on this gap and find solutions to most problems affecting the decision support system that is as a result system failure. For instance, the growing importance of decision-making depends greatly on the factors of automated algorithms systems. Algorithms have therefore been part of the decision-making for long enough such that they need developments to increase the effectiveness of the decision-making process. Through research on the important trending issues that can better these algorithms, we can be able to diversify and make the decision support system useful and effective at the same it, helping organizations to avoid flaws that come as a result of it and ensuring that profit-making in organizations is becoming a priority, and attached advantage of decision making.

In an attempt of finding possible useful trends that can help in improving the decision support; automated support algorithms, my research paper explores the analysis of the current state of the subject area of decision support systems and the automated support algorithm. Through the use of secondary research, we explored different government publications, business documents, technical trade journals, and other documents to formulate results that will make the solution to the research question of this paper. Through research, artificial intelligence informs machinery learning forms the most important trend in automated algorithms support.

Literature review. Based on recent research and publication, major developments show that the decision support system (DSS) has different ways through which it works. These developments form the major trends in these sections, allowing us to effectively understand how this decision support system and automated support algorithms work. Previous research shows that the DSS system works based on the computer interactive features that serve as the decision-making instruments for different organizations [3]. The decision support system acts as a source of information that enables these organizations to draw effective strategies that make up unstructured decisions as well as the semi-structured decisions, and therefore, a major discussion of the development features that make up this decision support system will give us an understanding on the underlying analytical models that helps organizations to perform different levels data analysis and creation of important information that help organizations structure these various decisions.

Previous research confirms that organizations usually apply acquired knowledge through training and innovation to the system to develop an understanding of the underlying problem that is facing the organization. This ability to integrate the system and understand how it works is a major area of concern, especially when dealing with the developments that are surrounding this system. It is clear that when organizations use the decision support system and the automated support algorithms, the ability of organizations to make collect balanced decisions become easy and highly effective. For instance, research shows that the DSS system has something termed an interactive interface. An interactive interface is an effective tool in this system in that it makes it easy for users to develop real-time responses to major questions that arise when problems are experienced in organizations. The use of these different tools helps organizations to develop different tools that manage each stage of the decision-making process, including complex problems, model designing for problem analysis, alternatives development, and the available alternatives choosing complexity.

Research shows that different levels of management in organizations call for different use of the decision support system. Because of this, different types of decision support systems exist, and a thorough analysis, of the different types of these systems, will provide us with an overview of the major development of the DSS system that exists, what are the available gaps that exist and how will this research exercise help us build important approaches to mend these gaps. The first type of decision support system and automated support algorithm is the model-based decision support system [5]. The model-based decision-based system is a system that is termed a standalone system. The standalone system is a system that is not connected with any major corporate information system. And because of this, the model-based system's capacity for analysis is usually supported by some strong model through which organizations have a user interface that enables them to use this system. Different models underlying this system help organization perform many types of information analyses including the what-if analysis. Therefore, because of this, the model-based decision support system is used to create simulation models that have underlying tasks of performing production planning and scheduling and creating the financial reports and statistical reports as well.

Previous research also confirms that the data-based decision support system is also a current trend type of decision support system and automated support algorithm. This type of system is used to analyze huge amounts of different data in organizations such as data from enterprise systems and data from the web. This data-based decision support system collects data from different sources and stores it in data warehouses such that managers and organizations can use it here for problem analysis. A data warehouse in this case is a type of database that can store past and present extracted information that is extracted from various operational systems. This in turn provides different certain query tools and reporting tools.

The two types of decision support systems apply the use of different techniques that are of interest to this research paper. The techniques applied here are mainly used in data analysis are data mining techniques and the online analytical process (OLAP). The data mining technique for instance is used to help organizations extract useful information through a systematic finding of rules from extracting data, also termed data patterns [7](Sojan et al., 2014). This technique helps in the retrieval of information that is then used to predict behaviors and future trends that may occur. On the other hand, the online analytical processing technique (OLAP) is effective in that it uses queries and can provide fast answers to complex organizational requests. This technique helps managers and analysts to examine and manipulate available data in data warehouses from different viewpoints interactively.

In his article [2], gives meaning to the role of algorithms in decision-making. According to the article, decision-making is a huge part of our lives and the contribution of algorithms to this is a huge part of this accountability. Therefore, major developments have been made in this sector to better decision making, and [2], suggests the increasing development of machine learning from big data as part of these trends. Research shows that there have been objections to the full transparency and accountability of the systems as part of the major trends that are surrounding the decision support system. According to this article, there has been a loss of privacy when datasets become public, and because of this, the disclosure effects of algorithms in this decision support system as well as the decision-making system become limited. This has effects on the existing firms and companies that depend on it, leading to losses, loss of information, and other related effects that are a result of loss of transparency. Fully transparency for oversight bodies remains the only option that extends to the public at large as the only solution that can bring accountability to the existing problems surrounding the decision support system and algorithms. The contribution of algorithm decisions should also become more understandable, and the only way to make it possible is to introduce the models of machine learning as an effective way of helping the employees to interpret most of the ex-post or design ex-ante that comes as a result of the unaccountability and lack of transparency in the decision support system. Therefore generally, an introduction of artificial intelligence in this system not only forms a trend but is also an important factor to consider, even as we build an understanding of these ideas, something that makes this article relevant to this case analysis.

Research methods and design. Research methods and design form the most important part of any research paper [4]. This is a secondary research paper, and because of this, I dueled greatly on the use of internet sources and school library sources to find data and information for my research. The research design that seemed effective in this case study was the secondary quantitative research, a type of research that uses already existing data also termed secondary data. A close analysis of this existing data, summarizing, and picking up important points to supplement my research made the overall efficacy of this research.

The available information online gave me an overview of the current trends that are underlying the DSS. Data here was obtained from journals and magazines that capture important information on the latest business news and technology. The school library sources included books and school magazines. Through a multivariate data analysis tool, the applied use of cluster analysis helped me to comprehend comprehensive DSS literature that was available in different sources over the years 1991 to 2022. Only but few authors were involved in the raw cocitation matrix, with the help of the statistical analysis systems.

Selecting authors to duel within the research was also an important part of this research. The technique of best fit, authors with the most relevant information supplementing my research was the most effective. No official citations or criteria were used to sample the authors.

Ethical issues and limitations of the study. This is secondary research, and because of this, its limitations were many [1]. One of the limitations that I faced as I researched was the lack of relevancy throughout the study. I could not easily find the data that I needed to supplement my research and because of this, most data and information that I applied here may lack relevancy and accuracy. Another form of

irrelevancy may be subjected to the inaccuracy use of the objectives and methodology that I used to collect my data, such that they may not be effective and appropriate for the problem at hand.

Another limitation of study for my research was the lack of accuracy. Relevant and accurate secondary research must pay attribute to important factors such as research design, sampling design, sources, rate of change of studied topics, and analysis of points of view. Because of these many qualifications, a slight deviation of any may result in inaccuracy, rendering the whole research exercise to be ineffective. For instance, I extensively applied the use of self-explanatory techniques in research design and because of this, I may have interpreted my information and data wrongly, making my research not accurate enough.

Secondary data usage in research requires high ethical practice. This is effective in maximizing the value of data collection investment, ensuring replicability and disclosure of sensitive information. Because of this, my data analysis and research had to meet major secondary research ethical conditions that have been proposed. Some of these ethical conditions include the following;

- Data usage in research must not lead to any type of distress or damage.
- The study subjects must reach presumed reasonable consent.
- The re-identifying of participants must not be allowed by the outcomes of the analysis.
- Before releasing to the researcher, data must be de-identified.

Therefore, my research was limited to these ethical issues and limitations of the study.

Statistical processing and discussion of scientific results. Based on the analysis of existing literature and available information, it is clear that the decision support system and the automated algorithm support require improvement and an underlying effort to ensure better decision-making in organizations. Through the existing literature, it is evident that the incorporation of full transparency in the whole algorithmic cycle all through the organization is an important trend that can help zip up the available gaps in this system. However, it is hard this integrates this element into the system unless major software development of the algorithms and the DSS is made. This can only be possible if the information software is supplemented with the modern form of artificial intelligence. Research shows that the important development of the artificial intelligence system is the backbone of an effective decision support system as well as the automated support algorithm. Through artificial intelligence, the capacity of many machines to mimic human intelligence and draw conclusions from incomplete information is possible [6]. This is important especially when there is a need to create transparency in the systems using machine-generated information without depending on human intelligence, a major development in the DSS.

Another helpful tip of artificial intelligence that seems relevant to this research is that of machine learning. Machine learning is a subfield of artificial intelligence, defined as the ability of a machine to imitate human behavior. At the start of this research paper, we found out that humans have failed the decision-making process through attached human incompetence that includes information loss and lack of transparency. If machine learning takes over the decision support system, such mistakes can be avoided drastically. For instance, a huge part of the interpretability of algorithms depends on data and information analysis, and because of this, the dominant trajectory of developing algorithms becomes less accurate if artificial intelligence is not used. It's good to understand that human intelligence does not have to be underestimated, but for transparency and accountability, artificial intelligence always outshines this human intelligence.

Conclusion and recommendation. The decision support system and automated support algorithm form an important part of decision-making in organizations. Through research, most problems that are facing organizations are those of accountability and transparency, most of which are attributed to human mistakes and errors that are directly linked to human intelligence. Through a close analysis of the techniques used in the decision support system, most of the techniques only duel on the ability of managers and organization management systems to form complex business queries from available data in the data warehouses. The managers and managing bodies that exist and are responsible for this data analysis are the ones that form available gaps that the existing trends, and because of this, my research shows that the incorporation of machine learning and other forms of artificial intelligence in these systems can help reduce such risks attributed to transparency and accountability.

Therefore, I recommend that this research be supplemented by the ability of the machine and technological improvements to offer this choice of machine learning in the decision support system.

REFERENCES:

1. Cole, A. P., & Trinh, Q. D. (2017). Secondary data analysis: techniques for comparing interventions and their limitations. *Current opinion in urology*, 27(4), 354–359. <https://doi.org/10.1097/MOU.0000000000000407>
2. de Laat, P. B. (2018). Algorithmic decision-making based on machine learning from big data: Can transparency restore accountability? *Philosophy & Technology*, 31(4), 525–541. <https://doi.org/10.1007/s13347-017-0293-z>
3. Eom, S., & Kim, E. (2006). A survey of decision support system applications (1995–2001). *The Journal of the Operational Research Society*, 57(11), 1264–1278. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602140>
4. Marshall, G., Cox, M.J. (2008). Research Methods: Their Design, Applicability and Reliability. In: Voogt, J., Knezek, G. (eds) *International Handbook of Information Technology in Primary and Secondary Education*. Springer International Handbook of Information Technology in Primary and Secondary Education, vol 20. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-0-387-73315-9_62
5. Nissenbaum, H. (1996). Accountability in a computerized society. *Science and Engineering Ethics*, 2(1), 25–42. <https://doi.org/10.1007/bf02639315>
6. Singh, A., Thakur, N., & Sharma, A. (2016). A review of supervised machine learning algorithms. *2016 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*, 1310–1315.
7. Sojan, S., Raphy, S. K., & Thomas, P. (2014). Techniques used in decision support system for CRM-a review. *International Journal of Information Technology Infrastructure*, 3(1). <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.453.9765&rep=rep1&type=pdf>

С.М. Юхимчук, М.М. Толстушко, С.Ф. Юхимчук, Л.М. Дацюк

Луцький національний технічний університет

РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ДИСКОВО-ПАСОВОГО ЛЬОНОБРАЛЬНОГО АПАРАТА

У статті дано опис нової конструкції дисково-пасового льонобрального апарата, яка дозволить підвищити довговічності бральних пасів та зменшення матеріаломісткості льонозбиральної машини. Пропонується використати паралелограмний привод бральних дисків із гнучкими тяговими ланками.

Ключові слова: браання, стебла льону, дисково-пасовий бральний апарат, паралелограмний механізм приводу.

С.Н. Юхимчук, С.Ф. Юхимчук, Н.Н. Толстушко, Л.Н. Дацюк

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ДИСКОВО-РЕМЕННОГО ЛЬНОТЕРЕБИЛЬНОГО АППАРАТА

В статье дано описание новой конструкции дисково-ременного льнотеребильного аппарата, которая позволит повысить долговечность теребильных ремней и уменьшение материалоемкости льноуборочной машины. Предлагается использовать параллелограммный привод теребильных дисков с гибкими тяговыми звеньями.

Дисково-ременной льнотеребильный аппарат содержит сборную раму и расположенные на ней делители, теребильный узел и поперечный транспортер. Причем теребильный узел выполнен в виде активных теребильных дисков, контактирующих с теребильными ремнями, каждый из которых установлен на двух роликах, один из которых подпружинен.

Ключевые слова: теребление, стебли льна, дисково-ременной теребильный аппарат, параллелограммный механизм привода.

S.M. Yukhymchuk, S.F. Yukhymchuk, M.M. Tolstushko, L.M. Datsyuk

DEVELOPMENT OF THE DESIGN OF A DISC-BELT FLAX-PULLING DEVICE

The article describes a new design of a disk-belt flax puller, which will increase the durability of the tack belts and reduce the material consumption of the flax harvester. It is proposed to use a parallelogram drive of pulling disks with flexible traction links.

Disk-belt lenobral device contains a prefabricated frame and dividers located on it, a pulling unit and a transverse conveyor. Moreover, the pulling unit is made in the form of active pulling disks in contact with the twin pulling belts, each of which is mounted on two rollers, one of which is spring-loaded.

Key words: pulling, flax stalks, disk-belt flax-pulling device, parallelogram drive mechanism.

Постановка проблеми. Для витягування стебел льону з ґрунту під час механізованого збирання льону-довгунця, використовуються бральні апарати. Найчастіше це пасові та пасово-дискові бральні апарати [1-4].

У пасових бральних апаратах стебла затискаються між двома бральними пасами, що працюють як пасові передачі, в яких робоча вітка є натяжною (набігаючою). Пас охоплює ведучий і ведений шків, або ведучий шків і натяжні ролики [5].

У пасово-дискових бральних апаратах стебла льону затискаються між бральним пасом і бральним диском. При цьому бральний диск обертається від контакту з бральним пасом. Тобто бральний пас ще більше навантажений ніж у пасовому бральному апараті.

Бральні паси виготовлені з гуми армованої капроновими нитками і в процесі роботи розтягуються і потребують періодичного підтягування, а при зношенні – заміни.

Крім того ці конструкції бральних апаратів є доволі матеріаломісткими. Це пов'язано з використанням шківів, натяжних та підтримуючих роликів, складного приводу.

Тому актуальним є розробка такої конструкції брального апарата, яка усувала б зазначені недоліки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні відомо багато досліджень в напрямку створення нових та удосконалення наявних конструкцій льонозбиральних машин, але поряд з цим недостатню увагу приділено підвищенню довговічності елементів льонобральних апаратів цих машин [1-4].

Постановка завдань. Підвищення довговічності бральних пасів та зменшення матеріаломісткості льонозбиральної машини шляхом розробки нової конструкції дисково-пасового льонобрального апарата.

Викладення основного матеріалу. Пропонуємо нову конструкцію (подана заявка на корисну модель) дисково-пасового брального апарата. У ньому привод здійснюється

безпосередньо на бральні диски, а паси притискають стебла льону до поверхні бральних дисків. Тобто пас не передає крутного моменту від ведучого до веденого шківів, а значить менше розтягується при роботі.

Бральний апарат нахилений під кутом до горизонту.

На рис. 1 схематично показаний запропонований дисково-пасовий льонобральний апарат.

Дисково-пасовий льонобральний апарат містить: збірну раму (на рисунку не показана); подільники 1, бральний вузол, який включає бральні диски 2, бральні паси 3, ролики 4, підпружинені кріплення 5, напрямні прутки 6, поперечний транспортер 7.

Дисково-пасовий льонобральний апарат працює наступним чином.

Привод бральних дисків, які обертаються в однаковому напрямку, здійснюється з картера рами. З одного боку кожен бральний диск 2, охоплюється бральним пасом 3, який надітий на ролики 4. За рахунок підпружиненого кріплення 5 верхнього ролика 4 забезпечується постійний натяг брального паса 3, а значить і тиск в бральному рівчаку.

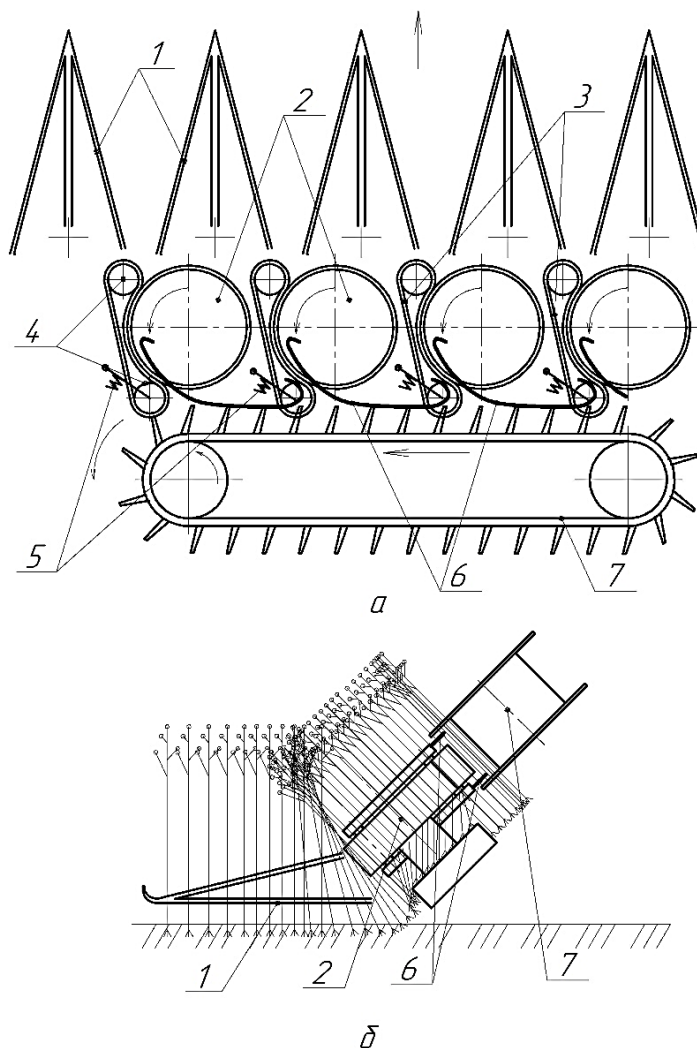


Рис. 1. Дисково-пасовий льонобральний апарат (а – вид зверху, б – вид збоку): 1 – подільники; 2 - бральні диски; 3 - бральні паси; 4 – ролики; 5 - підпружинені кріплення; 6 - напрямні прутки; 7 - поперечний транспортер

При русі машини по поверхні поля подільники 1 розділяють стебла льону на окремі смужки і направляють їх в гирла бральних рівчаків. Далі стебла льону затискаються між контактуючими поверхнями бральних дисків 2 і бральних пасів 3, витягуються з ґрунту і переміщуються до виходу з бральних рівчаків, де захоплюються пальцями поперечного транспортера 7 і ковзаючи по поверхні напрямних прутків 6 переміщуються до виходу з дисково-пасового льонобрального апарата. В подальшому в залежності від типу льонозбиральної машини стеблова стрічка або

розстеляється на льонище, або подається на наступні робочі органи льонозбиральної машини для обчісування насінневих коробочок.

Найбільш складним у даній конструкції є привод бральних дисків. Диски повинні обертатись в одну сторону. Для цього можна використати зубчасті передачі по аналогії до приводу ведучих шківів пасових передач льонокомбайна ЛК-4А. Розмістимо бральний диск першого брального рівчака на ведучому валу, а три інших на вихідних валах циліндрично-зубчастого редуктора з передатнім числом рівним одиниці. Для того, що усі вали обертались в одну сторону необхідно використати проміжні шестірні.

Але це все обтяжує конструкцію брального апарата: зубчасті колеса, шестірні, масивний корпус редуктора, наявність мастила в редукторі.

Тому ми пропонуємо в запропонованому дисково-пасовому бральному апараті використати паралелограмний привод бральних дисків. Даний привод працює по принципу синхронного обертання ведучого і ведених валів, шківів яких з'єднані між собою декількома тяговими планками, які шарнірно закріплені на шківках з певним ексцентриситетом відносно центра обертання вала – принцип приводу коліс паровоза.

Щоб ще спростити конструкцію приводу бральних дисків пропонуємо замінити тяги і шарнірні з'єднання на гнучкі зв'язки (рис. 2). А саме на ведучому 2 та трьох ведених валах 3 за допомогою шліцевого з'єднання під кутом 120° один до одного посаджені три шківки-ексцентрики 4 з напесованими підшипниками кочення 5. На зовнішніх кільцях підшипників 5 встановлені обойми 6. Обойми 6 ведучого вала 2 мають два симетричні вуха, в які встановлюються натяжні гвинти 8, для натягу троса 7. Обойми ведених валів 3 охоплюються трьома тросами 7. Щоб при роботі трос 7 не сповзав з обойми 6 вона має реборди.

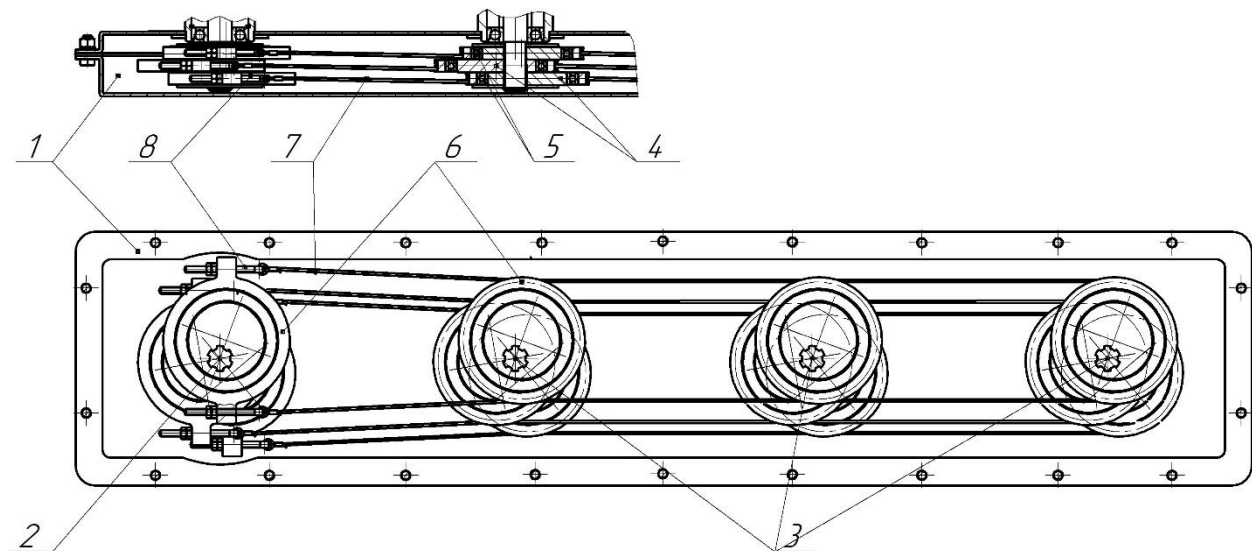


Рис. 2. Паралелограмний механізм приводу бральних дисків: 1 – картер; 2 - ведучий вал; 3 – ведені вали; 4 – шківки-ексцентрики; 5 - підшипники; 6 - обойми; 7 – троси; 8 – натяжники

Ця конструкція паралелограмного приводу забезпечує плавність передачі крутного моменту від ведучого до ведених валів. Підшипники, які використовуються в приводі закритого типу, тобто мають заводське змащення і не потребують додаткового мащення. Тому не потрібно заливати мастило в картер і його роль зводиться тільки для закриття приводу від механічних пошкоджень. Тому картер можна виготовляти з тонкого листа металу методом штамповки.

За існуючими методами [1-5] був проведений попередній інженерний розрахунок даного приводу. Підібрані діаметри валів, підшипники, сталевий трос.

Варто зазначити, що ведучий вал 2 на який посаджений бральний диск, через запобіжну муфту з'єднується з валом кінцевого редуктора. Або можна використати гідромотор.

Загалом дана конструкція дисково-пасового брального апарата знаходиться на стадії проектування – розробляються креслення складальних одиниць і деталей.

Висновки. Бральний вузол містить менше деталей, тому запропонований дисково-пасовий льонобральний апарат менш матеріаломісткий в порівнянні з аналогами. За рахунок того, що бральні паси не передають тягових зусиль, а виконують тільки затискання і утримування стебел

льону, а також підпружинення верхніх роликів 4, забезпечується підвищення довговічності бральних пасів.

Ця конструкція є новою, тому автори будуть дуже вдячні за зауваження і пропозиції по її вдосконаленню.

Список використаних джерел

1. Дударев І.М. Теоретичні основи модернізації машин для виробництва льону: монографія / І.М. Дударев. – Луцьк: Ред.-вид. відділ Луцького НТУ, 2015. – 268 с.
2. Дідух В. Ф., Ковалишин С. Й., Дударев І. М., Тараймович І. В. Технології вирощування, збирання та переробки льону-довгунця : навч. посіб. Львів : Львівський НАУ, 2013. 324 с.
3. Depoortere. Machines de récolte. URL: <https://www.depoortere.be/Machines-de-recolte>.
4. Union. Machines. URL: <https://www.unionmachines.com/nl/machines>.
5. Деталі машин: підручник / [Міняйло А.В., Тіщенко Л.М., Мазоренко Д.І. та ін.]. – К.: Агроосвіта, 2013. – 448 с.

Рецензент Ягелюк Світлана Володимирівна, професор кафедри товарознавства та експертизи в митній справі Луцького національного технічного університету, доктор технічних наук, професор.

УДК 621.793.002.3-419

DOI 10.36910/775.24153966.2022.73.36

О.У. Стельмах¹, Р.Є. Костюнік¹, В.А. Радзієвський¹, В.С. Бондар¹, А.Л. Майстренко²
О.Д. Клименко³

Національний авіаційний університет¹
ІНМ НАН України ім. В.Н. Бакуля НАН України²
Луцький національний технічний університет³

МЕТОДОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТРИБОЛОГІЧНО ЕФЕКТИВНИХ ГІБРИДНИХ ПАР ТЕРТЯ КОЧЕННЯ «КЕРАМІКА-СТАЛЬ» В РІЗНИХ УМОВАХ ЗМАЩУВАННЯ

Наведено результати дослідження та зроблено порівняльну оцінку інтенсивності зношування гібридних модельних трибосистем кочення «сталь-кераміка-сталь», з кулями з різних керамічних матеріалів, що дозволило виконати їх ранжування за ефективністю та вдосконалити технологію виготовлення тіл кочення для гібридних шарикопідшипників.

Ключові слова: кераміка, шарикопідшипник, тертя кочення, технології спікання, зношування

А.У. Стельмах, Р.Е. Костюник, В.А. Радзиевский, В.С. Бондарь, А.Л. Майстренко,
А.Д. Клименко

МЕТОДОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРИБОЛОГИЧЕСКО-ЭФФЕКТИВНЫХ ГИБРИДНЫХ ПАР ТЕРТЯ КАЧЕНИЯ «КЕРАМИКА-СТАЛЬ» В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ СМАЗКИ

Приведены результаты исследования и сделана сравнительная оценка интенсивности изнашивания гибридных модельных трибосистем качения «сталь-керамика-сталь», с шарами из разных керамических материалов, что позволило выполнить их ранжирование по эффективности и усовершенствовать технологию изготовления тел качения для гибридных шарикоподшипников.

Ключевые слова: керамика, шарикоподшипник, трение качения, технологии спекания, изнашивание

A.U. Stelmakh, R.E. Kostyunik, V.A. Radzievsky, V.S. Bondar, A.L. Maistrenko,
A. Klymenko

METHODOLOGY of DETERMINATION of TRIBOLOGICALLY EFFICIENT HYBRID RODS Of ROLLING FRICTION «CERAMIC – STEEL» At DIFFERENT GREASING CONDITION

The results of the study are presented and a comparative assessment of the wear intensity of hybrid model rolling tribosystems "steel-ceramics-steel" with balls made of different ceramic materials is made, which made it possible to rank them in terms of efficiency and improve the technology for manufacturing rolling elements for hybrid ball bearings.

Key words: ceramics, ball bearing, rolling friction, sintering technology, wear

Постановка проблеми.

Особливе місце серед областей застосування технічної кераміки займають високонавантажені вузли тертя, насамперед це підшипники ковзання і кочення які можуть бути виготовлені повністю з кераміки чи комбінованого (гібридного) типу, тобто з металу та кераміки. Вони мають дуже унікальні властивості, такі як висока міцність і твердість, хімічна і термічна стійкість, низька адгезійна здатність. Висока коштовність таких підшипників компенсується більш високими довговічністю (у 3...10 разів) та зносостійкістю (у 10 разів) в порівнянні з металевими, котрі втрачають свою працездатність при температурах експлуатації 600...800°C. В даний час для їх виробництва широко використовуються керамічні матеріали на основі V_4C , Si_3N_4 та Al_2O_3 . Так нітрид кремнію (Si_3N_4) є одним з основних матеріалів при створенні керамічних підшипників кочення, хоча зберігається інтерес і до таких керамічних матеріалів як оксид алюмінію (Al_2O_3), карбід кремнію (SiC) та діоксид цирконію (ZrO_2). Особливо привабливим в керамічних парах тертя є той факт, що вже на стадії отримання матеріалу існує можливість введення в нього твердих мастил, так зокрема, в парах тертя на основі Si_3N_4 в якості твердого мастила використовують графіт та нітрид бору. Виробництво гібридних шарикопідшипників дозволяє використовувати переваги керамічних тіл з високою якістю обробки поверхонь сталевих кілець. Така «гібридна» конструкція дозволяє високонавантаженим керамічним підшипникам забезпечувати більш тривалий термін роботи та кращі робочі характеристики при високих швидкостях обертання. Низький коефіцієнт тертя покращує експлуатацію при мінімальному змащуванні та підвищує як термін працездатності, так і швидкісні характеристики пар тертя. На практиці використовуються

© О.У. Стельмах, Р.Є. Костюнік, В.А. Радзієвський, В.С. Бондар, А.Л. Майстренко
О.Д. Клименко

керамічні матеріали, що виготовляють за по різними технологіями і відрізняються з одного боку щільністю, розміром зерна, складом та твердістю, а з іншого боку – вартістю та можливістю масового використання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Авторами даної роботи попередньо отримані численні експериментальні дослідження процесу зношування керамічних матеріалів на лабораторній інформаційно-випробувальній системі АСК-01 [1,2], котра реалізує одностороннє тертя кочення твірною поверхнею циліндричного контрзразка по площині нерухомого сталевого зразка, що відповідає моделі трибологічної випробувальної систем "колодка-кільце" за німецьким промисловим стандартом G176-03 ASTM чи ISO 7148-2 (фізична модель лінійного контакту). За розробленою методикою випробувань п'яти типів керамічних матеріалів при терті ковзання в умовах змащування (масло Turbo Oil 2380) та при сухому терті проведена порівняльна оцінка інтенсивності зношування модельної гібридної пари тертя. Для трибологічних випробувань зразки керамічних контртіл виготовлялись у вигляді кілець розміром $\varnothing 35 \times \varnothing 21 \times 5$ мм з використанням способу електроспінання під тиском (ЕСД), розробленого в ІНМ ім. В.Н. Бакуля НАН України [3], та відомих технологічних способів (гаряче пресування, реакційне спікання та вільне спікання [4-9]).

Матеріал штатних плоских (нерухомих) зразків - сталь ШХ15, шорсткість поверхонь попередньо доводилась на притирах з залученням алмазних паст і не перевищує за R_a 0,02 мкм.

На підставі отриманих результатів випробувань можливо зробити висновок про працездатність гібридних підшипників ковзання в парах тертя з керамічними матеріалами основі карбідів бору чи кремнію для використання не тільки в мастильному середовищі, а й у екстремальних умовах тертя.

Так застосування в гібридних парах тертя керамічних матеріалів на основі ZrO_2 і Al_2O_3 , в порівнянні з контртілами на основі B_4C , SiC та Si_3N_4 , де спостерігається збільшення інтенсивності зношування сталі до 140 разів. При цьому, відсутність змащування гібридної пари тертя « B_4C – сталь ШХ15» призводить до зростання інтенсивності зношування кераміки тільки в 1,5 рази, в той же час, інтенсивність зношування сталі зростає до 40 разів. Більш інтенсивне зношування сталі в парах тертя з матеріалами на основі ZrO_2 і Al_2O_3 ймовірно можуть бути пояснені розвиненістю поверхні робочої частини контрзразків у порівнянні з контр зразками з B_4C , SiC та Si_3N_4 , що обумовлено великою величиною зерен в спечених матеріалах, а отже і їх більш високою абразивною здатністю.

Об'єкти і методи дослідження. В якості змащувального середовища використовувався авіаційний гас ТС-1, як малов'язке середовище та моторне синтетичне масло ИПМ-10.

Доведення робочих поверхонь штатних плоских зразків (вільне кільце серійного упорного шарикопідшипника 8211, сталь ШХ15) проводились на плоскошліфувальному верстаті після чого за допомогою чавунних притирів з використанням алмазних паст проводилось чистове полірування до шорсткості R_a 0,02. Така висока ступінь доведення робочих поверхонь дозволяє мінімізувати можливість мікрорізання та підвищує ймовірність адгезійного зношування шляхом мікросхоплення вторинних структур у граничних шарах змащування.

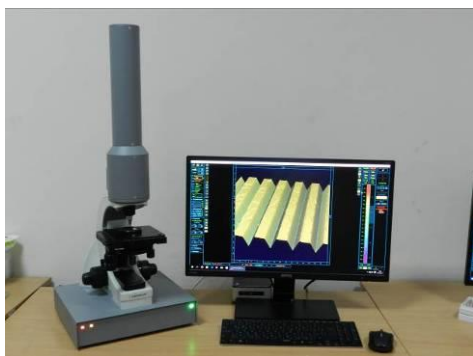
Результати вимірювань поліровки робочих поверхонь штатних плоских зразків їх контролю якості, лінійне зношування досліджувались на лазерному скануючому диференційно-фазовому мікроскопі-профілометрі ЛСДФМП (рис. 1а)), растровому електронному мікроскопі РЕМ-10БИ (рис. 1б)) та профілографі «Калібр - М201» у вигляді профілограм, 3D графічних зображень та параметрів шорсткості заносились в базу.

До та після проведення лабораторних триботехнічних випробувань проведено металографічні дослідження, а саме фізико-хімічний експрес-аналіз робочих поверхонь двох типів дослідних керамічних куль на растровому електронному мікроскопі РЕМ-10БИ, результати заносились в базу даних, для подальшого порівняння та аналізу.

Постановка завдання.

Мета роботи полягає в проведенні порівняльної оцінки зносостійкості двох типів керамічних матеріалів при терті коченні модельного упорного шарикопідшипника, де точковий контакт реалізували дослідні кулі, виготовлені з карбиду бора та карбиду кремнію [10,11], із плоским рухомим сталевим кільцем, при сухому терті та в умовах змащування, шляхом проведення лабораторних триботехнічних випробувань.

За результатами досліджень виконати ранжування за трибологічною ефективністю керамічних матеріалів для подальшого вдосконалення технології виготовлення тіл кочення дослідних гібридних шарикопідшипників.



а)



б)

Рис. 1. Зовнішній вигляд приладів для проведення досліджень робочих поверхонь тертя: а) лазерний скануючий диференційно-фазовий мікроскоп-профілометр ЛСДФМП; б) растровий електронний мікроскоп РЕМ-106И

Для досягнення даної мети вирішувались такі завдання:

- модернізувати прилад однонаправленого тертя кочення КИИГА-1М;
- розробити і створити методики досліджень впливу змащувальних та конструкційних матеріалів у трибосистемах кочення, у тому числі при виборі кераміки для гібридних підшипників;
- провести апробацію модернізованого приладу однонаправленого тертя кочення КИИГА-1М та розробленої методики випробувань конструкційних матеріалів куль модельного шарикопідшипника за їх протизносними властивостями;
- виконати за результатами лабораторних випробувань порівняльну оцінку зносостійкості двох типів керамічних матеріалів при терті коченні модельного упорного шарикопідшипника;
- надати рекомендації щодо подальшого вдосконалення технології виготовлення досліджуваних тіл кочення для гібридних шарикопідшипників.

Викладення основного завдання.

Для досягнення поставленої мети на першому етапі роботи було створено алгоритм (рис. 2), та розроблено методику проведення порівняльних лабораторних триботехнічних випробувань дослідних зразків куль, виготовлених з двох типів керамічних матеріалів (карбіду бора і карбіду кремнію), при терті кочення по рухомому кільцю (сталь ШХ15) в умовах сухого тертя та при змащуванні. Проведена апробація розробленого та створеного триконтактного випробувального вузла тертя кочення на базі модернізованого лабораторного приладу тертя КИИГА-1М, де в якості випробувальних зразків використовувались штатні кільця упорних шарикопідшипників 8211, що серійно випускаються.

Лабораторні триботехнічні випробування модельної пари тертя з керамічними тілами кочення

Для експериментального визначення зносостійкості двох типів керамічних матеріалів виготовлених зразків куль, щодо подальшого застосування в якості дослідних гібридних шарикопідшипників, що працюють в реальних умовах змащування удосконалена схема випробувального вузла лабораторного приладу тертя кочення (рис. 3,а)). Конструкція механізму модельного вузла тертя та кожної позиції деталей камери попередньо продумана та розроблена з урахуванням: швидкості кочення, навантаження, температуру середовища, режим роботи та виконана на основі відомого лабораторного приладу КИИГА-1 [12-14], що моделює точкову геометрію контакту «куля – плоска поверхня». Лабораторний прилад однонаправленого тертя кочення, принципова схема котрого представлена на рисунку 1, складається з модельного випробувального вузла тертя, головного приводу та вузла осьового навантаження важільного типу. Головний привід виконано у вигляді системи шківів 1 та електродвигуна 2. Для забезпечення плавності пускових режимів роботи і автоматичного відключення головного приводу за таймером модернізований прилад тертя був оснащений модулем управління 3. Вузол осьового навантаження важільного типу 5 дозволяє здійснювати високі початкові контактні напруження - до 2500МПа.

Головною частиною лабораторного приладу являється випробувальний вузол тертя кочення. Модельна пара тертя складається з нижнього плоского зразка 6 (зішліфована та полірована поверхня кільця упорного шарикопідшипника 8211), що обертається в процесі випробувань, сепаратора 8, дослідних куль 7 та нерухомого кільця 4 того ж підшипника 8211, котрий своєю штатною доріжкою кочення забезпечував центрування всіх трьох дослідних куль по одній траєкторії бігової доріжки плоского рухомого зразка 6.

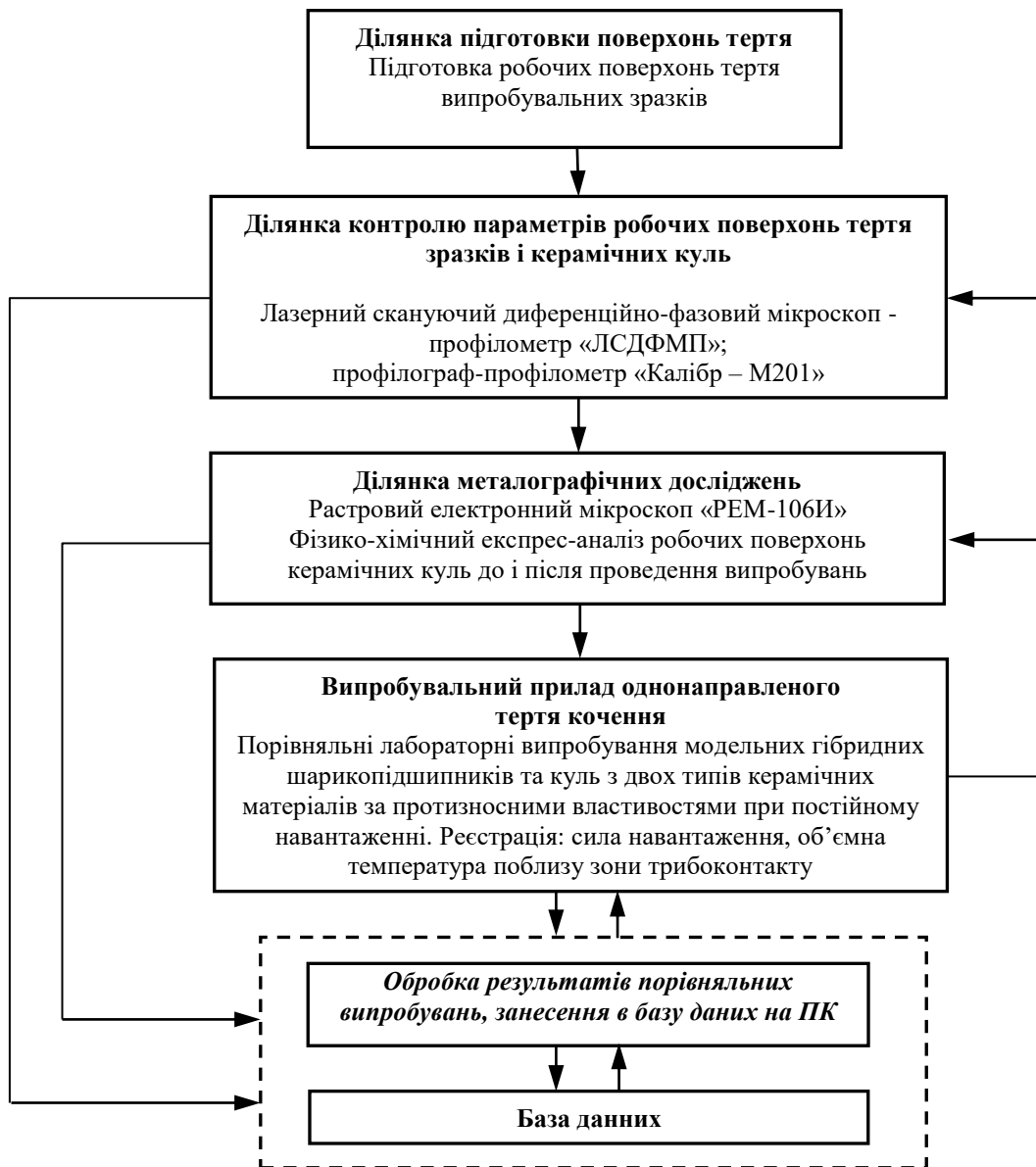


Рис. 2. Алгоритм проведення порівняльних випробувань гібридних шарикопідшипників

Сепаратор 8 модельного шарикопідшипника виготовлявся спеціально із трьома вікнами еквідистантного позиціонування трьох куль. Така конструкція сепаратора забезпечує рівномірне розподілення навантаження та роботи швидку та зручну заміну модельних куль практично без їх зміщення після кожного випробування.

На передній панелі бортового модуля управління розташовано індикацію контролю значень текучої об'ємної температури випробувального мастильного матеріалу, частоти обертання головного валу приводу дослідного зразка та таймеру зворотного рахунку часу щодо автоматичної зупинки випробувань (рис. 3, б).

Технічні характеристики приладу тертя та умови випробувань:

Камера	герметична;
Обертання	однонаправлене;
Швидкість обертання, об/хв.....	1500;
Об'єм середовища в камері, мл.....	150 – 200;
Максимальне осьове навантаження, Н.....	2000;
Матеріал плоских зразків.....	сталь ШХ15;
Шорсткість плоских зразків за Ra, мкм.....	≤ 0,02;
Критерій зношування.....	глибина доріжки тертя кочення, об'єм та маса зношеного матеріалу куль;
Відносна похибка випробувань, %.....	6 – 13.

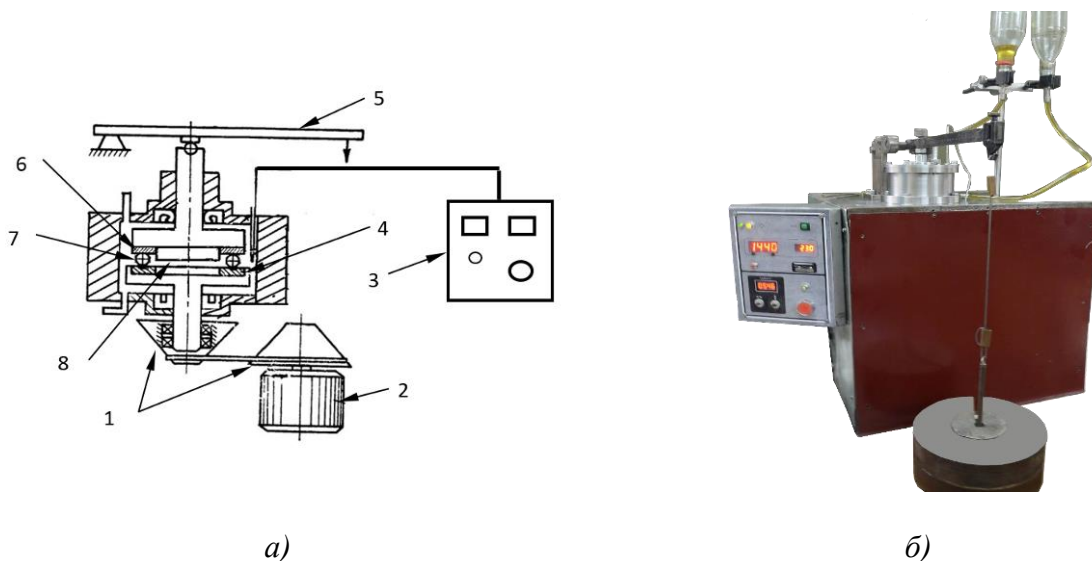


Рис. 3. Модернізований прилад однонаправленого тертя кочення КИИГА-1 [4]:
а) принципова схема; б) зовнішній вигляд

Методика проведення випробувань

Камера, деталі кріплення зразків та самі зразки ретельно промивались в бензині Б-70 та протиралися чистим ганчір'ям насухо. На посадковому місці утримувача дослідного зразка проміжного валу 1 (рис. 4, а)) встановлювався нерухомий зразок 2 - кільце упорного шарикопідшипника 8211 вгору поверхнею з centruючою штатною доріжкою кочення. На проміжному валу, на його верхній поверхні фіксувався рухомий зразок 3 – з плоскою поверхнею вгору, з раніше підготовленою шліфованою та полірованою робочою поверхнею (рис. 4, б)). На доріжку кочення рухомого плоского зразку позиціювався сепаратор із дослідними зразками куль (рис. 4, в)).

Сепаратор з кулями (рис. 4, в)) встановлювався на робочу поліровану поверхню плоского зразка (рис. 4, б)), на котрий встановлювався утримувач із зразком направляючою доріжкою на дослідні кулі (рис. 4, а)), після чого камера герметично закривалась та заповнювалась мастильним матеріалом. Осьове навантаження випробувального вузла тертя здійснювалося за допомогою гирок та штатної системи важільної типу.

На передній панелі модулю управління за допомогою відповідних кнопок встановлювався час тривалості проведення випробувань, що забезпечував таймер пуску та зупинки електродвигуна головного приводу валу лабораторного приладу тертя. Оптимальна тривалість випробувань визначалася експериментальним шляхом в залежності від мастильного середовища і рівня навантаження та не перевищувала 6 годин. Після закінчення часу випробувань головний привід автоматично вимикався та охолоджувався до кімнатної температури для безпечного вилучення з камери приладу дослідних зразків.

Апробація методики випробувань проводилась з використанням еталонних сталених куль діаметром $12,700 \pm 0,0005$ мм серійного шарикопідшипника 8211 (не нижче четвертого класу точності) в середовищі авіагасу ТС-1 (рис. 5). Роботи відносно попередньої підготовки робочих

поверхонь плоских рухомих зразків (кільце серійного упорного шарикопідшипника 8211, сталь ШХ15), проводились на плоско шліфувальному верстаті з наступним фінішним доведенням на чавунних притирах шляхом використання алмазних паст до шорсткості $Ra < 0,02$ мкм. Контроль вихідної шорсткості у процесі фінішного полірування плоских зразків проводився на лазерному скануючому диференційно-фазовому мікроскопі «ЛСДФМП» у вигляді графічних зображень та параметрів шорсткості (рис.8, табл.3). Така висока ступінь доведення робочих поверхонь дозволить виявити ймовірність мікрорізання а підвищує ймовірність адгезійного зношування шляхом мікросхоплювання вторинних структур в граничних шарах мастила.

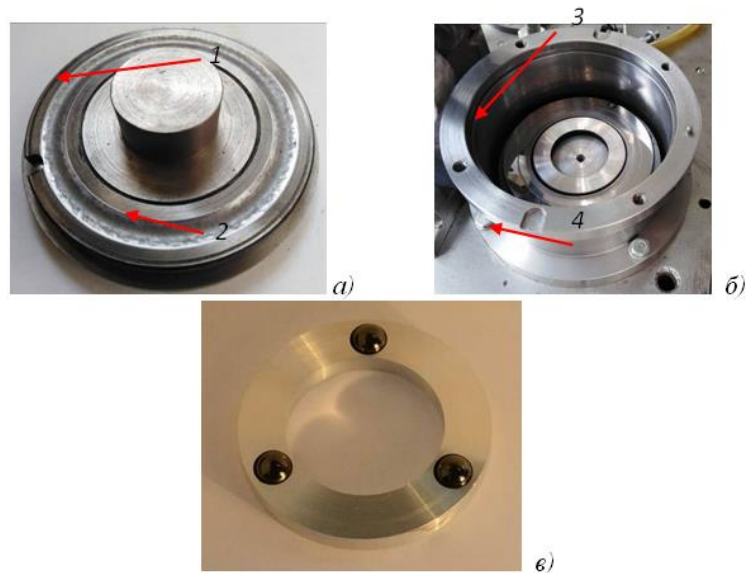


Рис. 4. Зовнішній вигляд деталей випробувального вузла тертя: а) - кріплення нерухомого сталюого зразка: 1 – утримувач дослідного зразка; 2 - нерухомий зразок (ШХ15) з центруючою доріжкою; б) - камера з встановленим рухомих нижнім плоским кільцем шарикопідшипника 3 в камері 4; в) - сепаратор з встановленими модельними зразками керамічних куль

Порівняльна оцінка зносостійкості керамічних матеріалів зразків куль в умовах змащення при сухому терті кочення проводилась з рівною кількістю повторних випробувань (не менше трьох).

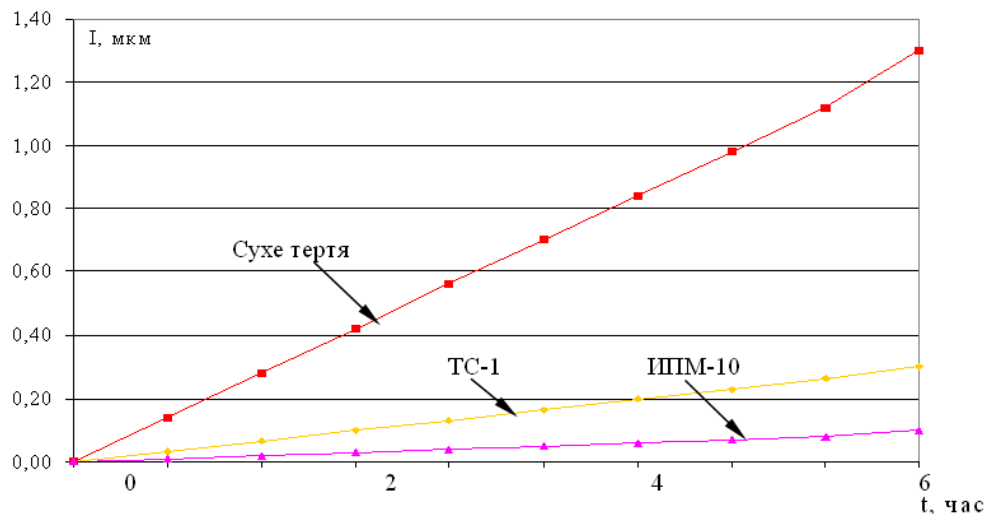


Рис. 5. Інтенсивність зношування еталонної пари тертя сталь ШХ15 по ШХ15 у часі у різних середовищах

Застосування керамічних матеріалів при виготовленні куль для гібридних шарикопідшипників потребує нових підходів до методик лабораторної оцінки їх довговічності та зносостійкості, оскільки ці матеріали мають малу масу і значно більш високу твердість, ніж підшипникова сталь ШХ15. Тому у процесі відпрацювання і апробації методики лабораторних триботехнічних випробувань зразків серійних куль шарикопідшипника 8211 і дослідних зразків керамічних куль були визначені початкові умови, а саме: - швидкість тертя кочення; - час проведення випробувань; - осьове навантаження в різних середовищах: - у середовищі авіагасу ТС-1; в мастилі ИПМ-10 та в умовах сухого тертя. Критеріями зношування модельної трибосистеми кочення слугували: величина лінійного зношування робочої поверхні плоского рухомого полірованого зразка та величина зміни маси модельних куль.

Випробувались зразки двох типів керамічних матеріалів: карбід бора и карбід кремнію, з яких були виготовлені кулі для модельного вузла тертя кочення, діаметром $12,700 \pm 0,0005$ мм, фізико-механічні властивості котрих представлені в таблиці 1.

Табл. 1

Фізико-механічні властивості керамічних матеріалів [1,2]

Матеріал керамічної кулі	Спосіб спікання	Щільність, г/см ³	Модуль пружності Е, ГПа	Твердість по Кнуппу 9,8 Н, ГПа	Міцність на вигин, МПа
SiC	Реакційне спікання: T=2150°C; $\tau_{\text{вигр.}}=20$ хв.	3,03-3,10	390-410	12-15	230-245
B ₄ C	Гаряче пресування: P=35 МПа; T=2200°C $\tau_{\text{вигр.}}=20$ хв.	2,45-2,49	410-430	26-27	330-340

Дослідження якості полірування робочих поверхонь зразків керамічних куль проводились на растровому електронному мікроскопі РЕМ 106И (рис. 6-7), а параметри їх шорсткості і мікрогеометрії плоских рухомих зразків визначалися на «ЛСДФМП», представлені у вигляді графічних зображень та параметрів шорсткості (рис. 8).

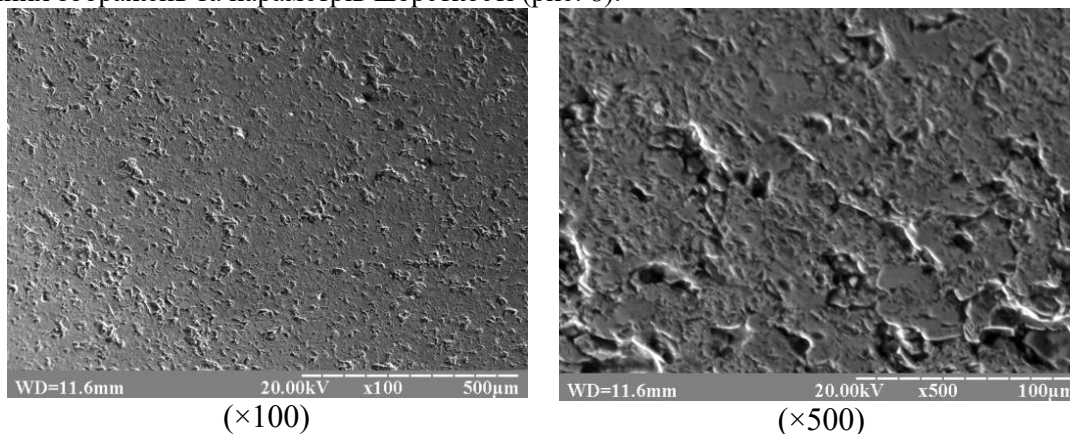


Рис. 6. Зовнішній вигляд поверхонь куль з карбиду кремнію (SiC)

У зв'язку з зношуванням матеріалу поверхонь модельної пари тертя «шар - плоска поверхня» у процесі тертя, відбувається швидке зменшення контактних напружень, що, в свою чергу, утруднює виконати коректу оцінку фактичних значень поточних контактних питомих напружень. Тому величина розрахункових максимальних початкових контактних напружень, що характерна пусковим значенням, що визначаються за формулою Г. Герцу [15-17] за допомогою програмного забезпечення (вікно інтерфейсу представлено на рис. 9) були головним критерієм початкових умов (таблиця 2). Тобто величини максимальних контактних напружень, що визначаються величиною навантаження, фізико-механічними властивостями матеріалів та

геометрією контакту, котрі виникають в одному контактї за схемою «куля - плоска поверхня», приймалися, як головними початковими умовами тертя кочення при однаковій і постійній частоті обертання валу.

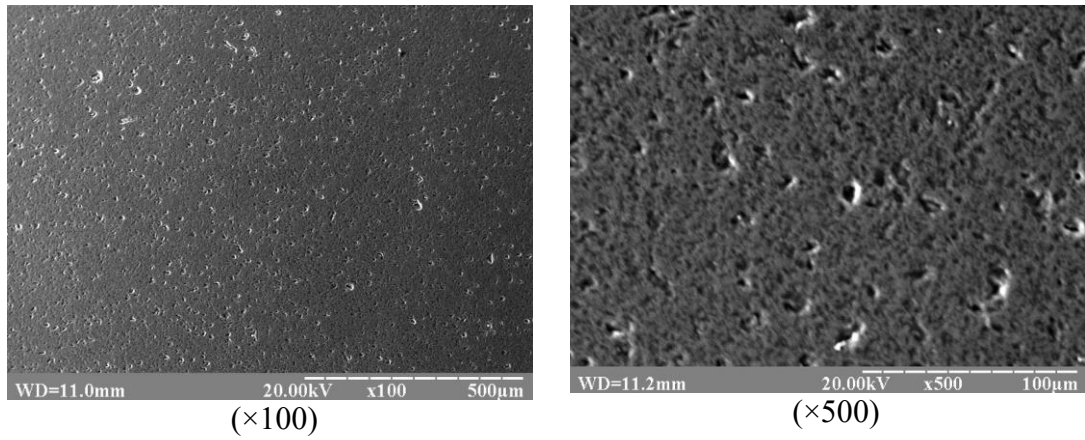
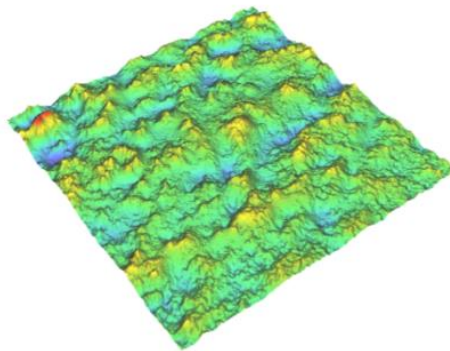


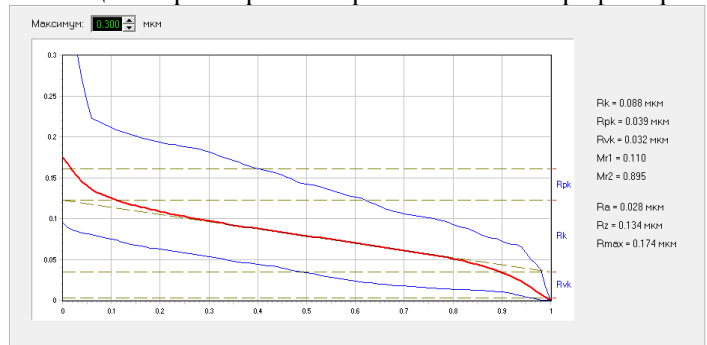
Рис. 7. Зовнішній вигляд поверхонь куль з карбиду бора (В₄С)



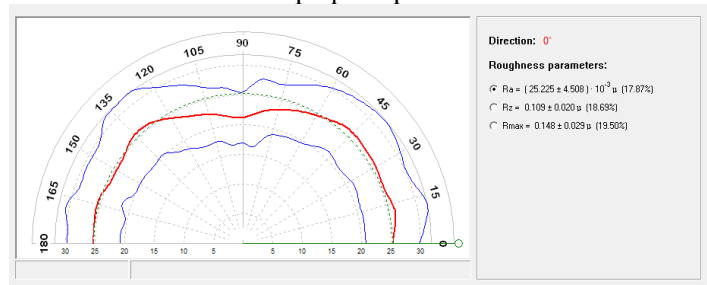
Тривимірний вигляд робочої поверхні

Параметри	Кількість измерений	Среднее значение	Среднеквадратическое отклонение	Доверительные границы интервала значений параметра при P=0.970
Ra, мкм	512	0.028	6.366 · 10 ⁻³ (22.73%)	0.012 (42.85%)
Rz, мкм	512	0.134	0.029 (21.42%)	0.054 (40.38%)
Rmax, мкм	512	0.174	0.051 (29.12%)	0.096 (54.83%)
Rk, мкм	512	0.078	0.022 (28.23%)	0.042 (53.22%)
Rvk, мкм	512	0.035	0.017 (48.07%)	0.032 (90.62%)
Prk, мкм	512	0.043	0.023 (54.00%)	0.044 (101.79%)
Sp, мкм	512	33.378	7.482 (22.41%)	14.103 (42.25%)

Таблиця з параметрами шорсткості за 512 профілограмам



Розподілення шорсткості Аббота-Файрстоуна за 512 профілограмам



Векторне розподілення робочої поверхні за 512x512 профілограмам

Рис. 8. Результати дослідження вихідної поверхні рухомого зразка (сталь ШХ15) на ЛСДФМП

Після проведення триботехнічних випробувань куль на зносостійкість, виготовлених з керамічних матеріалів, отримані результати досліджень шляхом вимірювання параметрів доріжки кочення визначався знос шляхом профілографування та математичних розрахунків, які у вигляді величини середнього лінійного зносу матеріалу заносились до таблиці. Середнє значення масового зносу зразків куль оцінювалась з точністю 0,0001 г., за допомогою аналітичних ваг моделі ВЛА-200г-М.



Рис. 9. Зовнішній вигляд контакту та вікна інтерфейсу програми розрахунку початкових контактних напружень точкового контакту

Порівняльна оцінка зношування плоского рухомого зразка (ШХ15) та зносостійкості конструкційних матеріалів куль, як при терті кочення в мастильному середовищі, так і при сухому терті, проводилася на підставі графіків, де на осі абсцис відкладався час випробувань, а на осі ординат – глибина чи об’єм зношеного матеріалу.

У зв’язку з тим, що руйнування керамічних тіл кочення (куль) в шарикопідшипнику найбільш небезпечний фактор для будь-якого ротора та машини в цілому, то проведення порівняльних випробувань керамічних матеріалів при виготовленні куль потребує нових підходів до методики лабораторної оцінки впливу компонентів гібридних шарикопідшипників на їх довговічність та зносостійкість.

Табл. 2.

Розрахункові параметри

Пара тертя (куля - поверхня)	E ₁ , ГПа	E ₂ , ГПа	ν ₁	ν ₂	E _{пр} , МПа	M, кг	F(N)	H _к , Мм	S _к , мм ²	S _{gm} (МПа)
ШХ15 – ШХ15	211	211	0,3	0,3	115934	1	16,345	0,0012	0,04817	339,269
						10	163,45	0,0056	0,22361	730,934
						20	326,9	0,00889	0,35497	920,92
В ₄ С – ШХ15	211	430	0,3	0,21	151549	1	16,345	0,00101	0,04029	405,608
						10	163,45	0,00468	0,18704	873,857
						20	326,9	0,00744	0,29691	1100,99
SiC – ШХ15	211	410	0,3	0,25	151456	1	16,345	0,00101	0,04031	405,443
						10	163,45	0,00469	0,18712	873,501
						20	326,9	0,00744	0,29703	1100,54

Оцінка зношування керамічних куль в умовах тертя кочення в середовищі авіа гасу

ТС-1

Вимірювання зношування робочих поверхонь плоских нерухомих зразків, а саме геометричних параметрів кожної доріжки тертя та визначення шорсткості робочих поверхонь, проводились за допомогою профілографа - профілометра «Калібр - М201» і лазерного мікроскопу ЛСДФМП. Результати наведені у таблиці 3.

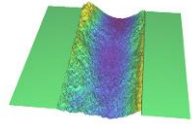
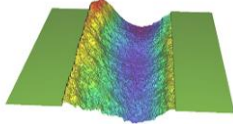
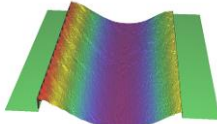
Вимірювання маси серійних куль (сталь ШХ15) та дослідних куль з двох типів керамічних матеріалів, виконувались на аналітичних вагах моделі ВЛА-200г-М з точністю до 0,0001 г. Результати зважування маси до та після проведення випробувань наведено у таблиці 4. Перед

зважуванням зразки куль ретельно промивали в бензині Б-70 та и осушувалися при температурі +100°C на протягом однієї години.

На (рис. 10-11) представлені фотографії поверхні тертя куль та плоских нерухомих зразків с продуктами зношування для кожного типу керамічних матеріалів після триботехнічних випробувань при терті кочення в авіагасі ТС-1 .

Табл. 3.

Результати вимірювань розмірів доріжки тертя кочення на плоскому рухомому зразку

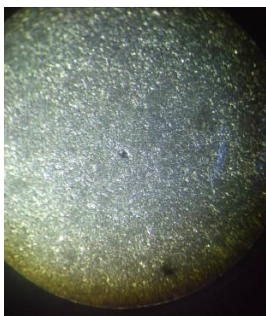
Матеріали зразків пари тертя	Лінійний знос, мкм	3D зображення сліду зношування	Температура $T_{сер}$ °C (початок-кінець)
ШХ15 – ШХ15	0,30		20-26
SiC – ШХ15*	1,28		19-23
B ₄ C – ШХ15	2,53		20-26

*- відбулась примусова зупинка випробувань через 15 хв., через виникнення надмірних вібрацій, стуку та шуму

Табл. 4.

Результати зважування маси досліджуваних зразків куль

Вимірювання зразків куль	№ куль	Тип матеріалу кулі		
		Сталь (ШХ15)	Карбід кремнію (SiC)	Карбід бору (B ₄ C)
Маса зношеного матеріалу, г	1	0,0061	0,0078	0,0006
	2	0,0094	0,0005	0,0018
	3	0,0091	0,0003	0,0006

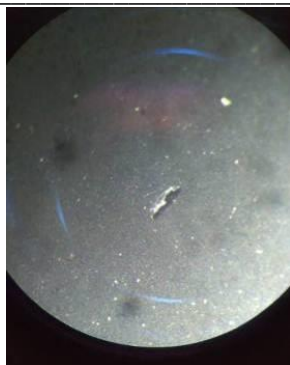


Куля (SiC)



Плоский зразок (ШХ15)

Рис. 10. Пара тертя: куля - карбіду кремнію; плоский зразок – сталь ШХ15 (через 15 хвилин випробування прилад примусово зупинено – стук, сильна вібрація)



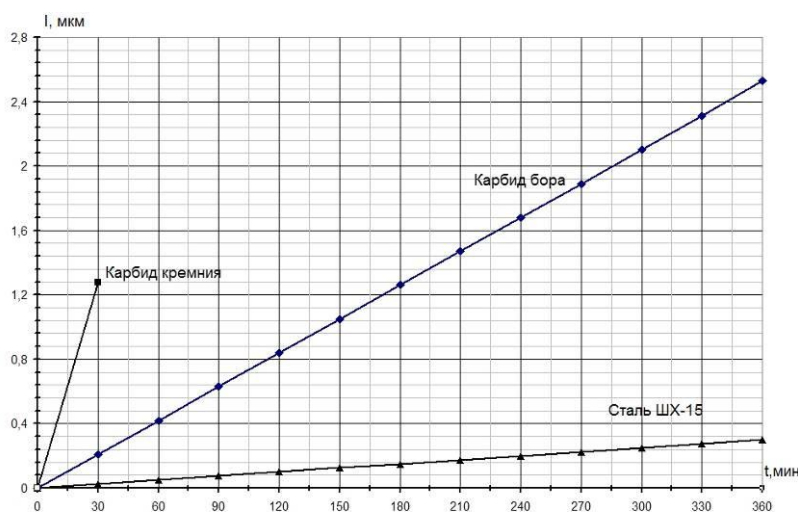
Куля (В4С)



Плоский зразок (ШХ15)

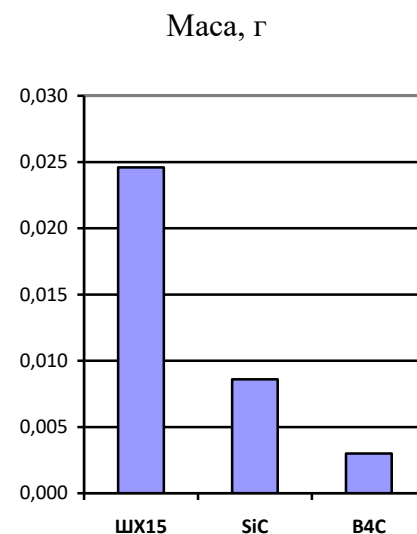
Рис. 11. Пара тертя: куля - карбід бору В4С; плоский зразок – ШХ15

Середня сумарна втрата маса трьох куль після тертя кочення в авіагасі ТС-1 для: штатних куль ШХ15 – 0,0246 г.; SiC – 0,0086* г.; В4С – 0,003 г.



*SiC – випробувальний прилад примусово зупинено через 15 хвилин після пуску. Через стук в камері та підвищену вібрацію системи навантаження.

а)



б)

Рис.12. Лінійне зношення плоского сталюго зразка (а) та діаграми масового зносу 3-х куль з різних матеріалів у середовищі авіагасу ТС-1 під навантаженням 490 Н.

Аналіз показав, що поверхневий шар кулі з реакційно-спеченого карбїду кремнію руйнується в результаті вимивання вільного кремнію з міжзеренного простору та оголення гострих і дуже твердих зерен карбїду кремнію, утворюючи в результаті абразивну поверхню що зношує сталіне кільце ШХ15 (рис.10). На поверхні кулі з гаряче-пресованого карбїду бору утворюються ізольовані каверни, спричинені локальним схоплюванням із поверхнею сталюгого кільця. При цьому втрата маси куль з карбїду бору в 2,87 рази менше ніж куль з карбїду кремнію і в 8,2 рази менше ніж куль зі сталі ШХ15.

Оцінка зношування керамічних матеріалів при терті кочення в мастильному середовищі ИПМ-10.

Для визначення величини зношування плоского зразка після випробування двох типів керамічних зразків куль в умовах тертя кочення в маслі ИПМ-10 також використовувався метод профілографування («Калїбр - М201») та лазерний мікроскоп ЛСДФМП). Результати вимірювань плоских зразків для різних типів матеріалів модельної пари тертя наведено у табл. 5.

Масу досліджуваних куль до і після випробувань визначали ваговим методом з точністю 0,0001 г., результати наведені у таблиці 6.

На (рис. 13-14) представлені зображення робочих поверхонь куль та плоских рухомих зразків кожного типу керамічних матеріалів після проведення порівняльних триботехнічних випробувань.

Аналіз показав, що поверхневий шар кулі з карбіду кремнію руйнується в результаті вимивання вільного кремнію з міжзеренного простору та оголення гострих і дуже твердих зерен карбіду кремнію, утворюючи в результаті абразивну поверхню, що зношує сталеве упорне кільце (рис.13). На поверхні кулі з карбіду бору в результаті дії великих контактних напружень утворюються ізольовані кратери, обумовлені локальним схоплюванням із поверхнею сталевого кільця з наступним крихким сколом (рис.14). При цьому втрата маси кулі з карбіду бору в 15 раз менше ніж кулі з карбіду кремнію і в 9 раз менше ніж штатних сталевих кулі (ШХ15).

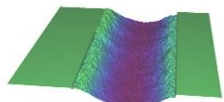
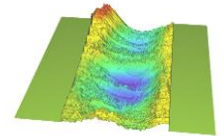
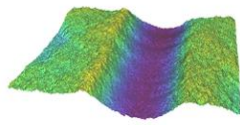
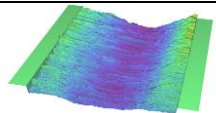
Оцінка зношування керамічних кулі в умовах сухого тертя кочення

Для проведення порівняльних лабораторних випробувань в умовах сухого тертя кочення відібрані серійні кулі упорного шарикопідшипника 8211 (сталь ШХ15) і кулі з двох типів керамічних матеріалів: карбід бору та карбід кремнію. Результати вимірювань зношення робочих поверхонь плоских сталевих зразків при сухому терті кочення наведені у таблиці 7.

На (рис. 16-17) представлені фотографії поверхонь тертя кулі і плоских зразків з продуктами зношення для кожного типу керамічних матеріалів після проведення лабораторних триботехнічних випробувань в умовах сухого тертя кочення.

Табл. 5.

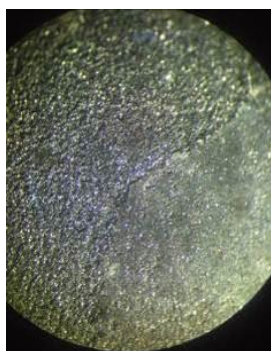
Результати вимірювань доріжки тертя плоских рухомих зразків

№ Випр.	Матеріали зразків пари тертя (шар - поверхня)	Лінійний знос, мкм	3D зображення сліду зношення	T _{сер} °С (початок-кінець)
1	ШХ15 – ШХ15	0,1 (0,085; 0,105; 0,101)		20-28
2	SiC – ШХ15	3,25* (3,0; 3,25; 3,5)		18-25
3	B ₄ C – ШХ15	14,4** (14,5; 15,2; 13,6)		18-36
4	B ₄ C – ШХ15	10,0*** (9,75; 9,3; 11,00)		19-29

*- примусова зупинка випробувань через 13 хв. (стук, вібрація вузла навантаження)

** - примусова зупинка випробувань через 3 год. 30 хв. (стук, вібрація вузла навантаження)

*** - примусова зупинка випробувань через 1 год. (стук, вібрація вузла навантаження)



Кулі (SiC)



Рухомий зразок (ШХ15)

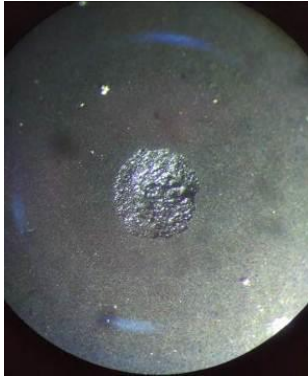
Рис. 13. Пара тертя: кулі - SiC; плоский зразок – сталь ШХ15, (примусова зупинка випробувань через 13 хв., стук, вібрація вузла навантаження)

Табл. 6.

Результати зважування 3-х зразків куль

Тип матеріалу зразків куль

Вимірювання зразків куль	№ кулі	Тип матеріалу зразків куль			
		Сталь (ШХ15)	(SiC)	(B ₄ C)	(B ₄ C)
Маса зношеного матеріалу, г	1	0,0100	0,0092	0,0009	0,0018
	2	0,0252	0,0474	0,003	0,0012
	3	0,0106	0,0222	0,0012	0,0053

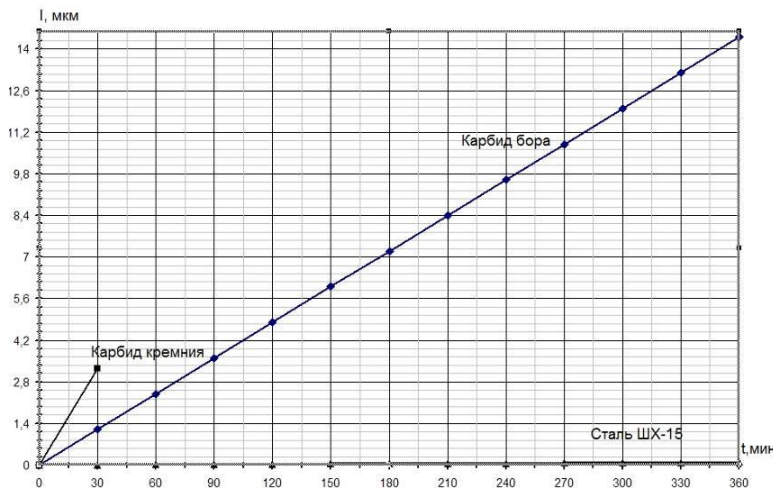


Куля (B₄C)

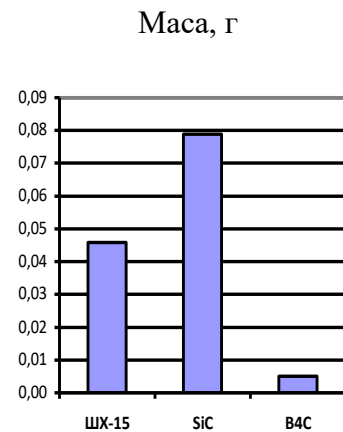


Рухомий зразок (ШХ15)

Рис. 14. Пара тертя: кулі – B₄C; плоский зразок – сталь ШХ15



а)



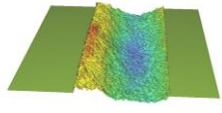
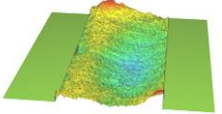
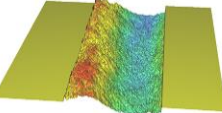
б)

Рис. 15. Лінійний знос плоского рухомого зразка (а) та діаграма масового зносу 3-х куль у середовищі масла ІПМ-10 під навантаженням 980 Н (Середня сумарна втрата маси трьох куль пари тертя для: штатних куль ШХ15 – 0,0458 г.; SiC – 0,0788* г.; B₄C – 0,0051 г.)

Аналіз показав, що поверхневий шар куль з кремнію руйнується через вимивання вільного кремнію із міжзеренного простору та оголення гострих і дуже надтвердих зерен карбіду кремнію, утворюючи в результаті абразивну поверхню, що зношує сталеве упорне кільце ШХ15 (рис.16). На поверхні кулі з карбіду бору в результаті дії великих контактних напружень утворюються ізольовані кратери, обумовлені локальним захопленням з поверхнею сталевого кільця з наступним крихким сколом (рис.17). При цьому втрата маси куль з карбіду бору в 4,2 рази менше чим куль з карбіду кремнію і в 60,8 рази менше чим куль зі сталі ШХ15.

Табл. 7.

Результати вимірювань доріжки тертя на плоскому рухомому сталевому зразку

№ Випр.	Матеріали зразків пари тертя (куля-поверхня)	Лінійний знос, мкм	3D зображення доріжки кочення	$T_{сер}^{\circ C}$ (початок-кінець)
1	ШХ15 – ШХ15	1,3 (1,28; 1,35; 1,27)		18,5-29,2
2	SiC – ШХ15	4,1* (3,6; 4,5; 4,2)		18,9-24,2
4	B ₄ C – ШХ15	1,45 (1,51; 1,20; 1,63)		18,2-36,3

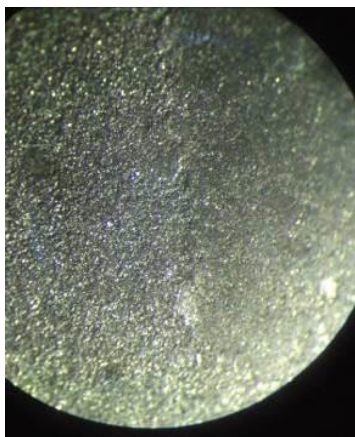
*- примусова зупинка випробувань через 37 хв. (стук, вібрація вузла навантаження)

Результати зважування маси до та після випробувань наведено у таблиці 8.

Табл. 8.

Результати зважування зразків куль

Вимірювання зразків куль	№ Кулі	Тип матеріалу куль		
		Сталь ШХ15	Карбід кремнію (SiC)	Карбід бору (B ₄ C)
Маса зношеного матеріалу, г	1	0,0337	0,0018	0,0004
	2	0,019	0,0034	0,0006
	3	0,0264	0,0003	0,0003

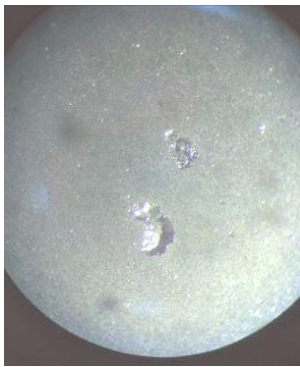


Куля (SiC)



Плоский зразок (ШХ15)

Рис. 16. Пара тертя: кулі - карбід кремнію; плоский рухомий зразок - сталь ШХ15, (Примусова зупинка випробувань через 37 хв. - стук, вібрація)



Куля (B4C)



Плоский зразок (ШХ15)

Рис. 17. Пара тертя: куля – карбід бору; плоский рухомий зразок зі сталі ШХ15

Середня сумарна втрата маси трьох куль пари тертя при сухому терті кочення для: штатних зразків – 0,0791 г.; SiC – 0,0055* г.; B₄C – 0,0013 г.

* (SiC) – примусова зупинка випробувань через 37 хв. (стук, вібрація вузла навантаження)

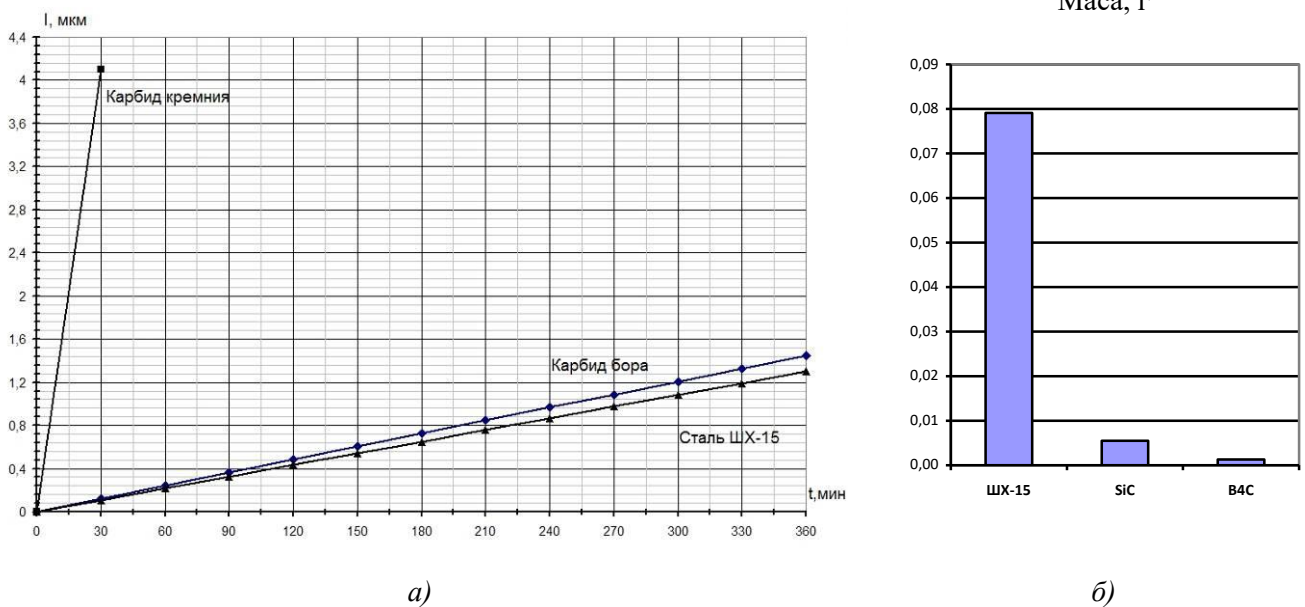


Рис.18. Лінійний знос плоского сталевго зразка (а) і діаграма масового зносу 3-х куль при сухому терті кочення під навантаженням 49Н

Висновки:

1. Розроблена і апробована спеціальна методика лабораторних триботехнічних випробувань гібридних пар тертя кочення на модернізованого приладу тертя КИИГА-1М;

2. Аналіз даних отриманих при триботехнічних випробуваннях гібридних модельних трьох точкових упорних шарикопідшипників «сталь ШХ15 – керамічні кулі – сталь ШХ15» дозволив зробити наступні висновки:

- показано, що використання куль з карбиду бору в гібридних шарикопідшипниках кочення являється перспективним напрямком у трибологічному матеріалознавстві, особливо для газотурбінних двигунів та інших енергосилових роторних установок;

- суттєвий вплив середовища мастила на інтенсивність зношування компонентів пари тертя, зокрема, мінімальна інтенсивність зношування спостерігається в змащувальному середовищі масла ИПМ-10, однак, показана можливість роботи гібридної пари тертя кочення і в умовах сухого тертя, що особливо актуально для газотурбінних двигунів вертольотів;

- встановлено істотний вплив вихідної шорсткості поверхонь керамічних куль, що формується не тільки в процесі механічної обробки, а й на стадії спікання. Таким чином показано, що для гібридних пар тертя необхідно формувати структуру керамічних матеріалів для

подальшого виготовлення куль з дрібнішим зерном, що підвищить їх зносостійкість та знизить абразивність поверхонь по відношенню до сталевих поверхонь кілець підшипників кочення.

Література

1. Трибология легких полимерных материалов применяемых в узлах трения машин /В.Хуфенбах, А.Стельмах, К.Кунце, Н.Модлер // Міжвузівський збірник "Наукові нотатки", м.Луцьк, 2011. – Вип. №34 . - с.303-321
2. Костюник Р.Е. Трибологические исследования адгезионного изнашивания на машине трения АСК-01// Сільськогосподарські машини. -2015. - Вип. 31.- с.88-94
3. Пат. 37069 Украина, МПК С04В 35/565. Спосіб виготовлення карбідокрем-нієвих виробів / І. П. Криворучко, А. Л. Майстренко, В. Г. Кулич. – Заявл. 07.06.01; Опубл. 15.03.02, Бюл. № 3.
4. Skorokhod V.(Jr), Krstic V.D. High strength-high toughness W_4C-TiB_2 composites.// J. Mat. Sc. Letter. – 2000. – No. 19 . – p. 237 – 239.
5. Електроспінання під тиском кераміки на основі карбіду бору / Майстренко А. Л., Боримський О. І., Дутка В. А., Кулич В.Г.// Академкнига. Збірник до 100-річчя НАН України. - 2018
6. Гнесин Г.Г. Бескислородные керамические материалы // Киев: «Техника» -1987. – 37 с.
7. 3275722 U.S. Patent / Popper P.P., Production of Dense Bodies of Silicon Carbide / Sept. 27, 1966.
8. Microstructure and Mechanical Properties of Silicon Carbide Processed by Spark Plasma Sintering (SPS) /S. Hayun, V. Paris, R. Mitrani, et.al.//Ceramics International DOI 10.1016 / j.ceramint. 2012.05.03
9. Celik Y, Goller G, Yucel O, Sahin FC / Spark Plasma Sintering of Boron Carbide and Effects of Various Additives on Sintering and Material Properties/ 12th International Ceramic Congress CIMTEC. Naziran 2010, Montecatini Terme/Italya.
- 10.Закономерности формирования высокоплотной структуры самосвязанного карбида кремния / А.Л.Майстренко, В.Г.Кулич, Ткач В.Н. // Сверхтвердые материалы. - 2009. - №1. - с. 18 - 35.
11. Електроспінання під тиском кераміки на основі карбіду бору /Майстренко А. Л., Боримський О. І., Дутка В. А. и др. // Наука про матеріали: досягнення та перспективи. У 2-х томах. //Київ: Академперіодика. -2018. - с. 276-294.
12. Аксёнов А. Ф. Трение и изнашивание металлов в углеводородных жидкостях// М. : Машино-строение, 1977. – 149 с.
- 13.Стельмах А. У. Исследование процессов трения и изнашивания в углеводородных средах при использовании некоторых металл-органических соединений и разработка путей повышения износостойкости трибосистем: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.02.04. – Київ. -1993. – 20 с.
14. Крагельский И.В., Алисина В.В. Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2 книгах // М.: Машиностроение, 1978. - 400 с.
15. Иванов А. С. Конструируем машины шаг за шагом: в 2 ч. // М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2-е изд., перераб. - 2003. — Ч. 1. - 328 с.
16. Афанасьев А.И., Федосеев А.П. Контактные напряжения в эллиптическом рабочем инструменте машины для разрушения негабаритов // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9-3. – С. 497-500;
17. Popov Valentin L. Contact Mechanics and Friction. Physical Principles and Applications // Springer-Verlag, - 2010. -362 p.

Є. Б. Козак

магістр в галузі комп'ютерних наук, розробник програмного забезпечення, інженер-програміст GAN Inc.

ЗАСТОСУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ІНТЕРПОЛЯЦІЇ КУБІЧНИМ СПЛАЙНОМ ПРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ АЕРОНАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

У статті розглянуто принципи застосування математичної моделі інтерполяції кубічним сплайном при автоматизації аеронавігаційної системи. Підкреслено, що на відміну від дискретного рівняння, що описує стан і вимірювання в дискретній моделі, еволюція випадкового процесу і вимірювань в часі у стохастичній диференціальній моделі може бути описана диференціальним рівнянням стану і дискретним рівнянням вимірювання. Зазначено, що стохастичні диференціальні рівняння мають два методи аналізу: сильні рішення і слабкі рішення, і тільки деякі типи стохастичних диференціальних рівнянь відносяться до замкнутих рішень з сильним рішенням; в той час як слабке рішення є розподіленим рішенням, тобто ймовірністю в безперервному функціональному просторі. Наголошується, що у стохастичних диференціальних рівняннях броунівський рух являє собою лише руйнівну силу мікроскопічних випадкових флуктуацій, а не появу у властивості макроскопічного середнього. Слабке рішення стохастичного диференціального рівняння визначається функцією передачі. Обґрунтовано алгоритм кубічного сплайна, який є одновимірним випадком, щільність ймовірності сегментована для апроксимації апіорної щільності ймовірності стану системи, він безпосередньо вирішує функцію щільності ймовірності стану системи, щоб більш чітко зрозуміти різні можливості стану. Шляхом побудови умов інтерполяції кубічним сплайном, у статті дана функція використовується для апроксимації рішення прямого рівняння Колмогорова, щоб перетворити завдання в рішення системи звичайних диференціальних рівнянь відносно коефіцієнтів в кусковій функції. Математично доведено, що оптимальне рішення оцінки стану можна отримати за формулою Байєса, але перш за все необхідно знати попередню функцію щільності ймовірності стану системи та дослідити доцільність використання методу кубічного сплайну для його вирішення. Запропоновано алгоритм інтерполяції кубічного сплайну, який перетворює часткові диференціальні рівняння щільності ймовірності стану в часі в рішення звичайного диференціального рівняння кускової функції та розв'язує стан системи в одновимірному просторі функцій.

Ключові слова: математична модель, інтерполяція, кубічний сплайн, автоматизація, аеронавігаційна система.

Е.Б. Козак

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИНТЕРПОЛЯЦИИ КУБИЧЕСКИМ СПЛАЙНОМ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ АЭРОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

В статье рассмотрены принципы применения математической модели интерполяции кубическим сплайном при автоматизации аэронавигационной системы. Подчеркнуто, что в отличие от дискретного уравнения, описывающего состояние и измерения в дискретной модели, эволюция случайного процесса и измерений во времени в стохастической дифференциальной модели может быть описана дифференциальным уравнением состояния и дискретным уравнением измерения. Указано, что стохастические дифференциальные уравнения имеют два метода анализа: сильные решения и слабые решения, и только некоторые типы стохастических дифференциальных уравнений относятся к замкнутым решениям с сильным решением; в то время как слабое решение является распределенным решением, то есть вероятностью в непрерывном функциональном пространстве. Отмечается, что в стохастических дифференциальных уравнениях броуновское движение представляет собой лишь движущую силу микроскопических случайных флуктуаций, а не появление в свойствах макроскопического среднего. Слабое решение стохастического дифференциального уравнения определяется функцией передачи. Обоснованы алгоритм кубического сплайна, который является одномерным случаем, плотность вероятности сегментированная для апроксимации апіорной плотности вероятности состояния системы, он непосредственно решает функцию плотности вероятности состояния системы, чтобы более четко понять различные возможности состояния. Путем построения условий интерполяции кубическим сплайном, в статье данная функция используется для апроксимации решения прямого уравнения Колмогорова, чтобы преобразовать задачу в решение системы обычных дифференциальных уравнений относительно коэффициентов в кусковой функции. Математически доказано, что оптимальное решение оценки состояния можно получить по формуле Байеса, но прежде всего необходимо знать предварительную функцию плотности вероятности состояния системы и исследовать целесообразность использования метода кубического сплайна для его решения. Предложен алгоритм интерполяции кубического сплайна, который преобразует частичные дифференциальные уравнения плотности вероятности состояния во времени в решение обычного дифференциала уравнения кусковой функции и решает состояние системы в одномерном пространстве функций.

Ключевые слова: математическая модель, интерполяция, кубический сплайн, автоматизация, аэронавигационная система.

E. Cozac

APPLICATION OF MATHEMATICAL MODEL OF CUBIC SPLINE INTERPOLATION IN AUTOMATION OF AIR NAVIGATION SYSTEM

The principles of application of the mathematical model of cube spline interpolation in the automation of the aeronautical system are considered in the article. It is emphasized that, in contrast to the discrete equation describing state and measurement in a discrete model, the evolution of a random process and time measurements in a stochastic differential model can be described by a differential equation of state and a discrete equation of measurement. It is noted that stochastic differential equations have two methods of analysis: strong solutions and weak solutions, and only some types of stochastic differential equations belong to closed solutions with a strong solution; while a weak solution is a distributed solution, ie a probability in a continuous functional space. It is emphasized that in stochastic differential equations the Brownian motion is only the driving force of microscopic random fluctuations, and not the appearance in the property of the macroscopic mean. The weak solution of the stochastic differential equation is determined by the transfer function. The cubic spline algorithm is substantiated, which is a one-dimensional case, the probability density is segmented to approximate the a priori probability density of the system state, it directly solves the probability density function of the system state to more clearly understand the different possibilities of the state. By constructing the conditions of cubic spline interpolation, in the paper this function is used to approximate the solution of the direct Kolmogorov equation to transform the problem into a solution of a system of ordinary differential equations with respect to the coefficients in the piecewise function. It is mathematically proved that the optimal solution for state estimation can be obtained by the Bayesian formula, but first of all it is necessary to know the preliminary probability density function of the system state and investigate the expediency of using the cubic spline method to solve it. An algorithm for interpolating a cubic spline is proposed, which transforms partial differential equations of

the state probability density in time into a solution of the ordinary differential of the piecewise equation and solves the state of the system in the one-dimensional space of functions.

Key words: mathematical model, interpolation, cubic spline, automation, aeronautical system.

Вступ та постановка проблеми дослідження. Технологія точної аеронавігації є однією з ключових технологій, що забезпечують ефективне використання і безпечне повернення повітряних апаратів. В даний час велика частина основного аеронавігаційного обладнання повітряних апаратів це, в основному, інерціальні навігаційні системи, доповнені іншим обладнанням для допомоги або коригування інерціального блоку [1]. В останні роки детально підлягала дослідженню акустична навігація (наприклад, довгі і короткі базові лінії і т. д.), геофізична польова навігація (наприклад, гравітація, магнетизм), рельєф і т. д.), проведені дослідження технологій повітряної навігації. Технічна область поступово розвивається, проте, розробка всіх комбінованих режимів заснована на теорії фільтрації. Технологія фільтрації є одним з ключових моментів впливу на продуктивність системи, тобто на точність навігації. Застосування основ теорії фільтрації в аеронавігаційних системах завжди було актуальним в області навігаційних досліджень і рушійною силою розвитку теорії фільтрації. Фільтрація Калмана вводить модель простору станів в теорію оптимальної фільтрації, і для лінійних систем з гауссовським розподілом шумом рекурсивна мінімальна середньоквадратична помилка стану системи може бути отримана шляхом оцінки, але її недоліком є те, що модель системи повинна бути лінійною, а обсяг обчислень різко зростає зі збільшенням третього ступеня оціненої розмірності вектора.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні, питання автоматизації аеронавігаційної системи розглянуло чимало науковців.

М.В. Касаткін [2] дослідив принципи стохастичного моделювання сумісного прийняття рішень в особливому випадку в польоті. Автором представлено моделі сумісного прийняття рішень (CDM) екіпажем повітряного судна та керівником польотів в умовах стохастичної невизначеності у вигляді дерева рішень та мережі GERT. Наведено приклад CDM в особливому випадку «Відмова лівого двигуна (відмова системи граничного обмеження температури) двомоторного літака».

Питання врахування вимог ІКАО стосовно місцевості та перешкод у районах аеропорту для їх картографування та використання розкрили Сергій Крячок, Олена Бойко та Людмила Мамонтова [3]. Науковці виконали аналіз нормативних документів ІКАО та Євроконтролю стосовно якісних та кількісних вимог щодо даних про місцевість та перешкоди, що складають бази даних аеронавігаційних ГІС, залежно від районів аеропорту – для вибору методів їх картографування.

Сплайн-функції та їх застосування досліджено в [4]. Б.П.Довгий, А.В.Ловейкін, Є.С.Вакал та Ю.Є.Вакал розглянули основні відомості про сплайни і їх застосування до задач наближення функцій, чисельного диференціювання і інтегрування, наближеного розв'язання диференціальних і інтегральних рівнянь. Основну увагу авторами приділено чисельним аспектам застосування сплайнів з використанням системи комп'ютерної математики MATLAB.

Н. С. Кузьменко [5] розкрила принципи багатопараметричного відновлення даних у безпілотній авіаційній системі з багатоальтернативною класифікацією польотних ситуацій.

Із зарубіжних авторів варто відзначити такі роботи як: J. Cao [6], Y. Gao [7], W. Deng, R. Yao, H. Zhao, X. Yang, and G. Li [8], S. Gulc'u, M. Mahi, O. K. Baykan, and H. Kodaz [9], A. A. Nagra, F. Han, Q.-H. Ling, and S. Mehta [10], J. Wang [11], C. Sahu, P. B. Kumar, and D. R. Parhi [12], F. Q. Lu, M. Huang, W. K. Ching, X. W. Wang, and X. L. Sun [13], G. I. Sayed, G. Khoriba, and M. H. Haggag [14] та інші.

Незважаючи на масштабність наукових досліджень за темою роботи, питання застосування математичної моделі інтерполяції кубічним сплайном при автоматизації аеронавігаційної системи є актуальним та потребує детального опрацювання.

Постановка завдання. Здійснити дослідження застосування математичної моделі інтерполяції кубічним сплайном при автоматизації аеронавігаційної системи.

Викладення основного матеріалу дослідження. Стан руху повітряного апарата можна розглядати як випадковий процес $x(t)$, припускаючи, що $t \in [0, \infty)$, всі $x(t)$ визначені у імовірнісному просторі (Ω, F, P) , де: Ω – не порожня множина, звана простором відліків, а її елементи називаються відліками; F – набір ступенів простору відліків, а не пуста підмножина, безліч F має бути σ -алгеброю; P – міра ймовірності, скорочено позначається як ймовірність. Вимірювання $z(t)$ є алгебраїчною областю в імовірнісному просторі, а $z(t)$ вимірюється за допомогою

$$x_t \triangleq x(t), z_t \triangleq z(t).$$

На відміну від дискретного рівняння, що описує стан і вимірювання в дискретній моделі, еволюція x_t і z_t в часі у стохастичній диференціальній моделі може бути описана диференціальним рівнянням стану і дискретним рівнянням вимірювання:

$$dx_t = f(x_t, t)dt + b(u_t, t)dt + g(x_t, t)d\beta_t, \quad (1)$$

$$z_k = h(x_k, t_k) + e_k. \quad (2)$$

Серед них: $x_t \in \mathbf{R}^n, u_t \in \mathbf{R}^c, \beta_t \in \mathbf{R}^d, z_k \in \mathbf{R}^m, e_k \in \mathbf{R}^m$;

$f(x_t, t): \mathbf{R}^n \times \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}^n$ – функція зльоту; $b(u_t, t): \mathbf{R}^c \times \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}^n$ – керуюча функція;
 $g(x_t, t): \mathbf{R}^n \times \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}^n \times d$ – коефіцієнт дифузії; $h(x_k, t_k): \mathbf{R}^n \times \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}^m$ – функція вимірювання;

u_t – c -мірний вектор управління, β_t – d -мірний вектор броунівського руху,

$E[d\beta_t d\beta_t^T] = Q(t)dt, Q(t) \in \mathbf{R}^{d \times d}$; e_k – m -мірний білий шум процесу,

$$E(e_k e_k^T) = R(k), R(k) \in \mathbf{R}^{m \times m}$$

β_t і e_k не залежать одне від одного.

Випадковий процес рішення стохастичних диференціальних рівнянь може бути абстрактно представлено функціоналом $x_t = J[x_0, \beta_t, t]$. Стохастичні диференціальні рівняння мають два методи аналізу: сильні рішення і слабкі рішення, і тільки деякі типи стохастичних диференціальних рівнянь відносяться до замкнутих рішень з сильним рішенням; в той час як слабке рішення є розподіленним рішенням, тобто ймовірністю в безперервному функціональному просторі.

У стохастичних диференціальних рівняннях броунівський рух являє собою лише рушійну силу мікроскопічних випадкових флуктуацій, а не появу у властивості макроскопічного середнього. У випадку, якщо замінити броунівський рух в стохастичному диференціальному рівнянні іншим броунівським рухом B_t^i , рішення буде $x_t = J[x_0, \beta_t^i, t]$, з точки зору розподілу розподіл випадкового процесу $\{x_t\}$ і випадкового процесу $\{x_t^i\}$ однаковий. Коли умова існування сильного рішення не виконується, слабке рішення надає сенс стохастичному диференціальному рівнянню.

Слабке рішення стохастичного диференціального рівняння визначається функцією передачі. При відповідних умовах коефіцієнтів $f(x, t), g(x, t)$ умовна щільність ймовірності $p(x, t | z_t)$, стан системи задовольняє пряму рівнянню Колмогорова [9]:

$$L(p) = \dot{p} = \frac{1}{2} \sum_{r,s=1}^n \frac{\partial^2 (g(x, t) Q(t) g^T(x, t) \cdot p)}{\partial x_r \partial x_s} - \sum_{r=1}^n \frac{\partial (f(x, t) \cdot p)}{\partial x_r} \quad (3)$$

$$p \triangleq p(x, t | z_t)$$

$$p'(x_0) = 0, p'(x_n) = 0 \quad (4)$$

Серед них: У реальній інтегрованій аеронавігації, $f(x, t)$ являє собою зв'язок між зміною стану руху та станом руху, а $g(x, t)$ являє собою поширення шуму.

Пряме рівняння Колмогорова (3) і його рівняння граничних умов (4) складають крайову задачу диференціальних рівнянь.

Ω – область з гладким кордоном в просторі \mathbf{R}_n ,

$P: \Omega \rightarrow \mathbf{R}$ – рішення крайової задачі.

Алгоритм кубічного сплайна [10] є одновимірним випадком, щільність ймовірності сегментована для апроксимації апіорної щільності ймовірності стану системи, він безпосередньо вирішує функцію щільності ймовірності стану системи, щоб більш чітко зрозуміти різні можливості стану. А для іншого алгоритму кусково-інтерполяційного поліноміального кубічного сплайна низького порядку він не тільки зберігає свої різні переваги, але також покращує гладкість функції інтерполяції.

У цій статті, шляхом побудови умов інтерполяції кубічним сплайном, функція інтерполяції кубічним сплайном використовується для апроксимації рішення прямого рівняння Колмогорова, щоб перетворити завдання в рішення системи звичайних диференціальних рівнянь відносно коефіцієнтів в кусковій функції.

Функція щільності ймовірності стану $p(x, t): \mathbf{R}^n \times (t_0, t_e) \rightarrow \mathbf{R}$, для фіксованого часу $t, p(x, t) \in f: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}$ в гільбертовому просторі. Нехай $p(x, p) \triangleq p(x)$.

Для заданого інтервалу $a = x_0 < x_1 < x_2 < \dots < x_n = b$ послідовність точок $\{(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)\}$, якщо функція $p(x)$ отримаємо:

1) $p(x)$ в кожному підінтервалі $[x_{i-1}, x_i](i = 1, 2, \dots, n)$ - багаточлен не вище третього ступеня;

2) $p(x), p'(x), p''(x)$ неперервні на (a, b) ;

3) Задоволення умові інтерполяції $p(x_i) = y_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$.

$p(x)$ – функція інтерполяції кубічним сплайном вихідної функції щодо вузла.

Друга похідна $p(x), p''(x)$ дорівнює $p''(x_i) = M_i, i = 0, 1, 2, \dots, n$.

Оскільки $p(x) = p_i(x)(i = 1, 2, 3, \dots, n)$ на підінтервалі $[x_{i-1}, x_i]$ є багаточленом не вище третього порядку, друга похідна повинна бути лінійною функцією (або константою). Отже, існує

$$p''(x) = M_{i-1} \frac{x_i - x}{h_i} + M_i \frac{x - x_{i-1}}{h_i}$$

Серед них: $x \in [x_{i-1}, x_i], h_i = x_i - x_{i-1}$, інтегруємо його двічі посліпль, отримаємо

$$p_i(x) = M_{i-1} \frac{(x_i - x)^3}{6h_i} + M_i \frac{(x - x_{i-1})^3}{6h_i} + A_i(x - x_{i-1}) + B_i, x \in [x_{i-1}, x_i] \quad (5)$$

Серед них A_i і B_i є інтегральними константами тільки по часу. Підставляючи $p(x_i), p(x_{i-1})$ в пряме рівняння Колмогорова рівняння (3), маємо

$$\begin{cases} L(p(x_i)) = \frac{\partial p(x)}{\partial t} \Big|_{x_i} \\ L(p(x_{i-1})) = \frac{\partial p(x)}{\partial t} \Big|_{x_{i-1}} \end{cases}$$

через

$$\begin{aligned} \frac{\partial(f \cdot p)}{\partial x_r} &= \frac{\partial(f)}{\partial x_r} \cdot p + f \cdot \frac{\partial(p)}{\partial x_r} \\ \frac{\partial(gQg^T \cdot p)}{\partial x_s} &= \frac{\partial(gQg^T)}{\partial x_s} \cdot p + gQg^T \cdot \frac{\partial(p)}{\partial x_s} \\ \frac{\partial^2(gQg^T \cdot p)}{\partial x_r \partial x_s} &= \frac{\partial^2(gQg^T)}{\partial x_r \partial x_s} \cdot p + 2 \cdot \frac{\partial(gQg^T)}{\partial x_r} \cdot \frac{\partial(p)}{\partial x_s} + gQg^T \cdot \frac{\partial^2(p)}{\partial x_r \partial x_s} \end{aligned}$$

отримуємо

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{2} \sum_{r,s=1}^n \left[\frac{\partial^2(gQg^T)}{\partial x_r \partial x_s} \cdot p + \frac{\partial(gQg^T)}{\partial x_r} \cdot \frac{\partial(2p)}{\partial x_s} \right] + \frac{1}{2} \sum_{r,s=1}^n gQg^T \cdot \frac{\partial^2(p)}{\partial x_r \partial x_s} - \sum_{r=1}^n \frac{\partial(f)}{\partial x_r} \cdot p - \sum_{r=1}^n f \cdot \frac{\partial(p)}{\partial x_r}$$

$$\begin{aligned} \sum_{r,s=1}^n \frac{\partial(gQg^T)}{\partial x_r} - f &\triangleq \Delta_2 \\ gQg^T &\triangleq \Delta_3 \end{aligned}$$

Припускаючи, що g, Q і f не залежать від часу, тоді Δ_1, Δ_2 і Δ_3 не залежать від часу t .

$$\int_{t_k}^{t_{k+1}} L(p(x)) dt = \int_{t_k}^{t_{k+1}} \frac{\partial p}{\partial t} dt = \int_{t_k}^{t_{k+1}} \left(\Delta_1 p + \Delta_2 \frac{\partial p}{\partial x} + \Delta_3 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \right) dt$$

Серед них нехай $t_{k+1} - t_k \triangleq \Delta t_k$, з теореми про медіану інтегралу

$$p^{t_{k+1}}(x) = p^{t_k}(x) + \left(\Delta_1 p^{t_k} + \Delta_2 \frac{\partial p^{t_k}}{\partial x} + \Delta_3 \frac{\partial^2 p^{t_k}}{\partial x^2} \right) \cdot \Delta t_k$$

$p_i(x_i)$ в вузлі x_i в момент часу t_{k+1} може бути знайдено, нехай

$$p_i(x_i) = p_i^{t_{k+1}}(x_i), p_i(x_{i-1}) = p_i^{t_{k+1}}(x_{i-1})$$

З наведеної вище формули можемо отримати

$$\begin{cases} A_i = \frac{p_i(x_i) - p_i(x_{i-1})}{h_i} - \frac{h_i}{6}(M_i - M_{i-1}) \\ B_i = p_i(x_{i-1}) - \frac{h_i^2}{6}M_{i-1} \end{cases}$$

Підставляючи A_i і B_i в рівняння (5), отримуємо

$$\begin{aligned} p_i(x) &= M_{i-1} \frac{(x_i - x)^3}{6h_i} + M_i \frac{(x - x_{i-1})^3}{6h_i} + \\ &+ \left(p_i(x_{i-1}) - \frac{h_i^2}{6}M_{i-1} \right) \cdot \frac{x_i - x}{h_i} + \left(p_i(x_i) - \frac{h_i^2}{6}M_i \right) \frac{x - x_{i-1}}{h_i} \end{aligned} \quad (7)$$

Потім потрібно визначити M_i ($i = 0, 1, 2, \dots, n$) і $n + 1$ невідомих, щоб отримати функцію інтерполяції кубічним сплайном. Необхідно використовувати першу похідну, щоб отримати безперервність на вузлі підінтервалу x_i

$$p'_i(x_i - 0) = p'_{i+1}(x_i + 0) \quad (8)$$

де $i = 1, 2, \dots, n - 1$. Також через

$$\begin{aligned} p'_i(x_i - 0) &= \frac{p_i(x_i) - p_i(x_{i-1})}{h_i} + \frac{h_i}{6}M_{i-1} + \frac{h_i}{3}M_i \\ p'_{i+1}(x_i + 0) &= \frac{p_i(x_{i+1}) - p_i(x_i)}{h_{i+1}} - \frac{h_{i+1}}{6}M_{i+1} - \frac{h_{i+1}}{3}M_i \end{aligned}$$

Підставляючи його в рівняння (8), одержуємо

$$\frac{h_i}{6}M_{i-1} + \frac{h_i + h_{i+1}}{3}M_i + \frac{h_{i+1}}{6}M_{i+1} = \frac{p_i(x_{i+1}) - p_i(x_i)}{h_{i+1}} - \frac{p_i(x_i) - p_i(x_{i-1})}{h_i}$$

Помножимо обидві частини наведеної вище формули на , тоді

$$\frac{h_i}{h_i + h_{i+1}} M_{i-1} + 2M_i + \frac{h_{i+1}}{h_i + h_{i+1}} M_{i+1} = \frac{6}{h_i + h_{i+1}} \cdot \frac{p_i(x_{i+1}) - p_i(x_i)}{h_{i+1}} - \frac{6}{h_i + h_{i+1}} \cdot \frac{p_i(x_i) - p_i(x_{i-1})}{h_i}$$

$$u_i = \frac{h_i}{h_i + h_{i+1}}$$

$$\alpha_i = \frac{h_{i+1}}{h_i + h_{i+1}} = 1 - u_i$$

$$g_i = \frac{6}{h_i + h_{i+1}} \cdot \frac{p_i(x_{i+1}) - p_i(x_i)}{h_{i+1}} - \frac{6}{h_i + h_{i+1}} \cdot \frac{p_i(x_i) - p_i(x_{i-1})}{h_i}$$

де $i = 1, 2, \dots, n - 1$. Тоді по граничних умовах $p'(x_0) = 0, p'(x_n) = 0$, отримуємо

$$\frac{p_0(x_1) - p_0(x_0)}{h_1} - \frac{h_1}{6} M_1 - \frac{h_1}{3} M_0 = 0$$

$$\frac{p_{n-1}(x_n) - p_{n-1}(x_{n-1})}{h_n} + \frac{h_n}{6} M_{n-1} - \frac{h_n}{3} M_n = 0$$

$$M_{n-1} + 2M_n = -6 \frac{p_{n-1}(x_n) - p_{n-1}(x_{n-1})}{h_n^2} \triangleq g_n$$

Припустимо, що $(g_0 \ g_1 \ \dots \ g_{n-1} \ g_n)^T \triangleq G$, з наведеної вище формули $n + 1$ можемо отримати

$$\begin{pmatrix} 2 & 1 & & & & \\ u_1 & 2 & a_1 & & & \\ & & \dots & & & \\ & & & u_{n-1} & 2 & a_{n-1} \\ & & & & 1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_0 \\ M_1 \\ \dots \\ M_{n-1} \\ M_n \end{pmatrix} = G$$

Якщо

$$\begin{pmatrix} 2 & 1 & & & & \\ u_1 & 2 & a_1 & & & \\ & & \dots & & & \\ & & & u_{n-1} & 2 & a_{n-1} \\ & & & & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

не сингулярна, то система рівнянь має єдине рішення.

Використовуючи метод «наздоганяю чого», можна отримати M_i ($i = 0, 1, 2, \dots, n$). Підставляючи M_i в рівняння (8), вираз апіорної щільності ймовірності $p(x)$:

$$p(x) = p_i(x), i = 1, 2, \dots, n$$

За формулою Байєса:

$$p(x, t_{k+1}/z_{k+1}) = \frac{p(z_{k+1}/x)p(x, t_{k+1}/z_k)}{\int_{\Omega} p(z_{k+1}/x)p(x, t_{k+1}/z_k) dx}$$

Де щільність ймовірності дорівнює

$$p(z_{k+1}/x) = \frac{\exp\left\{-\frac{1}{2}(z_k - h(x, t_k))^T R_k^{-1}(z_k - h(x, t_k))\right\}}{\sqrt{(2\pi)^m \det R_k}}$$

Підставляємо апіорну щільність ймовірності в формулу Байєса, щоб отримати апостеріорну щільність ймовірності:

$$p(x, t_{k+1}/z_{k+1}) = \frac{p(z_{k+1}/x)p_i(x)}{\int_{\Omega} p(z_{k+1}/x)p_i(x) dx}$$

$$x \in [x_{i-1}, x_i], i = 1, 2, \dots, n$$

Отримана апостеріорна щільність ймовірності $p(x, t_{k+1}/z_{k+1})$ також є кусковою функцією.

Висновки і перспективи подальших досліджень. У роботі здійснено дослідження застосування математичної моделі інтерполяції кубічним сплайном при автоматизації аеронавігаційної системи. У цій роботі на основі аеронавігаційної стохастичної диференціальної моделі доведено, що оптимальне рішення оцінки стану можна отримати за формулою Байєса, але перш за все необхідно знати попередню функцію щільності ймовірності стану системи та дослідити доцільність використання методу кубічного сплайну для його вирішення.

Удосконалено та запропоновано алгоритм інтерполяції кубічного сплайну, який перетворює часткові диференціальні рівняння щільності ймовірності стану в часі в рішення звичайного диференціала рівняння кускової функції та розв'язує стан системи в одновимірному просторі функцій.

Напрямки подальших досліджень ґрунтуються на доведенні розробленого алгоритму із застосування пакету прикладних програм для числового аналізу, а також мови програмування, що використовується в пакеті Matlab.

Список літератури:

1. Некрасова М.В. Гібридна інерціальна навігаційна система для об'єктів з високою кутовою динамікою. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.03 «Гіроскопи та навігаційні системи». – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», МОН України, Харків, 2019. – 134 с.
2. Касаткін М.В. Стохастичне моделювання сумісного прийняття рішень “екіпаж – керівник польотів” в особливому випадку в польоті. Системи озброєння і військова техніка. 2020. № 4(64). С. 67-74. <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.64.09>.
3. Крячок С. Врахування вимог ІКАО стосовно місцевості та перешкод у районах аеропорту для їх картографування та використання в геоінформаційних системах / С. Крячок, О. Бойко, Л. Мамонтова // Технічні науки та технології. – 2020. – № 3. – С. 301-309. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/tnt_2020_3_33.
4. Сплайн-функції та їх застосування / Б.П.Довгий, А.В.Ловейкін, Є.С.Вакал, Ю.Є.Вакал. – К.:Видавничо-поліграфічний центр “Київський університет”, 2016. – 117 с.
5. Кузьменко Н. С. Багатопараметричне відновлення даних у безпілотній авіаційній системі з багатоальтернативною класифікацією польотних ситуацій [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.13 / Кузьменко Наталія Сергіївна ; Нац. авіац. ун-т. – Київ, 2017. – 266 с
6. J. Cao, “A novel fixed point feedback approach studying the dynamical behaviors of standard logistic map,” *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 29, no. 1, 2019.
7. Y. Gao, “A hybrid method for mobile agent moving trajectory scheduling using ACO and PSO in WSNs,” *Sensors*, vol. 19, no. 3, 2019.
8. W. Deng, R. Yao, H. Zhao, X. Yang, and G. Li, “A novel intelligent diagnosis method using optimal LS-SVM with improved PSO algorithm,” *Soft Computing*, vol. 23, no. 7, pp. 2445–2462, 2019
9. S. Gülcü, M. Mahi, O. K. Baykan, and H. Kodaz, “A parallel cooperative hybrid method based on ant colony optimization and 3-Opt algorithm for solving traveling salesman problem,” *Soft Computing*, vol. 22, no. 5, pp. 1669–1685, 2018.
10. A. Nagra, F. Han, Q.-H. Ling, and S. Mehta, “An improved hybrid method combining gravitational search algorithm with dynamic multi swarm particle swarm optimization,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 50388–50399, 2019.
11. Wang, “A PSO based energy efficient coverage control algorithm for wireless sensor networks,” *Computers, Materials and Continua*, vol. 56, no. 3, pp. 433–446, 2018.
12. Sahu, P. B. Kumar, and D. R. Parhi, “An intelligent path planning approach for humanoid robots using adaptive particle swarm optimization,” *International Journal on Artificial Intelligence Tools*, vol. 27, no. 5, 2018.
13. F. Q. Lu, M. Huang, W. K. Ching, X. W. Wang, and X. L. Sun, “Multi-swarm particle swarm optimization based risk management model for virtual enterprise,” in *Proceedings of the first ACM/SIGEVO Summit on Genetic and Evolutionary Computation*, pp. 387–392, Shanghai, China, July 2019.
14. G. I. Sayed, G. Khoriba, and M. H. Haggag, “A novel chaotic salp swarm algorithm for global optimization and feature selection,” *Applied Intelligence*, vol. 48, no. 10, pp. 3

О. В. Верешко¹, Св.Св. Гомон²

Луцький національний технічний університет¹
Національний університет водного господарства та природокористування²

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ ГУСТИНИ ДЕРЕВИНИ ЛИСТЯНИХ ТА ХВОЙНИХ ПОРІД ПІД ДІЄЮ КИСЛОТНИХ СЕРЕДОВИЩ

В статті наведено методику експериментальних досліджень зміни густини деревини берези та сосни під впливом різних кислотних середовищ. Побудовано графіки зміни густини деревини з різним терміном просочення оцтовою, молочною та соляною кислотами. Проведено порівняння зміни густини зразків суцільної деревини берези та сосни в залежності від терміну просочення. Встановлено, що кислотне агресивне середовище збільшує густину усіх досліджуваних зразків, але із різною швидкістю.

Ключові слова: деревина, механічні властивості, густина, кислотне середовище.

О. В. Верешко, Св.Св. Гомон

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ ЛИСТВЕННЫХ И ХВОЙНЫХ ПОРОД ПОД ДЕЙСТВИЕМ КИСЛОТНЫХ СРЕД

В статье представлена методика экспериментальных исследований изменения плотности древесины березы и сосны под влиянием различных кислотных сред. Построены графики изменения плотности древесины с разными сроками пропитки уксусной, молочной и соляной кислотами. Произведено сравнение изменения плотности образцов сплошной древесины березы и сосны в зависимости от срока пропитки. Установлено, что кислотная агрессивная среда увеличивает плотность всех изучаемых образцов, но с разной скоростью.

Ключевые слова: древесина, механические свойства, плотность, кислотная среда.

O. V. Vereshko, S.S. Homon

INVESTIGATION OF CHANGES IN THE DENSITY OF DECIDUOUS AND CONIFEROUS WOOD UNDER THE INFLUENCE OF ACIDIC ENVIRONMENTS

The article presents a method of experimental studies of changes in the density of birch and pine wood under the influence of various acidic environments. Graphs of changes in wood density with different impregnation periods with acetic, lactic, and hydrochloric acids are plotted. Changes in the density of solid birch and pine wood samples depending on the impregnation period are compared. It was found that the acidic aggressive medium increases the density of all the studied samples, but at different rates.

During 28 days of acid impregnation, the density of solid wood increased from 1.4 to 1.9 times, depending on the type of wood and the influence of a certain acidic environment.

Key words: wood, mechanical properties, density, acidic environment.

Постановка проблеми. Деревина як об'єкт технологічної переробки та конструкційний матеріал відрізняється від інших матеріалів, що використовуються у промисловості та будівництві, виключно високою мінливістю своїх властивостей. Під мінливістю властивостей ми розуміємо не лише мінливість, яка пов'язана з умовами вирощування дерева та його генетикою, але і мінливість під дією різних змінних факторів – вологості, температури та інших. Особливо значним є вплив агресивного середовища на деревину – в результаті зволоження різними кислотами міцність деревини знижується на 40-70% у порівнянні із міцністю у абсолютно сухому стані. Внаслідок просочення листяних та хвойних порід деревини різними кислотами змінюються різні властивості деревини, в тому числі і густина, яка безпосередньо впливає на міцність деревини. Важливо вивчити зміну густини деревини листяних та хвойних порід експериментальним шляхом та в подальшому враховувати її при проектуванні деталей, матеріалів, виробів, елементів, конструкцій та їх роботи в таких середовищах.

Аналіз останніх досліджень. Дослідженню зміни основних механічних властивостей під дією різних агресивних середовищ присвячено велику кількість робіт [1-9], як правило, вони стосуються зміни міцнісних характеристик. Нами були проведено дослідження зміни міцнісних та деформівних показників під дією кислотних середовищ [10].

Дуже важливими дослідженнями є також зміна фізичних показників, в тому числі і густини, оскільки, густина є надійним показником її міцності та може використовуватися для оцінки ймовірних меж міцності чистої деревини.

Постановка завдання. Метою даної статті є дослідження впливу кислотного середовища (соляної, оцтової та молочної кислоти) на густину суцільної деревини берези та сосни.

Методика експериментальних досліджень. Для проведення експериментальних досліджень було виготовлено зразки у вигляді призми перерізом 30x30x120 мм 1 сорту суцільної деревини різних порід (об'ємом 108 см³) [11]. Для натурних випробувань вибрані деревина берези та сосни. Дані породи дерев вирощені в лісах Волинської області. Їх вік складав приблизно 60 років.

Виготовлення зразків проводили згідно діючих стандартів [12,13].

Після зрізу вибраних дерев стовбури транспортувались до столярних цехів та розрізались на бруси, з яких виготовлялись зразки для досліджень.

Деревина, яка піддавалась вимірюванням перед просочуванням різним рідинами мала стандартну вологість 12%. Заготовки деревини висушували у спеціальних сушильних камерах до даної вологості. Вологість деревини контролювалась за допомогою вологоміра MD-814. Зразки випилювали із заздалегідь заготовлених довгих брусків. Просочення дослідних зразків проводили наступними кислотами: оцтовою (9%), молочною (40%), соляною (15%) у скляній посудині (рис. 1). Проникнення рідин в товщу зразків виконували в посудині в горизонтальному положенні при повному зануренні в різні розчини. При цьому забезпечувався доступ кожного розчину до всіх сторін призми. Деревину просочували природним шляхом без додаткової стимуляції відповідно на протязі 1, 3, 7 годин, 1, 3, 7, 14, 21 та 28 діб. Після просочення кожен зразок зважували на електронних вагах з точністю до 0,01 гр та враховуючи зміну об'єму внаслідок зволоження визначали густину деревини (рис. 2).

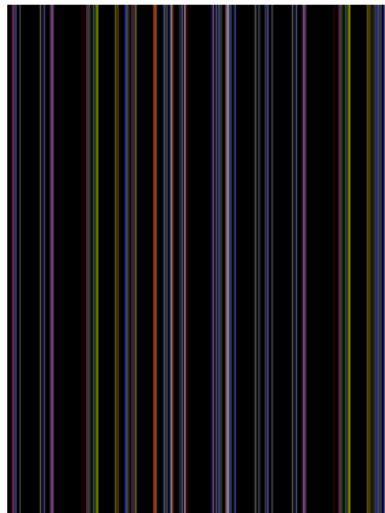


Рис. 1. Просочення деревини

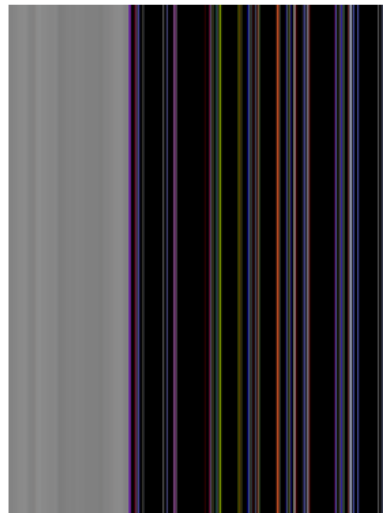


Рис. 2. Вимірювання ваги деревини

Результати досліджень та їх обговорення. На основі проведеного експерименту були отримані дані про густину деревини різного терміну просочення (табл. 1) та побудовані графіки зміни густини деревини берези та сосни під дією оцтової, молочної та соляної кислот (рис.3).

На даних діаграмах спостерігаємо постійне збільшення густини берези та сосни під впливом кислотного середовища. Це свідчить про те, що деревина під дією кислотних середовищ набирає вологу та збільшується по масі значно швидше ніж збільшується в об'ємі. Таким чином, густина берези та сосни постійно збільшується, при цьому зменшується її міцність.

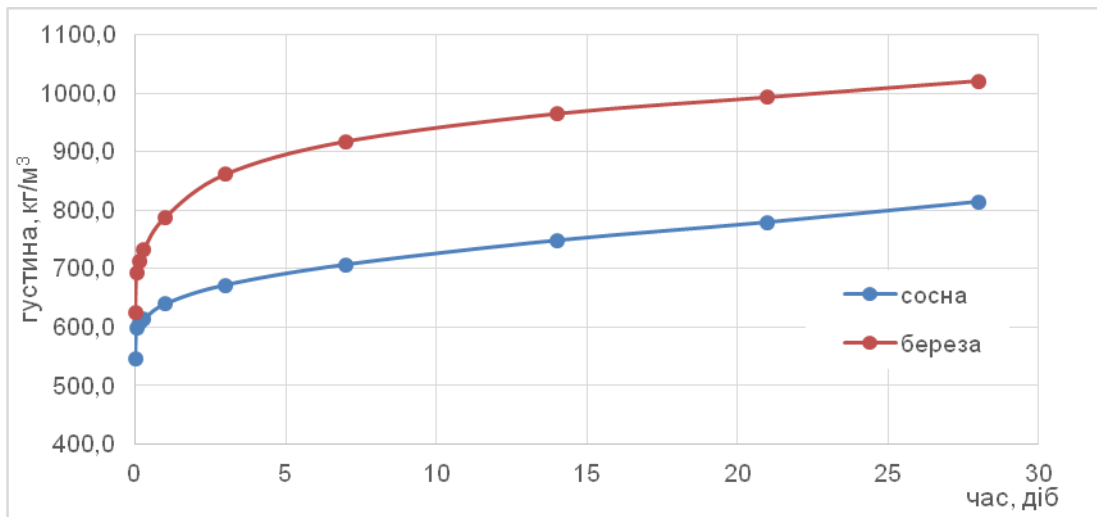
Аналізуючи рис. 3 та табл. 1, можна зробити висновок, що вплив кислотного середовища значно збільшує густину деревини берези та сосни, проте ці зміни у різних кислотних середовищах відбуваються дещо відмінно. Зокрема, внаслідок впливу оцтової кислоти (9 %) за 28 днів просочення густина сосни збільшилася у 1,5 рази, а густина берези – у 1,63 рази. При цьому, сосна набирає за першу добу 35% від досягнутої густини, а береза – понад 41% від досягнутої густини.

Внаслідок впливу молочної кислоти (40 %) за 28 днів просочення густина сосни збільшилася у 1,4 рази, а густина берези – у 1,7 рази. При цьому, сосна набирає за перших 7 годин 33,5% від досягнутої густини, а береза – понад 37% за першу добу від досягнутої густини.

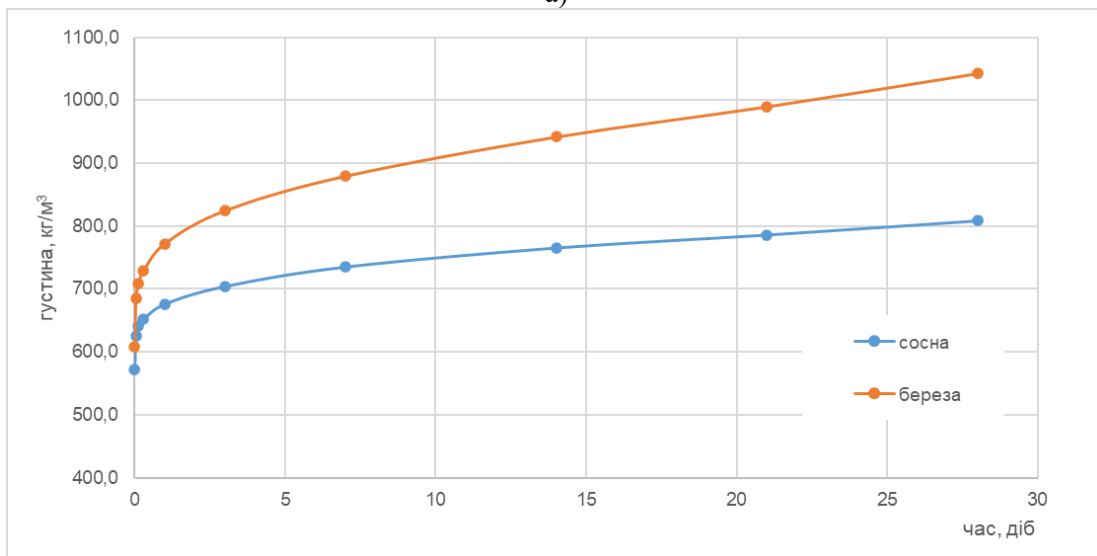
Табл. 1.

Зміна густини деревини під впливом кислотних середовищ

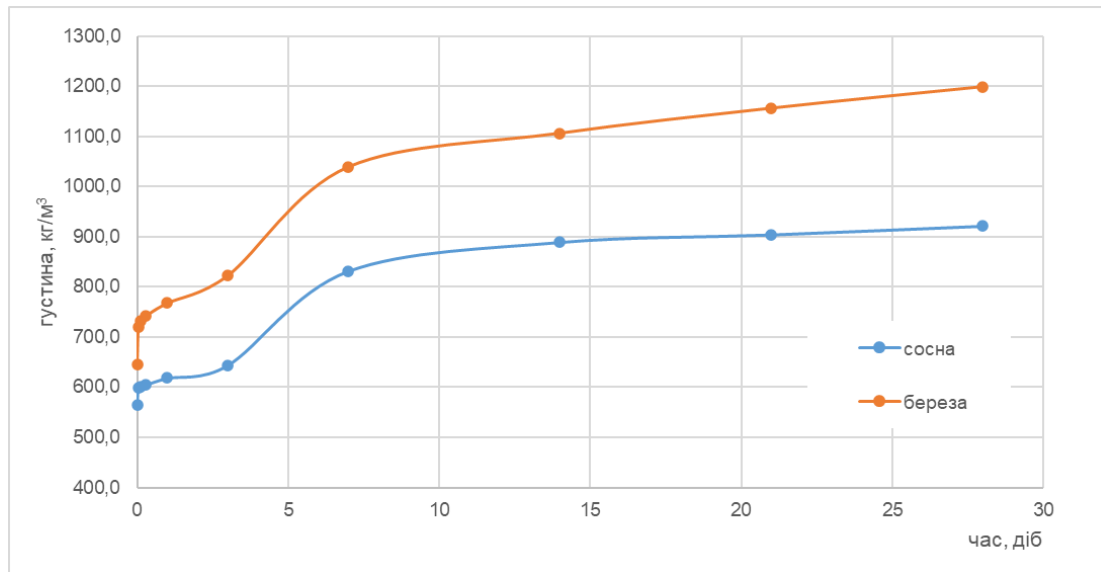
Час просочення	оцтова кислота		молочна кислота		соляна кислота	
	сосна	береза	сосна	береза	сосна	береза
	густина, кг/м ³	густина, кг/м ³	густина, кг/м ³	густина, кг/м ³	густина, кг/м ³	густина, кг/м ³
0	546,8	624,5	572,4	608,2	564,4	644,5
1 год	599,2	693,4	625,2	685,2	599,4	720,2
3 год	607,2	713,4	640,8	708,4	601,6	731,3
7 год	613,4	733,4	651,6	728,3	604,9	742,0
1 доба	639,5	788,2	675,9	771,8	618,3	767,7
3 доби	671,9	861,3	704,1	824,4	643,8	822,5
7 діб	706,9	917,4	735,0	879,4	831,6	1039,3
14 діб	748,1	964,7	765,5	941,9	889,1	1106,3
21 доба	779,2	992,9	786,1	990,1	904,0	1156,2
28 діб	814,2	1020,6	808,6	1042,9	921,3	1198,9



а)



б)



в)

Рис. 3. Графіки зміни густини деревини берези та сосни під дією: а) оцтової кислоти (9%); б) молочної кислоти (40%); в) соляної кислоти (15%)

Внаслідок впливу соляної кислоти (15 %) за 28 днів просочення густина сосни збільшилася у 1,6 рази, а густина берези – у 1,9 рази. При цьому, для обох досліджуваних видів деревини прослідковується певна закономірність: за перших годину обидва зразки набирають від 10 до 13 % досягнутої вологості. Після цього відбувається значне уповільнення зростання густини: за перших 3 дні сосна набирає 22 % досягнутої густини, а береза – 32 %. В період з 3 по 7 день просочення відбувається різке зростання густини – сосна та береза набирають до понад 70 % досягнутої густини.

Висновки. 1. Розроблено методику експериментальних досліджень суцільної деревини берези та сосни під впливом кислотного середовища для дослідження зміни густини.

2. Проведено експериментальні дослідження суцільної деревини берези та сосни під впливом різних кислотних середовищ з дослідження зміни густини.

3. Отримано експериментальні дані про зміну густини суцільної деревини сосни та берези під впливом кислотних середовищ (оцтової, молочної, та соляної кислот).

4. Встановлено, що густина суцільної деревини сосни та берези збільшуються в залежності від терміну просочення різними кислотними середовищами.

Список використаних джерел:

1. Mårtensson A. Mechanical behavior of wood exposed to humidity variations. Thesis, Report TVBK-1006, Lund Institute of Technology, Dept. Struct. Eng., Sweden, 1992. 189 p.

2. Madsen B. Recommended moisture adjustment factor for lumber stresses. Can. J. Civil Engineering. 1982. Vol. 9. №4. P. 602–610.

3. Гринкруг Н.В. Моделирование и расчет элементов деревянных конструкций при химических агрессивных воздействиях: дисс. канд. техн. наук, 05.23.01. Владивосток, 2004. 202 с.

4. Ванін С.И., Прикот Н.Г. Влияние кислот и щелочей на физико-механические свойства древесины. Труды ЛТА. Ленинград, 1947. Вып. 61. С. 55-90.

5. Сашин М.А. Прогнозирование и повышение долговечности и длительной прочности древесины в строительных изделиях и конструкциях: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.05. Тамбов, 2006. 182 с.

6. Ясній П.В., Гомон Св.Св. Експериментальні дослідження суцільної деревини конструкційних розмірів з врахуванням фактора вологості. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. Вінниця: ВНТУ, 2020. Том 28. №1. С. 41–48.

7. Гомон Св.Св., Сальчук В.Л., Верешко О.В. Прочностные и деформативные свойства увлажненной древесины. Eurasian scientific congress. Abstracts of the 8th International scientific and practical conference. Barca Academy Publishing. Barcelona, Spain. 2020. Pp. 136–139. URL: <https://sci->

conf.com.ua/viii-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-eurasian-scientific-congress-9-11-avgusta-2020-goda-barselona-ispaniya-arhiv/.

8. Ясній П.В., Гомон Св.Св., Дмитрук В.П. Міцність та деформівність деревини модрина з різним показником вологості за жорсткого режиму випробувань. SCIENCE, SOCIETY, EDUCATION: TOPICAL ISSUES AND DEVELOPMENT PROSPECTS. Abstracts of VI International Scientific and Practical Conference, Kharkiv, 10-12 May 2020. P. 319–322.

9. Ясній П.В., Гомон Св.Св. Динаміка зміни критичних деформацій деревини з різним показником вологості. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Рівне: НУВГП, 2021. Вип 40. С. 234-241.

10. Верешко О.В., Гомон Св.Св., Гомон Св.Ст., Довбенко Т.О. Деформівні показники деревини сосни та берези під дією кислотних середовищ. Наукові нотатки. Луцьк: ЛНТУ, 2021. №72. С. 175-179.

11. Гомон Св.Св., Савчук С.М., Верешко О.В., Кулаковський Л.Я. Методика експериментальних досліджень суцільної деревини на стиск уздовж волокон під впливом агресивного середовища. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Рівне: НУВГП, 2021. Вип. 39. С. 57–62.

12. ДСТУ 3129:2015. Деревина. Методи відбору зразків і загальні вимоги до фізико-механічних випробувань невеликих бездефектних зразків. Київ: Мінрегіон України, 2016. 9 с.

13. ДСТУ EN 380-2008. Лісоматеріали конструкційні. Загальні настанови щодо методів випробування на статичне навантаження. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 8с.

УДК: 620.22: 669.017

DOI 10.36910/775.24153966.2022.73.39

Ю.Ю. Жигуц¹, В.Д. Рудь², Я.П. Легета¹*ДВНЗ «Ужгородський національний університет»¹
Луцький національний технічний університет²***ОСОБЛИВОСТІ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТЕРМІТНИХ ХРОМОКРЕМНІЄВИХ СТАЛЕЙ**

У роботі розглянуто синтез високолегованих термітних хромокремнієвих сталей на основі порошкових матеріалів. Розглянуто вплив особливостей термітного синтезу на властивості синтезованих матеріалів і на особливості їх хімічного складу. Компонування металотермічної шихти надало змогу синтезувати висококремнієві сталі – аналоги промислових сталей 4X10C2M та 3X13H7C2. Авторами встановлені для термітних силхромів залежності границі міцності на розтяг, умовної границі текучості при допуску на пластичну деформацію 0,2% та границі повзучості, а також зміни витривалої міцності від температури. Отримані результати дослідження способу синтезу та властивостей термітних силхромів призводять до суттєвого розширення можливих областей їх використання.

Ключові слова: термітні сталі, властивості, силхроми, металотермія, синтез, залежності, структура.

Ю.Ю. Жигуц, В.Д. Рудь, Я.П. Легета

ОСОБЕННОСТИ СВОЙСТВ ТЕРМИТНЫХ ХРОМОКРЕМНИЕВЫХ СТАЛЕЙ

В работе рассмотрено синтез высоколегированных термитных хромокремниевых сталей на основе порошковых материалов. Рассмотрено влияние особенностей термитного синтеза на свойства синтезируемых материалов и особенности их химического состава. Компонировка металлотермической шихты позволила синтезировать высококремниевые стали – аналоги промышленных сталей 4X10C2M и 3X13H7C2. Авторами установлены для термитных силхромов зависимости предела прочности на растяжение, условной границы текучести при допуске на пластическую деформацию 0,2% и предела ползучести, а также изменения выносливой прочности от температуры. Полученные результаты исследования способа синтеза и свойств термитных силхромов приводят к существенному расширению возможных областей их использования.

Ключевые слова: термитные стали, свойства, силхромы, металлотермия, синтез, зависимости, структура.

Yu. Zhiguts, V. Rudj, Ya. Legeta

FEATURES OF PROPERTIES OF TERMITIC CHROME-SILICON STEELS STEEL

The work describes the synthesis of high-alloy thermal chromium-silicon steels based on powder materials. It is looked at the infusion of the features of thermite synthesis on the power of synthesizing materials and on the features of their chemical warehouse. The composition of the metallothermic charge gave the ability to synthesize high-silver steels – analogues of industrial steels "4X10C2M" and "3X13H7C2" The authors defined for thermite silicochromes the dependences of the tensile strength, conditional yield strength with a plastic deformation tolerance of 0.2% and creep strength, as well as changes in endurance strength with temperature. The obtained results of the study of the method of synthesis and properties of thermite silicochromes lead to a significant expansion of the possible areas of their use.

Key words: thermal steel, dominance, silicochrome, metallothermy, synthesis, fallow, structure.

Introduction. It is known that industrial chromium-silicon steels, so-called silicochromes, are most often used to manufacture valves for reciprocating engines, diesels, and heat-resistant material of heat exchangers for heating air, recuperators, grate [1,2], and others. A detailed study of the problem of creating new materials and improving the properties of traditional indicates that it can be solved by using special synthesized alloys obtained by thermite [3] and combined (self-propagating high-temperature synthesis [4] and metallothermy) processes.

Such technologies differ from traditional ones in several obvious advantages: no need for power sources of electricity; the possibility of using simple, cheap equipment; high productivity of the process (the time of synthesis of the alloy can last only a few minutes); the possibility of using secondary production waste, namely grinding graphite electrodes, aluminium or magnesium shavings, iron scale [5], etc.

Formulation of the problem. Despite these advantages, significant limitations for the use of these technologies are the lack of developed compositions of charges for thermite synthesis of high-alloy silicon steels and new properties of the synthesized materials. All this has caused an urgent need to conduct a series of studies to establish the performance properties of high-silicon steels – analogues of industrial steels "4X10S2M" and "3X13H7C2".

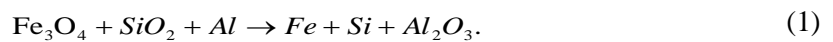
The aim of the study. The aim of the study was to establish the composition of metallothermic mixtures for thermite synthesis of high-silicon steels – analogues of industrial steels "4X10S2M" and "3X13H7C2", research and analysis of service properties of the obtained silicochromes.

Materials and methods of the experiment. In performing the work were used materials: soot (carbon black "TU 14-7-24-80"), aluminium powder PA-3–PA-4 "GOST 6058-73", iron scale with average chemical composition (in wt.%): 0,05 C; Cr_2O_3 – 36.4; Fe_2O_3 and FeO – 19.9 (at a ratio of 50% Fe_2O_3 to 50% FeO); CaO – 5.4; 0.10–0.35 Si; 0.10–0.35 Mn; 0.01–0.03 S; 0.01–0.03 P; other non-reducing compounds – the rest.

The powder metal-thermal charge with a dispersion of 5 to 100 μm was dried, mixed, compacted, and then placed in a metallothermic crucible. Sections for metallographic analysis were made from used samples for tensile testing.

In the developed synthesis technology, powdered ingredients of the charge were filled into the metal-thermal reactor, which was ignited with a special fuse. To determine the mass of the ingot and the yield of the alloy from the charge at the first stage of the study was micro-fused at a mass of 100-150 g in a metal crucible. The combustion process was initiated by a special titanium igniter made of titanium chemical powder "ПХ-2 ТУ 48-10-78-83".

Obtaining high-silicon steels by metallothermic using powdered ingredients for the composition of the charge was performed according to the scheme:



After determining the composition of the charge according to the stoichiometric coefficients of the chemical reaction and its correction by the coefficients of assimilation of the components [4,6], the adiabatic combustion temperature of the metallothermic reaction was calculated.

In order to reduce the impact of high temperature on the thermite metal and to eliminate the associated high porosity and shrinkage in the castings, the charge was incorporated with inert impurities - grinding chips of the corresponding steel and ferroalloys. In order to increase the stability of combustion and improve the kinetic characteristics of the reaction, 1-2% (by weight of the charge) fluorspar CaF_2 was also added to the charge, which not only reduced the ignition temperature of the exothermic powder mixture but also increased steel yield.

Theoretical and experimental research. In thermite silicochromes, a significant content of silicon leads to an increase in the ferrite region and a decrease in austenite on the state diagram. This contributes to the fact that even for medium-carbon steels, semi-ferrite steels are formed at more than 6% chromium, and ferritic steels increase with the increasing silicon content. Unfortunately, ferrite thermite steels are very prone to grain growth at high temperatures, which directly affects their high brittleness and, as a consequence, unsuitability for further pressure treatment.

A microstructural study of one of the synthesized thermite steels, namely, an analogue of the industrial brand "4X9C2", revealed a martensitic structure. It is known that in the metallothermic synthesis of materials there are high cooling rates [2], which leads to the formation of martensitic structure. The study found that the critical points A_3 and A_{ST} for thermite silicochromes are at the level of 1000°C.

When magnesite is used for lining the reactor and the heat dissipation is reduced and the cooling rate of the alloy is slowed down in the temperature range of 450–600°C, complex carbides such as cementite $(\text{Fe,Mn})_3\text{C}$, etc and this gives the alloy considerable brittleness and significantly reduces the toughness.

One of the tasks of the study was to establish the mechanical properties of thermite silicochromes and their dependence on temperature. The results of the study are shown in Fig. 1 and 2. A characteristic feature of thermite silicochromes, analogs of industrial steels "4X10C2H" and "3X13H7C2", is that these steels quickly lose strength (σ_b) with increasing temperature, conditional yield strength when allowed for plastic deformation of 0.2% ($\sigma_{0.2}$), the limit of endurance strength (σ_{10^3} , σ_{10^4} , and σ_{10^5}) and relative elongation (δ), and relative constriction (ψ), toughness (a_n) show a complex dependence with increasing temperature, shown in Fig. 2.

In continuation of the study of thermite silicochromes, the dependence of the tensile strength limit σ_{10^2} with increasing temperature was established. Thus, σ_{10^2} for the thermite analog of steel "4X10C2M" at 900°C is 32 MPa (Fig. 3). Both grades of thermite silicochromes after hardening have a hardness in the range of 50-55 HRC.

Analysis of the obtained experimental data confirms that the high content of chromium in thermite steel, which is a thermite analogue of the industrial brand "3X13H7C2", has greater resistance to oxidation at high temperatures, and with increasing carbon and nickel in its composition – higher heat resistance compared to industrial steel "4X9C2" and still worse than austenitic steels.

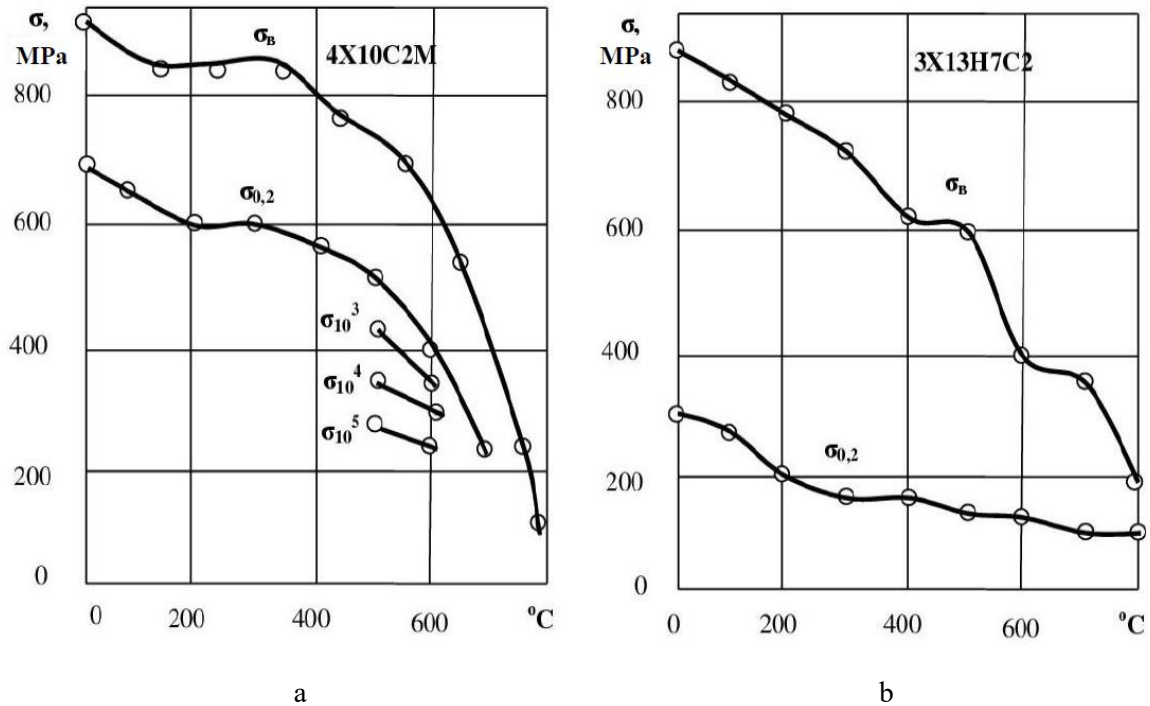


Fig. 1. Dependence of tensile strength (σ_b), conditional yield strength at tolerance to plastic deformation of 0.2% ($\sigma_{0,2}$) and creep limit (σ_{10^3} , σ_{10^4} , and σ_{10^5}) of thermite silicochromes on temperature: a – for thermite analogue of steel "4X10C2M"; b – for the thermite analogue of steel "3X13H7C2"

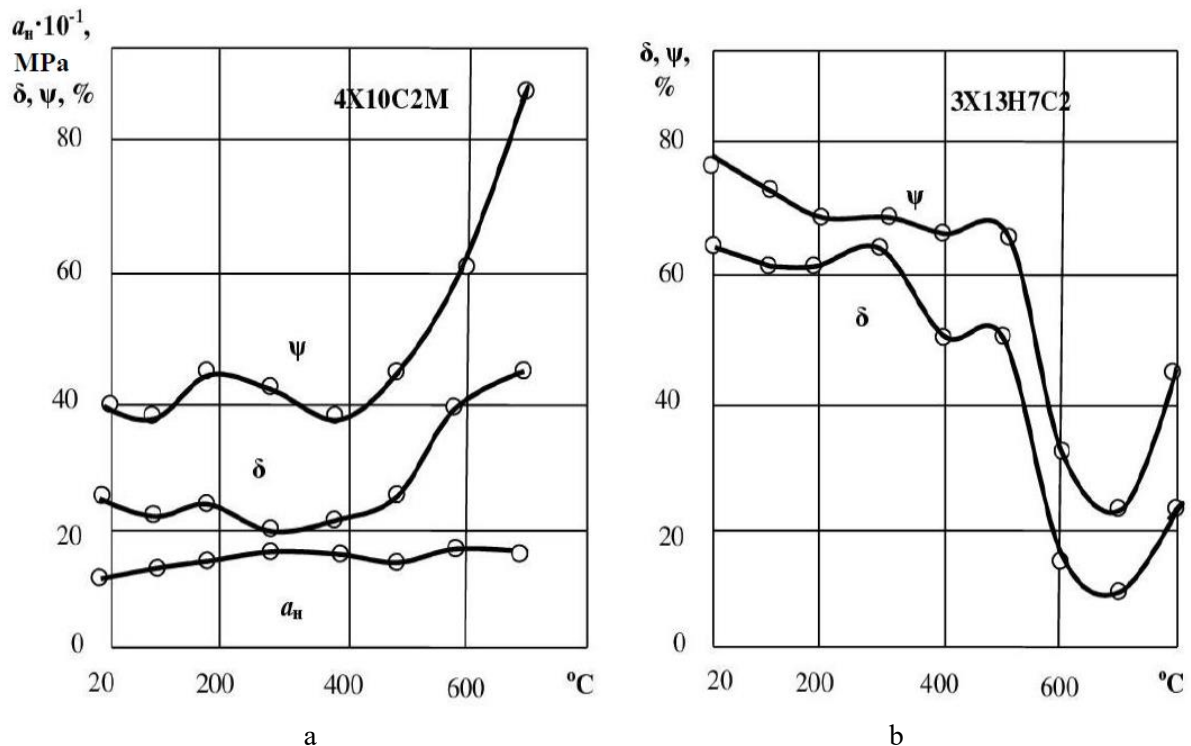


Fig. 2. Dependence of relative ductility (δ) and constriction (ψ) and toughness (a_n) of thermite sylicochromes on temperature: a – for thermite analogue of steel "4X10C2M"; b – for the thermite analogue of steel "3X13H7C2"

During the cooling process, thermite sylicochromes detect a linear shrinkage of 51–58 μm for every 25 mm of length, or 2.0–2.3%. According to the coefficient of linear expansion, these steels occupy an intermediate position between austenitic and martensitic steels.

Discussion of research results. Thus, it can be reasonably stated that the synthesized thermite sylchromes are not worse than industrial sylicochromes in terms of basic properties (σ_b , $\sigma_{0.2}$, σ_{10^3} , σ_{10^4} , σ_{10^5} , a_n , δ , ψ).

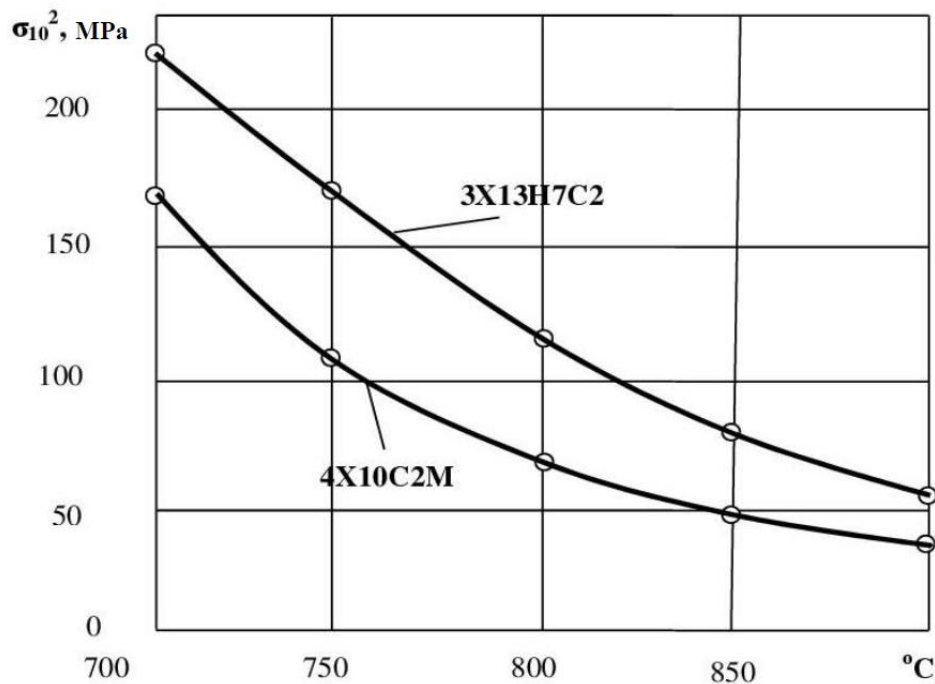


Fig. 3. Change in endurance strength (σ_{10^2}) with increasing temperature for analogue steels "4X10C2M" and "3X13H7C2"

The conducted experimental work speaks of significant prospects for the use of powder materials for the synthesis of alloys. Given that the method of manufacturing these alloys has full autonomy, namely, does not require power sources, or complex equipment (synthesis devices that maintain the required temperature, pressure, and ratio of reactive components), it can be widely used in non-specialized production and other industries. The advantages of the proposed method of synthesis of high-alloy chrome-plated steel and the composition of the exothermic charge make it possible to obtain repair casting of these steels in workshops and other production facilities not adapted to conventional methods of melting steel; gradient.

When considering the economic effect of the introduction of metal-thermite melting technologies, it is necessary to take into account the environmental effect associated with reducing the duration of the casting process, the use of industrial waste, reducing emissions of gases formed during metal melting; reduction of areas used in production for storage of industrial waste.

Conclusions. 1. As a result of the conducted research works, high-alloy steels analogues of industrial grades "4X10C2M" and "3X13H7C2" were smelted in a thermite way. 2. The technique of composition of metal-thermal mix for synthesis of the specified steels is developed. 3. The composition of the charge for the synthesis of thermite analogues of steels "4X10C2M" and "3X13H7C2" is established. 4. The authors identified the features of the microstructure of the studied steels. 5. The study of the properties of these thermite alloys showed that they differ from similar traditional alloys due to high combustion temperatures of mixtures, the specific method of reaction of charge components, and microalloying with aluminium powder. 6. Perspective directions of continuation of research of thermite steels and areas of their most expedient use are revealed. 7. The authors established the service properties of silicochromes σ_b , $\sigma_{0.2}$, a_n , ψ , δ and their dependence on temperature.

Список використаних джерел:

1. Солнцев, Ю. П. Материаловедение [Текст] / Ю. П. Солнцев, Е. И. Прякин. – М. : Химиздат, 2007. – 784.
2. Жигуц, Ю.Ю. Технології отримання та особливості сплавів синтезованих комбінованими процесами [Текст] / Ю.Ю. Жигуц, В.Ф. Лазар. — Ужгород : Видавництво «Інвазор», 2014. – 388 с.
3. Фасонное литье из термитной стали [Текст] / Золковер М.З., Гридунов А.С., Быльницкий-Бируля С.О. и др. – М.: Дориздат. – 1950. – 48 с.
4. Жигуц Ю.Ю., Рудь В.Д., Кляп М.М. Методика термохімічних розрахунків для встановлення складу екзотермічних шихт // Міжвузівський збірник Луцького національного технічного університету «Наукові нотатки». – 2017. – № 58. – С. 162 - 167.
5. Zhiguts Yu., Kozar O. New combined technologies of synthesis materials / Advanced technologies in education, industry and the environment. Monograph: edited by Olga Paraska, Norbert Radek, Oleg Synyuk – 2020. – P. 33-46.
6. Zhiguts Yu. Kozar O. New technologies synthesis of special cast irons for high temperatures / Actual problems of modern science. Monograph: edited by Matiukh S., Skyba M., Musial J., Polishchuk O. – 2021. – P. 708-714

Рецензент проф., док. фіз.-мат. наук,
директор Ужгородського науково-технологічного
центру матеріалів оптичних носіїв інформації
інституту проблем реєстрації інформації
НАН України

Рубіш Василь Михайлович

УДК 631.35:633.521

DOI 10.36910/775.24153966.2022.73.40

О.О. Чайка, Н.О. Толстушко, М.М. Толстушко*Луцький національний технічний університет***АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ПІДБИРАННЯ СТЕБЛОВОЇ СТРІЧКИ ЛЬОНУ НА ЛЬОНОВИЩІ**

В статті наведено результати аналізу процесу підбирання стеблової стрічки льону на льоновіщі за допомогою льонозбиральної машини з комбінованим підбирачем, який містить робочі органи у вигляді пальців. Встановлено аналітичні залежності для обґрунтування режимів роботи і параметрів робочих органів удосконаленого комбінованого підбирача льонозбиральної машини.

Ключові слова: льонозбиральна машина, підбирач, палець, підбирання, відривання, льоновіще, стрічка стебел льону.

А.А. Чайка, Н.А. Толстушко, Н.Н. Толстушко**АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ПОДБОРА СТЕБЛЕВОЙ ЛЕНТЫ ЛЬНА НА ЛЬНИЩЕ**

В статье приведены результаты анализа процесса подбора стеблевой ленты льна на льнище с помощью льноуборочной машины с комбинированным подборщиком, содержащим рабочие органы в виде пальцев. Установлены аналитические зависимости для обоснования режимов работы и параметров рабочих органов усовершенствованного комбинированного подборщика льноуборочной машины.

Ключевые слова: льноуборочная машина, подборщик, палец, подбор, отрыв, льнище, лента стеблей льна.

O.O. Chaika, N.O. Tolstushko, M.M. Tolstushko**ANALYSIS OF THE PROCESS OF SELECTING FLAX STEM TAPE IN THE FIELD**

The article presents the results of the analysis of the process of selection of flax stem tape on flax with the help of a flax harvester with a combined sorter, which contains working organs in the form of fingers. Analytical dependences for substantiation of operating modes and parameters of working bodies of the advanced combined flax harvester are established. To prepare flaxseed in the field under adverse weather conditions, the stem tape is placed by a flax harvester on the wet vegetation of the flaxseed, where it dries with it and germinates with grass and weeds while lying on the flaxseed. As a result of curing, the stem tape seems to stick to the flaxseed, which creates certain difficulties during its mechanized lifting, because first the stem tape must be torn off from such a surface. This process is often accompanied by significant damage and loss of flax. Due to the study of the process of picking the stem belt on flax, it is possible to systematically improve the pickers of flax harvesters.

Key words: flax harvester, pick-up, finger, picking, tearing, field, tape of flax stalks.

Постановка проблеми. Одним із важливих завдань льонарства є підвищення якості підбирання стеблової стрічки льону на основі розроблення принципово нових та вдосконалення відомих робочих органів льонозбиральних машин [1-5]. Для приготування лляної трести в польових умовах за несприятливих погодних умов стеблова стрічка вкладається льонозбиральною машиною на вологий рослинний покрив льоновіща, де підсихає разом з ним і під час вилежування на льоновіщі проростає травою та бур'янами. У результаті вилежування стеблова стрічка ніби прилипає до льоновіща, що створює певні труднощі під час її механізованого піднімання, адже спочатку стеблову стрічку необхідно відірвати від такої поверхні. Часто цей процес супроводжується значними пошкодженнями і втратами льоносировини. Якісне виконання такого завдання повинно забезпечуватись підбиральним апаратом або підбирачем льонозбиральних машин. Переважно такі машини містять робочі органи у вигляді пальців, які рухаються та взаємодіючи з розстеленою стебловою стрічкою на льоновіщі відривають її від рослинного покриву. При цьому долаються сили зчеплення стеблової стрічки з льоновіщем. Завдяки вивченню процесу підбирання стеблової стрічки на льоновіщі можливе системне удосконалення підбирачів льонозбиральних машин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні відомо багато робіт присвячених процесам підбирання стеблових стрічок льону [1-7], але поряд з цим недостатньо досліджено функціонування підбирачів льонозбиральних машин у складних умовах роботи, особливо за несприятливих погодних умов або змінних характеристиках льоновіща та стеблових стрічок. Під час роботи льонозбиральних машин часто змінюється їх швидкість руху, відбуваються зупинки, але дослідники переважно розглядали усталений режим роботи машин зі сталою швидкістю руху. У багатьох працях дослідників явище відривання стеблової стрічки від поверхні льоновіща залишилось поза увагою, а за прийнятих допущень льонозбиральна машина рухалась рівномірно, поступально та прямолінійно.

Постановка завдань. Мета дослідження – проаналізувати підбирання стеблової стрічки підбирачем льонозбиральної машини і встановити залежності для обґрунтування його параметрів.

Викладення основного матеріалу. На рис. 1 представлена схема для аналізу процесу підбирання стеблової стрічки льону на льоновищі. Тут палець підбирача обертається навколо осі, яка проходить через точку O_n перпендикулярно площині руху льонозбиральної машини. Льонозбиральна машина з підбирачем рухається поступально та прямолінійно зі змінною швидкістю v_n , причому напрям руху машини і напрям обертання пальця підбирача показано на рисунку. Вздовж пальця підбирача проведена вісь $O_n\xi$, а сам палець обертається у вертикальній площині з кутовою швидкістю ω_n та кутовим прискоренням ε_n . Положення пальця підбирача від нижнього вертикального положення визначається кутом φ . На пальці підбирача знаходиться елемент стеблової стрічки C у вигляді групи стебел, яку будемо розглядати як матеріальну точку масою m_{cm} .

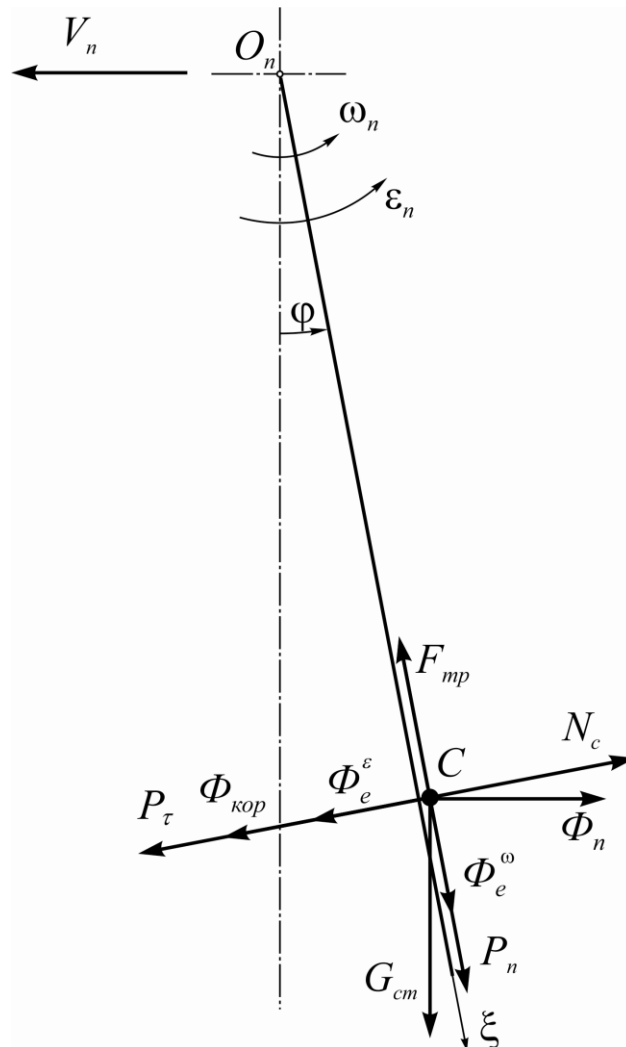


Рис. 1. Схема для аналізу процесу підбирання стеблової стрічки льону на льоновищі

Розглянемо взаємодію елемента стеблової стрічки C з пальцем підбирача льонозбиральної машини. Використаємо тут диференціальне рівняння відносного руху матеріальної точки [8], яке у векторній формі в нашому випадку має такий вигляд:

$$m_{cm} \cdot \vec{a}_r = \vec{F} + \vec{R} + \vec{\Phi}_e + \vec{\Phi}_{кор}, \quad (1)$$

де \vec{a}_r – відносне прискорення елемента стеблової стрічки C ;

\vec{F} – векторна сума діючих активних сил на елемент стеблової стрічки C ;

\vec{R} – векторна сума реакцій в'язей, які накладені на елемент стеблової стрічки C зі сторони пальця;

$\vec{\Phi}_e$ – переносна сила інерції;

$\vec{\Phi}_{кор}$ – коріолісова сила інерції.

З активних сил на елемент стеблової стрічки C діють: сила ваги $G_{cm} = m_{cm} \cdot g$ (де g – прискорення вільного падіння), сила P зчеплення стебел між собою у стрічці та з рослинним покривом льоновища. Сила P залежить від характеристик стеблової стрічки, льоновища, а також кута повороту пальця φ . Силу P представимо у вигляді двох складових P_n та P_τ (рис.). Причому складова P_n напрямлена вздовж пальця, а складова P_τ напрямлена перпендикулярно пальцю. Оскільки силу P будемо вважати силою корисного (технологічного) опору, тому напрям її складових P_n та P_τ вибрано саме з цих міркувань. Значення P_n та P_τ будемо визначати експериментально.

Зі сторони пальця підбирача на елемент стеблової стрічки C діють: нормальна реакція N_c , сила тертя ковзання $F_{mp} = f \cdot N_c$, де f – коефіцієнт тертя ковзання стеблової стрічки льону на поверхні пальця підбирача.

Переносну силу інерції Φ_e представимо у вигляді трьох складових Φ_n , Φ_e^ω та Φ_e^ε (рис.). Складова $\Phi_n = m_{cm} \cdot \frac{dv_n}{dt}$ виникає внаслідок змінної швидкості v_n льонозбиральної машини під час підбирання стеблової стрічки з урахуванням прийнятих вище допущень. Складова $\Phi_e^\omega = m_{cm} \cdot \omega_n^2 \cdot \xi$, де ξ – координата точки C (відстань $O_n C$), а складова $\Phi_e^\varepsilon = m_{cm} \cdot \varepsilon_n \cdot \xi$. Тут кутова швидкість $\omega_n = \frac{d\varphi}{dt}$, а кутове прискорення $\varepsilon_n = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$.

$$\text{Коріолісова сила інерції } \Phi_{кор} = 2 \cdot m_{cm} \cdot \omega_n \cdot \frac{d\xi}{dt}.$$

Рівняння (1) в проекції на вісь $O_n \xi$, з урахуванням вищезгаданих сил, матиме вигляд:

$$m_{cm} \cdot \frac{d^2\xi}{dt^2} = G_{cm} \cdot \cos \varphi + P_n - F_{mp} + \Phi_n \cdot \sin \varphi + \Phi_e^\omega. \quad (2)$$

Силу N_c визначимо з умови безвідривного руху елемента стеблової стрічки C на пальці підбирача:

$$N_c = G_{cm} \cdot \sin \varphi + P_\tau - \Phi_n \cdot \cos \varphi + \Phi_e^\varepsilon + \Phi_{кор}. \quad (3)$$

Після підстановки у рівняння (2) усіх величин і спрощення, отримаємо:

$$\frac{d^2\xi}{dt^2} = -2 \cdot f \cdot \frac{d\varphi}{dt} \cdot \frac{d\xi}{dt} + \left(\left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 - f \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} \right) \cdot \xi + \frac{dv_n}{dt} \cdot (\sin\varphi + f \cdot \cos\varphi) + g \cdot (\cos\varphi - f \cdot \sin\varphi) + \frac{P_n - f \cdot P_\tau}{m_{cm}}. \quad (4)$$

Отримане диференційне рівняння (4) за прийнятих вище допущень описує взаємодію пальця підбирача льонозбиральної машини зі стебловою стрічкою льону під час виконання процесу її підбирання на льоновищі. Це рівняння дає можливість проаналізувати таку взаємодію під час різних режимів роботи підбирача льонозбиральної машини.

Висновки. Для обґрунтування параметрів і режимів роботи робочих органів комбінованого підбирача льонозбиральної машини розроблена програма на ПЕОМ в системі Maple V, яка дозволяє проаналізувати вплив багатьох факторів на переміщення стеблової стрічки льону під час її підбирання в різних умовах збирання.

Список використаних джерел

1. Шейченко В. О., Хайліс Г. А. Теорія і розрахунок апаратів для підбирання та обертання : монографія. Ніжин : Видавець ПП Лисенко М. М., 2014. 240 с.
2. Дідух В. Ф., Ковалишин С. Й., Дударєв І. М., Тараймович І. В. Технології вирощування, збирання та переробки льону-довгунця : навч. посіб. Львів : Львівський НАУ, 2013. 324 с.
3. Толстушко Н. О., Хайліс Г. А., Толстушко М. М. Рулонні прес-підбирачі : монографія. Луцьк : ІВВ Луцького НТУ, 2018. 164 с.
4. Цикалюк Ю. О. Вдосконалення підбирачів стебел льону: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.05.11. Луцьк, 2001. 19 с.
5. Чайка О. О., Толстушко Н. О., Толстушко М. М., Сацюк В. В., Булік Ю. В. Аналіз конструкцій та роботи підбиральних апаратів машин для збирання льону. Наукові нотатки. Міжвузівський збірник наук. праць. 2021. Вип. 71. С. 348 – 352.
6. Хайліс Г. А., Волошин В. І., Толстушко М. М. Аналіз роботи розпушувача стеблової стрічки льону. Сільськогосподарські машини. Зб. наук. ст. 2006. Вип. 14. С. 202 – 209.
7. Хайліс Г. А., Волошин В. І., Толстушко М. М. Аналіз взаємодії пальців розпушувача зі стеблами стрічки льону. Науковий вісник Національного аграрного університету. 2007. Вип. 115. С. 214 – 220.
8. Павловський М. А. Теоретична механіка : підручник. Київ : Техніка, 2004. 512 с.

Рецензент Дідух Володимир Федорович, завідувач кафедри аграрної інженерії імені професора Г.А. Хайліса Луцького національного технічного університету, доктор технічних наук, професор, Заслужений діяч науки і техніки України.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАННЯ СТАТЕЙ

Стаття надсилається до редакції збірника у паперовому варіанті з підписами авторів на адресу: 43018, м. Луцьк, вул. Львівська 75, Луцький НТУ; в електронному вигляді у форматі MS WORD – на електронну адресу: naukovi_notatki@lutsk-ntu.com.ua. Обидва варіанти повинні бути ідентичними.

Наукова стаття обов'язково повинна мати наступні необхідні елементи: постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття; формулювання цілей статті; виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки з даного дослідження і перспективи подальших досліджень у даному напрямку.

1. **Статтю можна подавати українською, російською, або англійською мовою.** Стаття повинна бути набрана у текстовому редакторі не нижче MS WORD 97/03 і надрукована тільки на лазерному або струйному принтері на білих листах формату А4 (297x210 мм). Нумерацію сторінок не виконувати. Обсяг статті від 4-9 сторінок.
2. Параметри сторінки: верхнє, нижнє та ліве поле – 2 см, праве поле 2,5 см. Від краю до колонтитула верхнього – 1,25 см, нижнього – 1,25 см.
3. Шапка статті: індекс УДК, ініціали та прізвища авторів розміщується на один абзац нижче шрифтом 11 пт, назва організації – набираються з нового рядка шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюються по центру. Назва статті розміщується на один абзац нижче назви організації, набирається шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з напівжирним виділенням і вирівнюється по центру.
4. **Анотації** українською, російською та англійською мовами набираються з абзацного відступу шрифтом Time New Roman Cyr розміром 9, курсив, напівжирний 300-500 друкованих знаків з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюються по ширині; англійською мовами розширена анотація 700-1000 друкованих знаків.
5. Нижче анотацій обов'язково вказуються ключові слова шрифтом Time New Roman Cyr, курсив, напівжирний 9 пт.
6. Основний текст розміщується на 1 см нижче анотацій, набирається з абзацного відступу 1 см шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюється по ширині.
7. Для набирання формул застосовувати редактор формул MS WORD (використовувати шрифти: Symbol, Time New Roman Cyr; розміри шрифтів: звичайний 12 пт, крупний індекс 7 пт, дрібний індекс 5 пт, крупний символ 18 пт, дрібний символ 12 пт). Формула вирівнюється по центру і не повинна займати більше 5/6 ширини рядка.
8. Якщо в статті присутні ілюстрації, необхідно розташовувати їх по тексту, вирівнюючи підписи (*Рис. 1. Схема ...*) по ширині з абзацного відступу 1 см. Другий екземпляр ілюстрації необхідно подати на окремому листі. Ілюстрації повинні бути чіткими та контрастними.
9. Таблиці розташовувати по тексту, причому їх ширина повинна бути на 1 см менша ширини рядка. Над таблицею поставити її порядковий номер (*Таблиця 1*) вирівнюючи по правому краю, під яким розмістити назву таблиці вирівнюючи по центру.

10. Література подається загальним списком в кінці рукопису згідно з вимогами державного стандарту через 1 см від останнього рядка.
11. **Обов'язково** подати статтю. на лазерному диску. Статті можна також пересилати електронною поштою за такою адресою: **naukovi_notatki@lutsk-ntu.com.ua**
12. До статті **обов'язково** додається **рецензія** від провідного вченого за науковим спрямуванням статті та **авторська довідка** у письмовому та електронному вигляді за вказаною формою:

Прізвище, Ім'я, По-батькові

Місце роботи, посада, науковий ступінь, вчене звання

Наукові інтереси, ORCID

Назва статті та особисті підписи усіх авторів

Адреса для листування, телефон, e-mail, контактну особу

14. В кінці статті обов'язково вказуються ПІБ, посаду, науковий ступінь, вчене звання рецензента статті.
15. Рукописи, що не відповідають вище вказаним вимогам, не розглядаються і до друку не приймаються.

ЗРАЗОК ОФОРМЛЕННЯ СТАТТІ

УДК: 620.179.16

І.І. Іванов¹, П.П. Петров²*Луцький національний технічний університет¹**Тернопільський національний технічний університет²***НАБЛИЖЕНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ОСІ КОНОЇДА, ПРЕДСТАВЛЕНОГО ДИСКРЕТНИМ
КАРКАСОМ ТВІРНИХ***Розроблено алгоритм наближеного визначення осі коноїда, представленого дискретним каркасом спільних твірних.**Ключові слова: вісь коноїда, дискретний каркас, твірна.***И.И. Иванов, П.П. Петров****ПРИБЛИЖЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСИ КОНОИДА, ПРЕДСТАВЛЕННОГО
ДИСКРЕТНЫМ КАРКАСОМ ОБРАЗУЮЩИХ***Разработан алгоритм приближенного определения оси коноида, представленного дискретным каркасом общин образующих.**Ключевые слова: ось коноида, дискретный каркас, образующая.***I. Ivanov, P. Petrov****AXIS APPROXIMATE DEFINITION OF CONOID DESCRIBED BY THE SET OF STRAIGHT
LINES***The algorithm of axis approximate definition of conoid described by the set of straight lines is made. The approximate conoid axis is a lane. Conoid is created by straight lines.**Keywords: conoid axis, discretely carcass of straight lines.***Постановка проблеми.** На коноїді, представленому дискретним каркасом.....**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Наскільки відомо автору з.....**Постановка завдань.** В роботі поставлено мету – розробити алгоритм....**Викладення основного матеріалу.** Для наближеного визначення осі використовувалася така властивість коноїдів: усі твірні поверхні перетинають її вісь [1].

формула (1)

Рисунок

*Рис. 1. Назва рисунка**Табл. 1.***Назва таблиці****Висновки.** В статті розроблено алгоритм наближеного....**Список використаних джерел:****ПІБ, посада, науковий ступінь, вчене звання рецензентів статті.**

Ціна договірна

Міжвузівський збірник наукових праць «Наукові нотатки» за галузями знань «Фізико-математичні науки» та «Технічні науки».

Комп'ютерний набір та верстка: О.Д. Клименко

Наклад 300 прим.

Веб-сайт збірника:

http://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi_notatky

Довідки за e-mail: naukovi_notatki@lutsk-ntu.com.ua

Рекомендовано до друку Вченою радою Луцького національного технічного університету, протокол № 10 від 26 травня 2022 р.

Свідоцтво Міністерства юстиції України про державну реєстрацію:
Серія КВ №15901-4373ПР від 13.11.2009 р.

ISSN: 24-15-39-66

Редакційно-видавничий відділ Луцького національного технічного університету
43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75