

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 72

Луцьк 2021

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 10.36910/6775.24153966.2021.72

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 № 5 від 29 грудня 2021 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, 2021 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;

Імбірович 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
О. Ярошевич Повільні коливання дебалансного віброзбудника при проходженні зони резонансу вібромашини.....	7
А.В. Мініцький, Є.Г. Биба, О.І. Юркова, Н.В. Мініцька Вплив параметрів плакування нікелем на властивості порошків карбиду вольфраму.....	13
Н.В. Данилюк, Р.А. Затворський, А.О. Шийчук, Т.Р. Татарчук Експрес-метод колориметричного визначення іонів Fe(III) у воді за допомогою смартфона: RGB-аналіз цифрових зображень.....	18
С.А. Федосов, Ю.О. Одарчук, В.Є. Сахнюк, Д.А. Захарчук, О.М. Вілігурський Аналіз стану досліджень полімерних композитних матеріалів в Україні та світі.....	23
І.В. Грицюк, Ю.В. Грицюк, І.А. Басалко Математичне моделювання складових втрат активної потужності в електромережах з розосередженими джерелами енергії.....	30
Л.І. Никируй, С.А. Федосов, І.П. Яремій, О.В. Замуруєва, А.Б. Тимошук, В.С. Федосов Прикладні області досліджень сучасної фізики: медична і комп'ютерна фізика.....	36
Д.Е. Селезньов, Е.Л. Селезньов, Ю.В. Муравинець, Л.В. Назарчук Автоматизований розрахунок тарілчастої абсорбційної колони.....	45
А. В. Кошель Впровадження машинного навчання на мобільні пристрої.....	50
Дуань Маньтан, Чжун цзицяо Зміцнення і загартування алюмінієвих сплавів.....	57
Б.О. Решетило, В.В. Лотиш, О.К. Яковенко Візуалізація та обробка медичних зображень формату DICOM засобами Python.....	63
В.П. Кашицький, В.М. Малець, О.Л. Садова, М.І. Вишинський, Р.П. Голодюк Розробка складу біокомпозитів, наповнених деревним борошном, з підвищеною стійкістю до горіння.....	74
Д.А. Гусачук, О.Д. Клименко, І.О. Парфентьєва, М.В. Дмитріюк, Н.Ю. Імбірович, Ю.П. Фещук, М.М. Карпук Оптимізація процесу гарячого штампування поковки вушка гідроциліндру в програмному комплексі QForm.....	80
В.Є. Сахнюк, А.М. Шutowський, С.А. Федосов, О.М. Вілігурський Вплив симетрії параметра впорядкування на струм-фазову залежність в SIS контактах.....	88
О.П. Карасевська, І.Ю. Троснікова, Т.О. Соловійова, С.В. Завадюк, П.І. Лобода Вплив термообробки на напружено-деформований стан матеріалів, отриманих за технологією інжекційного лиття порошку.....	94
А.В. Кузьмов, М.Б. Штерн Знаходження обчислювальними методами мікромеханіки різноопірної реології спікання порошкових матеріалів які містять площинні дефекти.....	101
С.О. Примиська Математичне моделювання технологічних процесів каталітичної очистки.....	108
Ю.Ю. Жигуц, В.Д. Рудь Технологія лазерного напилення тонких плівок.....	115
А.О. Сяський, В.А. Сяський, Н.В. Шевцова Моделювання контактної взаємодії берегів міжфазного розрізу по дузі кола між ортотропною пластинкою і замкненим пружним ребром.....	120
С.В. Коробка, І.Г. Стукалець, Н.О. Толстушко, М.М. Толстушко Обґрунтування параметрів конструкції плоского дзеркального концентратора для потоку сонячних променів.....	128
О.П. Карасевська, Т.О. Соловійова, П.І. Лобода, С.О. Наконечний, М.Елькаді, С.В. Завадюк Вплив розміру частинок на відновлення та спікання Fe порошків.....	136
С.М. Юхимчук, С.Ф. Юхимчук, Н.О. Толстушко, Л.М. Дацюк Енергетика брання стебел льону бральним апаратом з прямолінійними поперечними рівчачками.....	145
М.В. Дмитріюк, Д.А.Гусачук Встановлення кореляції «коефіцієнт теплопровідності- інтенсивність зношування» у мідистих високоміцних чавунах з структурою нижнього бейніту.....	151
О.Д. Солоніченко, В.М. Поводзинський Дослідження інтенсифікації теплообміну у випарному апараті за рахунок зміни геометрії труб у гріючій камері.....	154
С.П. Шимчук, М.С. Півницький, Н.П. Зайчук Використання ланцюгових передач в різних галузях сучасного машинобудування.....	159
Т.М. Павлиго Значення стандартизації у інноваційних процесах.....	163
Б.О. Пальчевський Аналіз взаємодії робочого і інформаційного процесів в кібер-фізичній виробничій системі.....	169
О.В. Верешко, Св.Св. Гомон, Св.Ст. Гомон, Т.О. Довбенко Деформівні показники деревини сосни та берези під дією кислотних середовищ.....	175
Б.С. Окрепкий, І.Я. Новосад, Т.Б. Пиндус, Б.Г. Шелестовський Контактна взаємодія гарячого циліндричного штампа з пружним шаром при неідеальному тепловому контакті.....	180
Абгалян Юра Серьожайович Щодо питання побудови архітектури сучасних корпоративних додатків на Node.js.....	188
А.А. Ганзюк, О.І. Стремєцький, О.П. Шелестюк, О.М. Міщук Отримання та тестування глюконітового грануляту.....	194
Ж.Р. Олексин, Л.І. Никируй, Р.С. Яворський, І.В. Малярська, О.М. Матківський, О.В. Замуруєва, С.А. Федосов Моделювання впливу параметрів буферного шару на властивості фотоелектричної комірки.....	204

CONTENT

Contents	5
O. Yaroshevych Slow oscillations of unbalanced vibration exciter when passing through the resonance zone of vibration machine.....	7
A.V. Minitsky, Ie.G. Byba, O.I. Yurkova, N.V. Minitska Influence nickel cladding parameters on the properties of tungsten carbide powders.....	13
N.V. Danyliuk, R.A. Zatorsky, A.O. Shiyshuk, T.R. Tatarchuk Rapid colorimetric detection of Fe(III) ions in water using a smartphone: RGB analysis of digital images.....	18
S. Fedosov, Yu. Odarchuk, V. Sakhnyuk, D. Zakharchuk, O. Viligurskiy Analysis of the state of research of polymeric composite materials in Ukraine and the world.....	23
I.V. Hrytsiuk, Y.V. Hrytsiuk, I.A. Basalko Mathematical modeling of complex loss of active power in electrical networks with dispersed energy sources.....	30
L. Nykryuy, S. Fedosov, I. Yaremyy, O. Zamurujeva, A. Tymoshchuk, V. Fedosov Applied fields of modern physics research: medical and computer physics.....	36
D.E. Selesnov, E.L. Selesnov, Y.V. Muravunets, L.V. Nazarchuk Automated calculation of the plate absorption column.....	45
A. V. Koshel Machine learning on mobile devices implementing.....	50
Duan Mnatang, Zhong ziqiao Strengthening and toughening of aluminum alloys.....	57
B.A. Reshetilo, V.V. Lotysh, O.K. Yakovenko Visualization and processing of medical images in DICOM format with Python means.....	63
V. Kashytskyi, V. Malets, O. Sadova, M. Vyshenskyi, R. Holodiuk Development of the composition of biocomposites filled with wood flour with increased resistance to combustion.....	74
D. Husachuk, O. Klymenko, I. Parfentieva, M. Dmytriyuk, N. Imbirovych, Yu. Feshchuk, M. Karpyuk The optimization of the hot forging process of an eye-end for hydraulic cylinder in the QForm software package.....	80
V. Sakhnyuk, A. Shutovskiy, S. Fedosov, O. Viligurskiy Influence of order parameter symmetry on current-phase dependence in SIS junctions.....	88
O. Karasevskaya, I. Trosnikova, T. Solovyova, S. Zavadyuk, P. Loboda Influence of heat treatment on stress-deformed state for materials obtained by powder injection molding.....	94
A. Kuzmov, M. Shtern Finding by computational methods of micromechanics of multi-response rheology of sintering of powder materials containing planar defects.....	101
S. Prymyska Mathematical modeling of technological processes of catalytic cleaning.....	118
Yu. Zhiguts, V. Rudj Laser spraying technology of thin films.....	115
A.O. Siaskyi, V.A. Siaskyi, N.V. Shevtsova Modeling of contact interaction of the edges of the interfacial section along the arc of the circle between the orthotropic plate and the closed elastic rib.....	120
S.V. Korobka, I.H. Stukalets, N.O. Tolstushko, M.M. Tolstushko Justification of the design parameters of a flat mirror concentrator for the flow of sunlight.....	128
O.P. Karasevskaya, T.O. Soloviova, P.I. Loboda, S.O. Nakonechny, M. Elkadi, S.V. Zavadiuk Effect of particle size on the reduction and sintering of Fe powders.....	136
S.M. Yukhymchuk, S.F. Yukhymchuk, N.O. Tolstushko, L.M. Datsyuk Energetics pulling of the flax stalks by pulling apparatus with rectilinear transversal streams.....	145
M.V. Dmitriyuk, D.A. Gusachuk Establishment of the correlation "thermal conductivity coefficient - warning intensity" in copper high-strength irons with structure of lower.....	151
O. D. Solonichenko, V. M. Povodzinskiy Investigation of heat exchange intensification in the evaporatory apparatus due to change of pipes geometry in the heating chamber.....	154
S.P. Shymchuk, N.S. Pivnytskyi, N.P. Zaychuk Use of chain transmissions in various industries of modern mechanical engineering.....	159
T.M. Pavlyho The importance of standardization in innovation processes.....	163
B. Palchevskiy Analysis of the interaction of work and information processes in cyber-physical production systems.....	169
O. V. Vereshko, S.S. Homon, S.S. Gomon, T.O. Dovbenko Deformable indicators of pine and birch wood under the action of acidic environments.....	175
B. Okrepkyi, I. Novosad, T. Pyndus, B. Shelestov'skyi Contact interaction of a hot cylindrical stamp with a spring ball with an incidental thermal contact.....	180
Abharian Yura On the issue of building the architecture of modern enterprise applications on Node.js.....	188
A. Hanzjuk, O. Stremetskyi, O. Shelestiuk, O. Mishchuk Glauconite granulate obtaining and testing.....	194
Z. Oleksyn, L. Nykryuy, R. Yavorskyi, I. Malyars'ka, O. Matkivskiy, O. Zamurujeva, S. Fedosov Simulation of influence of buffer layer parameters on photoelectric cell properties.....	204

УДК 621.9048.6

DOI 10.36910/775.24153966.2021.72.1

О. Ярошевич

Луцький НТУ

ORCID ID: 0000-0003-2594-3323

**ПОВІЛЬНІ КОЛИВАННЯ ДЕБАЛАНСНОГО ВІБРОЗБУДНИКА
ПРИ ПРОХОДЖЕННІ ЗОНИ РЕЗОНАНСУ ВІБРОМАШИНИ**

Методом прямого розділення рухів розв'язано задачу про виникнення повільних коливань швидкості дебалансного віброзбудника при проходженні зони резонансу; при цьому, враховано вплив на коливання ротора віброзбудника моменту сил ваги дебаланса. Отримано вираз, який описує коливання швидкості віброзбудника в області ефекту Зоммерфельда. Показано, що повільні коливання віброзбудника викликані резонансним зростанням величини гальмівного вібраційного моменту.

Ключові слова: вібраційна машина, ефект Зоммерфельда, інерційний віброзбудник, повільні коливання.

О. Ярошевич**МЕДЛЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ ДЕБАЛАНСНОГО ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЯ ПРИ
ПРОХОЖДЕНИИ ЗОНЫ РЕЗОНАНСА ВИБРОМАШИНЫ**

Методом прямого разделения движений решена задача о возникновении медленных колебаний скорости дебалансного вибровозбудителя при прохождении зоны резонанса; при этом, учтено влияние на колебания ротора вибровозбудителя момента сил тяжести дебаланса. Получено выражение которое описывает колебания скорости вибровозбудителя в области эффекта Зоммерфельда. Показано, что медленные колебания вибровозбудителя вызваны резонансным возрастанием величины тормозного вибрационного момента.

Ключевые слова: вибрационная машина, эффект Зоммерфельда, инерционный вибровозбудитель, медленные колебания.

O. Yaroshevych**SLOW OSCILLATIONS OF UNBALANCED VIBRATION EXCITER WHEN PASSING
THROUGH THE RESONANCE ZONE OF VIBRATION MACHINE**

The problem of occurrence of slow oscillations of velocity of the unbalanced vibration exciter during the passage through the resonance zone is solved by the method of direct separation of motions; in addition, it is taken into account the effect on the oscillation of the vibration exciter rotor of the moment of gravity of the imbalance. It is also obtained the expression describing oscillations of the vibration exciter velocity in the zone of the Sommerfeld effect. It is shown that slow oscillations of the vibration exciter are caused by a resonant increase in value of braking vibration moment. It was found out that amplitudes of slow oscillations of the rotor velocity in cases of taking into account the action of the moment of gravity and neglecting it, will be approximately the same. Computer simulation confirms the obtained results.

Keywords: vibration machine, Sommerfeld effect, inertial vibration exciter, slow oscillations.

Постановка проблеми. Вібраційні машини широко використовуються у багатьох галузях промисловості. Одномасним вібромашинам з інерційним приводом при роботі в далеко зарезонансному режимі притаманна достатньо висока стабільність. Проте, якщо приводний електродвигун не має достатнього запасу потужності, то при пуску такої машини може виникнути стійкий резонансний режим коливань. Резонансні коливання можуть викликати поломки деталей та вузлів конструкції вібромашини. Звичайно, застосування двигунів завищеної потужності є економічно недоцільним. Отже, аналіз динаміки інерційних вібромашин з приводом від двигуна обмеженої потужності становить актуальну прикладну задачу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідження коливних систем з обмеженим збудженням (неідеальним джерелом енергії) розглядається в низці класичних праць [1-4]. Огляд більш пізніх публікацій з даної тематики наведено, наприклад, у роботах [5, 6].

Серед останніх публікацій відзначимо статті [7, 8]. У [8], зокрема, розглянуто стаціонарні режими у неідеальній системі, в якій відбувається взаємодія між джерелом енергії (електродвигуном) та лінійно-пружною підсистемою; аналізується стійкість режимів руху; чисельно-аналітичними методами досліджено ефект Зоммерфельда.

В [3] продемонстровано ефективність застосування методу прямого розділення рухів для аналізу ефекту Зоммерфельда. Продemonстровано, що основні закономірності ефекту можна порівняно просто пояснити з позицій вібраційної механіки. В статті [9] стверджується, що при дослідженнях динаміки машинного агрегату з додатковими ступенями вільності, доцільно перейти від вихідних рівнянь руху до рівняння вібраційної механіки; звертається увага, що це рівняння

© О. Ярошевич

відрізняється від класичного рівняння машинного агрегату наявністю додаткового члена – гальмівного вібраційного моменту.

Можливість збудження двухчастотної вібрації кульковим автобалансиром у вібраційних грохотах з використанням ефекту Зоммерфельда обґрунтовується в роботі [10]. В статті [11] показано, що двомасова вібраційна система з ексцентрико-маятниковим приводом у режимі резонансних коливань характеризується миттєвим пуском і зупинкою приводу, без тривалих перехідних процесів. Проте, очевидно, що запропонований привод не може конкурувати з інерційним.

Питанням пуску вібромашин з інерційними збудниками присвячені роботи [12-15]. В [12] за результатами досліджень робиться висновок, що послідовний пуск двигунів дозволяє істотно зменшити амплітуди резонансних коливань при проходженні резонансу вібромашини. При цьому, коливні процеси, що виникають в зоні резонансу, у роботі не аналізуються.

В монографії [3] звертається увага на те, що поведінка вібромашин з інерційним збудниками при проходженні резонансу характеризується низкою важливих закономірностей. Зокрема, показано, що в зоні резонансу виникають коливання віброзбудника з частотою, істотно нижчою за частоту обертання. Такі коливання в деяких роботах названі напівповільними або повільними [3, 14-17]. При цьому, у відомих роботах досліджуються тільки усталені коливання незрівноваженого ротора в області ефекту Зоммерфельда. Проте, звичайно, саме у перехідних режимах можливі максимальні коливання.

У статті [17] встановлено що, повільні коливання частоти збудника являють собою перехідний процес при встановленні стаціонарного режиму в області ефекту Зоммерфельда.

Прикладне використання повільних коливань незрівноваженого ротора для полегшення пуску вібромашини з інерційним приводом продемонстровано у роботах [15].

Проте, у відомих дослідженнях виникнення повільних коливань розглядається без урахування впливу на цей процес моменту сил ваги дебалансу. Водночас, у вібромашинах з дебалансним приводом цей момент є досить великим. Дана робота присвячена подальшому розвитку результатів праці [17].

Постановка завдання. Дослідити вплив моменту сил ваги дебаланса на коливні процеси у приводі вібраційної машини при «повільному» проходженні зони її власних частот.

Виклад основного матеріалу дослідження. Опис системи та рівняння руху. Основні особливості динаміки незрівноваженого ротора при проходженні зони резонансу несучої системи можна уявити на простішому прикладі, зображеному на рис. 1.

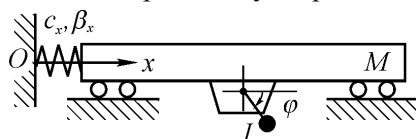


Рис. 1. Динамічна модель вібраційної машини з інерційним приводом

Динамічну модель вібраційної машини прийнято у вигляді жорсткої платформи (твердого несучого тіла) масою M на якій закріплений дебалансний віброзбудник. Платформа зв'язана з нерухомою основою лінійними пружними та демпфуючими елементами. Припускається, що вона може зміщуватися тільки в одному фіксованому напрямку Ox , тобто має лише одну ступінь вільності. Привод віброзбудника має також одну ступінь вільності, він здійснюється від електродвигуна асинхронного типу. Рівняння руху такої системи подамо у вигляді

$$I\ddot{\varphi} = L - R + m\varepsilon(\ddot{x} \sin \varphi + g \cos \varphi), \quad (1)$$

$$M\ddot{x} + \beta_x \dot{x} + c_x x = m\varepsilon(\ddot{\varphi} \sin \varphi + \dot{\varphi}^2 \cos \varphi), \quad (2)$$

де φ – кут повороту ротора віброзбудника; x – переміщення платформи від положення, яке відповідає недеформованим пружним елементам; I – зведений момент інерції віброзбудника; m, ε – маса віброзбудника та його ексцентриситет; c_x, β_x – коефіцієнти жорсткості та в'язкого тертя пружного-демпфуючих елементів; L – крутний момент електродвигуна, рахується заданим

його статичною характеристикою, $L = L(\dot{\varphi})$; R – момент сил опору обертання двигуна, обумовлений, як правило, опором у підшипниках, $R = R(\dot{\varphi})$; g – прискорення вільного падіння.

Розв'язування рівнянь руху за допомогою методу прямого розділення рухів. Для дослідження динаміки обертання ротора дебалансного віброзбудника в стаціонарних (наколостационарних) режимах використано підхід вібраційної механіки [3, 6, 16]. Розглядається «повільне» проходження ротором зони резонансу вібромашини з двигуном обмеженої потужності. Зазначимо, що режим «повільного» проходження віброзбудником зони резонансу, під час якого спостерігається «застрягання» його швидкості, є цікавим як максимально навантажений режим роботи вібромашини.

Рух системи (1), (2) може бути поданий у вигляді

$$\dot{\varphi} = \omega(t) + \dot{\psi}(t, \omega t), \quad x = x(t, \omega t), \quad (3)$$

де $\omega(t)$ – повільна, а $\dot{\psi}$ і x – швидкі 2π -періодичні по $\tau = \omega t$ функції, при цьому їх середні значення за період дорівнюють нулю; приймаємо також, що $\dot{\psi} \ll \omega$.

Використовуючи вибраний метод дослідження від системи рівнянь (1), (2), переходимо до інтегро-диференціальних рівнянь повільних та швидких рухів [3]

$$I\dot{\omega} = L(\omega) - R(\omega) + \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} \Phi(\ddot{x}, \varphi) d\tau, \quad (4)$$

$$I\ddot{\psi} + k\dot{\psi} = \Phi(\ddot{x}, \varphi) - \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} \Phi(\ddot{x}, \varphi) d\tau,$$

$$M\ddot{x} + \beta_x \dot{x} + c_x x = m\varepsilon((\omega + \dot{\psi}) \sin(\omega + \psi) + (\omega + \dot{\psi})^2 \cos(\omega + \psi)), \quad (5)$$

де $\Phi(\ddot{x}, \varphi) = m\varepsilon(\ddot{x} \sin(\omega + \psi) + g \cos(\omega + \psi))$.

Вище враховано, що при дослідженні режимів, близьких до рівномірного обертання, робочі характеристики двигуна та машини можна лінеаризувати поблизу стаціонарних значень $\dot{\varphi} = \omega$. Для цього розкладемо їх в ряд Тейлора; при цьому, збережемо у розкладі перші два члени. Для моментів двигуна $L(\dot{\varphi})$ та сил опору обертання $R(\dot{\varphi})$, відповідно, отримано: $L(\dot{\varphi}) = L(\omega) - k_1 \dot{\psi}$, $R(\dot{\varphi}) = R(\omega) + k_2 \dot{\psi}$, де k_1, k_2 – коефіцієнти демпфірування, причому $k_1 + k_2 = k$ [3]. Згідно (3), вираз для координати φ має вигляд $\varphi = \omega(t)t + \alpha(t) + \psi(t, \omega t)$, де $\alpha(t)$ деяка повільна функція t ; в рівнянні (5) та нижче кут $\alpha(t)$ нехтуємо.

Таким чином, в загальному, основне рівняння вібраційної механіки приймає вигляд

$$I\dot{\omega} = L(\omega) - R(\omega) + V(\omega), \quad (6)$$

отриманий у монографії [3]. Отже, висновки зроблені в [3] стосовно можливих стаціонарних режимів обертання віброзбудника та їх стійкості, залишаються в силі також й у розглядуваному випадку більш повних вихідних рівнянь руху.

В правій частині рівняння повільних рухів (4) останній доданок являє собою так званий, вібраційний момент $V(\omega) = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} \Phi(\ddot{x}, \varphi) d\tau$ – середнє значення додаткового динамічного

навантаження на двигун, обумовлене коливаннями несучого тіла, на якому закріплено віброзбудник. Визначення вібраційного моменту є важливою практичною задачею вібротехніки [3, 6].

Беручи до уваги, що обертання ротора у розглядуваних стаціонарних режимах мало відрізняється від рівномірного руху, у вихідному наближенні приймаємо $\psi = \psi^{(0)} = 0$, $\varphi = \varphi^{(0)} = \omega t$. В [17] вираз для вібраційного моменту у розглядуваному наближенні було подано у вигляді

$$V(\omega) = -0,5k_d^2 A_{st}^2 \beta_x p_x, \quad (7)$$

де $A_{st} = \frac{m\varepsilon}{M}$ – амплітуда коливань платформи в робочому зарезонансному режимі; k_d – коефіцієнт динамічності; $p_x = \sqrt{\frac{c_x}{M}}$ – частота власних коливань платформи.

Згідно виразу (7), при повільному проходженні зони резонансу платформи, зростання величини вібраційного моменту є пропорційним квадрату коефіцієнту динамічності. Звичайно, що в момент такого стрімкого зростання моменту можна очікувати збудження значних нестационарних коливань незрівноваженого ротора. Для дослідження коливань ротора віброзбудника розглянемо рівняння його швидких рухів. У першому наближенні ($\varphi = \omega t + \psi$) отримуємо

$$I\ddot{\psi} + k\dot{\psi} = m\varepsilon \left(\ddot{x} \sin(\omega t + \psi) + g \cos(\omega t + \psi) - \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} \ddot{x} \sin \omega t d\tau \right). \quad (8)$$

Враховуючи припущення, що $\psi \ll \omega$, лінеаризуємо праву частину (8) по ψ . Далі підставимо в (8) розв'язок рівняння (5) за умови рівномірного обертання віброзбудника з сталою кутовою швидкістю ω . У підсумку отримуємо рівняння швидких рухів дебалансного віброзбудника у вигляді

$$\ddot{\psi} + 2b_\psi \dot{\psi} + p_\psi^2 \psi = \Phi_x \sin(2\omega t - \gamma_x) + \Phi_g \cos \omega t, \quad (9)$$

де $b_\psi = \frac{k}{2I}$; $p_\psi^2 = \frac{c_\psi}{I}$; $c_\psi = V_{\max} \cos \gamma_x$; $V_{\max} = \frac{m\varepsilon \omega^2 A_x}{2}$; $A_x = A_{st} k_d$; $\Phi_x = -\frac{V_{\max}}{I}$; $\Phi_g = -\frac{m\varepsilon g}{I}$;

γ_x – кут між коливаннями та збурюючою силою.

Зазначимо, що при отриманні рівняння (8) враховано оцінки доданків рівнянь швидких рухів, виконані в [3, 17].

Згідно (9), рівняння швидких рухів віброзбудника набуває вигляду рівняння малих вимушених коливань. Порівняно з рівнянням, отриманим у [17], права частина (9) містить додаткове гармонічне збурення з частотою ω ; при цьому, амплітуди обох збурюючих моментів у правій частині (9) мають однаковий порядок.

Загальний розв'язок рівняння (9) поза зоною резонансу без урахування опору подамо у вигляді ($\psi_{20} = 0$, $\dot{\psi}_{20} = -V_{\max}/I\omega$):

$$\psi_2 \approx A_p \sin(p_\psi t - \alpha_1) - A_x \sin(2\omega t - \alpha_x) - A_g \cos(\omega t - \alpha_g), \quad (10)$$

де $A_p = \sqrt{C_1^2 + C_2^2}$; $A_x = -\frac{V_{\max}}{I(p_\psi^2 - 4\omega^2)}$; $A_g = -\frac{m\varepsilon g}{I(p_\psi^2 - \omega^2)}$; $C_2 = -\frac{2\omega A_x \cos \gamma_x}{p_\psi} - \frac{V_{\max}}{I p_\psi \omega}$;

$C_1 = A_x \sin \gamma_x - A_g$.

Порівняння розв'язку (10) та розв'язку рівняння швидких рухів віброзбудника, отриманого у [17], свідчить, що амплітуди коливань швидкості ротора при встановленні стаціонарного режиму руху в області резонансу вібромашини у випадках урахування дії моменту сил ваги та нехтування нею, будуть приблизно однаковими. Водночас, у стаціонарному режимі у разі дії моменту сил ваги, амплітуди коливання швидкості віброзбудника будуть помітно більшими.

Комп'ютерне моделювання коливань дебалансного віброзбудника. Моделювання динамічних процесів в зоні резонанса вібромашини зводилося до чисельного інтегрування диференціальних рівнянь руху електромеханічної системи, рівнянь (1), (2) та рівнянь динамічної моделі асинхронного двигуна [18] з використанням програмного продукту Maple. Параметри системи рівнянь (1), (2) вибрано згідно параметрів експериментальної вібраційної установки, описаної в [2]: $M = 40 \text{ кг}$; $m = 3 \text{ кг}$; $\varepsilon = 0,03 \text{ м}$; $I = 0,006 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $c_x = 7,5 \cdot 10^4 \text{ Н/м}$; $\beta_x = 135 \text{ кг/с}$; передбачається, що у вібромашині встановлено трифазний асинхронний

електродвигун серії 4А з короткозамкненим ротором потужністю $P = 0,6 \text{ кВт}$ та частотою обертання $n_c = 1500 \text{ об/хв}$.

На рис. 2 наведені графіки зміни швидкості віброзбудника для випадку дії на ротор збудника моменту сил ваги дебалансу та за її відсутності.

Згідно отриманим графікам в обох досліджуваних випадках при «застряганні» віброзбудника виникають складні коливання швидкості ротора з порівняно низькою (відносно частоти обертання $\omega \approx 41 \text{ с}^{-1}$) основною частотою $p_\psi \approx 15 \text{ с}^{-1}$; амплітуди перехідного процесу є підвищеними та практично однакові за величиною. Таким чином, дія моменту сил ваги дебаланса на незрівноважений ротор не змінює частоту його повільних коливань в зоні резонансу. Водночас, в подальшому при встановленні усталеного режиму руху для випадку дії моменту сил ваги, амплітуди коливань швидкості віброзбудника є істотно більшими (12 с^{-1} і 6 с^{-1}). Звичайно, при цьому вони являють собою бігармонічні коливання (гармоніки ω та 2ω), в той час як в іншому розглядуваному випадку – моногармонічні коливання з частотою 2ω .

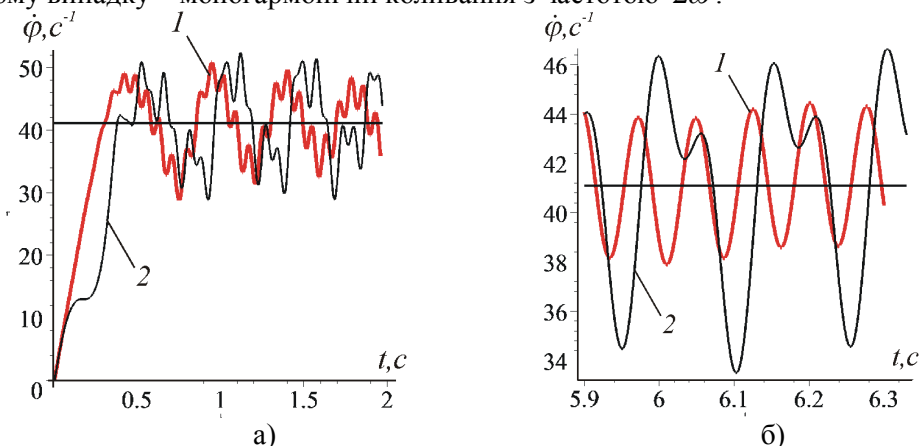


Рис. 2. Зміни швидкості віброзбудника при її «застряганні» у зоні резонансу вібромашини: а) з початку руху; б) в усталеному режимі: 1 – без урахування моменту сил ваги; 2 – з урахуванням моменту сил ваги

Висновки і перспективи подальших досліджень. У разі «застрягання» швидкості ротора віброзбудника при «повільному» проходженні зони власних частот вібромашини (стрімкому зростанню гальмівного вібраційного моменту) виникають повільні коливання швидкості ротора.

Встановлено, що дія моменту сил ваги дебалансу практично не впливає на перехідний процес виникаючий в області ефекту Зоммерфельда. Частота та амплітуди повільних коливань швидкості ротора в зоні резонансу вібромашини в обох досліджуваних випадках є практично однаковими.

Водночас, у стаціонарному режимі руху в області власних частот вібромашини наслідком дії моменту сил ваги дебалансу є істотне зростання амплітуди коливань швидкості ротора. Звичайно робота розглядуваного класу вібромашин у такому режимі є неприпустимою.

Виконані дослідження можуть бути корисними при розробці алгоритмів керування пуском вібраційних машин з інерційним приводом.

Література:

1. Кононенко В.О. Колебательные системы с ограниченным возбуждением. М.: Наука, 1964. 254с.
2. Алифов Ф.Ф., Фролов К.В. Взаимодействие нелинейных колебательных систем с источниками энергии. М.: Наука, 1985. 328 с.
3. Блехман И.И. Вибрационная механика. М.: Физматлит, 1994. 400с.
4. Balthazar, J.M. Mook D.T., Weber H.I. and all. An overview on non-ideal vibrations / J. M. Balthazar, // Mechanics. 2003. Vol. 38(6). P. 613–621.
5. Краснопольська Т.С. Ефект Зоммерфельда-Кононенка та його дослідження. Проблеми вычислительной механики и прочности конструкций. 2018. Вып. 8. С. 89-109.
6. Блехман И.И. Вибрационная механика и вибрационная реология (теория и приложения).

– М.: Физматлит, 2018. 752с.

7. Аврамов К.В., Михлин Ю.В. Нелинейная динамика упругих систем. М.: Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2010. 704 с.

8. Перепелкин Н.В., Михлин Ю.В. О нелинейной динамике систем с ограниченным возбуждением. Вестник Нац. техн. ун-та “ХПИ” : сб. науч. тр.: Динамика и прочность машин. Харьков : НТУ “ХПИ”, 2008. № 36. С. 153-163.

9. Blekhman, I., Kremer, E. The dynamics of a complex machine assembly: Vibration-induced drag on the rotation. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2017. Т. 46. № 4.

10. Филимоныхин, Г.Б., Яцун В.В. Исследование процесса возбуждения двухчастотных вибраций шаровым автобалансиром грохота Гил 42. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2016. № 1/7(79). С.17–23.

11. Ланець О.С., Гурський В.М., Ланець О.В., Шпак Я.В. Обґрунтування конструкції та моделювання роботи резонансного двомасового вібростолу з інерційним приводом. Динаміка, міцність та проектування машин і приладів: Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». Львів, 2014. № 788. С. 28–37.

12. Ярошевич М.П., Силивонюк А.В. Про деякі особливості динаміки розбігу вібраційних машин зі збудниками, що само синхронізуються. Науковий вісник НГУ. Дніпропетровськ. 2013. №4. С. 37-45.

13. N. Yaroshevich, I. Zabrodets, S. Shymchuk, T. Yaroshevich. Influence of elasticity of unbalanced drive in vibration machines on its oscillations. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, №5, 2018, pp.17–23.

14. Нелинейные проблемы теории колебаний и теории управления. – Вибрационная механика. Пол ред. В.В. Белецкого, Д.А. Индейцева, А.Л. Фрадкова. ИПМаш РАН. СПб.: Наука, 2009. 528 с.

15. Ярошевич М.П., Ярошевич Т.С. Динаміка розбігу вібраційних машин с де балансним приводом. Луцьк. ЛНТУ, 2010.220с.

16. Blekhman I.I Blekhman L.I Dresig H. and others. Selected Topics in Vibrational Mechanics. World Scientific, New Jersey, London, 2004, 409p.

17. Yaroshevich, N., Puts, V., Yaroshevich, T., Herasymchuk, O. (2020). Slow oscillations in systems with inertial vibration exciters. Vibroengineering Procedia, 32, pp. 20–25.

18. Чабан В. Й. Математичне моделювання електромеханічних процесів. Львів: вид-во держ. ун-ту «Львівська політехніка», 1997. 342 с.

УДК 621.762.

DOI 10.36910/775.24153966.2021.72.2

А.В. Мініцький, Є.Г. Биба, О.І. Юркова, Н.В. Мініцька

Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ,
Україна**ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ПЛАКУВАННЯ НІКЕЛЕМ НА ВЛАСТИВОСТІ ПОРОШКІВ
КАРБІДУ ВОЛЬФРАМУ**

Досліджено процес плакування частинок твердих сплавів на основі карбіду вольфраму покриттям на основі нікелю методом хімічного осадження із розчинів солей. Вивчено вплив хімічного складу розчину, а саме кислото на основі сірчаної кислоти солі нікелю та лужного на основі хлористого нікелю. Показано, що покриття яке утворюється, складається не з чистого нікелю, а є складною системою, де поряд з нікелем присутні фосфор в кількості від 2 до 10 % мас. в залежності від умов отримання. Встановлено, що в обох випадках швидкість осадження нікелю складала 8-10 мкм/год., при цьому застосування лужного розчину дозволяє отримати покриття із більшим вмістом нікелю і меншим вмістом фосфору. Встановлено, що плакування частинок приводить до зміни їх фізичних властивостей: форми та розміру. Форма плакованих частинок стає більш наближеною до сферичної з різною товщиною покриття на частинках, що обумовлено різною поверхневою площею та формою вихідних частинок. Нанесення нікель-фосфорного покриття на частинки порошку карбіду вольфраму, приводить до зміни його розмірів за гранулометричним складом. Досліджено вплив плакування на технологічні властивості порошків карбіду вольфраму, встановлено, що плакування приводить збільшення текучості і, відповідно, до зростання насипної щільності порошку, що обумовлено зменшення питомої поверхні частинок та згладженням рельєфу їх поверхні, що в свою чергу приводить до зменшення шорсткості поверхні частинок. Результати досліджень можуть бути корисними при створенні твердосплавних виробів різного функціонального призначення, і, насамперед, броньованих сердечників куль стрілецької зброї. Плакування твердосплавних частинок карбіду вольфраму покриттям на основі нікелю із лужного розчину, дозволяє отримати композиційні порошки з високими фізичними та технологічними характеристиками.

Ключові слова: порошок карбіду вольфраму, нікель, плакування, хімічне осадження, текучість, насипна щільність, гранулометричний склад.

А.В. Миницкий, Е.Г. Биба, А.И. Юркова, Н.В. Миницкая

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАКИРОВАНИЯ НИКЕЛЕМ НА СВОЙСТВА
ПОРОШКОВ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА**

Исследован процесс плакирования частиц твердых сплавов на основе карбида вольфрама покрытием на основе никеля методом химического осаждения из растворов солей. Изучено влияние химического состава раствора, а именно кислото на основе сернистой соли никеля и щелочного на основе хлористого никеля. Показано, что покрытие которое образуется, состоит не из чистого никеля, а является сложной системой, где наряду с никелем присутствуют фосфор в количестве от 2 до 10% масс. в зависимости от условий получения. Установлено, что в обоих случаях скорость осаждения никеля составляла 8-10 мкм/ч, при этом применение щелочного раствора позволяет получить покрытие с большим содержанием никеля и низким содержанием фосфора. Установлено, что плакирования частиц приводит к изменению их физических свойств: формы и размера. Форма плакированных частиц становится более приближенной к сферической с разной толщиной покрытия на частицах, что обусловлено разной поверхностной площадью и формой исходных частиц. Нанесение никель-фосфорного покрытия на частицы порошка карбида вольфрама, приводит к изменению его размеров по гранулометрическому составу. Исследовано влияние плакирования на технологические свойства порошков карбида вольфрама, установлено, что плакирование приводит увеличению текучести и, соответственно, к росту насыпной плотности порошка, обусловлено уменьшение удельной поверхности частиц и сглаживанием рельефа их поверхности, что в свою очередь приводит к уменьшению шероховатости поверхности частиц. Результаты исследований могут быть полезными при создании твердосплавных изделий различного функционального назначения, и, прежде всего, броневых сердечников пуль стрелкового оружия. Плакирование твердосплавных частиц карбида вольфрама покрытием на основе никеля из щелочного раствора, позволяет получить композиционные порошки с высокими физическими и технологическими характеристиками.

Ключевые слова: порошок карбида вольфрама, никель, плакирование, химическое осаждение, текучесть, насыпная плотность, гранулометрический состав.

A.V. Minitsky, Ie. G. Byba, O. I. Yurkova, N.V. Minitska

**INFLUENCE NICKEL CLADDING PARAMETERS ON THE PROPERTIES OF
TUNGSTEN CARBIDE POWDERS**

The process of cladding of particles of hard alloys based on tungsten carbide with a coating based on nickel by the method of chemical deposition from salt solutions has been investigated. The effect of the chemical composition of the solution, namely acidic based on nickel sulfate salt and alkaline based on nickel chloride, has been studied. It is shown that the coating that is formed does not consist of pure nickel, but is a complex system, where, along with nickel, phosphorus is present in an amount from 2 to 10 wt%. depending on the conditions of receipt. It was found that in both cases the deposition

rate of nickel was 8-10 $\mu\text{m} / \text{h}$, while the use of an alkaline solution makes it possible to obtain a coating with a high nickel content and a low phosphorus content. It was found that cladding of particles leads to a change in their physical properties: shape and size. The shape of the clad particles becomes more close to spherical with different thickness of the coating on the particles, which is due to the different surface area and shape of the initial particles. The deposition of a nickel-phosphorus coating on the particles of tungsten carbide powder leads to a change in its size in terms of particle size distribution. The effect of cladding on the technological properties of tungsten carbide powders was investigated, it was found that cladding leads to an increase in fluidity and, accordingly, to an increase in the bulk density of the powder, due to a decrease in the specific surface area of particles and smoothing of their surface relief, which in turn leads to a decrease in the roughness of the particle surface. The research results can be useful in the creation of carbide products for various functional purposes, and, first of all, armor-piercing cores of small arms bullets. The cladding of tungsten carbide hard-alloy particles with a nickel-based coating from an alkaline solution makes it possible to obtain composite powders with high physical and technological characteristics.

Key words: tungsten carbide powder, nickel, cladding, chemical deposition, fluidity, bulk density, particle size distribution.

Постановка проблеми. Широке застосування твердих сплавів на основі карбіду вольфраму в якості інструментальних, конструкційних та балістичних матеріалів забезпечується їх високою питомою вагою, високим питомим модулем пружності та рядом інших фізичних властивостей [1,2]. Висока твердість та міцність дозволяє застосовувати ці сплави у виробництві бронебійних сердечників стрілецької зброї. Технологія виробництва вольфрамових твердих сплавів передбачає застосування дисперсних металевих порошків високої чистоти - як правило, карбіду вольфраму в якості основи, а також кобальту чи нікелю в якості зв'язки [3, 4]. Однак, застосування чистих порошків має певні недоліки, пов'язані як з високою вартістю останніх, так і нерівномірним розподілом легуючих елементів при механічному змішуванні. Це обумовлено великою різницею густини металевої зв'язки порівняно з тугоплавким карбідом вольфраму, що ускладнює процес легування і забезпечення рівномірного розподілу легуючих добавок по об'єму матеріалу. Для рівномірного розподілу металевої зв'язки зазвичай застосовують багатогодинні операції розмелу в кульових млинах, що значно збільшує собівартість твердосплавної суміші та підвищує енергетичні затрати при виробництві. Одним із більш економних і швидких способів введення легуючих добавок є плакування порошку основи шляхом нанесення на його поверхню покриття.

Відомо ряд методів нанесення металевих і неметалевих покриттів на порошки, такі як: хімічне [5, 6] і електрохімічне осадження [7], напилювання [8, 9], випаровування і конденсація у вакуумі [10], осадження з парової фази, у тому числі з використанням методів газотранспортних реакцій, автоклавне відновлення металів з одночасним осадженням на поверхні введених порошків [11] і ряд інших методів. Проте не усі вони рівною мірою використовуються в техніці і промисловості.

Одним з найбільш розповсюджених методів нанесення покриттів, є метод хімічного осадження. Даний метод відносно недорогий, не потребує спеціального дорогого устаткування, дозволяє одержувати якісні покриття із нікелю, міді, кобальту, хрому, що мають високе зчеплення з поверхнею матеріалу, що покривається.

Постановка мети та задач. Метою даної роботи є вивчення параметрів хімічного осадження нікелевого покриття на частинки карбіду вольфраму та дослідити їх фізичні та технологічні властивості. Для досягнення поставленої мети в роботі досліджували склад розчину, температуру та час процесу хімічного осадження.

Викладення основного матеріалу. Плакування порошку карбіду вольфраму нікелем було реалізовано методом хімічного осадження, яке дозволяє отримувати покриття практично будь-якого складу без використання спеціального устаткування. Метод хімічного осадження є економічно вигідним, оскільки використовуються не чисті компоненти, а солі металу, який осаджується, що робить процес значно дешевшим порівняно із механічним легуванням чистого нікелю. Також, однією з переваг даного методу, є можливість регулювати товщину покриття і, відповідно, вміст легуючого компоненту.

Процес нанесення нікелю шляхом хімічного відновлення його солей розчином гіпофосфіту забезпечує можливість отримання рівного по товщині і якості покриття на усіх ділянках рельєфної поверхні за умови доступу до неї розчину. Швидкість нанесення нікелю приблизно відповідає швидкості гальванічного процесу, який проходить при невеликій щільності струму і досягає 20-25 мкм/год. Покриття, яке утворюється, складається не з чистого нікелю, а є складною системою, де поряд з нікелем присутні фосфор в кількості від 2 до 10 % мас. в залежності від умов отримання. Наявність фосфору суттєво змінює властивості покриттів, як фізичні (питому вагу, температуру плавлення, магнітні характеристики, твердість та інш.), так і хімічні – нікель, який хімічно

осаджується, має підвищену стійкість проти агресивних середовищ в порівнянні з нікелем, який осаджується гальванічним шляхом.

При отриманні порошку із кислого розчину, перед процесом плакування порошок карбіду вольфраму знежирювали у бензині, сушили на повітрі і загрузали в кислотну ванну нікелювання, яка містить в певному співвідношенні сірчаноокислий нікель, уксусноокислий натрій та гіпофосфіт натрію. Робоча температура процесу складала 90-92 °С. Величина pH=4-4,5 коректувалась розчином їдкого натрію. Швидкість осадження нікелю складала 8-10 мкм/год. Складність процесу полягала у необхідності точного контролю температури (не більше 92 °С), тому що при температурі 95 °С і більше починається саморозряд гіпофосфіту з миттєвим випаданням темного губчатого осаду, який супроводжується викидом розчину з ванни.

Отриманий порошок промивався і висушувався. Для підвищення міцності зчеплення поверхневого шару з часточкою карбіду вольфраму порошок випалювався у водні при температурі 500 °С протягом 1 години (рис. 1 а).

Разом із плакуванням з кислого середовища були проведені дослідження по отриманню покриття з нікелю з використанням лужного середовища, яке забезпечується введенням у робочий розчин аміаку. Лужний розчин характеризується високою стійкістю, простотою корегування складу, відсутністю схильності до саморозряду і можливістю довготривалої експлуатації.

В якості донору нікелю був використаний хлористий нікель. Робоча температура процесу складала 80-88 °С, швидкість утворення покриття дорівнювала 8-10 мкм/год. Плакований цим способом порошок також відпалювали у водні при температурі 500 °С протягом 1 години (рис. 1б).

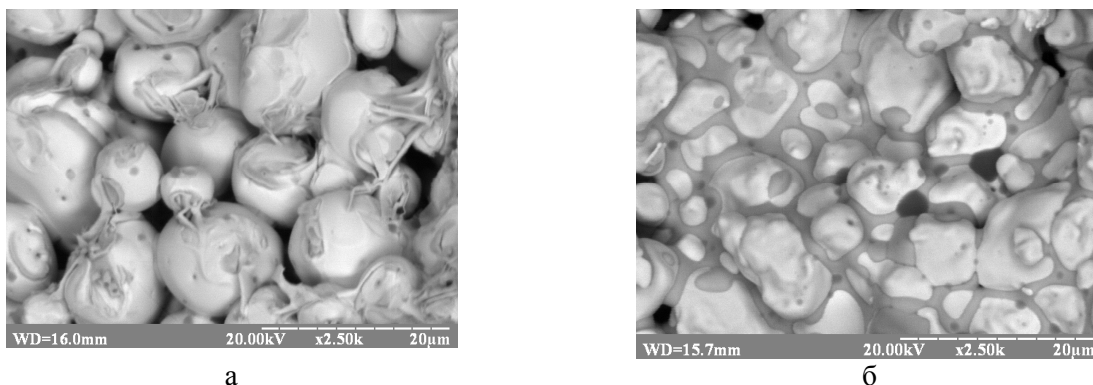


Рис. 1. Морфологія частинок порошку карбіду вольфраму покритого нікелем: а – осадження з кислого розчину, б – осадження з лужного розчину

Дослідження гранулометричного складу плакованого порошку, що було визначено за допомогою лазерного дифракційного аналізатору Malvern Mastersizer 2000 показало бімодальне розподілення частинок за розміром, що говорить про те що не всі частинки порошку карбіду вольфраму мають однакову товщину покриття (рис. 2). Це пояснюється тим, що рівномірність осадження покриття залежить від форми та морфології вихідних частинок WC. Відповідно, частинки, що мають більш розвинену поверхню та неправильну форму мають товщий шар нікелю, частинки більш правильної форми з гладкою поверхнею – менший шар покриття.

При цьому, як показали металографічні дослідження, практично всі частинки покриті шаром нікелю, що підтверджує спектральний хімічний аналіз вихідних та плакованих порошків (рис. 3, табл. 1).

Дослідження технологічних характеристик порошків карбіду вольфраму показало, що зміна фізичних властивостей після плакування, а саме збільшення розміру частинок та форми, приводить до зміни технологічних характеристик (табл. 2). Текучість та насипну щільність порошків визначали за стандартними методиками із дотриманням вимог ISO 4490 та ISO 3923 для металевих порошків.

Результати вимірювань технологічних характеристик порошків показали, що плакування приводить до збільшення текучості і, відповідно, до зростання насипної щільності порошку. Зростання технологічних характеристик обумовлено декількома причинами, по-перше зміна форми та збільшення розміру частинок приводить до зменшення їх питомої поверхні, по друге, плакування приводить до згладження рельєфу поверхні, що знижує шорсткість поверхні частинок.

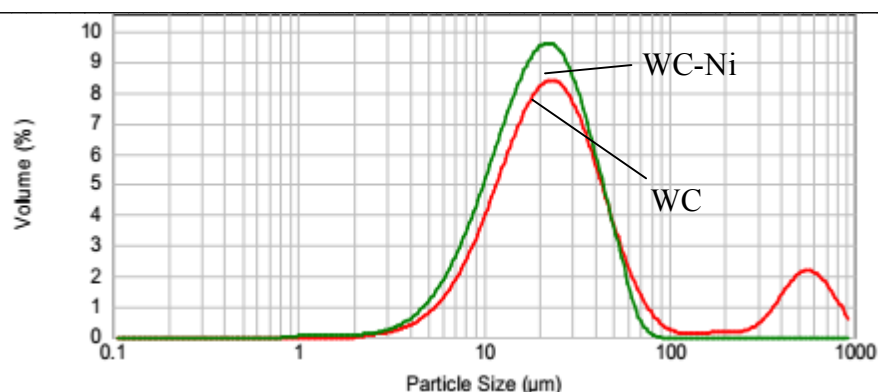


Рис. 2. Гранулометричний склад вихідного та плакованого порошку WC

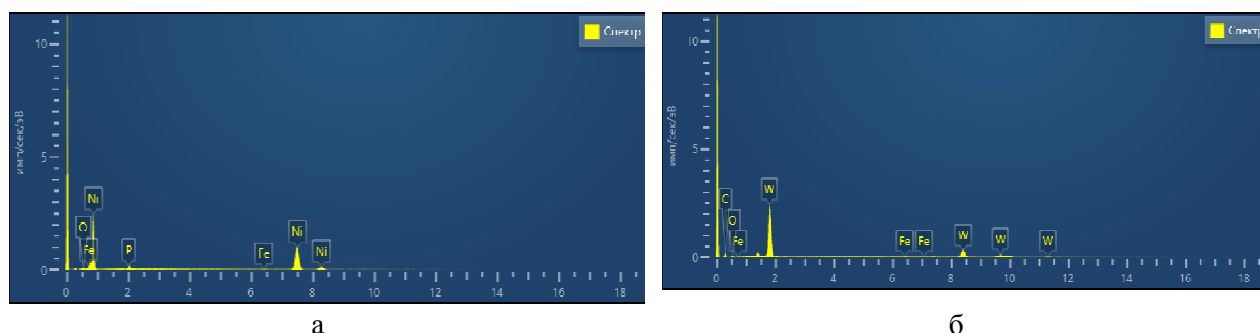


Рис. 3. Спектральний хімічний аналіз порошку карбіду вольфраму: а – плакований нікель-фосфором, б - вихідний

Як видно з приведеної таблиці плакування порошку карбіду вольфраму нікелем з лужного середовища забезпечує одержання нікель-фосфорних покриттів з більшим, у порівнянні з кислим середовищем, вмістом нікелю, при цьому поліпшується плинність плакованих порошків і зростає їх насипна щільність.

Табл. 1.

Хімічний склад порошків вихідного порошку карбіду вольфраму та плакованого нікель-фосфором

Елемент	Плакований WC		Вихідний WC	
	Ваг %	Атом. %	Ваг %	Атом. %
Ni	94.59	88.48	-	-
P	3.66	6.49	-	-
W	-	-	81.65	24.21
Fe	0.40	0.39	0.61	0.60
O	1.35	4.63	4.70	16.01
C	-	-	13.04	59.17
Всього	100.00	100.00	100.00	100.00

Табл. 2.

Хімічний склад і технологічні властивості порошків карбіду вольфраму плакованих нікель-фосфором

Вид порошку	Хімічний склад порошків		Плинність с/50 г	Насипна щільність г/см ³
	Ni	P		
Вихідний порошок WC	—	—	34,0	7,95
Порошок WC плакований нікель-фосфором із кислого середовища	4,6	0,29	32,8	8,16
Порошок WC плакований нікель-фосфором із лужного середовища	6,5	0,24	31,5	8,34

Висновки.

1. Досліджено вплив складу хімічного розчину на процес плакування частинок карбіду вольфраму покриттям на основі нікелю. Встановлено, що застосування лужного розчину дозволяє отримати покриття із більшим вмістом нікелю і меншим вмістом фосфору.

2. Дослідження фізичних властивостей порошків карбіду вольфраму показало, що плакування частинок приводить до зміни їх форми та розміру. Форма плакованих частинок стає більш наближеною до сферичної з різною товщиною покриття на частинках, що обумовлено різною поверхневою площею та формою вихідних частинок. Крім зміни форми частинок порошку карбіду вольфраму, при плакуванні відбувається також, зміна його розмірів за гранулометричним складом.

3. Дослідження технологічних властивостей порошків карбіду вольфраму показали, що плакування приводить збільшення текучості і, відповідно, до зростання насипної щільності порошку, що обумовлено зменшення питомої поверхні частинок та згладженням рельєфу їх поверхні.

4. Результати досліджень показали перспективність плакування твердосплавних частинок карбіду вольфраму покриттям на основі нікелю із лужного розчину, отримані композиційні порошки можуть ефективно застосовуватись при створенні твердосплавних виробів різного функціонального призначення.

Список використаних джерел:

1.Панов В.С., Чувилин А.М. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них.М. : Изд-во МИСиС, 2001. 428 с.

2.Киффер Р., Бенезовский Ф. Твердые сплавы / под ред. В.И. Третьякова. М. : Металлургия, 1971. 392 с.

3.Panov V.S., Zaitsev A.A. WC-Co Hard Alloys Alloyed with Tantalum Carbide. Review. *Izvestiya vuzov Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya*. 2015; (2):44-48. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2015-2-44-48>

4.Kramar H., Bodrova L., Kovalchuk Ya., Marynenko S., Koval I. Effect of binder with nano Ni on mechanical properties of TiC based hard alloys // *Scientific Journal of the TNTU*, No 3 (91), 2018

5.Вишенков С.А. Химические и электрохимические способы осаждения металлопокрытий. М.: Машиностроение, 1975. – 310 с

6.Картвелешвили И.М., Терентьев А.Е., Ильченко Н.С. Автоклавное плакирование порошков алюминия и карбида вольфрама никелем // *Порошковая металлургия*.–1990. – №6. – с. 16–18

7.Guan C. Study of the technology of electrodeposition of an amorphous Ni - P coating on the surface of artificial diamonds // *Diandu Yu Jingshi. Plat and finish*. – 1994. – v.16, №1. – p. 13–15

8.Ramaseshan R., Nair N.G., Seshadri S.K. Magnetic moment studies on nickel coated titanium powders // *J. Mater. Sci. Lett.*–1997. – v. 16, №17. – p 1441–1443

9.Moustafa S.E., El-Badry S.A., Sanad A.M. Effect of graphite with and without cooper coating on consolidation behaviour and sintering of cooper // *Powder met.*–1997. – v.40, №3. – p. 201–206

10. Мовчан Б.А., Малащенко И.С. Жаростойкие покрытия осаждаемые в вакууме / под ред. Б.Е. Патона; Ин-т электросварки им. Е.О.Патона. – К.: Наук. думка, 1983. – 231 с.

11. Heck F.W., Rees E.L., Koehler L.F. The use of the carbonyl nickel gas process to nickel coat particulate materials // *Int. Conf. Powder met.*, London, 2–6 july 1990. – v.2. – p. 40–46

УДК 543.07+ 543.08

DOI 10.36910/775.24153966.2021.72.3

Н.В. Данилюк, Р.А. Заторський, А.О. Шийчук, Т.Р. Татарчук
Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника

ЕКСПРЕС-МЕТОД КОЛОРИМЕТРИЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ІОНІВ Fe(III) У ВОДІ ЗА ДОПОМОГОЮ СМАРТФОНУ: RGB-АНАЛІЗ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ

У роботі описано новий підхід до кількісного визначення концентрації іонів Fe^{3+} у воді за допомогою смартфона, що дозволяє проводити аналіз з достатньою точністю та чутливістю. Для покращення лінійності калібрувальних кривих та збільшення межі виявлення здійснено перетворення параметрів RGB на відносні параметри R' , G' , B' . Дана робота демонструє високу точність методу вимірювання концентрації іонів Fe^{3+} у межах від 0.1 до 5.0 мг/л з коефіцієнтом кореляції 0.9916. Точність колориметричного аналізу з використанням смартфона було підтверджено за допомогою спектрофотометра ULAB 102-UV. Простота та чутливість такого підходу роблять смартфон альтернативою професійним спектрофотометрам.

Ключові слова: смартфон, ферум, колориметричний аналіз.

Н.В. Данилюк, Р.А. Заторский, А.О. Шийчук, Т.Р. Татарчук ЭКСПРЕСС-МЕТОД КОЛОРИМЕТРИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНОВ Fe(III) В ВОДЕ С ПОМОЩЬЮ СМАРТФОНА: RGB-АНАЛИЗ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В работе описан новый подход к количественному определению концентрации ионов Fe^{3+} в воде с помощью смартфона, позволяющего проводить анализ с достаточной точностью и чувствительностью. Для улучшения линейности калибровочных кривых и увеличения предела обнаружения произведено преобразование параметров RGB в относительные параметры R' , G' , B' . Данная работа показывает высокую точность способа измерения концентрации ионов Fe^{3+} в пределах от 0.1 до 5.0 мг/л с коэффициентом корреляции 0.9916. Точность колориметрического анализа с использованием смартфона была подтверждена с помощью спектрофотометра ULAB 102-UV. Простота и чувствительность такого подхода делают смартфон альтернативой профессиональным спектрофотометрам.

Ключевые слова: смартфон, железо, колориметрический анализ.

N.V. Danyliuk, R.A. Zatorsky, A.O. Shiychuk, T.R. Tatarchuk RAPID COLORIMETRIC DETECTION OF Fe(III) IONS IN WATER USING A SMARTPHONE: RGB ANALYSIS OF DIGITAL IMAGES

The paper describes a new approach to quantifying the concentration of Fe^{3+} ions in water using a smartphone, which allows the analysis with sufficient accuracy and sensitivity. The RGB parameters were converted into specific parameters R' , G' , B' in order to improve the linearity of the calibration curves and increase the detection limit. This work shows the high accuracy of the detection method of the Fe^{3+} concentration in the range from 0.1 to 5.0 mg/L with a correlation coefficient of 0.9916. The accuracy of colorimetric analysis using a smartphone was confirmed using a ULAB 102-UV spectrophotometer. The simplicity and sensitivity of this approach make the smartphone an alternative to professional spectrophotometers.

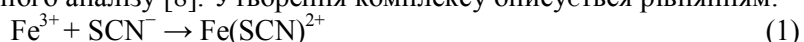
Keywords: smartphone, iron, colorimetric analysis.

Постановка проблеми. Наявність важких металів у водних об'єктах є небажаною навіть у малих концентраціях, і їх моніторинг є важливим для забезпечення якості води та контролю забруднення водою. Більшість аналітичних методів аналізу ґрунтуються на реакціях, в результаті яких утворюється забарвлений розчин певного кольору, який пропорційно змінюється зі зміною концентрації аналізованого компоненту. Для проведення точних вимірів у лабораторних умовах використовуються сучасні прилади, такі, як спектрофотометри та фотоколориметри. Проте спектрофотометри є дорогими. Смартфони можуть служити вирішенням цієї проблеми, оскільки все частіше застосовуються для визначення концентрації речовини колориметричним методом. Тому актуальним завданням є розробка портативних аналітичних приладів та методів аналізу, в яких детектором може виступати камера смартфона. Впровадження таких інновацій дає все більше можливостей для вдосконалення хімічного аналізу та покращення контролю навколишнього середовища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Кількісні аналітичні вимірювання за допомогою смартфона вже знайшли своє місце у різноманітних галузях досліджень, а саме для визначення кількості альбуміну у сечі [1], проведення аналізу якості харчових продуктів [2,3], аналізу якості біодизельного пального [4] та моніторингу навколишнього середовища [5]. Окрім колориметричних вимірів, смартфон може служити і для проведення флуориметричних визначень [6,7].

Ферум постійно міститься в поверхневих і підземних водах у вигляді іонів Fe^{2+} і Fe^{3+} , причому вміст його коливається у широких межах: від декількох міліграмів і до декількох грамів. Визначення концентрації іонів Fe^{3+} ґрунтується на їх здатності утворювати комплекс з тіоціанатом

(SCN⁻), інтенсивно червоного кольору Fe(SCN)²⁺, який має максимальне світлопоглинання при довжині хвилі опромінення $\lambda=486$ нм (Рис. 1-а). Метод є доволі простим і тому використовується протягом багатьох років для кількісного аналізу [8]. Утворення комплексу описується рівнянням:



Вплив перешкоджаючих іонів представлений в таблиці 1. Дані вказують на рівень впливу аніонів і катіонів, які спричиняють похибку не більше $\pm 5,0\%$. З наведених результатів видно, що метод залежить від впливу сторонніх іонів. Вказано, що найбільший вплив має оксалат-аніон тоді, як серед катіонів найбільший вплив має іон Co²⁺, у присутності якого відбувається завищення результатів аналізу.

Табл. 1.

Вплив перешкоджаючих іонів на визначення концентрації іонів Fe³⁺, які спричиняють похибку вимірювання не більше $\pm 5\%$ [9]

Аніони	*Іон X / Fe ³⁺	Катіони	*Іон X / Fe ³⁺
C ₂ O ₄ ²⁻	1 (-)	Co ²⁺	7 (+)
F ⁻ (у вигляді NaF)	13 (-)	Al ³⁺	91 (-)
MnO ₄ ⁻	45 (+)	Sn ²⁺	95 (+)
Cr ₂ O ₇ ²⁻	77 (+)	Hg ²⁺	350 (-)
H ₂ PO ₄ ⁻	100 (-)	Cu ⁺	392 (+)
Γ	115 (-)	Mg ²⁺	732 (-)
CN ⁻	380 (-)	NH ₄ ⁺	788 (-)

*співвідношення кількості перешкоджаючих іонів до кількості іонів Fe³⁺; («+» – завищення результатів аналізу, «-» – заниження результатів аналізу).

Простий та рН-селективний спектрофотометричний метод з використанням саліцилової кислоти як забарвлюючого реагенту, застосовано для визначення концентрації іонів Fe³⁺ у фармацевтичних препаратах [10]. Метод заснований на якісній реакції між іонами Fe³⁺ та саліциловою кислотою при рН 2.26 та 6.10 для отримання розчинів з максимальним світлопоглинанням при 520 та 460 нм відповідно [10].

Для спектрофотометричного визначення концентрації іонів Fe³⁺ та загального вмісту феруму часто використовується скварінова кислота (1,2-дигідрокси-3,4-дикетонциклобутен), яка вступає в реакцію з іонами Fe³⁺ утворюючи інтенсивно забарвлену сполуку червоного кольору. Аналітичне визначення включає додавання амоній скварінату (40 ммоль/л) (приготовленого у фталатному буферному розчині (рН = 2.7)) до досліджуваного зразка і вимірювання оптичної густини при $\lambda = 515$ нм [11]. Також іони Fe³⁺ реагують з диантипіринметаном, утворюючи комплексну сполуку червоного кольору, яка має максимум світлопоглинання при $\lambda = 520$ нм [12].

Ще одним чутливим спектрофотометричним методом визначення концентрації іонів Fe³⁺ є взаємодія з тіроном (4,5-дигідрокси-1,3-бензендисульфонова кислота) в присутності цетилпіридиній хлориду при рН 5.6. Утворений комплекс демонструє максимальну абсорбційну здатність при 520 нм. Метод застосовується для визначення заліза в сплавах на основі Al та Cu, використовуючи відповідні маскуючі реагенти [13].

Постановка завдання. Мета дослідження – провести кількісне визначення іонів Fe(III) у природній воді на основі аналізу RGB-зображень, отриманих із використанням цифрової камери смартфона.

Методологія досліджень. Детектором для отримання інформації про колір слугувала камера смартфона Samsung Galaxy A6 (16 Мрх). Для розпізнавання кольору використано безкоштовний мобільний додаток «Спектр». Він дозволяє працювати з такими колірними системами, як RGB, HSV та CIE Lab. Отримані дані про колір є основою для кількісного аналізу. Для опрацювання отриманих даних були використані формули (2)-(4) [14]:

$$R' = -\log\left(\frac{R}{R+G+B}\right); \quad (2)$$

$$G' = -\log\left(\frac{G}{R+G+B}\right); \quad (3)$$

$$B' = -\log\left(\frac{B}{R+G+B}\right); \quad (4)$$

Збільшення концентрації розчинів дає пропорційну зміну відносних параметрів кольорів (R' , G' , B'). Використовуючи співвідношення 2-4 можна отримати відтворювані і точні результати, які лінеаризуються в широких діапазонах концентрацій іонів Fe^{3+} .

Для підтвердження отриманих даних під час визначення концентрації іонів Fe^{3+} , був використаний спектрофотометр ULAB 102-UV), оснащений скляною кюветою з довжиною оптичного шляху 5 мм. Калібрувальну криву побудували шляхом визначення оптичної густини відомих кількостей стандартного розчину Fe^{3+} в діапазоні 0.0–5.0 мг/л та подальшого додавання до них 2 см³ HNO_3 (1:1) і 4 мл 10% KSCN. Визначення максимальної довжини хвилі поглинання проводилося в діапазоні від 325 до 700 нм (Рис. 1-а.). Розчини перемішували і визначали світлопоглинання при 486 нм. Розчином порівняння була холоста проба. За отриманими даними побудовано калібрувальний графік (Рис. 1-б.) – залежність оптичної густини від концентрації розчину (c_0 , мг/дм³). Закон Бугера-Ламберта-Бера справджується в діапазоні концентрацій 0.0–5.0 мг Fe^{3+} /дм³.

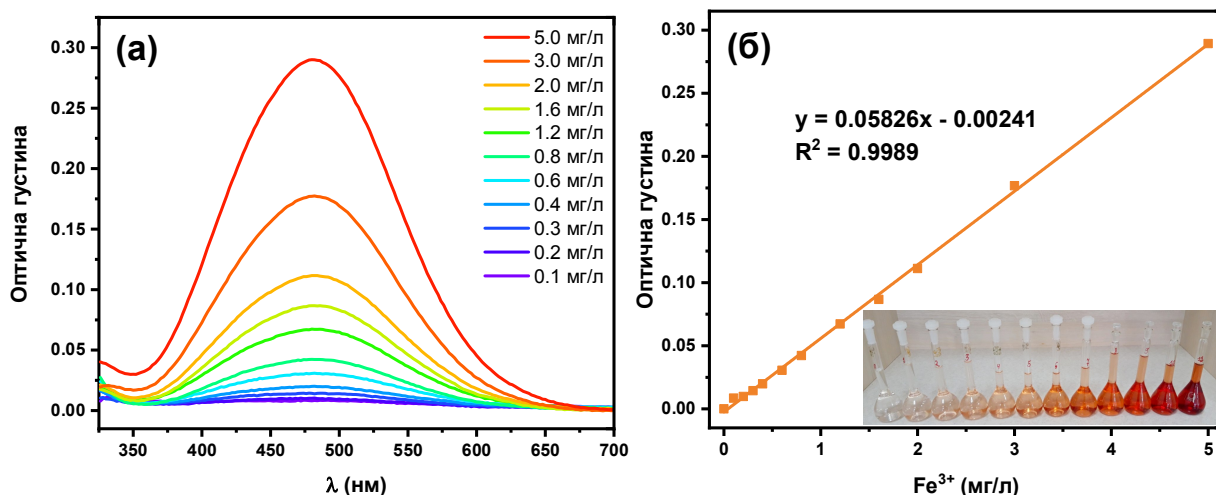


Рис. 1. (а) Спектри поглинання комплексу $\text{Fe}(\text{SCN})^{2+}$; (б) калібрувальна крива для визначення концентрації іонів Fe^{3+} (максимум світлопоглинання 486 нм).

Викладення основного матеріалу дослідження. При кількісному визначенні іонів Fe^{3+} у вигляді тіоціанатного комплексу $\text{Fe}(\text{SCN})^{2+}$ використано цифрові зображення розчинів, отримані за допомогою камери смартфона, з яких взято параметри RGB. Дані представлено у Таблиці 2 та зображено на Рис.2-а. Криві зеленого та синього кольорів демонструють тенденцію зменшення інтенсивності збільшенням концентрації іонів Fe^{3+} . Натомість інтенсивність червоного кольору зростає, що пов'язано з утворенням тіоціанатного комплексу, і також це є наслідком зменшення значень синього (B') та зеленого кольорів компонент (G').

Табл. 2.

Параметри кольору R, G, B та відносні параметри R' , G' , B' цифрових зображень розчинів із різною концентрацією іонів Fe^{3+}

№ п/п	Fe^{3+} (мг/л)	R	G	B	R'	G'	B'
1	0.0	172	173	116	0.428	0.426	0.599
2	0.1	176	177	120	0.429	0.427	0.596
3	0.2	178	176	117	0.423	0.428	0.605
4	0.3	175	174	118	0.426	0.429	0.597
5	0.4	176	174	115	0.422	0.427	0.607
6	0.6	183	175	113	0.411	0.430	0.620
7	0.8	187	176	110	0.403	0.429	0.633
8	1.2	193	174	105	0.388	0.433	0.653
9	1.6	198	176	100	0.379	0.430	0.676
10	2.0	203	178	96	0.371	0.428	0.696
11	3.0	214	177	88	0.350	0.432	0.736
12	5.0	228	178	63	0.313	0.421	0.872

Після обробки даних з використанням формул (2)–(4) були побудовані аналітичні криві для еталонних розчинів Fe^{3+} (Рис. 2-б,в). Зміна концентрації розчину призводить до зміни кольору, який використовується для отримання цифрового зображення, що реєструється смартфоном.

Отримані дані RGB були перетворені на відносні параметри R' , G' і B' . Зростання концентрації комплексу $\text{Fe}(\text{SCN})^{2+}$ призводить до пропорційного збільшення кількості вмісту червоної складової R' , що фіксується камерою смартфона. Спостерігається лінійність кривих в діапазоні концентрацій від 0.0 до 5.0 мг/л (рис. 2-б,в). Коефіцієнт кореляції для параметра R' становить $R^2 = 0.9723$, а для параметра B' $R^2 = 0.9916$, що свідчить про те, що розрахунки доцільніше проводити за синьою складовою (B'). Межа виявлення становить 0.1 мг/л, виходячи з найнижчої доданої концентрації іонів Fe^{3+} , що сприяє зміні значень RGB відносно розчину порівняння ($2 \text{ cm}^3 \text{ HNO}_3$ (1:1) та $4 \text{ cm}^3 \text{ KSCN}$, розчинених водою у колбі на 50 cm^3).

Порівняння отриманих результатів, визначених смартфоном та спектрофотометром, показано у вигляді діаграми на рис. 2-г. З діаграми видно, що результати цих двох методів практично співпадають. Отже, можна проводити визначення концентрації іонів Fe^{3+} у природніх водах, використовуючи смартфон.

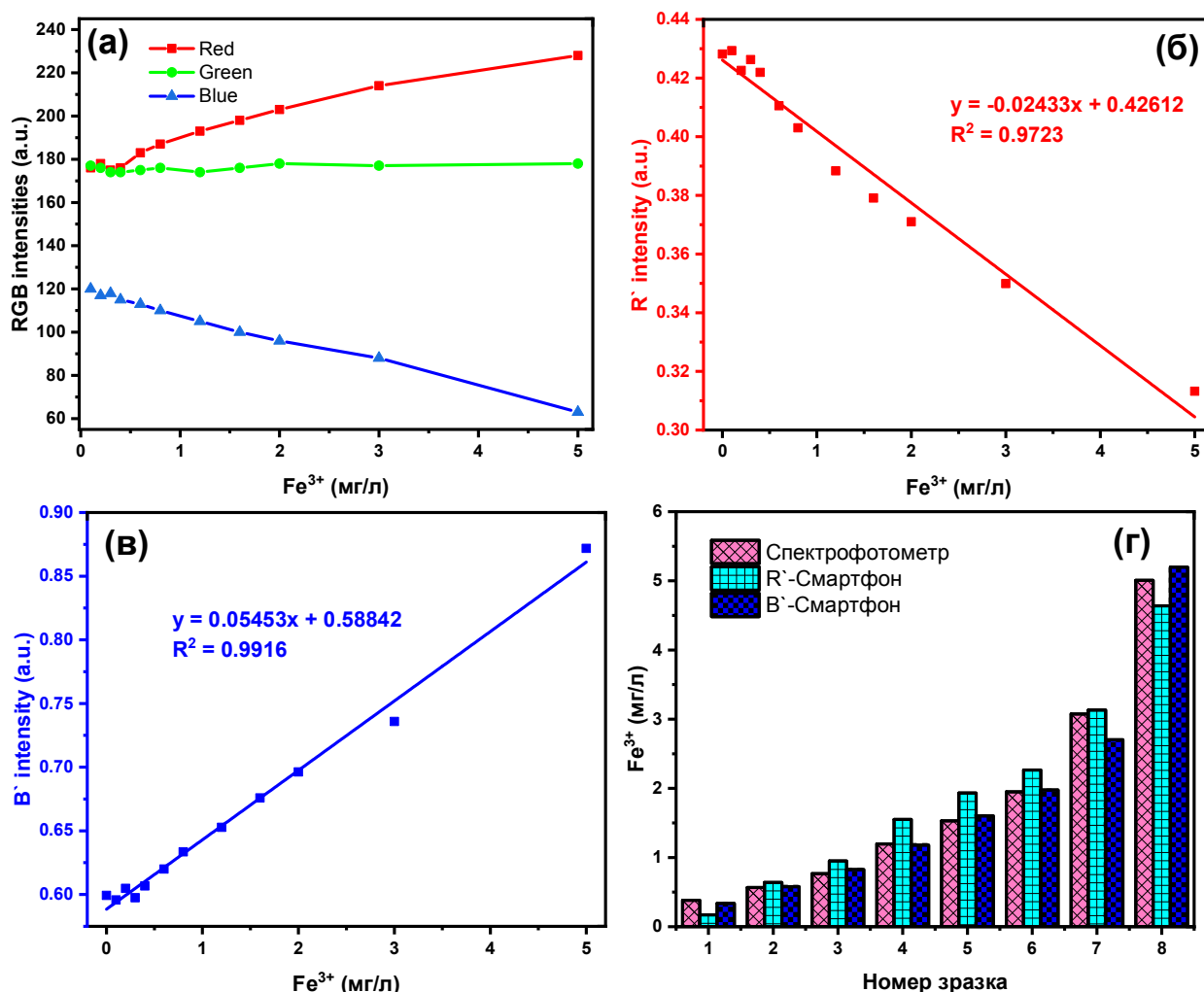


Рис. 2. (а) Зміна інтенсивності червоного (R), зеленого (G) та синього (B) кольорів зі зміною концентрації іонів Fe^{3+} ; (б) калібрувальна крива для визначення концентрації іонів Fe^{3+} у воді за допомогою смартфона – червоний колір (параметр R'); (в) калібрувальна крива для визначення концентрації іонів Fe^{3+} у воді за допомогою смартфона – синій колір (параметр B'); (г) порівняльна діаграма концентрації іонів Fe^{3+} у водних розчинах, отримана за допомогою смартфона та спектрофотометру.

Висновки. Дослідження містить опис швидкого та простого методу визначення концентрації іонів Fe^{3+} у воді за допомогою смартфона. Параметри цифрових зображень, отриманих з камери смартфона з використанням програми Спектр, показали повторюваність та надійність визначення. Дані співвідношення кольорів R, G і B були перетворені у відносні параметри R' , G' і B' , що забезпечило лінійну залежність між інтенсивністю кольору та концентрацією іонів Fe^{3+} . В оптимізованих умовах був отриманий робочий діапазон визначення феруму: від 0,1 до 5,0 мг Fe^{3+} /л з коефіцієнтом кореляції 0.9916 для дванадцяти калібрувальних

точок. Результати, отримані з використанням камери смартфона, показали високу точність та низьку межу виявлення. Порівняння отриманих результатів з результатами, отриманими на спектрофотометрі не показало суттєвих відмінностей між обома методами.

Список використаних джерел:

- [1] Mathaweesansurn A., Maneerat N., Choengchan N. A mobile phone-based analyzer for quantitative determination of urinary albumin using self-calibration approach. *Sensors Actuators B Chem.* 2017. Vol. 242. P. 476–483. <https://doi.org/10.1016/J.SNB.2016.11.057>.
- [2] Vidal M., Garcia-Arrona R., Bordagaray A., Ostra M., Albizu G. Simultaneous determination of color additives tartrazine and allura red in food products by digital image analysis. *Talanta.* 2018. Vol. 184. P. 58–64. <https://doi.org/10.1016/J.TALANTA.2018.02.111>.
- [3] Masawat P., Harfield A., Namwong A. An iPhone-based digital image colorimeter for detecting tetracycline in milk. *Food Chem.* 2015. Vol. 184. P. 23–29. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2015.03.089>.
- [4] Soares S., Rocha F.R.P. A simple and low-cost approach for microdistillation: Application to methanol determination in biodiesel exploiting smartphone-based digital images. *Talanta.* 2019. Vol. 199. P. 285–289. <https://doi.org/10.1016/J.TALANTA.2019.02.064>.
- [5] Srivastava S., Vaddadi S., Sadistap S. Smartphone-based System for water quality analysis, *Appl. Water Sci.* Vol. 8 (2018). <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0780-0>.
- [6] Granica M., Tymecki Ł. Analytical aspects of smart (phone) fluorometric measurements. *Talanta.* 2019. Vol. 197. P. 319–325. <https://doi.org/10.1016/J.TALANTA.2019.01.032>.
- [7] Zhang C., Kim J.P., Creer M., Yang J., Liu Z. A smartphone-based chloridometer for point-of-care diagnostics of cystic fibrosis, *Biosens. Bioelectron.* 2017. Vol. 97. P. 164–168. <https://doi.org/10.1016/J.BIOS.2017.05.048>.
- [8] João A.F., Squizzato A.L., Fernandes G.M., Cardoso R.M., Batista A.D., Muñoz R.A.A. Iron (III) determination in bioethanol fuel using a smartphone-based device. *Microchem. J.* 2019. Vol. 146. P. 1134–1139. <https://doi.org/10.1016/J.MICROC.2019.02.053>.
- [9] Najib F.M., Hayder O.I. Study of Stoichiometry of Ferric Thiocyanate Complex for Analytical. *Iraqi Natl. J. Chem.* 2011. Vol. 42. P. 135–155.
- [10] Rajendraprasad N., Basavaiah K. Modified spectrophotometric methods for determination of iron(III) in leaves and pharmaceuticals using salicylic acid. *Indian J. Adv. Chem. Sci.* 2016. Vol. 4. P. 302–307.
- [11] Stalikas C.D., Pappas A.C., Karayannis M.I., Veltsistas P.G. Simple and selective spectrophotometric method for the determination of iron (III) and total iron content, based on the reaction of Fe(III) with 1,2-dihydroxy-3,4-diketocyclo-butene (squaric acid). *Mikrochim. Acta.* 2003. Vol. 142. P. 43–48. <https://doi.org/10.1007/s00604-002-0950-4>.
- [12] S. Sharma Lutfullah, Rahman N., Najmul Hejaz Azmi S., Juma S. Al Hidaifi H., Mansoor Abdulrahman AlQasm M. Spectrophotometric determination of Fe (III) via complexation with piroxicam in synthetic mixture and soil samples. *J. Sci. Ind. Res.* 2010. Vol. 69. P. 135–141.
- [13] Bhadani S.N., Tiwari M., Agrawal A., Kavipurapu C.S. Spectrophotometric determination of Fe(III) with tiron in the presence of cationic surfactant and its application for the determination of iron in Al-alloys and Cu-based alloys. *Mikrochim. Acta.* 1994. Vol. 117. P. 15–22. <https://doi.org/10.1007/BF01243012>.
- [14] Danyliuk N., Tatarchuk T., Shyichuk A. Estimation of Photocatalytic Degradation Rate Using Smartphone Based Analysis. *Phys. Chem. Solid State.* 2020. Vol. 4. P. 727–736. <https://doi.org/10.15330/pess.21.4.727-736>.

УДК 678.027.3

DOI 10.36910/775.24153966.2021.72.4

С.А. Федосов¹, Ю.О. Одарчук¹, В.Є. Сахнюк¹, Д.А. Захарчук², О.М. Вілігурський¹¹Волинський національний університет імені Лесі Українки²Луцький національний технічний університет

АНАЛІЗ СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ В УКРАЇНІ ТА СВІТІ

Стаття аналізує публікації авторитетних світових і українських науковців у галузі полімерних композитних матеріалів з метою знайти закономірності щодо підтримки та розвитку цього напрямку у світі та в Україні, визначити перспективи для спільних досліджень. Розглянуто особливості міжнародної співпраці, окреслено коло провідних видань у науковій області, проаналізовано фактори впливовості вчених різних країн на розвиток цієї області. Дослідження базується на результатах даних, опублікованих у міжнародній наукометричній базі Scopus. Виконано аналіз і сформульовано рекомендації для покращення поширення результатів вітчизняних вчених у світовій науковій спільноті за цим напрямком.

Ключові слова: полімерні композитні матеріали, публікації, наукові дослідження, h-індекс.

С.А. Федосов, Ю.О. Одарчук, В.Е. Сахнюк, Д.А. Захарчук, О.Н. Вилигурский АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В УКРАИНЕ И МИРЕ

Статья анализирует публикации авторитетных мировых и украинских ученых в области полимерных композитных материалов с целью найти закономерности поддержки и развития этого направления в мире и в Украине, определить перспективы для совместных исследований. Рассмотрены особенности международного сотрудничества, очерчен круг ведущих изданий в научной области, проанализированы факторы влияния ученых разных стран на развитие этой области. Исследование основывается на результатах данных, опубликованных в международной наукометрической базе Scopus. Выполнен анализ и сформулированы рекомендации по улучшению распространения результатов отечественных ученых в мировой научной общности по этому направлению.

Ключевые слова: полимерные композитные материалы, публикации, научные исследования, h-индекс.

S. Fedosov, Yu. Odarchuk, V. Sakhnyuk, D. Zakharchuk, O. Viligurskiy ANALYSIS OF THE STATE OF RESEARCH OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS IN UKRAINE AND THE WORLD

The article analyzes the publications of authoritative world and Ukrainian scientists in the field of polymer composite materials in order to find patterns for the support and development of this area in the world and in Ukraine, to identify prospects for joint research. The peculiarities of international cooperation are considered, the range of leading publications in the scientific field is outlined, the factors of influence of scientists of different countries on the development of this field are analyzed. The study is based on the results of data published in the international scientometric database Scopus. The analysis is made and recommendations for improvement of distribution of results of domestic scientists in the world scientific community in this area are formulated.

Keywords: polymer composite materials, publications, scientific research, h-index.

Постановка проблеми. Нанотехнології швидко увійшли у світ науки та техніки і, завдяки своїм унікальним властивостям, набули застосування майже в усіх галузях виробництва і промисловості, починаючи від військових потреб і закінчуючи побутом. З розвитком нанотехнологій з'явилися надсучасні бронезилети, матеріали для «невидимості» літаків і кораблів та ін. Підвищення інтеграції електронних компонент, нові матеріали з покращеними характеристиками температурної стійкості та збереження своїх структурних, діелектричних, електрофізичних і магнітних властивостей, а також розроблення нових датчиків газу, тиску, випромінювання з широким діапазоном хвиль на основі мембран з атомарною товщиною – усе це суттєві переваги наноелектроніки. Дослідження пов'язані з нанотехнологіями є одними з найактуальніших на сьогодні і носять не лише теоретичний характер, але й мають велике практичне значення, і включають в себе розробку методів новітніх технологій одержання та переробки полімерних матеріалів з прогнозованим комплексом їх властивостей.

Постановка завдань. В роботі поставлено мету – виконати аналіз досліджень, які стосуються полімерних композитних матеріалів, зробити спробу визначити особливості розвитку даної тематики у світі та Україні.

Методологія досліджень. Проведено аналіз публікацій, індексованих у наукометричній базі Scopus. Для аналізу відібрано статті з пошуку за ключовими словами (тегом) «Polymer composite materials» (Полімерні композитні матеріали) у ключових словах (keywords) наукових статей за період 1993-2021 рр. Вибірку зроблено за результатом аналізу таких матеріалів: найбільш

цитованих публікацій із афіліацією у світі, найновіших публікацій із афіліацією в світі, аналогічно, із афіліацією в Україні – найцитованіших публікацій і найбільш нових публікацій. Аналізувалися: афіліація авторів, країни авторів, наявність фінансової підтримки досліджень, журнал, у якому здійснено публікацію, рік публікації та їх кількість, а також і самі публікації. Така методика була запропонована і апробована у [1-3].

Викладення основного матеріалу. Вивченням проблем, які пов'язані з дослідженнями полімерних композитних матеріалів займається велика кількість науковців усього світу. У наукометричній базі даних Scopus за період 1993-2021 рр. опубліковано 50 020 наукових праць пов'язаних з полімерними композитними матеріалами (Polymer composite materials). Високий сумарний h-індекс ($h = 373$) лише підтверджує велику зацікавленість науковців до даної тематики. Майже половина всіх робіт (рис. 1) опубліковано вченими з Китаю та США. Серед країн-лідерів, також: Індія, Японія, Великобританія, Німеччина тощо. Самі ж дослідження з даної тематики зосереджено у провідних науково-дослідних центрах, серед яких: Міністерство освіти Китаю, Китайська академія наук, Сичуанський університет, Харбінський технологічний інститут, Національний центр наукових досліджень CNRS, Технологічний інститут Джорджії тощо. Закономірно, що провідні центри належать саме країнам-лідерам – Китай, США тощо.

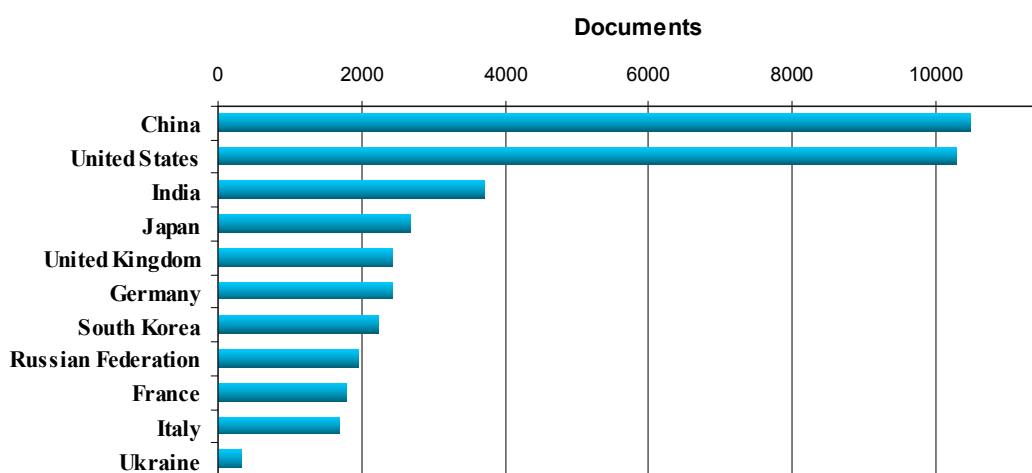


Рис. 1. Кількість публікацій за країнами у дослідженнях полімерних композитних матеріалів.

Для дослідників з українських організацій кількість публікацій присвячених вивченню питань полімерних композитних матеріалів (Polymer composite materials) значно менша ніж загальносвітова і складає 325 із h-індексами $h = 27$. Провідними українськими установами за кількістю публікацій, які пов'язані з дослідженнями полімерних композитних матеріалів є (кількість публікацій у Scopus): Національна академія наук України (157), інститути НАН України – Інститут хімії високомолекулярних сполук (35), Інститут хімії поверхні (21), Інститут фізики (18), Інститут проблем матеріалознавства (17), Інститут фізики напівпровідників (15), а також Київський національний університет імені Тараса Шевченка (37), Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (22), Національний університет «Львівська політехніка» (13).

У найцитованіших публікаціях розглядаються найактуальніші результати досліджень полімерних композитних матеріалів. Аналіз самих публікацій за тегом «Polymer composite materials» (Полімерні композитні матеріали) вказує на високе практичне значення таких досліджень. Зокрема у найбільш цитованій роботі [4] (10 645 цитувань) представлено новий загальний підхід до створення графен-полімерних композитів шляхом повного відшарування графіту9 і дисперсії на молекулярному рівні окремих хімічно модифікованих графенових листів всередині полімерних хостів, що забезпечує шлях до широкого нового класу матеріалів на основі графену та значно розширює їх застосування. Ефективність збору носіїв та ефективність перетворення енергії полімерних фотоелектричних елементів було покращено [5] (9 192 цитувань) шляхом змішування напівпровідникового полімеру з C_{60} або його функціоналізованими похідними, а висока ефективність збору є результатом двонеперервної мережі внутрішніх донорно-акцепторних гетеропереходів. Автори [6] (4 914 цитувань) показали, що WS_2 і MoS_2 ефективно зміцнюють полімери, тоді як гібридні плівки WS_2 вуглецевих нанотрубок мають високу

провідність, що призводить до перспективних термоелектричних властивостей. У [7] (4 589 цитувань) увага авторів зосереджена на механізмах і теоретичних моделях, які були розроблені для електроспінінгу, а також на можливості керувати діаметром, морфологією, складом, вторинною структурою та просторовим вирівнюванням електроспінінгових нановолокон. Виділено також деякі потенційні застосування, які пов'язані з особливими характеристиками електроспінінгових нановолокон. Огляд [8] (4 313 цитувань) досліджує стан знань про взаємозв'язок між пористістю та розміром пор біоматеріалів, що використовуються для регенерації кістки. Розглянуто вплив цих морфологічних особливостей на остеогенез *in vitro* та *in vivo*, а також взаємозв'язок з механічними властивостями каркасів. У роботі [9] (3 341 цитувань) розглянуто прогрес, який досягнуто на сьогоднішній день у сфері механічного армування полімерів за допомогою нанотрубок і як результат досліджень – обговорення найбільш перспективних методів обробки механічного армування та перспективи на майбутнє. Детально розглядаються різні методи модифікації поверхні для досягнення хорошої біосумісності, а також більш високої стійкості до зносу та корозії у [10] (3 324 цитувань). Загалом, була зроблена спроба розкрити поточний стан матеріалів на основі Ті для біомедичного використання. У [11] (3 160 цитувань) вивчався конструкційний полімерний матеріал із здатністю автономно загоювати тріщини. Матеріал містить мікрокапсулований загоювальний агент, який виділяється при проникненні тріщин. Експерименти з руйнуванням дають 75 % відновлення міцності, і автори очікують, що їх підхід буде застосовний до інших систем крихких матеріалів (включаючи кераміку та скло).

Найбільш цитовані публікації українських вчених мають місце у співавторстві з колегами із Польщі [12], Франції [13], США [14] і [15], Китаю [15]. Найцитованіша робота науковців України [12] (388 цитувань) присвячена дослідженню електрохімічних властивостей композитів, які виготовлені з електропровідного полімеру полі(3,4-етилendioксифену) тобто PEDOT та багатошарових вуглецевих нанотрубок (ВНТ) для застосування суперконденсаторів. Встановлено, що PEDOT/вуглецевий композит має хороші циклічні характеристики з високою стабільністю у всіх електролітах та володіє значною об'ємною енергією через свою високу щільність. У [13] (368 цитувань) авторами розглянуто кілька методів виробництва композитів/сумішей, що містять поліанілін PANI. Зокрема, розглянуто узагальнені підходи до підготовки таких матеріалів. Розглянуто дві різні групи синтетичних методів, заснованих на полімеризації аніліну: (1) у присутності або всередині полімеру матриці, або (2) змішування попередньо приготовленого PANI з полімером матриці. Проаналізовано деякі аспекти цих методів, наголошено на особливостях, які визначають властивості кінцевих композитів/сумішей.

Вплив складу ливарної суміші та процесу введення наночастинок на морфологічні та граничні властивості підготовлених мембран досліджували у [14] (237 цитувань) шляхом порівняння нанокомпозитів різних препаратів із контрольними групами без срібла. Інтерпретовано структуру та властивості нанокомпозитів з точки зору взаємозв'язку процесів утворення наночастинок та гелеутворення багатої на полімер фази під час фазової інверсії. Встановлено у деяких випадках включення нанорозмірного срібла, яке призводило до розширення макровидів і зниження гідралічного опору на порядок, що супроводжувалося лише помірним зниженням відторгнення. У роботі [15] (166 цитувань) продемонстровано 3D двофотонний запис та двофотонне зчитування у фотохромних полімерних композитах. Метод зчитування на основі RET виявився по суті неруйнівним (демонстрував втрату початкового випромінювання флуоресценції менше ніж 20% від початкового випромінювання після 10 000 циклів зчитування), забезпечуючи вирішення давньої проблеми у фотохромному оптичному зберіганні даних. Електропровідні композити на основі PE, PP, PS, PMMA і PA, які наповнені сажею досліджено в [16] (125 цитувань). Встановлено, що перколяційна поведінка провідності залежить від ступеня взаємодії полімер-наповнювач. Запропоновано рівняння, що враховують взаємодію полімер-наповнювач, для опису провідності композиту вище та нижче порога перколяції.

Серед найбільш цитованих світових наукових центрів (науковців публікації, яких найбільш цитовані) спостерігаються, в основному, установи країн-лідерів: Північно-Західний університет (США), Бірський нанотехнологічний центр (США), Інститут полімерів та органічних твердих тіл (США), Центр досліджень адаптивних наноструктур і нанопристроїв (Ірландія), Корейський університет (Південна Корея), Вашингтонський університет (США), Університет Тафтса (США) та ін. Хоча ці центри не входять до переліку провідних науково-дослідних центрів, які мають найбільшу кількість публікацій, проте науковці з них можуть претендувати на найвищі позиції у рангу світових вчених. В Україні окрім провідних за кількістю публікацій також є низка центрів з

найавторитетнішими (найцитованішими) науковцями в області полімерних композитних матеріалів: Київський національний університет технологій і дизайну, Інститут біоорганічної хімії та нафтохімії ім. В.П. Кухаря НАНУ, Національний університет «Києво-Могилянська академія», Національний педагогічний університет імені М.П. Драгоманова та ін.

Табл. 1.

Порівняльна характеристика світових та українських досліджень в області «Полімерні композитні матеріали» (Polymer composite materials)

Світ	Порівняння	Україна
50 020	Кількість публікацій	325
373	h-індекс	27
– Journal of Applied Polymer Science, US (Q1 0,58) – Composites Science and Technology, UK (Q1 2,0) – Composites Part B: Engineering, UK (Q1 2,2) – Proceedings of SPIE The International Society for Optical Engineering, US (0,19) – Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, UK (Q1 1,88) – Advanced Materials Research, Germany – Polymer, Netherlands (Q1 0,91) – ACS applied materials & interfaces, US (Q1 2,54) – Composite Structures, Netherlands (Q1 1,63) – Polymer Composites, US (Q1 0,58)	Джерела публікацій, країна (SJR)	– Molecular Crystals and Liquid Crystals, UK (Q3 0,22) – Chemical and Petroleum Engineering, US (Q3 0,29) – Powder Metallurgy and Metal Ceramics, US (Q3 0,22) – Springer Proceedings in Physics, Germany (0,14) – Nanoscale Research Letters, US (Q1 0,87) – Journal of Applied Polymer Science, US (Q1 0,58) – Materials Science, US (Q3 0,23) – Mechanics of Composite Materials, US (Q2 0,36) – Functional Materials, Ukraine (Q4 0,18) – International Applied Mechanics, US (Q3 0,22)
– National Natural Science Foundation of China – National Science Foundation – European Commission – Ministry of Education of the People's Republic of China – Fundamental Research Funds for the Central Universities – U.S. Department of Defense – Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China – National Research Foundation of Korea – Engineering and Physical Sciences Research Council – Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology	Організації, що фінансують дослідження	– European Commission – National Academy of Sciences of Ukraine – Ministry of Education and Science of Ukraine – North Atlantic Treaty Organization – Seventh Framework Programme – Research Executive Agency – Bundesministerium für Bildung und Forschung – Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego – Narodowe Centrum Nauki – Russian Foundation for Basic Research

Найвагоміші результати досліджень світових науковців опубліковано у авторитетних виданнях Q1. Найбільшу кількість представлено у журналах: Journal of Applied Polymer Science (SJR 0,58), Composites Science and Technology (SJR 2,0), Composites Part B: Engineering (SJR 2,2), Composites Part A: Applied Science and Manufacturing (SJR 1,88), Polymer (SJR 0,91), ACS applied materials & interfaces (SJR 2,54), Composite Structures (SJR 1,63), Polymer Composites (SJR 0,58),

тоді як найбільш цитовані статті опубліковані у топових (з високим SJR) журналах: Nature (SJR 15,99), Science (SJR 12,56), Advanced Materials (SJR 10,71), Biomaterials (SJR 3,21), Carbon (SJR 2,25), Progress in Materials Science (SJR 9,71), Macromolecules (SJR 1,99), Nature Nanotechnology (SJR 14,31). Причому, значна кількість публікацій видана не лише у топових журналах, але й у великій кількості матеріалів конференцій, таких як Proceedings of SPIE The International Society for Optical Engineering (SJR 0,19) тощо, що вказує на важливість участі науковців у роботі таких заходів, зокрема представлення на них своїх результатів.

Для України ситуація з невисоким значенням h-індексу пов'язана не лише з кількістю публікацій. Є країни, які мають приблизно таку ж кількість публікацій, але випереджають нас за якістю (h-індексом). Для пояснення цього проаналізовано видання, де представлені дослідження наших вчених. Українські науковці найчастіше публікують свої результати в журналах Q3: Molecular Crystals and Liquid Crystals (SJR 0,22), Chemical and Petroleum Engineering (SJR 0,29), Powder Metallurgy and Metal Ceramic (SJR 0,22), Materials Science (SJR 0,23), International Applied Mechanics (SJR 0,22), але і значна їх кількість прослідковується у виданнях Q1 і Q2: Nanoscale Research Letters (SJR 0,87), Journal of Applied Polymer Science (SJR 0,58), Mechanics of Composite Materials (SJR 0,36). Привертає увагу те, що країни-лідери за кількістю і якістю публікацій публікують результати своїх досліджень практично у тих самих наукових виданнях. Це є певним «плюсом», оскільки, публікуючи статті у таких самих журналах, вчені цих країн звертають увагу на інші праці, опубліковані у цих виданнях. Таким чином реалізується більша кількість цитувань їх праць. Тому найбільш цитовані українські публікації саме у виданнях Q1 і Q2. Причому, імпакт-фактори цих журналів не завжди є надто високими: Journal of Physics and Chemistry of Solids (Q2 SJR 0,74), Progress in Polymer Science (Q1 SJR 5,95), Journal of Membrane Science (Q1 SJR 1,93), Chemistry of Materials (Q1 SJR 3,74), Composite Interfaces (Q2 SJR 0,59), Advances in Colloid and Interface Science (SJR Q1 2,27), ACS Nano (Q1 SJR 5,55), Polymer Engineering and Science (Q2 SJR 0,5), Journal of Colloid and Interface Science (Q1 SJR 1,54), Powder Technology (Q1 SJR 1,08). Часто такими виданнями є матеріали профільних конференцій, що є ознакою сформованого певного міжнародного наукового середовища, представники якого беруть спільно участь у міжнародних конференціях та симпозіумах, де діляться своїми результатами.

Дещо складніше робити висновки за галуззю знань, з якою позиціонується певна публікація. Для всіх публікацій по світу пов'язаних з «Полімерні композитні матеріали» (Polymer composite materials), переважаючими є «Матеріалознавство», «Інженерія», «Хімія», «Фізика та астрономія» і «Хімічна інженерія» (рис. 2а). Для України переважаючі галузі такі ж як у світі (рис. 2б), лише з дещо іншими пріоритетами. Значно вищі світові відсоткові значення кількості публікацій проти українських пов'язаних з галузями знань «Матеріалознавство» (33,4 проти 29,0 %), «Інженерія» (24,1 і 21,1 %), «Хімія» (12,3 і 11,7 %), «Хімічна інженерія» (6,7 і 5,1 %). Тоді як для галузі «Фізика та астрономія» спостерігається значний «перекос» (10,9 проти 20,7 %). Лідерство «Матеріалознавства» вказує на те, що відповідні дослідження більше інтегровані саме до конкретних областей матеріалознавства і перейшли у практичне русло, яке пов'язане з інженерією чи хімією. Перевагу за кількістю публікацій галузі знань «Фізика та астрономія» можна пояснити значним фундаментальним доробком і розвитком прикладних аспектів. Науковці намагаються знайти практичне застосування результатів досліджень своїх колективів в матеріалознавстві чи інженерії, але спираються у більшості на попередні результати. Також, часто такі напрями визначаються наявною матеріальною базою або публікаціями у співпраці вчених з різних країн, де кожна наукова група чітко виконує свою частину роботи.

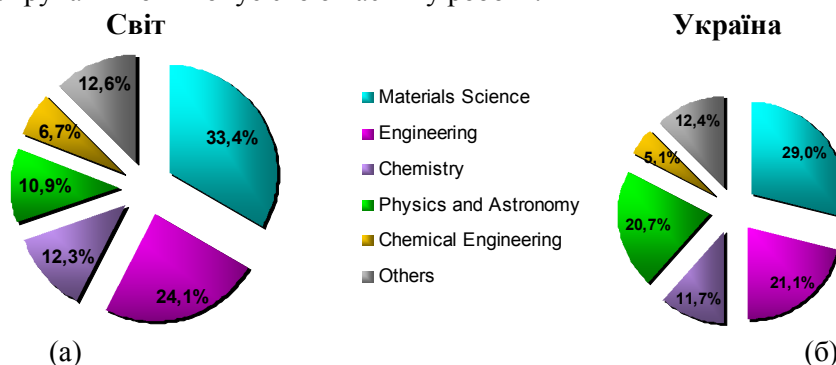


Рис. 2. Переважаючі галузі знань публікацій з «Полімерні композитні матеріали» (Polymer composite materials).

Схожим є аналіз країн, з представниками яких частіше йдуть на співпрацю. Для України це країни, які мають можливість надати матеріальну базу високого рівня. Закономірно бачити значну кількість публікацій з: РФ – 29 спільних публікацій, Польща – 23, США – 19, Франція – 17, Греція – 15. Є серед країн-партнерів і Німеччина, Великобританія, Італія, Білорусь, Китай. Хоча Китай і США мають високий економічний потенціал та суттєво вищі показники за кількістю публікацій (рис. 1), вони не є переважаючими серед країн-партнерів для України. Як правило, для цих країн пріоритетною є підтримка власних досліджень та, відповідно, значна кількість публікацій без іноземних партнерів.

Найбільшими світовими організаціями, що фінансують дослідження в даній галузі – здебільшого організації з Китаю і США: National Natural Science Foundation of China, National Science Foundation, European Commission, Ministry of Education of the People's Republic of China, Fundamental Research Funds for the Central Universities, U.S. Department of Defense тощо. Для України ситуація з державною підтримкою складніша. Дуже мала (7 і 5 відповідно) кількість публікації (рядок 4 табл. 1), де вказано виконання за сприянням НАНУ і МОНУ. Зате є публікації українських вчених, дослідження яких підтримані Bundesministerium für Bildung und Forschung (Німеччина), Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, Narodowe Centrum Nauki (Польща) тощо. Фінансують українські дослідження і загальносвітові спонсори (кількість праць): European Commission (8), NATO і Seventh Framework Programme (5). Як правило, українські вчені виконують свої дослідження або в закордонних інституціях, вигравши певний дослідницький грант, або українська організація співпрацює із закордонною. Тому вчені є співавторами багатьох спільних статей. Іншою проблемою у науковців з України є не деталізація на метаданих (відсутність виконання у рамках певного гранту), або виконання досліджень без фінансової підтримки. Лише близько чверті публікацій з українськими науковцями із проіндексованих мають відомості про фінансування дослідження.

Висновки. На основі проведеного аналізу стану досліджень полімерних композитних матеріалів в Україні та світі можна зробити висновок про високу актуальність даного напрямку, оскільки ним займається велика кількість науковців, про що свідчать 50 020 наукових праць у наукометричній базі даних Scopus за період 1993-2021 рр з сумарним h-індексом ($h = 373$). Серед країн-лідерів в цій галузі можна виділити: Китай, США, Індія, Японія, Великобританія, Німеччина тощо. Така зацікавленість науковців провідних країн світу і не тільки до даної проблематики свідчить про високе її практичне значення.

Окремо слід зауважити, що кількість публікацій українських вчених присвячених вивченню питань полімерних композитних матеріалів у загальносвітовому рейтингу складає 325 із h-індексами $h = 27$. Недостатнє представлення публікацій, які подаються українськими науковцями пояснено низкою факторів: потребами у наявності сучасної та дорогої матеріальної бази; ліцензованого програмного забезпечення; частою відсутністю зовнішнього фінансування таких досліджень; відсутністю чіткого інформування, за кошти яких саме грантів виконується конкретне дослідження. Однак, міжнародна співпраця українських вчених заслуговує уваги та вказує на перспективи розвитку досліджень полімерних композитних матеріалів.

Список використаних джерел:

1. Nykyruy L., Fedosov S., Saliy Ya., Prokopiv V., Zamurujeva O., Yavorsky R. Current research in the field of medical physics: Challenges for Ukraine. *Scientific Notes*. 2020. № 69. P. 82–91.
2. Wisz G, Nykyruy L, Yakubiv V, Hryhoruk I, Yavorskyi R. Impact of advanced research on development of renewable energy policy: Case of Ukraine. *Int. J. Renewable Energy Res*. 2018. Vol. 8, № 4. P. 2367–2384.
3. Nykyruy L.I., Zamurujeva O.V., Urban O.A., Fedosov S.A. The Impact of Scientific Research on the Development of Renewable Energy. *Perspective Technologies and Devices*. 2020. № 16. P. 82–91.
4. Stankovich S., Dikin D.A., Dommett G.H.B., et al. Graphene-based composite materials. *Nature*. 2006. Vol. 442, № 7100. P. 282–286.
5. Yu G., Gao J., Hummelen J.C., Wudl F., Heeger A.J. Polymer photovoltaic cells: Enhanced efficiencies via a network of internal donor-acceptor heterojunctions. *Science*. 1995. Vol. 270, № 5243. P. 1789–1791.
6. Coleman J.N., Lotya M., O'Neill A., et al. Two-dimensional nanosheets produced by liquid exfoliation of layered materials. *Science*. 2011. Vol. 331, № 6017. P. 568–571.
7. Li D., Xia Y. Electrospinning of nanofibers: Reinventing the wheel? *Adv. Mater*. 2004. Vol. 16, № 14. P. 1151–1170.

8. Karageorgiou V., Kaplan D. Porosity of 3D biomaterial scaffolds and osteogenesis. *Biomaterials*. 2005. Vol. 26, № 27. P. 5474–5491.
9. Coleman J.N., Khan U., Blau W.J., Gun'ko Y.K. Small but strong: A review of the mechanical properties of carbon nanotube-polymer composites. *Carbon*. 2006. Vol. 44, № 9. P. 1624–1652.
10. Geetha M., Singh A.K., Asokamani R., Gogia A.K. Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants - A review. *Prog. Mater. Sci.* 2009. Vol. 54, № 3. P. 397–425.
11. White S.R., Sottos N.R., Geubelle P.H., et al. Autonomic healing of polymer composites. *Nature*. 2001. Vol. 409, № 6822. P. 794–797.
12. Lota K., Khomenko V., Frackowiak E. Capacitance properties of poly(3,4-ethylenedioxythiophene)/carbon nanotubes composites. *J. Phys. Chem. Solids*. 2004. Vol. 65, № 2-3. P. 295–301.
13. Pud A., Ogurtsov N., Korzhenko A., Shapoval G. Some aspects of preparation methods and properties of polyaniline blends and composites with organic polymers. *Prog. Polym. Sci.* 2003. Vol. 28, № 12. P. 1701–1753.
14. Taurozzi J.S., Arul H., Bosak V.Z., et al. Effect of filler incorporation route on the properties of polysulfone-silver nanocomposite membranes of different porosities. *J. Membr. Sci.* 2008. Vol. 325, № 1. P. 58–68.
15. Corredor C.C., Huang Z.-L., Belfield K.D., Morales A.R., Bondar M.V. Photochromic polymer composites for two-photon 3D optical data storage. *Chem. Mater.* 2007. Vol. 19, № 21. P. 5165–5173.
16. Mamunya E.P., Davidenko V.V., Lebedev E.V. Effect of polymer-filler interface interactions on percolation conductivity of thermoplastics filled with carbon black. *Compos. Interfaces*. 1997. Vol. 4, № 4. P. 169–176.

УДК 621.316

DOI 10.36910/775.24153966.2021.72.5

І.В. Грицюк, Ю.В. Грицюк, І.А. Басалко*Луцький національний технічний університет***МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДОВИХ ВТРАТ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ З РОЗОСЕРЕДЖЕНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ**

Роботу присвячено дослідженню взаємовпливу розподільних електричних мереж та розосереджених джерел енергії, а саме вирішенню завдань визначення та оперативного керування критерію оптимальності для проектних та експлуатаційних задач компенсації реактивної потужності з урахуванням впливу режимів розосереджених джерел енергії на функціонування розподільних електричних мереж.

Ключові слова: розосереджені джерела енергії; економічні еквіваленти реактивної потужності; коефіцієнт чутливості; матриця коефіцієнтів розподілу втрат.

И.В. Грицюк, Ю.В. Грицюк, И.А. Басалко**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРОСЕТЯХ С РАССРЕДОТОЧЕННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ**

Работа посвящена исследованию взаимного влияния распределительных электрических сетей и рассредоточенных источников энергии, а именно решению задач определения и оперативного управления критерия оптимальности для проектных и эксплуатационных задач компенсации реактивной мощности с учетом влияния режимов рассредоточенных источников энергии на функционирование распределительных электрических сетей.

Ключевые слова: рассредоточенные источники энергии; экономические эквиваленты реактивной мощности; коэффициент чувствительности; матрица коэффициентов распределения потерь.

I.V. Hrytsiuk, Y.V. Hrytsiuk, I.A. Basalko**MATHEMATICAL MODELING OF COMPLEX LOSS OF ACTIVE POWER IN ELECTRICAL NETWORKS WITH DISPERSED ENERGY SOURCES**

The work is devoted to the study of the mutual influence of distribution electric grids and dispersed energy sources, namely, solving problems of determining and operational control of the optimality criterion for design and operational problems of reactive power compensation, taking into account the influence of modes of dispersed energy sources on the functional distribution of electricity.

Determination of the distribution of electricity losses in electrical networks from leakage of reactive power, namely the calculation of the corresponding components of active power losses in the branches of the electrical networks that transmit reactive power to certain consumers and from dispersed sources of energy, it is advisable to carry out their analysis.

Key words: dispersed energy sources; economic equivalents of reactive power; coefficient of sensitivity; matrix of coefficients of distribution of losses.

Постановка проблеми. Питання використання розосереджених джерел енергії (РДЕ) в електромережах з метою підвищення якості електропостачання споживачів на сьогодні є мало дослідженими. Важливим є оцінювання їх впливу на режими роботи розподільних електричних мереж (ЕМ) за напругою та реактивною потужністю, а також визначення складової втрат електроенергії, зумовленої перетіканнями реактивної потужності за рахунок роботи РДЕ.

Недослідженість зазначених питань проявляється у некоректності визначення (часто з завищенням) економічних еквівалентів реактивної потужності (ЕЕРП) та необґрунтовано занижених нормативів втрат електроенергії в них. Перше зумовлює зниження економічної ефективності роботи юридичних споживачів, а також власників РДЕ, які транспортують електроенергію до енергоринку з використанням ЕМ, а друге – погіршує економічні показники функціонування власне розподільних електромереж.

Використання діючої методики для визначення ЕЕРП може, за певних умов, призводити до протиріччя, що полягає у зростанні плати за перетікання реактивної потужності для РДЕ, які, фактично, забезпечують групову компенсацію реактивного споживання електромереж. Останнє, впливаючи на прибуткову частину економічного балансу роботи таких підприємств, негативно впливає на рентабельність інвестицій у розбудову відновлюваної енергетики і є одною з причин економічної недоцільності розбудови РДЕ малих встановлених потужностей, хоча позитивний вплив останніх на режими електромереж був багаторазово підтверджений у вітчизняних та закордонних публікаціях [1, 2].

Враховуючи можливість приєднання зазначених джерел енергії в електрично-віддалених вузлах з огляду на потреби групового регулювання перетоків реактивної потужності та напруги в ЕМ, саме на таких станціях доцільно встановлювати керовані засоби КРП, а іноді й, статичні

тиристорні компенсатори (СТК). Це ж стосується умовно-керованих РДЕ з АГ, функціонування яких визначається випадковим впливом навколишнього середовища, наприклад, вітрових електростанцій.

Дослідження взаємовпливу розподільних електричних мереж та РДЕ, а також математичне моделювання складової втрат електроенергії, зумовлених перетіканнями їх реактивної енергії, дозволить сформулювати умови оптимального взаємовпливу РДЕ та споживачів електричної мережі, а також адекватно визначати місця встановлення засобів одиничної та групової компенсації реактивної потужності, крім того, коригувати уставки систем автоматичного керування процесом компенсації. Це сприятиме забезпеченню комплексності підходу до розв'язання задачі, а отже, підвищенню ефективності технічних рішень.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Складність задачі оцінювання впливу окремих споживачів та джерел реактивної потужності на втрати активної потужності в електромережах полягає в тому, що втрати залежать від перетікань у вітках заступної схеми мережі нелінійно і скористатися методом накладання неможливо [3].

Використання даних методів в розімкнених розподільних мережах, як правило, призводить до виникнення похибки, допустимої на етапі планування режимів ЕМ. Однак, у розподільних ЕМ з двобічним живленням, що виникає за рахунок впливу РДЕ, збільшується вплив нелінійності функції втрат потужності, що може викликати суттєві похибки обчислення додаткових технічних втрат електроенергії [4, 5].

Постановка завдань. В роботі поставлено мету – розв'язати задачі визначення та оперативного коригування критерію оптимальності для проектних та експлуатаційних задач компенсації реактивної потужності з урахуванням впливу режимів РДЕ на функціонування розподільних ЕМ.

Визначення розподілу втрат електроенергії в ЕМ від перетікань реактивної потужності, а саме розрахунок відповідних складових втрат активної потужності у вітках електричних мереж, якими передається реактивна потужність до певних споживачів та від РДЕ, доцільно здійснювати з урахуванням аналізу їх чутливості.

Викладення основного матеріалу. Коефіцієнти чутливості втрат активної потужності до зміни споживання (генерування) реактивної потужності, що чисельно дорівнюють економічним еквівалентам реактивної потужності, можна визначити надаючи малі прирости реактивній потужності вузлів (за аналітичного підходу – нескінченно малі).

На етапі вибору методу розподілу втрат перевагу слід віддавати таким, що забезпечують можливість використання аналітичного підходу до розподілу втрат електроенергії в ЕМ та визначення ЕЕРП, оскільки аналітичні критерії оптимальності в задачах керування мають ряд переваг у контексті побудови системи керування та її алгоритмічного забезпечення.

Для розв'язання задачі визначення впливу на втрати в ЕМ окремих вузлів споживання та генерування в [4, 6] обґрунтовано можливість використання лінеаризованої моделі заданого усталеного режиму ЕМ, наприклад режиму середніх навантажень. Використовуючи елементи матриці коефіцієнтів розподілу втрат потужності у вітках заступної схеми розподільної ЕМ $\dot{T}$ можна визначити складові втрат потужності в окремих вітках ЕМ від перетікань потужності до окремих вузлів.

Коефіцієнти розподілу втрат залежать від параметрів заступної схеми, а також від значень напруги у вузлах ЕМ, які визначаються навантаженням і генеруванням у вузлах схеми. Отже, нелінійність залежності втрат потужності в ЕМ від параметрів її режиму враховується.

Визначення коефіцієнтів матриці $\dot{T}$ через поточні значення вузлових напруг по суті означає лінеаризацію режиму електричної мережі за зафіксованих потужностей у вузлах. Тобто за малих відхилень потужностей в умовах розподільних електромереж з РДЕ коефіцієнти матриці $\dot{T}$ можна вважати постійними [5]. Таким чином, для випадку, коли зміна потужностей у вузлах ЕМ є незначною, тобто не викликає істотних (більше 1%) відхилень напруги у вузлах, залежність втрат потужності в ЕМ від потужностей у її вузлах можна вважати лінійною. А для дослідження впливу компенсації реактивної потужності та РДЕ на втрати потужності в розподільних мережах з прийнятною точністю можна використовувати метод накладання.

З огляду на забезпечення максимальної відповідності результатів математичного моделювання складових втрат електроенергії в ЕМ, зумовлених окремими перетіканнями реактивної потужності до споживачів та розосереджених джерел природно скористатися властивостями диференціалу та диференціальним методом розподілу втрат потужності. На основі

[7], з урахуванням розподілу втрат між окремими споживачами (джерелами) реактивної потужності, можна записати:

$$\Delta W_{Q\Sigma} = \sum_{j=1}^m \left\{ \sum_{i \in N_j} \left(\frac{\partial \Delta P_j}{\partial Q_i} Q_i \right) k_{\Phi Qj}^2 \right\} t, \quad (1)$$

або після перегрупування складових

$$\Delta W_{Q\Sigma} = \sum_{i=1}^n \left\{ \sum_{j \in M_i} \left(\frac{\partial \Delta P_j}{\partial Q_i} k_{\Phi Qj}^2 \right) Q_i \right\} t = \sum_{i=1}^n \Delta W_{Qi}, \quad (2)$$

де n – кількість вузлів ЕМ, у яких приєднані споживачі, розосереджені джерела електроенергії та засоби компенсації реактивної потужності;

ΔP_j – сумарні втрати потужності у j -ій вітці ЕМ;

$Q_i = Q_{Hi} - Q_{Ky_i} - Q_{pDEi}$ – реактивна потужність, що споживається (генерується) у i -му вузлі ЕМ з урахуванням локальних та групових засобів КРП;

M_i – множина віток ЕМ, якими здійснюється транспортування реактивної потужності до i -го вузла. В загальному випадку (для замкненої ЕМ, або мережі з двобічним живленням) множина M_i може включати всі m віток заступної схеми ЕМ. Це дещо збільшує обсяг непродуктивних обчислень, однак, враховуючи прийняту схему розподілу втрат електроенергії, практично не впливає на кінцевий результат;

$\Delta W_{Qi} = D_i Q_i t$ – складова втрат електроенергії в ЕМ, зумовлена транспортуванням реактивної потужності до i -го вузла;

$$D_i = \sum_{j \in M_i} \left(\frac{\partial \Delta P_j}{\partial Q_i} k_{\Phi Qj}^2 \right) - \quad (3)$$

економічний еквівалент реактивної потужності, визначений з урахуванням змінного графіка перетоків реактивної потужності у вітках ЕМ, зумовленого нестабільністю навантажень та впливу РДЕ.

Використовуючи (2) вирази для визначення складових витрат енергопостачальної компанії на транспортування перетікань реактивної потужності в ЕМ можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned} B_{\text{СП}} &= \sum_{i \in N_{\text{СП}}} [D_i (Q_{Hi} - Q_{Ky_i})] u_0 t; \\ B_{\text{РДЕ}} &= \sum_{i \in N_{\text{РДЕ}}} [D_i (Q_{pDEi} - Q_{Ky_i})] u_0 t, \end{aligned} \quad (4)$$

де $N_{\text{СП}}$, $N_{\text{РДЕ}}$ – відповідно, множини вузлів ЕМ, до яких приєднані споживачі та розосереджені джерела електроенергії.

Як видно з (4), основною проблемою розрахунку значень цільової функції оптимізації рівнів компенсації реактивної потужності в ЕМ та керування засобами КРП є визначення та оперативне коригування економічних еквівалентів реактивної потужності D_i .

Для вирішення проблеми було залучено метод коефіцієнтів розподілу втрат потужності в ЕМ [4, 6] – з метою визначення коефіцієнтів чутливості $\frac{\partial \Delta P_j}{\partial Q_i}$.

Метод розподілу втрат активної потужності в електромережах на підставі умовно-постійних коефіцієнтів для визначення економічних еквівалентів реактивної потужності D був запропонований у [8]. Перевагою є те, що метод не передбачає еквівалентування ЕМ і ґрунтується на електротехнічних розрахунках. Однак визначення коефіцієнтів розподілу за номінальними напругами у вузлах ЕМ є важливим недоліком.

Втрати у вітках схеми електричної мережі в залежності від активної та реактивної потужності навантаження можуть бути визначені з результатів розрахунку нормального режиму за фіксованих потужностей у вузлах з врахуванням нелінійної залежності втрат від параметрів режиму. На цій підставі запропоновано використовувати матрицю коефіцієнтів розподілу втрат потужності, яка дозволяє аналітично поєднати втрати потужності у вітках з потужностями у вузлах ЕМ. Кожен рядок матриці визначається за таким виразом:

$$\hat{T}_i = (\dot{U}_t \dot{M}_{\Sigma ki}) \hat{C}_{ki} \dot{U}_d^{-1}, \quad (5)$$

де $\dot{T}_i$ – вектор-рядок матриці коефіцієнтів розподілу втрат потужності в i -тій вітці від потужностей вузлів ЕМ, з урахуванням комплексних коефіцієнтів трансформації;

$\dot{U}_t$ – транспонований вектор напруг у вузлах включаючи і балансувальні (тут і далі індекс “ t ” означає, що матриця або вектор є транспонованими);

$M_{\Sigma k}$ – матриця зв’язків віток у вузлах, що за структурою подібна до першої матриці з’єднань $M_{\Sigma 1}$, але в якій замість значень “–1” для вузлів кінця віток з трансформаторами знаходяться їх коефіцієнти трансформації;

C_k – матриця струмозподілу з урахуванням комплексних коефіцієнтів трансформації трансформаторних зв’язків;

$\dot{U}_d$ – діагональна матриця напруг у незалежних вузлах ЕМ.

Матриця $\dot{T}$ залежить від параметрів схеми ЕМ, які за певних допущень можна вважати постійними, а також від значень напруги у вузлах, які обумовлені навантаженням і генеруванням у вузлах схеми. Нелінійність залежності втрат від параметрів режиму зберігається.

З врахуванням (5) можна записати вираз для визначення втрат потужності у вітках заступної схеми:

$$\Delta \dot{S}_b = \dot{T} \dot{S} + \Delta \dot{S}_{nb}, \quad (6)$$

де $\Delta \dot{S}_{nb}$ – вектор-стовпець додаткових втрат потужності у вітках схеми, що виникають за рахунок незбалансованих коефіцієнтів трансформації у контурах ЕМ. Для електромереж без трансформаторних зв’язків у контурах (до яких належать розподільні електромережі) $\Delta \dot{S}_{nb} = 0$.

Коефіцієнти матриці розподілу втрат $\dot{T}$ є комплексними, а їх складові можуть приймати додатні та від’ємні значення, що показує яким чином навантаження певного вузла змінює потекорозподіл в ЕМ, наближаючи його до оптимального, тобто зменшуючи сумарні втрати потужності та електроенергії. Використання матриці коефіцієнтів розподілу втрат потужності $\dot{T}$ для визначення ЕЕРП дозволить пов’язати задачі компенсації реактивної потужності та оптимізації її потекорозподілу з урахуванням балансових та режимних обмежень.

На величину сумарних втрат активної потужності в електричних мережах впливають потужностей джерел енергії, параметри споживання, коефіцієнти трансформації трансформаторів, а також взаємні і транзитні перетоки потужності.

Сумарні втрати потужності у вітках для заданого режиму роботи ЕМ можуть бути визначені за формулою (6) з використанням коефіцієнтів розподілу втрат (5). Остання складова виразу (6) $\Delta \dot{S}_{nb}$ неявно залежить від потужностей генерування та споживання (через значення напруг у вузлах) і являє собою власні технологічні втрати потужності в електричних мережах ЕМ, що зумовлені регульовальними впливами на силові трансформатори, необхідними для забезпечення технічних обмежень та оптимального розподілу потоків активних та реактивних потужностей. Для електромереж розімкненої конфігурації (у тому числі з двобічним живленням), а також ЕМ з контурами без трансформаторів зв’язку, зазначена складова за визначенням дорівнює нулю.

Таким чином, втрати повної потужності в розподільних ЕМ 110(35)–10(6) кВ можна подати у вигляді:

$$\Delta \dot{S}_b = \dot{T} \dot{S}, \quad (7)$$

Відповідно до фізичного змісту матриці розподілу втрат $\dot{T}$ кожен її стовпець $\dot{T}^{(i)}$ є набором коефіцієнтів, що характеризують вплив потужності окремого вузла $\dot{S}_i$ на втрати у вітках заступної схеми ЕМ.

Якщо припустити, що коефіцієнти $\dot{T}$ є незмінними, то за зміни значення реактивної потужності i -го вузла на δQ_i зміняться і втрати потужності у вітках заступної схеми ЕМ, причому ці зміни можна оцінити як

$$\delta \dot{S}_b = \dot{T}^{(i)} \cdot j \delta Q_i. \quad (7)$$

За зміни споживання (генерування) реактивної потужності в i -му вузлі зміна втрат потужності в ЕМ буде визначатись за виразом

$$\delta \dot{S} = \dot{t}_i \cdot j \delta Q_i. \quad (8)$$

З (8) за малих відхилень δQ_i можна чисельно визначити коефіцієнт чутливості втрат в ЕМ до зміни реактивної потужності у i -му вузлі

$$\dot{t}_i = \frac{\delta \dot{S}}{j \delta Q_i} = \frac{\delta Q}{\delta Q_i} - j \frac{\delta P}{\delta Q_i}, \quad (9)$$

або, приймаючи до уваги (7), коефіцієнт чутливості $\dot{t}_i$ можна визначити, домноживши вектор стовпець $\dot{T}^{(i)}$ на відповідний одиничний вектор рядок E_1 розмірністю m (кількість віток заступної схеми ЕМ):

$$\dot{t}_i = E_1 \cdot \dot{T}^{(i)}. \quad (10)$$

Вектор $\dot{T}_q = (E_1 \cdot \dot{T})^T$, утворений з коефіцієнтів чутливості втрат потужності $\dot{t}_i$ до змін реактивного споживання у i -му вузлі, чисельно є вектором чутливості, який встановлює зв'язок між приростами втрат потужності в ЕМ і змінами реактивної потужності у її вузлах. Виходячи з цього, коефіцієнти чутливості втрат активної потужності до змін реактивних потужностей у вузлах можна визначити з уявної частини вектора $\dot{T}_q$, взятої зі зворотним знаком:

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial Q_i} \approx -\text{Im}(\dot{T}_{qi}) = -\text{Im}(E_1 \cdot \dot{T}^{(i)})^T. \quad (11)$$

Виходячи з (11) вираз для визначення економічних еквівалентів реактивної потужності можна записати у вигляді:

$$D_i = \sum_{j \in M_i} (-\text{Im}(\dot{T}_{ji}) k_{\Phi Qj}^2). \quad (12)$$

Використовуючи (12) можна технічно обґрунтувати зменшення плати за транспортування реактивної потужності споживачів та РДЕ, функціонування яких забезпечує зменшення втрат електроенергії в ЕМ. До них належать розосереджені джерела невеликої потужності (для електромереж 10(6) кВ – до 600 кВт та споживачі, що розташовані на шляху транспортування реактивної потужності від РДЕ до основного центру живлення).

Висновки. Однією з головних проблем моделювання цільової функції задачі оптимальної компенсації реактивної потужності є вибір ефективного, інформаційно забезпеченого, методу визначення втрат електроенергії в ЕМ, а також методу їх розподілу між окремими транзакціями реактивної потужності. Для розв'язання задачі обґрунтовано поєднання методу середніх навантажень та диференційного методу розподілу на підставі коефіцієнтів розподілу втрат потужності.

Значення навантажувальних втрат, зумовлених транспортуванням реактивної потужності до споживачів ЕМ та від РДЕ, приєднаних до них, можуть визначатися з використанням коефіцієнтів розподілу, які розраховуються на підставі лінеаризації в залежності втрат для окремого режиму мережі. Зазначені коефіцієнти у малому околі незалежних параметрів режиму ЕМ чисельно дорівнюють частинним похідним від втрат активної потужності по реактивних перетіканнях $\partial \Delta P / \partial Q_i$.

Використовуючи результати аналізу чутливості втрат потужності в електромережах від реактивних перетікань, зумовлених впливом розосередженого генерування, можна технічно обґрунтувати оснащення їх засобами компенсації реактивної потужності, робота яких забезпечить зменшення втрат в ЕМ, а відповідно, вартості транзакції активної потужності РДЕ.

Список використаних джерел:

1. Distributed generation and its impact on power grids and microgrids protection / Antonova G., Nardi M., Scott A., Pesin M. Protective Relay Engineers, 65th Annual Conference Publication. 2012. – P. 152 – 161.
2. Лежнюк П. Д., Кулик В. В., Грицюк І. В. Компенсація реактивної потужності в локальній електричній системі. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. 2011. №3. С. 32–33.
3. Волков А. В., Мирошніченко О. Математическая модель потерь энергии в энергосистеме при транспортировке электроэнергии отдельного электропотребителя. Технічна електродинаміка. Тематичний випуск : проблеми сучасної електротехніки, ч.3. 2006. С. 29–34. ISSN 0204–3599.

4. Лежнюк П. Д., Кулик В. В., Бурыкин А. Б. Определение и анализ потерь мощности от транзитных потоков в электрических сетях энергосистем методом линеаризации. Электрические сети и системы. 2006. №1. С. 5–11.

5. Лежнюк П. Д., Кулик В. В., Бурикін О. Б., Ковальчук О. А. Оптимізація режимів електричних мереж з малими ГЕС в умовах адресного електропостачання. Технічна електродинаміка. Тематичний випуск : Проблеми сучасної електротехніки. Ч. 3. 2010. С. 31–34. ISSN 0204–3599.

6. Лежнюк П. Д., Кулик В. В., Бурикін О.Б. Взаємовплив електричних мереж і систем в процесі оптимального керування їх режимами. Вінниця: УНІВЕРСУМ, 2008. – 123 с.

7. Грицюк І.В., Грицюк Ю.В., Волинець В.І. Визначення витрат енергопостачальних компаній на обслуговування реактивних перетікань в електричних мережах з розосередженими джерелами енергії. Наукові нотатки. Міжвузівський збірник (за галузями знань «Технічні науки») Випуск 60 (жовтень-грудень, 2017). № 60. 2017.

8. Рогальський Б. С., Штогрін Є. А., Нанака О. М. Метод визначення економічних еквівалентів реактивної потужності для замкнених мереж. Енергетика : економіка, технології, екологія. 2006. № 2. С. 66–70.

УДК 577.3+004.9

DOI 10.36910/775.24153966.2021.72.6

Л.І. Никируй¹, С.А. Федосов², І.П. Яремій¹, О.В. Замуруєва², А.Б. Тимошук², В.С. Федосов³¹Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника²Волинський національний університет імені Лесі Українки³Сервіс-груп «SEOtodo»

ПРИКЛАДНІ ОБЛАСТІ ДОСЛІДЖЕНЬ СУЧАСНОЇ ФІЗИКИ: МЕДИЧНА І КОМП'ЮТЕРНА ФІЗИКА

З огляду на сучасні виклики науковцям і бажання людей зробити життя тривалішим та комфортнішим, фундаментальні та прикладні дослідження з медичної та комп'ютерної фізики відносяться до пріоритетних для всіх країн світу. Стаття аналізує публікації вчених у напрямках «медична фізика» і «комп'ютерна фізика», з метою знайти закономірності щодо підтримки та розвитку цих напрямів у світі та в Україні. Розглянуто особливості міжнародної співпраці, окреслено коло провідних видань у наукових областях, проаналізовано фактори впливовості вчених різних країн на розвиток медичної і комп'ютерної фізики. Дослідження базується на результатах даних, опублікованих у міжнародній наукометричній базі Scopus. Виконано аналіз і сформульовано рекомендації для покращення поширення результатів вітчизняних вчених у світовій спільноті за цими напрямками.

Ключові слова: медична фізика, комп'ютерна фізика, публікації, наукові дослідження, h-індекс.

Л.И. Никируй, С.А. Федосов, И.П. Яремий, О.В. Замуруева, А.Б. Тимошук, В.С. Федосов
ПРИКЛАДНЫЕ ОБЛАСТИ ИССЛЕДОВАНИЙ СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКИ:
МЕДИЦИНСКАЯ И КОМПЬЮТЕРНАЯ ФИЗИКА

Учитывая современные вызовы ученым и желание людей сделать жизнь более длительной и комфортной, фундаментальные и прикладные исследования по медицинской и компьютерной физике относятся к приоритетным для всех стран мира. Статья анализирует публикации ученых в направлениях «медицинская физика» и «компьютерная физика» с целью найти закономерности поддержки и развития этих направлений в мире и в Украине. Рассмотрены особенности международного сотрудничества, очерчен круг ведущих изданий в научных областях, проанализированы факторы влияния ученых разных стран на развитие медицинской и компьютерной физики. Исследование основывается на результатах данных, опубликованных в международной наукометрической базе Scopus. Выполнен анализ и сформулированы рекомендации по улучшению распространения результатов отечественных ученых в мировой общности по этим направлениям.

Ключевые слова: медицинская физика, компьютерная физика, публикации, научные исследования, h-индекс.

L. Nykyruy, S. Fedosov, I. Yaremiy, O. Zamurujeva, A. Tymoshchuk, V. Fedosov
APPLIED FIELDS OF MODERN PHYSICS RESEARCH: MEDICAL AND COMPUTER PHYSICS

Given the current challenges to scientists and the desire of people to make life longer and more comfortable, fundamental and applied research in medical and computer physics is a priority for all countries of the world. The article analyzes the publications of scientists in the areas of "medical physics" and "computer physics" in order to find patterns of support and development of these areas in the world and in Ukraine. The peculiarities of international cooperation are considered, the circle of leading publications in scientific fields is outlined, the factors of influence of scientists from different countries on the development of medical and computer physics are analyzed. The research is based on the results of data published in the international scientometric database Scopus. The analysis is made and recommendations are formulated to improve the dissemination of the results of domestic scientists in the world community in these areas.

Keywords: medical physics, computer physics, publications, scientific research, h-index.

Постановка проблеми. В останні роки все рідше зустрічаються публікації, що стосуються безпосередньо конкретних наук, як фізика, хімія, медицина, біологія, тощо. Замість них автори часто вказують галузі, які у певних наукових журналах асоціюються із інженерією, матеріалознавством тощо. Так, якщо звернути увагу на певні галузі наук за публікаціями у міжнародній наукометричній базі Scopus, то часто за певним напрямом бачимо, як різні статті класифікуються за напрямками «Фізика і астрономія», «Матеріалознавство», «Медицина», «Інженерія» та ін. Такий напрям, як «матеріалознавство» останнім часом теж стає все більш диференційованим: «матеріали для енергетики», «біоматеріали», «рідкісні матеріали» та ін. Усе це є наслідком того, що дослідження отримують більше практичне спрямування. Відповідно, більшу роль отримують дослідження, які є «на стику» різних наук, як наприклад, фізика і хімія, фізика і медицина, фізика і інформатика (комп'ютерні науки), тощо. Все це є наслідком нових викликів, коли перед науковцями ставляться завдання, де потрібно знаходити нові рішення, використовуючи, у тому числі, дослідницькі бази інших наук. А отже, закономірним є виникнення нових міждисциплінарних (міжнаукових) напрямів і спеціалізацій, як відновлювальна енергетика, комп'ютерна фізика, медична фізика, мехатроніка, тощо. Це такі спеціалізації, які сьогодні

користуються популярністю у світі і починають ставати популярнішими в Україні. А отже, з метою підготовки фахівців високого рівня та отримання конкурентних наукових продуктів, важливим завданням є аналіз проблем у таких «перехресних» областях різних наук.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оскільки концепція освіти для сталого розвитку ще не є достатньо інтегрованою в концепцію трансформації у закладах вищої освіти, важливими залишаються дослідження в галузі університетської освіти [1]. Проблемним залишається питання підтримки створення нових міждисциплінарних курсів, адже вони часто вимагають нової та дорогої матеріальної бази і зацікавленості викладачів-науковців. Тому зміни такого типу, які пов'язані із введенням нових навчальних курсів відбуваються досить повільно [2]. Саме міждисциплінарні напрями мають найбільшу перспективу розвитку [3]. З метою знайти закономірності щодо підтримки та розвитку напрямку «Медична фізика» у різних країнах та визначити перспективи для України, у [4] аналізувався сучасний стан у цій області.

Постановка завдань. В роботі поставлено мету – виконати аналіз досліджень у напрямках «Медична фізика» і «Комп'ютерна фізика», зробити спробу визначити особливості та спрогнозувати розвиток цих напрямів у світі та Україні.

Методологія досліджень. Проведено аналіз публікацій, індексованих у наукометричній базі Scopus. Для аналізу відібрано статті із пошуку за ключовими словами у назві та анотації «Medical physics» (Медична фізика), «Computer physics» (Комп'ютерна фізика). Для порівняння аналізувалися роботи, опубліковані авторами, які мають приналежність до наукових центрів у світі й в Україні.

Вибірку зроблено за результатом аналізу матеріалів: найбільш цитованих публікацій із афіліацією у світі, найновіших публікацій із афіліацією в світі, аналогічно, із афіліацією в Україні – найцитованіших публікацій і найбільш нових публікацій.

Порівняння здійснено, використовуючи наявні можливості аналітики, які пропонує Scopus. При цьому була можливість аналізувати: афіліацію авторів, прізвища авторів, країни авторів, тип документів, наявність фінансової підтримки досліджень, журнал, у якому здійснено публікацію, рік публікації та їх кількість. Аналізувалися також і самі публікації. Така методика була запропонована і апробована у [5-6].

Викладення основного матеріалу. Станом на кінець жовтня 2021 року у наукометричній базі Scopus зафіксовано 20 158 документів, що відповідають критерію пошуку «Medical physics» (Медична фізика) і 62 627 документів – «Computer physics» (Комп'ютерна фізика). Сумарний h-індекс для них складає $h = 192$ і 401 відповідно. На рис. 1 наведено діаграму країн із найбільшою кількістю публікацій, а також України. Для коректної порівняльної оцінки дані наведено у % від загальної кількості за кожним напрямом.

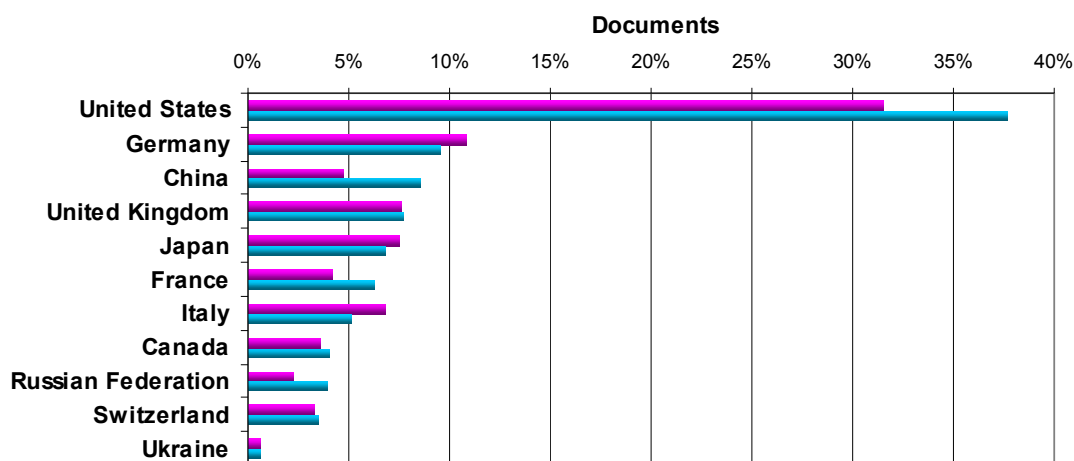


Рис. 1. Діаграма країн із найбільшою кількістю публікацій та України у напрямках «Медична фізика» і «Комп'ютерна фізика»

На рис. 1 країни розташовані у порядку спадання кількості публікацій за напрямом «Комп'ютерна фізика» (сині стовпці). Відповідно до цих значень цікавим є порівняльний розподіл між двома сучасними напрямками. Ці дані мають дещо відмінний характер за напрямками по країнах не лише абсолютний, але й відносний. Незаперечним лідером за кількістю публікацій (6 349 і 23 585) в обох досліджуваних напрямках є США. Кількість публікацій науковців зі США

становлять третину (32-38 %) усіх публікацій у світі. Другою за кількістю публікацій (2 184 і 5 997) є Німеччина, де майже однаковий (у %) внесок у світову науку за обома напрямками. Значна відносна різниця за цим показником (майже у два рази між напрямками) спостерігається для Китаю, Франції, Росії, де суттєво більше робіт з комп'ютерної фізики. Тоді, як для Німеччини, Італії та Японії відносна кількість публікацій з медичної фізики більша ніж з комп'ютерної.

Аналітичні дані для світової науки, зібрані із використанням ресурсів наукометричної бази Scopus узагальнено у таблиці 1.

Табл. 1.

Порівняльна статистична характеристика світових досліджень, проведених у напрямках «Медична фізика» (Medical physics) і «Комп'ютерна фізика» (Computer physics)

Медична фізика	Порівняння	Комп'ютерна фізика
20 158	Кількість публікацій	62 627
192	h-індекс	401
– European Organization for Nuclear Research, Switzerland – University of Texas M.D. Anderson Cancer Center, US – University of Michigan, Ann Arbor, US – Harvard Medical School, US – Technical University of Munich, Germany	Провідні установи	– European Organization for Nuclear Research, Switzerland – Chinese Academy of Sciences, China – CNRS Centre National de la Recherche Scientifique, France – Stanford University, US – Massachusetts Institute of Technology, US
– James Franck Institute University of Chicago, US – Santa Fe Institute, US – University of Washington, US – Biotechnologie und Molekulare Genetik Universität Bremen, Germany – Optical Imaging Laboratory, US	Найбільш цитовані наукові центри	– University of Queensland, Australia – Massachusetts Institute of Technology, US – Joseph Henry Laboratories Princeton University, US – University of Pennsylvania, US – Universidad Autónoma de Madrid, Spain
– IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, US – IFMBE Proceedings, Germany (0,15) – Medical Physics, US (1,47) – Health Physics, US (0,36) – Physics in Medicine and Biology, UK (1,31)	Джерела видань, країна (SJR)	– Journal of Chemical Physics, US (1,07) – Physics in Medicine and Biology, UK (1,31) – Journal of Applied Physics, US (0,7) – Journal of Physics Conference Series, UK (0,29) – Applied Physics Letters, US (1,18)
– National Institutes of Health – US Department of Health and Human Services – National Cancer Institute – National Science Foundation – National Natural Science Foundation of China	Організації, що фінансують дослідження	– National Science Foundation – US Department of Energy – National Institutes of Health – National Natural Science Foundation of China – US Department of Health and Human Services

Обґрунтованим є рейтинг провідних установ, які займають передові позиції за кількістю публікацій, і сповна відповідає рейтингу за державою. Це науково-дослідні центри, які, як і країни загалом, є однозначними лідерами в дослідженнях з медичної фізики (Онкологічний центр ім. М.Д. Андерсона техаського університету (США), Університет Мічигану в Енн-Арбор (США), Медична школа Гарварда (США), Мюнхенський технічний університет (Німеччина) тощо) і з комп'ютерної фізики (Академія наук Китаю (Китай), Стенфордський університет і

Массачусетський технологічний інститут (США) тощо) (табл. 1, рядок 3). За обома напрямками лідируючу позицію, воно і не дивно, займає Європейська організація з ядерних досліджень (Швейцарія), де працюють кращі науковці світу з різних галузей знань для розв'язання найглобальніших проблем людства. Крім того, високі позиції як і з медичної, так і з комп'ютерної фізики водночас займають Національний центр наукових досліджень (Франція), Національний інститут ядерної фізики (Італія), Університет Вісконсин-Медісон (США).

Серед найбільш цитованих світових наукових центрів (табл. 1, рядок 4) також спостерігаються установи країн-лідерів: Інститут ім. Джеймса Франка Чиказького університету, Інститут Санта-Фе, Вашингтонський університет, Лабораторія ім. Джозефа Генрі Принстонського університету, Пенсільванський університет (США), Бременський університет біотехнологій і молекулярної генетики (Німеччина), Квінслендський університет (Австралія), Автономний університет Мадрида (Іспанія) та ін., однак, які не увійшли до рядка 3 (табл. 1). Хоча ці центри не входять до переліку провідних науково-дослідних центрів, які мають найбільшу кількість публікацій, тим не менш, дослідники з них можуть претендувати на найвищі позиції у рангу світових вчених. До таких грандів світової науки, які найчастіше є авторами публікацій і найбільш цитованими в області медичної фізики відносяться (к-ть публікацій в Scopus): Hendee W.R. (69), Yamaya T. (56), Pia M.G. (51), Yoshida E. (48), Rosenfeld A.B. (44), Petasecca M., Yanagida T. (41), Orton C.G. (40), Guatelli G. (39). Так само в області комп'ютерної фізики фахівцями найвищого рівня є (к-ть публікацій в Scopus): Pia M.G. (55), Terzopoulos D. (44), Binder K. (42), De K. і Maeno T. (41), Paganetti H. (40), Ivanchenko V.N. і Jiang S.B. (39), He J. (38), Elmer P. (37).

Для дослідників з українських організацій кількість публікацій з медичної і комп'ютерної фізики «Medical/Computer physics» значно менша загальносвітової і складає, відповідно 119 і 399 із h-індексами $h = 12$ і 36. Аналітичні дані для української науки за досліджуваними напрямками зібрані із бази Scopus узагальнено у таблиці 2.

Табл. 2.

Порівняльна статистична характеристика українських досліджень, проведених у напрямках «Медична фізика» (Medical physics) і «Комп'ютерна фізика» (Computer physics)

Медична фізика	Порівняння	Комп'ютерна фізика
119	Кількість публікацій	399
12	h-індекс	36
– National Academy of Sciences in Ukraine – Vinnytsia National Technical University – Institute for Scintillation Materials of NASU – Taras Shevchenko National University of Kyiv – National Science Center Kharkov Institute of Physics and Technology	Провідні установи	– National Academy of Sciences in Ukraine – Institute for Condensed Matter Physics NASU – National Science Center Kharkov Institute of Physics and Technology – Vinnytsia National Technical University – Taras Shevchenko National University of Kyiv
– A.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics NASU – Vinnitsa National Technical University – Taras Shevchenko National University of Kyiv – Vinnitsa Pirogov National Medical University – Donetsk Institute for Physics and Engineering	Найбільш цитовані наукові центри	– Scientific Research Technological Institute of Instrument Engineering, Kharkov – Bogolyubov Institute for Theoretical Physics, Kiev – National Scientific Centre Kharkov Institute of Physics and Technology – Taras Shevchenko National University of Kyiv – Institute for Condensed Matter Physics NASU
– Proceedings of SPIE The International Society for Optical	Джерела видань, країна	– Journal of Chemical Physics, US (1,07)

Медична фізика	Порівняння	Комп'ютерна фізика
Engineering (US) 0,19 – IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, US – IFMBE Proceedings, Germany (0,15) – IEEE Transactions on Nuclear Science, US (0,54) – Medical Physics, US (1,47)	(SJR)	– Proceedings of SPIE The International Society for Optical Engineering, US (0,19) – CEUR Workshop Proceedings, US (0,18) – Journal of Applied Physics, US (0,7) – AIP Conference Proceedings, US (0,18)
– Australian Research Council – Department of Education and Training – Australian Nuclear Science and Technology Organization – European Cooperation in Science and Technology – Ministry of Higher Education, Malaysia	Організації, що фінансують дослідження	– European Commission – Ministry of Education and Science of Ukraine – National Institutes of Health – National Science Foundation – Deutsche Forschungsgemeinschaft
– Poland – Australia – Kazakhstan – United States – Russian Federation	Країни-партнери	– United States – Poland – Germany – Kazakhstan – Russian Federation

Провідними українськими установами за кількістю публікацій водночас як з медичної, так і з комп'ютерної фізики є: Національна академія наук України, Вінницький національний технічний університет, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», а також інститути НАНУ – Інститут сцинтиляційних матеріалів (з медичної фізики) та Інститут фізики конденсованих систем (комп'ютерної фізики) (рядок 3, табл. 2). Окрім провідних за кількістю публікацій є інші центри з найавторитетнішими (найцитованішими) науковцями: Інститут радіофізики та електроніки ім. Я. Усикова НАНУ, Вінницький національний медичний університет ім. М.І. Пирогова, Донецький фізико-технічний інститут ім. О.О. Галкіна НАНУ і Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування, Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАНУ відповідно для напрямів медичної і комп'ютерної фізики (рядок 4, табл. 2). Серед українських науковців найавторитетнішими у досліджуваних наукових напрямках є (к-ть публікацій в Scopus) – Perevertaylo V.L. (14), Zinets O. і Zlepko S.M. (4), Anokhin I.E. (3) з медичної фізики, а з комп'ютерної – Kalyuzhnyi Y.V. (15), Pavlov S.V. і Trokhymchuk A. (7), Smailova S. (5), Baumketner A. (4).

Аналіз самих публікацій за темою «Medical physics» (Медична фізика) і «Computer physics» (Комп'ютерна фізика) вказує на практичне значення таких досліджень. Найбільш цитована публікація у світі за напрямом як і «Медична фізика» так і «Комп'ютерна фізика», до написання якої долучилися 127 співавторів, вивчає широкий спектр функціональних можливостей набору інструментів GEANT4 для імітації проходження частинок через речовину [7]. Даний інструментарій є результатом всесвітньої співпраці фізиків та інженерів програмного забезпечення і був використаний у фізиці елементарних частинок, ядерній фізиці, проектуванні прискорювачів, космічній техніці та медичній фізиці. До найбільш цитованих з медичної фізики відноситься ціла серія робіт, присвячених дослідженню оптичних пінцетів, які можуть маніпулювати об'єктами від кількох десятків нанометрів [8], біохімічним дослідженням для розробки ліків із акцентом на наночастинки [11-13], дослідженню, розробці діагностичних пристроїв та обробці зображень [12-16], тощо. В свою чергу, найцитованіші з комп'ютерної фізики публікації присвячені розгляду теоретичних основ (3D) топологічних ізоляторів і надпровідників, а також перспектив створення пристроїв на їх основі [17], розробці та впровадженні методу для моделювання структурної релаксації та молекулярної динаміки [18], створенню нового дослідницького ресурсу для дослідження в області серцево-судинних та інших складних біомедичних сигналів [21],

кластеризації, методам перевірки та порівняння опису додатків реальних мереж, розкриттю структури та динаміки складних мереж [20-22]. Тобто, це публікації, які мають чітке практичне спрямування, однак містять також і повний спектр фундаментальних досліджень. Підтвердженням цього є нобелівська премія з фізики у 2018 році (A. Ashkin, G.A. Mourou, D. Strickland) за дослідження та розробку лазерних пристроїв для медицини.

Причому, найбільш цитовані статті опубліковані не лише у журналах типу *Reviews of Modern Physics* (SJR 24,88), *Chemical Review* (SJR 20,53), *Nature* (SJR 15,99), *Reports on Progress in Circulation* (SJR 7,8), *Physics* (SJR 7,53), *Physics Reports* (SJR 6,91), *Medical Image Analysis* (SJR 2,89) та ін., але й у великій кількості матеріалів конференцій, як *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (SJR 5,01), *IEEE Transactions on Nuclear Science* (SJR 0,54) тощо, що вказує на важливість участі науковців у роботі таких заходів, представлення на них своїх результатів.

Найбільш цитовані публікації українських вчених є у співавторстві з колегами із Японії, Великобританії, США, РФ [23] (Інститут радіофізики та електроніки імені Я. Усикова НАН України, Харків), Австралії [24] (SPA BIT, Київ), Еквадору та Польщі [25] (Вінницький національний технічний університет) та стосуються розвитку детекторів випромінювання різного типу, аналізуючи при цьому фізику процесів у речовині та досліджуючи прикладне застосування кінцевих пристроїв на їх основі, а також опису фізики та еталонних вхідних параметрів необхідних для розрахунків ядерних реакцій та оцінці ядерних даних [26], моделюванню канонічної молекулярної динаміки та Монте-Карло для рівноваги рідина/пара [27], опису нового коду для розрахунку атмосфер зоряної моделі з паралельною зоряною моделлю LIE для раннього та середнього типу зірок [28].

Для України ситуація із кореляцією кількості публікацій та h-індексу є, у певному плані, «негативною». Тобто, країни, що мають приблизно таку ж кількість публікацій, випереджають нас за якістю (h-індексом) [4]. Для пояснення цього було проаналізовано, які типи публікацій та у яких виданнях публікують науковці різних країн (рядок 5, табл. 1 і 2). Відразу привертає увагу те, що країни-лідери за кількістю і якістю публікацій максимально публікують результати своїх досліджень практично у тих самих наукових виданнях. Це є певним «плюсом», оскільки, публікуючи статті у тих самих журналах, вчені цих країн звертають увагу на інші праці, опубліковані у цих виданнях. Таким чином реалізується більша кількість цитувань їх праць. Причому, імпакт-фактори цих журналів не є надто високими, які б могли бути для топових журналів з фізики: *Medical Physics* (SJR 1,47), *Physics in Medicine and Biology* (SJR 1,31), *Journal of Chemical Physics* (SJR 1,07), *Physica Medica* (SJR 0,88), *Health Physics* (SJR 0,36). Часто такими виданнями є профільні конференції, як *IFMBE Proceedings* (SJR 0,15), *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*. Це ще одна ознака того, що є певне сформоване міжнародне наукове середовище, представники якого беруть спільно участь у міжнародних конференціях та симпозіумах, де діляться своїми результатами.

Представники країн, які мають меншу кількість публікацій чи загалом нижчий для країни h-індекс, в основному, публікуються теж у збірниках конференцій чи у своїх національних виданнях, які менше поширені у світі [4]. Так само, ці матеріали конференцій публікуються за участь вчених саме з цих держав. Зокрема, топ-видань для представників з України наступний (рядок 5, табл. 2): *Proceedings of SPIE The International Society for Optical Engineering* (SJR 0,19), *IEEE Transactions on Nuclear Science* (SJR 0,54), *CEUR Workshop Proceedings* (SJR 0,18), *AIP Conference Proceedings* (SJR 0,18). Це може бути причиною того, що саме для них можливі дещо менші вимоги до рівня англійської мови, або відповідні конференції мають суттєво нижчий рівень організаційних внесків (50-100 євро проти 700-1000 євро).

Дещо складніше робити висновки за галуззю знань, з якою позиціонується певна публікація. Для всіх публікацій по світу за напрямом «Медична фізика», лідерство тримають «Медицина», «Фізика та астрономія» і «Інженерія» (рис. 2а), а за напрямом «Комп'ютерна фізика» – «Фізика та астрономія», «Інженерія» і «Комп'ютерні науки» (10,7 %) (рис. 2в). Для України переважаючі галузі за окремими напрямами такі ж як у світі (рис. 2б,г), лише з дещо іншим відсотком. Якщо ж з комп'ютерної фізики ці значення мало відрізняються від світових («Фізика та астрономія» (30,5 і 35,3 %), «Інженерія» (16,4 і 14,5 %) і «Комп'ютерні науки» (10,7 і 13,7 %)), то для медичної фізики є значний «перекос» (світ і Україна) у галузях знань «Медицина» (26,3 % і 10,8 %), «Фізика та астрономія» (22,2 % і 30,4 %). Лідерство «Медицини» вказує, швидше за все на те, що відповідні дослідження більше інтегровані саме до конкретних галузей медицини і перейшли у практичне русло. Якщо ж лідирує за кількістю публікацій галузь знань «Фізика та астрономія», то можна

припустити, що представники відповідних країн починають розвивати дану галузь, намагаються знайти застосування результатів своїх колективів для медицини / комп'ютерних наук, але спираються у більшості на попередні результати. Однак, це не завжди справедливе. Часто такі напрями визначаються наявною матеріальною базою. Але ще частіше статті такого роду публікуються у співпраці вчених з різних країн, де кожна наукова група чітко виконує свою частину роботи.

Схочим є аналіз країн, з представниками яких частіше йдуть на співпрацю. Як правило, це країни, які мають можливість надати матеріальну базу високого рівня. Для України закономірно там бачити (рядок 7 табл. 2) США, Німеччину, Польщу, Австралію, Казахстан, РФ. Хоча США, не дивлячись на високий економічний потенціал та суттєво вищі показники за кількістю публікацій (рис. 1), не є переважаючими серед країн-партнерів. Поясненням цього може бути значно вища підтримка досліджень у області медичної і комп'ютерної фізики у самій країні та, відповідно, значна кількість публікацій без іноземних партнерів. Підтвердженням такого припущення є дані, наведені у стовпчику 6 таблиці 1. Як видно, два найбільші спонсори організацій з США [4] співпадають із найбільш потужними спонсорами таких досліджень у світі: National Institute of Health, National Cancer Institute. А також US Department of Health and Human Services, National Science Foundation, National Natural Science Foundation of China як для досліджень з медичної, так і комп'ютерної фізики є найбільш зацікавленими організаціями, що фінансують дослідження.

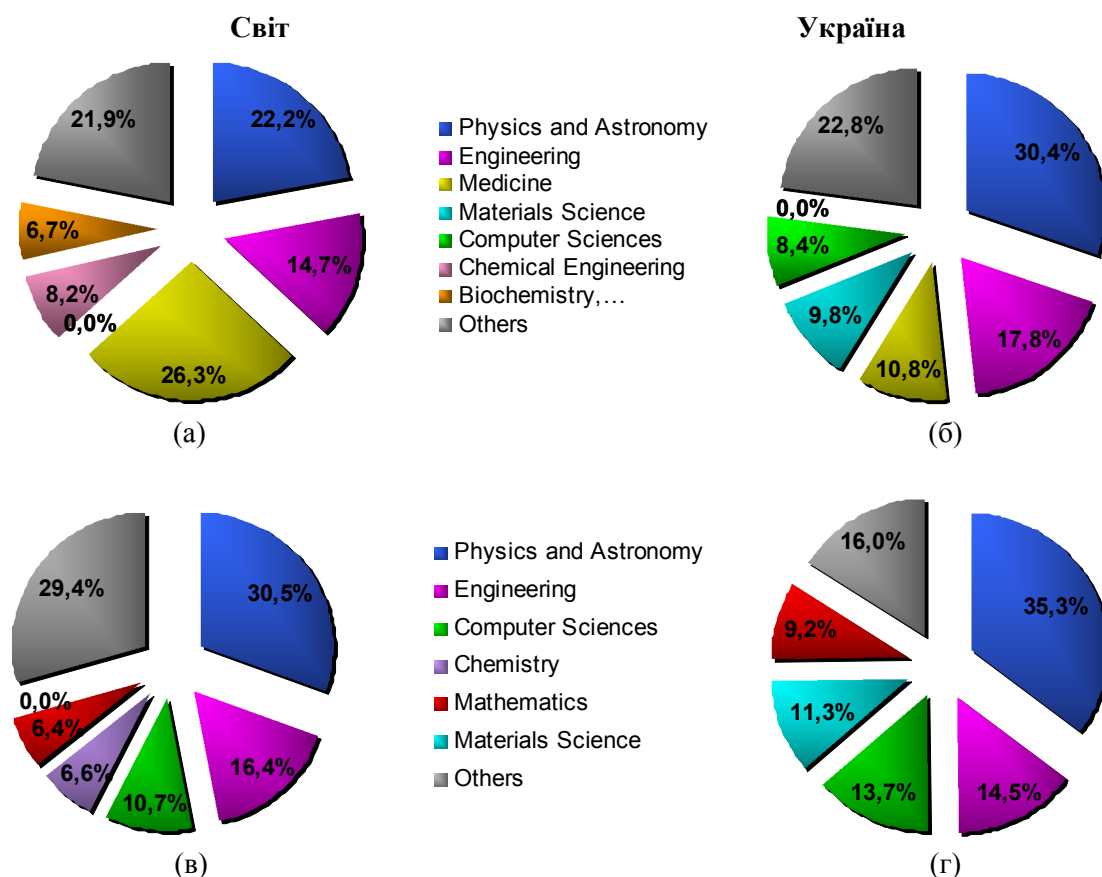


Рис. 2. Основні галузі знань публікацій за напрямками (а), (б) «Медична фізика» (Medical physics) і (в), (г) «Комп'ютерна фізика» (Computer physics)

Для України ситуація із державною підтримкою складніша. Дуже мала кількість публікації (рядок 6 табл. 2), де вказано виконання за сприянням НАНУ, МОНУ та ДФФД МОНУ. Зате є публікації із українськими вченими, дослідження яких підтримані Міністерством вищої освіти Малайзії, Комісією з атомної енергетики Сирії, Урядом Австралії, тощо. Найбільші спонсори для України – Australian Research Council, European Commission, Australian Nuclear Science and Technology Organization, Deutsche Forschungsgemeinschaft, тощо. Фінансують українські дослідження і загально світові спонсори: National Institutes of Health, National Science Foundation. Як правило, українські вчені виконують свої дослідження або в закордонних інституціях, вигравши певний дослідницький грант, або українська організація співпрацює із закордонною, та певний вчений (вчені) є співавтором статті. Однак, існує й інша проблема: науковці з України

часто не деталізують увагу на метаданих (не вказують виконання у рамках певного гранту), або просто виконують дослідження без фінансової підтримки. Лише близько чверті публікацій з українськими науковцями із проіндексованих мають відомості про фінансування дослідження.

Висновки. На основі аналітичних можливостей міжнародної наукометричної бази Scopus визначено основні тенденції розвитку медичної та комп'ютерної фізики у світі та Україні. Недостатнє представлення публікацій, які подаються від українських організацій пояснено низкою факторів:

1) початковим етапом в розвитку цих напрямів серед світової наукової спільноти, які спричинені потребами у наявності сучасної та дорогої матеріальної бази та ліцензованого програмного забезпечення;

2) відсутністю зовнішнього фінансування таких досліджень чи відсутністю чіткого інформування, за кошти яких саме грантів виконується конкретне дослідження;

3) публікацією актуальних результатів у виданнях суто «фізичних» чи «медичних» або «інформатики/комп'ютерних наук», замість більш популярних журналів у колі фахівців саме з медичної чи комп'ютерної фізики;

4) використанням ключових слів та анотацією, які більше актуальні саме фізиці, медицині чи комп'ютерним наукам, ніж медичній або комп'ютерній фізиці. Однак, міжнародна співпраця українських вчених заслуговує уваги та вказує на перспективи розвитку цих напрямів.

Список використаних джерел:

17. Leal Filho W., Raath S., Lazzarini B., et al. The role of transformation in learning and education for sustainability. *J. Cleaner Prod.* 2018. Vol. 199. P. 286–295.

18. Watson M.K., Lozano R., Noyes C., Rodgers M. Assessing curricula contribution to sustainability more holistically: Experiences from the integration of curricula assessment and students' perceptions at the Georgia Institute of Technology. *J. Cleaner Prod.* 2013. Vol. 61. P. 106–116.

19. Ferrer-Balas D., Buckland H., de Mingo M. Explorations on the University's role in society for sustainable development through a systems transition approach. Case-study of the Technical University of Catalonia (UPC). *J. Cleaner Prod.* 2009. Vol. 17, № 12. P. 1075–1085.

20. Nykyruy L., Fedosov S., Saliy Ya., Prokopiv V., Zamurujeva O., Yavorsky R. Current research in the field of medical physics: Challenges for Ukraine. *Scientific Notes.* 2020. № 69. P. 82–91.

21. Wisz G, Nykyruy L, Yakubiv V, Hryhoruk I, Yavorskyi R. Impact of advanced research on development of renewable energy policy: Case of Ukraine. *Int. J. Renewable Energy Res.* 2018. Vol. 8, № 4. P. 2367–2384.

22. Nykyruy L.I., Zamurujeva O.V., Urban O.A., Fedosov S.A. The Impact of Scientific Research on the Development of Renewable Energy. *Perspective Technologies and Devices.* 2020. № 16. P. 82–91.

23. Agostinelli S., Allison J., Amako K., et al. GEANT4 - A simulation toolkit. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A.* 2003. Vol. 506, № 3. P. 250–303.

24. Grier D.G. A revolution in optical manipulation. *Nature.* 2003. Vol. 424, № 6950. P. 810–816.

25. Niemeyer C.M. Nanoparticles, proteins, and nucleic acids: biotechnology meets materials science. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2001. Vol. 40, № 22. P. 4128–4158.

26. West J.L., Halas N.J. Engineered nanomaterials for biophotonics applications: improving sensing, imaging, and therapeutics. *Annu. Rev. Biomed. Eng.* 2003. Vol. 5, № 1. P. 285–292.

27. Junghanns J.U.A., Müller R.H. Nanocrystal technology, drug delivery and clinical applications. *Int. J. Nanomed.* 2008. Vol. 3, № 3. P. 295.

28. Sidky E.Y., Pan X. Image reconstruction in circular cone-beam computed tomography by constrained, total-variation minimization. *Phys. Med. Biol.* 2008. Vol. 53, № 17. P. 4777.

29. West J., Fitzpatrick J.M., Wang M.Y., et al. Comparison and evaluation of retrospective intermodality brain image registration techniques. *J. Comput. Assist. Tomogr.* 1997. Vol. 21, № 4. P. 554–568.

30. Boas D.A., Dunn A.K. Laser speckle contrast imaging in biomedical optics. *J. Biomed. Opt.* 2010. Vol. 15, № 1. P. 011109.

31. Ashkin A. Optical trapping and manipulation of neutral particles using lasers. *Proc. National Acad. Sci.* 1997. Vol. 94, № 10. P. 4853–4860.

32. Strickland D., Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses. *Opt. Commun.* 1985. Vol. 55, № 6. P. 447–449.

33. Hasan M.Z., Kane C.L. Colloquium: Topological insulators. *Rev. Mod. Phys.* 2010. Vol. 82, № 4. P. 3045–3067.

34. Soler J.M., Artacho E., Gale J.D., et al. The SIESTA method for ab initio order-N materials simulation. *J. Phys.: Condens. Matter*. 2002. Vol. 14, № 11. P. 2745–2779.
35. Goldberger A.L., Amaral L.A., Glass L., et al. PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: components of a new research resource for complex physiologic signals. *Circulation*. 2000. Vol. 101, № 23. P. E215–220.
36. Newman M. *Networks: An Introduction* (Book). 2010. P. 1–784.
37. Fortunato S. Community detection in graphs. *Phys. Rep.* 2010. Vol. 486, № 3–5. P. 75–74.
38. Strogatz S.H. Exploring complex networks. *Nature*. 2001. Vol. 410, № 6825. P. 268–276.
39. Savel'ev S., Yampol'skii V.A., Rakhmanov A.L., Nori F. Terahertz Josephson plasma waves in layered superconductors: spectrum, generation, nonlinear and quantum phenomena. *Rep. Prog. Phys.* 2010. Vol. 73, № 2. P. 026501.
40. Wong J.H.D., Fuduli I., Carolan M., et al. Characterization of a novel two dimensional diode array the “magic plate” as a radiation detector for radiation therapy treatment. *Med. Phys.* 2012. Vol. 39, № 5. P. 2544–2558.
41. Rovira R.H., Tuzhanskyy S.Y., Pavlov S.V., et al. (2016, September). Polarimetric characterisation of histological section of skin with pathological changes. In *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2016* (Vol. 10031, P. 100313E).
42. Capote R., Herman M., Obložinský P., et al. RIPL - Reference Input Parameter Library for Calculation of Nuclear Reactions and Nuclear Data Evaluations. *Nuclear Data Sheets*. 2009. Vol. 110, № 12. P. 3107–3214.
43. Trokhymchuk A., Alexandre J. Computer simulations of liquid/vapor interface in Lennard-Jones fluids: Some questions and answers. *J. Chem. Phys.* 1999. Vol. 111, № 18. P. 8510–8523.
44. Shulyak D., Tsymbal V., Ryabchikova T., Stütz Ch., Weiss W.W. Line-by-line opacity stellar model atmospheres. *Astron. Astrophys.* 2004. Vol. 428, № 3. P. 993–1000.

Д.Е. Селезньов, к.т.н., Е.Л. Селезньов, к.т.н., Ю.В. Муравинець, к.т.н.,
Л.В. Назарчук, к.т.н.

Луцький національний технічний університет

АВТОМАТИЗОВАНИЙ РОЗРАХУНОК ТАРИЛЧАСТОЇ АБСОРБЦІЙНОЇ КОЛОНИ

В роботі розглядається методика автоматизованого розрахунку діаметру тарільчастої абсорбційної колони.

Ключові слова: алгоритм, блок-схема, автоматизований розрахунок, тарільчаста абсорбційна колона.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ РАСЧЕТ ТАРЕЛЬЧАТОЙ АБСОРБЦИОННОЙ КОЛОНЫ

В работе рассматривается методика автоматизированного расчета диаметра тарельчатой абсорбционной колонны.

Ключевые слова: алгоритм, блок-схема, автоматизированный расчет, тарельчатая абсорбционная колонна.

D.E. Selesnov, E.L. Selesnov, Y.V. Muravunets, L.V. Nazarchuk AUTOMATED CALCULATION OF THE PLATE ABSORPTION COLUMN

The method of automated calculation of the diameter of the plate absorption column is considered in the work.

Keywords: algorithm, block diagram, automated calculation, plate absorption column.

Постановка проблеми.

Основні розміри абсорбера (наприклад, діаметр і висота) визначають шляхом розрахунку, виходячи із заданих умов роботи (продуктивність, необхідний ступінь витягання компоненту і т. д.). Для розрахунку необхідні відомості по статичі і кінетиці процесу. Дані по статичі знаходять з довідкових таблиць, розраховують за допомогою термодинамічних параметрів або визначають дослідним шляхом. В статті здійснено автоматизацію розрахунку тарільчастої абсорбційної колони. Завдяки використанню персонального комп'ютера, вдалося мінімізувати час на розрахунок необхідного діаметра колони, згідно заданих параметрів виробничого технологічного процесу, які при необхідності можна змінювати під відповідний технологічний процес. Приклад реалізації алгоритму розрахунку представлено в програмі MathCAD.

Основна частина.

Для визначення необхідного габаритного розміру колони введемо необхідні для обрахунку технологічні параметри, що використовуються в процесі виробництва:

V_2 – об'ємна витрата газової фази, що поступає в колону, м³/год;

y_n – вміст компоненту, який поглинається, в газі, що поступає, %;

α – ступінь проходження процесу, %;

x_{en} – початковий вміст компоненту, що поглинається, в абсорбенті, масова частка, %;

x_{ek} – кінцевий вміст компоненту, що поглинається, в абсорбенті, масова частка, %;

t – температура суміші, що поступає газової, в колону, °С;

P – тиск в колоні, МПа;

M_{nk} – молярна маса CO₂, $\frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$;

M_a – молярна маса води, $\frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$;

M_{n2} – молярна маса повітря, $\frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$;

Початкова відносна молярна концентрація компоненту газової фази, що поглинається, при вході в абсорбер

$$y_{ли} = \frac{y_{en}}{100 - y_{en}}$$

Кінцева відносна молярна концентрація компоненту газової фази, що поглинається, при виході з абсорбера

$$y_{mk} = \frac{y_{en} \cdot (100 - \alpha)}{(100 - y_{en}) \cdot 100}$$

Початкова відносна молярна концентрація компоненту, що поглинається, в абсорбенті при вході в абсорбер:

$$x_{\text{вх}} = \frac{\frac{x_{\text{вх}}}{M_{\text{вх}}}}{\frac{100 - x_{\text{вх}}}{M_{\text{г}}}}$$

Кінцева відносна молярна концентрація компоненту, що поглинається, в абсорбенті при виході з абсорбера

$$x_{\text{вих}} = \frac{\frac{x_{\text{вих}}}{M_{\text{вх}}}}{\frac{100 - x_{\text{вих}}}{M_{\text{г}}}}$$

Об'ємна витрата інертної складової газової фази (норм. ум.)

$$V_{\text{г}} = \frac{V_{\text{г}} \cdot (100 - y_{\text{вх}})}{100}$$

Молярна витрата компоненту, що поглинається

$$G_{\text{вх}} = \frac{V_{\text{г}} \cdot y_{\text{вх}} \cdot \alpha}{22,4 \cdot 100 \cdot 100}$$

Молярна витрата абсорбенту (інертною складовою рідкої фази)

$$L_{\text{а}} = \frac{V_{\text{г}} \cdot (y_{\text{вх}} - y_{\text{вих}})}{22,4 \cdot (x_{\text{вих}} - x_{\text{вх}})}$$

Молекулярна вага газової фази

$$M_{\text{г}} = \frac{y_{\text{вх}} \cdot M_{\text{вх}}}{100} + \frac{100 - y_{\text{вх}}}{100} \cdot M_{\text{г}}$$

Густина газової фази

$$\gamma_{\text{г}} = \frac{M_{\text{г}} \cdot T_0 \cdot P}{22,4 \cdot T \cdot P_0} \cdot \frac{(100 - y_{\text{вх}})}{100} + \frac{M_{\text{вх}} \cdot T_0 \cdot P}{22,4 \cdot T \cdot P_0} \cdot \frac{y_{\text{вх}}}{100}$$

Об'ємна витрата газової фази, що входить в колону абсорбції

$$V_{\text{гс}} = \frac{V_{\text{г}} \cdot 273 \cdot P_0}{P \cdot 3600 \cdot (t + 273)}$$

Молярна витрата газової фази, що поступає в колону абсорбції

$$G_{\text{г}} = \frac{V_{\text{гс}} \cdot \gamma_{\text{г}} \cdot 3600}{M_{\text{г}}}$$

Визначаємо діаметр колони.

Гранично допустима швидкість газової фази (умова перевищення 10% віднесення рідкої фази з газовою) розраховується для сітчастих тарілок як

$$w_{\text{гпд}} = 0,05 \cdot \sqrt{\frac{\gamma_{\text{р}}}{\gamma_{\text{г}}}}$$

де $w_{\text{г}}$ - робоча швидкість газової фази у вільному перетині колони, яка складає

$$w_{\text{г}} = w_{\text{гпд}} \cdot 0,8;$$

$$D_{\text{к}} = \sqrt{\frac{V_{\text{гс}}}{0,785 \cdot w_{\text{г}}}}$$

Блок-схема алгоритму розрахунку представлена на рис. 1.

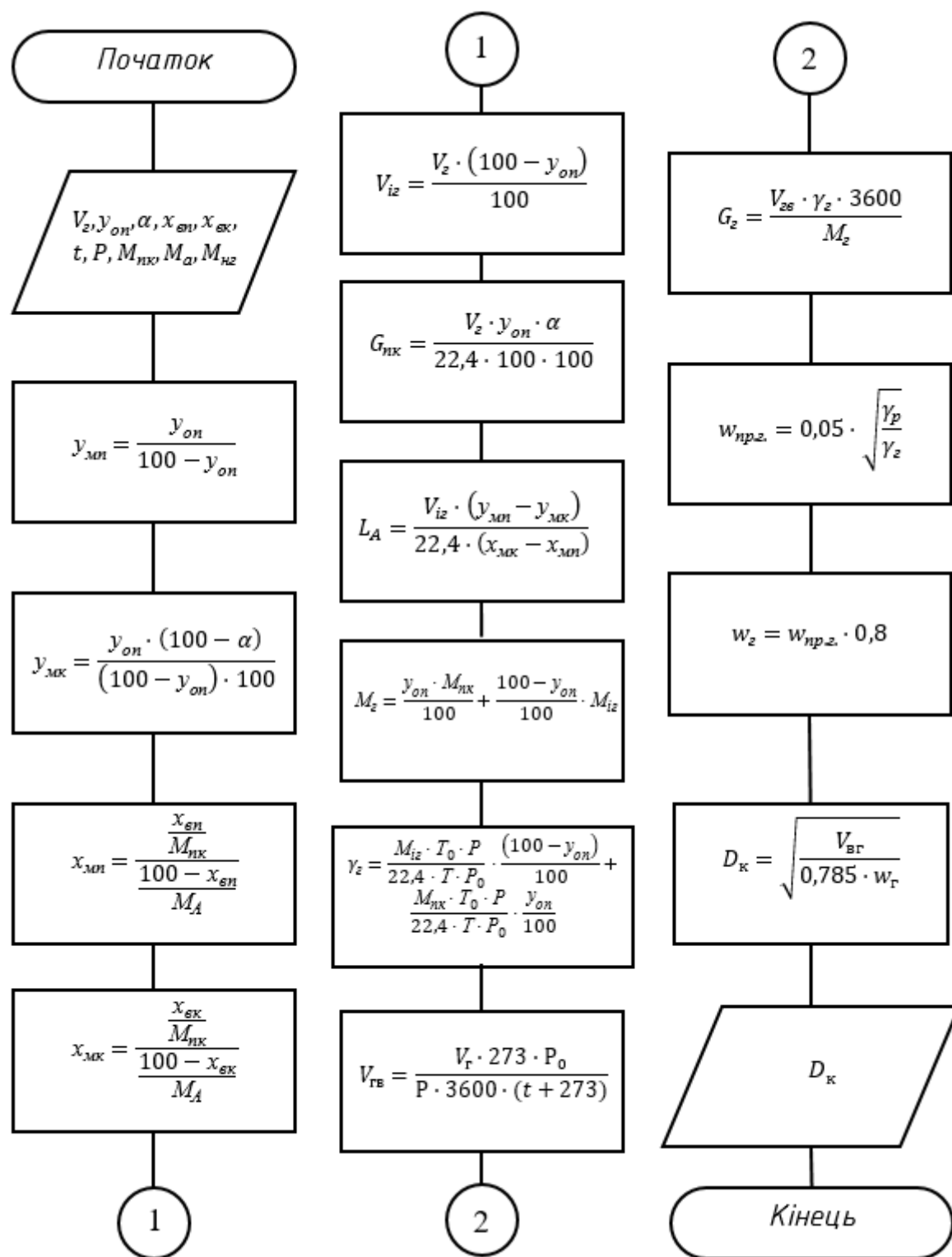


Рис. 1 – Блок-схема алгоритму

Нижче представлена реалізація даного алгоритму в середовищі MathCAD:

Об'ємна витрата газової фази – $V_{\Gamma} := 13000 \text{ м}^3/\text{год}$

Вміст компоненту, що поглинається в газі що поступає – $y_{он} := 35$

Ступінь проходження процесу – $\alpha := 95$

Початковий вміст компоненту, що поглинається в абсорбері, масова частка – $x_{вп} := 0$

Кінцевий вміст компоненту що поглинається в абсорбенті, масова частка – $x_{BK} := 0.45$

Температура газової суміші – $t := 20$

Тиск в колоні – $P := 1.013 \text{ МПа}$

Молярні маси:

Вуглекислого газу – $M_{PK} := 44 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$

Води – $M_a := 18 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$

Повітря – $M_{ir} := 29 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$

Густина рідкої фази – $\gamma_p := 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

Нормальні умови – $T_0 := 273 \text{ К}$ $P_0 := 0.1 \text{ МПа}$

Коефіцієнт міцності зварних швів – $\psi := 1$

Початкова відносна молярна концентрація компоненту газової фази при вході в абсорбер

$$y_{mp} := \frac{y_{op}}{100 - y_{op}} = 0.538 \frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль}}$$

Кінцева відносна молярна концентрація компоненту газової фази при виході з абсорбера

$$y_{mk} := \frac{y_{op} \cdot (100 - \alpha)}{(100 - y_{op}) \cdot 100} = 0.027 \frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль}}$$

Початкова відносна молярна концентрація компоненту, що поглинається, в абсорбенті при вході в абсорбер

$$x_{mp} := \frac{\frac{x_{vp}}{M_{PK}}}{\frac{100 - x_{vp}}{M_a}} = 0$$

Кінцева відносна молярна концентрація компоненту, що поглинається, в абсорбенті при виході з абсорбера

$$x_{mk} := \frac{\frac{x_{BK}}{M_{PK}}}{\frac{100 - x_{BK}}{M_a}} = 1.849 \times 10^{-3}$$

$$x_{mk} := \text{round}(x_{mk}, 3) = 2 \times 10^{-3} \%$$

Об'ємна витрата інертної складової газової фази (норм. ум.)

$$V_{ir} := \frac{V_r \cdot (100 - y_{op})}{100} = 8.45 \times 10^3 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$$

Молярна витрата компоненту, що поглинається

$$G_{PK} := \frac{V_r \cdot y_{op} \cdot \alpha}{22.4 \cdot 100 \cdot 100} = 192.969 \frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль}}$$

$$G_{PK} := \text{round}(G_{PK}, 0) = 193$$

Молярна витрата абсорбенту (інертною складовою рідкої фази)

$$L_A := \frac{V_{ir} \cdot (y_{mp} - y_{mk})}{22.4 \cdot (x_{mk} - x_{mp})} = 9.648 \times 10^4 \frac{\text{кмоль}}{\text{год}}$$

Молекулярна вага газової фази

$$M_{\Gamma} := \frac{y_{\text{оп}} \cdot M_{\text{пк}} + (100 - y_{\text{оп}}) M_{\text{іг}}}{100} = 34.25 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$$

Густина газової фази

$$\gamma_{\Gamma} := \frac{M_{\text{іг}} \cdot T_0 \cdot P \cdot (100 - y_{\text{оп}}) + M_{\text{пк}} \cdot T_0 \cdot P \cdot y_{\text{оп}}}{22.4 \cdot (t + 273) \cdot P_0 \cdot 100} = 14.432 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Об'ємна витрата газової фази, що поступає в колону абсорбції

$$V_{\text{ГВ}} := \frac{V_{\Gamma} \cdot T_0 \cdot P_0}{P \cdot 3600 \cdot (t + T_0)} = 0.332 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Молярна витрата газової фази, що поступає в колону абсорбції

$$G_{\text{і}} := \frac{V_{\text{ГВ}} \cdot \gamma_{\Gamma} \cdot 3600}{M_{\Gamma}} = 503.832 \frac{\text{кмоль}}{\text{год}}$$

Визначаємо діаметр колони

Гранично допустима швидкість газової фази

$$w_{\text{пр.Г}} := 0.05 \cdot \sqrt{\frac{\gamma_{\text{р}}}{\gamma_{\Gamma}}} = 0.416 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Робоча швидкість газової фази у вільному перетині колони

$$w_{\Gamma} := w_{\text{пр.Г}} \cdot 0.8 = 0.333 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Діаметр колони

$$D_{\text{к}} := \sqrt{\frac{V_{\text{ГВ}}}{0.785 \cdot w_{\Gamma}}} = 1.127$$

Приймаємо діаметр колони

$$D_{\text{кк}} := \text{round}(1.2 \cdot D_{\text{к}}, 1) = 1.4 \text{ м}$$

Висновки.

В результаті автоматизації розрахунку тарілчастої абсорбційної колони значно скоротилась кількість математичних розрахунків та з'явилась можливість проводити аналітичні дослідження.

Література.

1. В.М. Рамм. «Абсорбция газов». М., «Химия», 1976г.
2. «Расчет тарельчатых абсорбционных колонн» под ред. В.А. Иванова, Москва, 1985.
3. «Основные процессы и аппараты химической технологии», пособие по проектированию под ред. Ю.И. Дытнерского. М., «Химия» 1991 г.
4. Інформатика: конспект лекцій у чотирьох частинах. – Частина 4: Обробка інженерної інформації за допомогою математичного пакета MathCAD / Укладач А.В. Булашенко. – Суми: Вид-во СумДУ, 2010 – 123 с.

А. В. Кошель*Магістр Київського національного університету імені Тараса Шевченка**Розробник програмного забезпечення**Товариство з обмеженою відповідальністю "Арткай"**02000, м. Київ, вул. Генерала Геннадія Воробйова, 13**<https://orcid.org/0000-0003-1099-0995>*

ВПРОВАДЖЕННЯ МАШИННОГО НАВЧАННЯ НА МОБІЛЬНІ ПРИСТРОЇ

У статті розкрито архітектурні складові впровадження машинного навчання на мобільні пристрої. Виділено основні переваги використання глибокого навчання і логічного висновку на мобільному пристрої: економія смуги пропускання зв'язку, зниження вартості ресурсів хмарних обчислень, швидкий час відгуку, мобільні обчислення зберігають сенсорні дані на локальному пристрої, що значно покращує конфіденційність даних користувача. Підкреслено, що на сьогодні існує п'ять архітектур, які зазвичай використовуються для реалізації машинного навчання на мобільних пристроях. При цьому, наголошено, що кожна окрема архітектура, її фундаментальна основа залежить від деталей сценарію, таких як специфічні вимоги мобільного додатку, складність моделі, кількість даних тощо. Перша архітектура – це вивід даних без навчання, ґрунтується на тому, що мобільний додаток надсилає запит до хмари через інтерфейс прикладного програмування разом з новими даними, а служба повертає прогноз. Друга архітектура – це вивід даних та навчання у хмарі, в її основі лежить принцип попередньої моделі, єдина відмінність полягає в тому, що постачальники послуг надають розробникам мобільних пристроїв можливість навчати дані та створювати власні унікальні моделі за допомогою хмарного сервісу. Третя архітектура – це виведення на пристрої з попередньо навченими моделями, принцип реалізації засновано на тому, що попередньо навчена модель завантажується у мобільний додаток, щоб зробити виведення, мобільний додаток запускає всі обчислення виведення локально на пристрої. Четверта архітектура – це виведення і навчання на пристрої, програма може постійно вчитися на даних та поведінці користувача, а отже, постійно оновлювати моделі та покращувати продуктивність для даного користувача. П'ята архітектура – це гібридна архітектура, в основі лежить принцип коли основна модель навчається в хмарі з використанням великого стандартного набору даних або великої сукупності всіх даних, якими користуються користувачі. Наголошено, що на сьогоднішній день, найпростішим способом включення машинного навчання у мобільний додаток є використання хмарного сервісу, який охоплює функціональні можливості обох складових.

Ключові слова: платформа, архітектура, мобільні пристрої, інтеграція, хмара, блок навчання, блок обчислення, машинне навчання.

А. В. Кошель

ВНЕДРЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ НА МОБИЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

В статье раскрыты архитектурные составляющие внедрения машинного обучения на мобильные устройства. Выделены основные преимущества использования глубокого обучения и логического вывода на мобильном устройстве: экономия полосы пропускания связи, снижение стоимости ресурсов облачных вычислений, быстрое время отклика, мобильные вычисления хранят сенсорные данные на локальном устройстве, что значительно улучшает конфиденциальность данных пользователя. Подчеркнуто, что на сегодня существует пять архитектур, которые обычно используются для реализации машинного обучения на мобильных устройствах. При этом, отмечается, что каждая отдельная архитектура, ее фундаментальная основа зависит от деталей сценария, таких как специфические требования мобильного приложения, сложность модели, количество данных и тому подобное. Первая архитектура – это вывод данных без обучения, основанный на том, что мобильное приложение отправляет запрос в облако через интерфейс прикладного программирования вместе с новыми данными, а служба возвращает прогноз. Вторая архитектура – это вывод данных и обучения в облаке, в ее основе лежит принцип предыдущей модели, единственное отличие заключается в том, что поставщики услуг предоставляют разработчикам мобильных устройств возможность обучать данные и создавать собственные уникальные модели с помощью облачного сервиса. Третья архитектура – это выведение на устройстве с предварительно обученными моделями, принцип реализации основан на том, что предварительно обученная модель загружается в мобильное приложение, чтобы сделать вывод, мобильное приложение запускает все вычисления вывода локально на устройстве. Четвертая архитектура – это введение и обучение на устройстве, программа может постоянно учиться на данных и поведении пользователя, а следовательно, постоянно обновлять модели и улучшать производительность для данного пользователя. Пятая архитектура – это гибридная архитектура, в основе лежит принцип когда основная модель учится в облаке с использованием большого набора данных или большой совокупности всех данных, которыми пользуются пользователи. Отмечается, что на сегодняшний день, самым простым способом включения машинного обучения в мобильное приложение является использование облачного сервиса, который охватывает функциональные возможности обеих составляющих.

Ключевые слова: платформа, архитектура, мобильные устройства, интеграция, облако, блок обучения, блок вычисления, машинное обучение.

A. V. Koshel

MACHINE LEARNING ON MOBILE DEVICES IMPLEMENTING

The article reveals the architectural components of the implementation of machine learning on mobile devices. The main advantages of using deep learning and inference on a mobile device are highlighted: bandwidth savings, reduced cost of cloud computing resources, fast response time, mobile computing stores sensory data on the local device, which significantly improves the confidentiality of user data. It is emphasized that today there are five architectures that are commonly used to implement machine learning on mobile devices. At the same time, it is emphasized that each individual architecture, its fundamental basis depends on the details of the scenario, such as the specific requirements of the mobile application, the complexity of the model, the amount of data and so on. The first architecture is non-learning data output, based on the fact that the mobile application sends a request to the cloud through the application programming interface along with the new data, and the service returns the forecast. The second architecture is data output and cloud learning, based on the principle of the previous model, the only difference being that service providers give mobile device developers the ability to learn data and create their own unique models using the cloud service. The third architecture is output to devices with pre-trained models, the principle of implementation is based on the fact that the pre-trained model is loaded into the mobile application to make output, the mobile application runs all output calculations locally on the device. The fourth architecture is output and learning on the device, the program can constantly learn from the data and user behavior, and therefore, constantly update models and improve performance for this user. The fifth architecture is a hybrid architecture, based on the principle that the basic model is trained in the cloud using a large standard set of data or a large set of all data used by users. It is emphasized that today, the easiest way to include machine learning in a mobile application is to use a cloud service that covers the functionality of both components.

Key words: platform, architecture, mobile devices, integration, cloud, learning unit, computing unit, machine learning.

Вступ та постановка проблеми. Враховуючи прориви в технологіях глибокого навчання і штучного інтелекту, варто наголосити на встановленні можливості використання безлічі мобільних додатків з підвищеним рівнем функціоналу. Порівнюючи традиційні парадигми обчислень засновані на мобільних датчиках і хмарні обчислення та глибоке навчання, яке реалізовано на мобільних пристроях, візуалізується низка переваг використання останніх. До цих переваг відносяться низька пропускна здатність зв'язку, невелика вартість ресурсів хмарних обчислень, швидкий час відгуку і поліпшена конфіденційність даних.

Глибоке навчання є ключовим фактором багатьох останніх досягнень в області додатків штучного інтелекту. Технології штучного інтелекту з часом стають повсюдними в мобільних додатках, таких як автоматичне водіння, доступні роботи для дому та більш інтелектуальна особиста допомога на мобільному телефоні. У порівнянні з традиційною парадигмою мобільного зондування і хмарних обчислень, переваги глибокого навчання і логічного висновку на мобільному пристрої полягають в чотирьох аспектах:

1) Економія смуги пропускання зв'язку. Чим більше обчислень виконується на мобільному пристрої, тим менше даних потрібно відправляти у хмару.

2) Зниження вартості ресурсів хмарних обчислень. Вартість обслуговування або навіть оренди ресурсів хмарних обчислень може бути непомірно високою для деяких додатків. Обчислення на мобільних пристроях стають можливими в міру того, як мобільні пристрої стають більш потужними в обчислювальному відношенні.

3) Швидкий час відгуку. Якщо всі обчислення можуть бути виконані локально, не буде накладних витрат на час зв'язку або будь-яких проблем з надійністю сервера. Для деяких додатків, наприклад, в сфері охорони здоров'я і у військовій сфері, цей час відгуку є дуже важливим показником.

4) Мобільні обчислення зберігають сенсорні дані на локальному пристрої, що значно покращує конфіденційність даних користувача. Це особливо актуально для додатків домашньої робототехніки.

Таким чином, дослідження в області глибокого навчання для мобільних і вбудованих пристроїв стали актуальною темою. Підтеми охоплюють аспекти архітектури обладнання, алгоритмічну оптимізацію і вибір мобільних платформ глибокого навчання. По мірі розвитку досліджень і розробок багато інструментів, дані і моделі стають загальнодоступними. Для початківців в області мобільного глибокого навчання обсяг інформації, доступної у зазначеній сфері, може бути величезним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні роки з'являється все більше робіт, в яких описуються механізми та принципи застосування машинного навчання та штучного інтелекту на мобільні пристрої.

Так С. С. Гороховський та О. О. Франків [1] створили фреймворк MLARKit, що дає змогу легко користуватися складними для використання у мобільних пристроях алгоритмами машинного навчання та доповненої реальності, враховуючи їхні особливості. Фреймворк створено максимально гнучким, тож сторонні розробники зможуть максимально задовольнити свої потреби без самостійної реалізації.

Розробка програмного забезпечення доповненої реальності для розпізнавання рухів з використанням технологій SWIFT, ARKIT, COREML запропонували В.В. Туйчев та Д.І. Кателініков [2]. Авторами підкреслено, що актуальною залишається задача розробки мобільного додатку, який комбінує доповнену реальність та можливості розпізнавання рухів, за допомогою яких здійснюється вплив на віртуальні об'єкти. Саме вирішенню цієї задачі і присвячений розроблений науковцями додаток «Hands Gesture AR».

Д.Г. Косяков та О.В. Ларченко[3] дослідили тенденції розвитку сучасних інформаційних технологій, навели визначення основних понять та зазначили принципи функціонування Інтернету речей.

Актуальну науково-прикладну проблему у галузі інструментального забезпечення біоінформатики – розвиток теоретичних засад, удосконалення методологічної, алгоритмічної та програмно-технічної бази комп'ютерних систем опрацювання біосигналів і даних на основі широкого використання штучних нейронних мереж і технологій глибокого навчання розкрив Ю. В. Хома [4].

Впровадження машинного зору на мобільні пристрої для моніторингу завантаженості автодоріг дослідили низка вчених М. М. Гулковський, Ю.О. Борзов та О.В. Придатко [5]. Авторами проведено огляд технологій та методів для розпізнавання транспортних засобів та їх відслідковування на відео. Розглянуто один із можливих шляхів вирішення даної проблеми. за допомогою засобів машинного зору.

Із зарубіжних авторів варто відзначити такі роботи як: M. Hollemans [6], Bayerl, Sebastian & Frassetto, Tommaso & Jauernig, Patrick & Riedhammer, Korbinian & Sadeghi, Ahmad-Reza & Schneider, Thomas & Stapf, Emmanuel & Weinert, Christian [7], Newnham J. [8], He, Yihui & Lin, Ji & Liu, Zhijian & Wang, Hanrui & Li, Li-Jia & Han, Song [9], Tan, Mingxing & Chen, Bo & Pang, Ruoming & Vasudevan, Vijay & Sandler, Mark & Howard, Andrew & Le, Quoc[10], Wolfensperger D. [11], Zhang, Xiangyu & Zhou, Xinyu & Lin, Mengxiao & Sun, Jian[12], Dai, Xiangfeng & Spasic, Irena & Meyer, B. & Chapman, Samuel & Andres, Frederic[13], Ramu, Arulmurugan & K.R, Sabarmathi & Haldorai, Anandakumar[14], Sandler, Mark & Howard, Andrew & Zhu, Menglong & Zhmoginov, Andrey & Chen, Liang-Chieh [15] та інші.

Проте, враховуючи описані наукові набутки, за темою, питання розкриття принципів впровадження машинного навчання на мобільні пристрої залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

Постановка завдання. Розкрити принципи впровадження машинного навчання на мобільні пристрої.

Викладення основного матеріалу дослідження. Впровадження машинного навчання на мобільні пристрої реалізується на основі архітектур. На сьогодні, науковцями відокремлено п'ять архітектур, які зазвичай використовуються для реалізації машинного навчання на мобільних пристроях. Кожна окрема архітектура, її фундаментальна основа залежить від деталей сценарію, таких як специфічні вимоги мобільного додатку, складність моделі, кількість даних тощо.

Перша архітектура – це вивід даних без навчання.

Багато мобільних додатків, які базуються на обчисленні у хмарі, наприклад, платформи машинного навчання як послуги або віддалені сервери формують наступну послідовність: мобільний додаток надсилає запит до хмари через інтерфейс прикладного програмування (API) разом з новими даними, а служба повертає прогноз. Немає необхідності, щоб сам додаток (тобто його розробник) виконував навчання. Наприклад, на рисунку 1 показано принцип розпізнавання зображень, який використовує хмарні обчислення без навчальної вибірки. Зображення надсилається до хмарного сервісу, класифікується в хмарі, а результат розпізнавання надсилається назад на мобільний додаток.

Постачальники послуг оновлюють свої моделі. Коли моделі періодично проходять повторне навчання, мобільні додатки автоматично отримують користь від цих удосконалень. Ця архітектура є найпростішим та найшвидшим рішенням для впровадження машинного навчання

для мобільних додатків, але це рішення працює лише для програм, які обробляють загальноновживані дані, оскільки за збір навчальних даних та оновлення відповідає лише постачальник послуг, а не розробник програмних моделей. Будь-які випадки, які ґрунтуються на ідіосинкратичних даних, не можуть скористатися цією архітектурою [12].

Друга архітектура – це вивід даних та навчання у хмарі.

Точні моделі машинного навчання вимагають великих наборів навчальних даних, обробка яких, у свою чергу, споживає значну кількість енергії, пам'яті та часу, яких на мобільних пристроях недостатньо. Тому актуальним є як хмарний висновок, так і навчання.

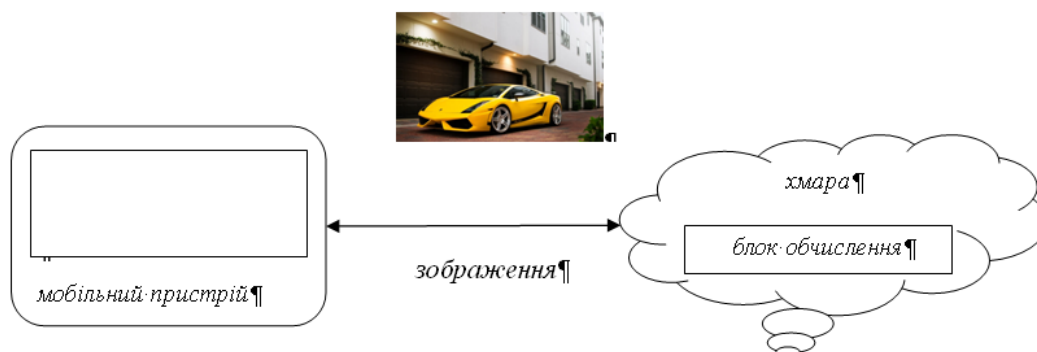


Рис. 1. Вивід даних без навчання

Ця архітектура схожа на попередню, єдина відмінність полягає в тому, що постачальники послуг надають розробникам мобільних пристроїв можливість навчати дані та створювати власні унікальні моделі за допомогою хмарного сервісу.

Це забезпечує гнучкість у типах та обсягах даних, які розробник може використовувати для навчання. У наведеному нижче прикладі (рисунок 2) розробник завантажує (не обов'язково з мобільного пристрою) навчальний набір даних (групу зображень, включаючи зображення авто) і використовує їх для навчання моделі в хмарі. Користувач надсилає зображення авто з телефону, а вивід результату виконується в хмарі, а потім надсилається назад на телефон користувача. Надсилання даних користувачів у хмару збільшує проблеми конфіденційності та безпеки, особливо якщо вони зберігаються там для розширення навчального набору даних та повторного навчання моделей, надісланих на сервер.

Третя архітектура – це виведення на пристрої з попередньо навченими моделями.

Виведення на пристрої є важливим для мобільних додатків, де затримка тривалістю кілька мікросекунд є критичною для виконання місії. Час відгуку є основною причиною здійснення виведення результату безпосередньо на пристрої. Наприклад, виведення, яке виконують автомобілі, що їздять самостійно, повинно бути майже миттєвим і незалежним від з'єднання з хмарою. У цій архітектурі попередньо навчена модель завантажується у мобільний додаток. Щоб зробити виведення, мобільний додаток запускає всі обчислення виведення локально на пристрої. Йому не потрібно з'єднання з сервером для будь-чого, що стосується машинного навчання. Виведення відбувається майже миттєво (рисунок 3).

Попередньо навчена модель може бути або стандартною загальною моделлю, такою як [11], [14], або індивідуальною. Якщо стандартна попередньо навчена модель задовольняє вимогам програми (наприклад, розмір моделі), розробникам потрібно лише завантажити попередньо навчену модель у додаток. В іншому випадку потрібна індивідуальна модель. Модель можна попередньо навчити та налаштувати на настільному комп'ютері, високопродуктивному комп'ютерному кластері або в хмарі.

Виведення на пристрої підходить для програм, де проблеми конфіденційності викликають занепокоєння, наприклад, у випадку медичної діагностики. Наприклад, [13] демонструє додаток виведення на пристрої для виявлення раку шкіри. Спочатку модель класифікації попередньо навчається та налаштовується на комп'ютері, потім зберігається на мобільному пристрої. Коли користувач надає новий образ своєї шкіри, він зберігається на його мобільному пристрої, де модель використовується для класифікації ураження шкіри. Результати сповіщення повинні передаватися зовні. Ця архітектура зменшує затримку, економить пропускну здатність та

покращує конфіденційність. Однак масштабні моделі не можуть бути розміщені на мобільному пристрої, розмірність може вплинути на точність та гнучкість використання.

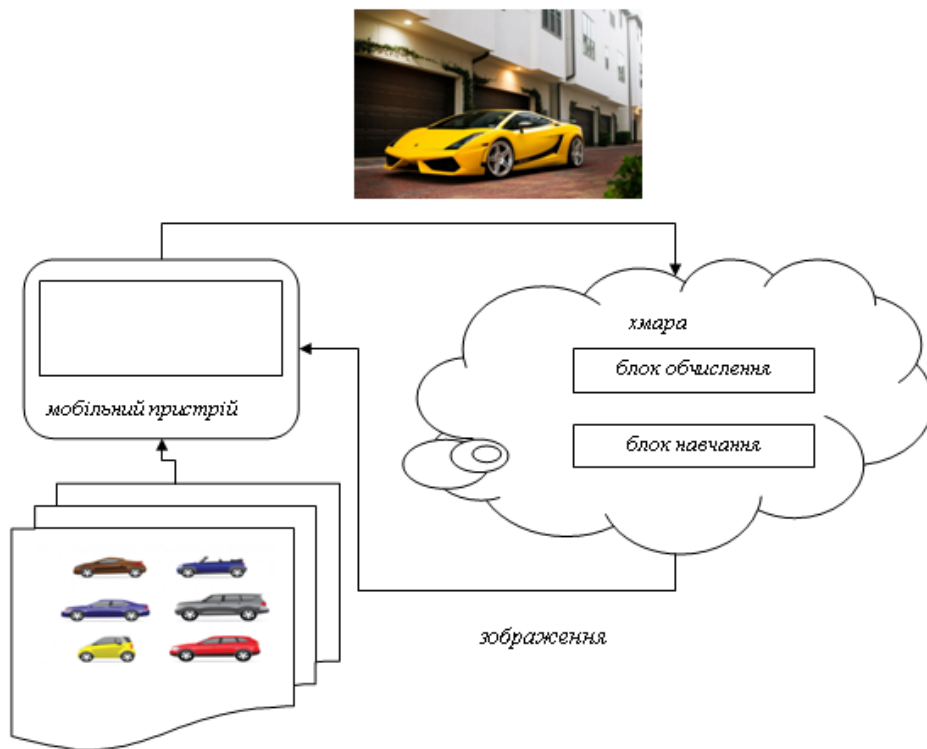


Рис. 2. Вивід даних та навчання у хмарі

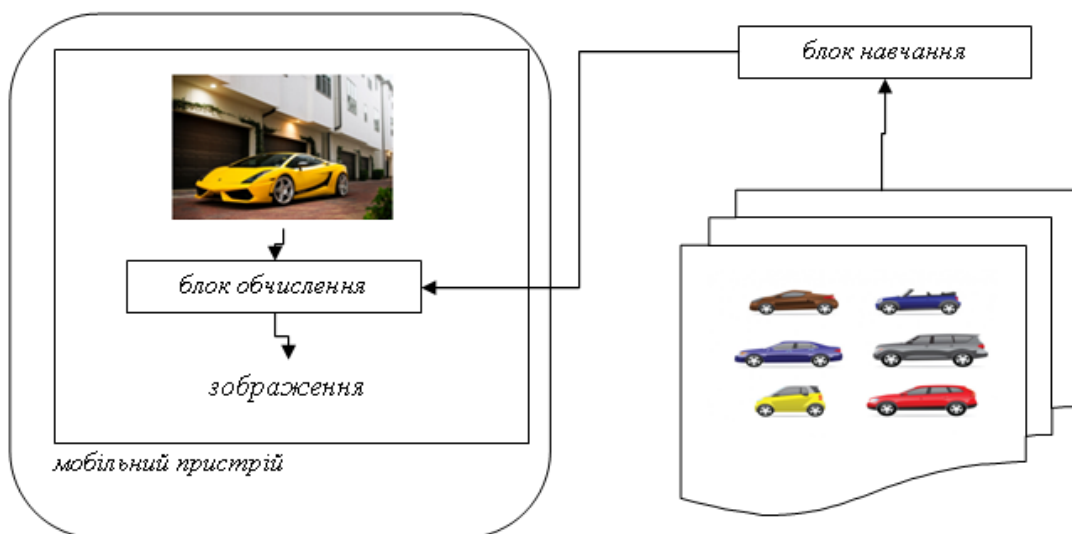


Рис. 3. Виведення на пристрої з попередньо навченими моделями

Четверта архітектура – це виведення і навчання на пристрої.

Основною перевагою цієї архітектури є те, що програма може постійно вчитися на даних та поведінці користувача, а отже, постійно оновлювати моделі та покращувати продуктивність для даного користувача.

Ця архітектура економить витрати на використання хмарних сервісів та потребу у пропускну здатності. Насправді, якщо всі дані доступні на пристрої користувача для навчання моделі та виведення інформації, все можна зробити на пристрої, не використовуючи хмари. Ця архітектура можлива для деяких сценаріїв за допомогою ручних глибоких нейронних мереж невеликого розміру [15]. Однак ця архітектура буде працювати лише для невеликих наборів даних

та базових алгоритмів машинного навчання через обмежену доступність пам'яті та обчислень. Інтенсивне навчання на мобільному пристрої залишається недоцільним для більшості застосувань.

П'ята архітектура – це гібридна архітектура.

У цій архітектурі навчання відбувається як на мобільному пристрої, так і в хмарі. Основна модель навчається в хмарі з використанням великого стандартного набору даних або великої сукупності всіх даних, якими користуються користувачі. Окрему модель можна адаптувати для кожного користувача, використовуючи власні дані на власному пристрої для додаткового навчання. Ця гібридна архітектура дозволяє розробникам продовжувати навчання для вдосконалення індивідуальної моделі та адаптації індивідуальної моделі шляхом пристосування моделі до індивідуальних даних користувача. Це покращує індивідуальні вимоги користувачів за допомогою індивідуальних моделей. Ця архітектура є складною, непростою для реалізації та досить дорогою в обслуговуванні.

Більшість популярних хмарних сервісів надають інфраструктуру для попередньої обробки даних, навчання моделі, оцінки моделі та подальшого прогнозування для підтримки хмарних архітектурних додатків. Додатки збирають дані з телефону, надсилають їх у хмару, а потім застосовують машинне навчання до хмари. На сьогоднішній день, найпростішим способом включення машинного навчання у мобільний додаток є використання хмарного сервісу, який охоплює функціональні можливості обох складових.

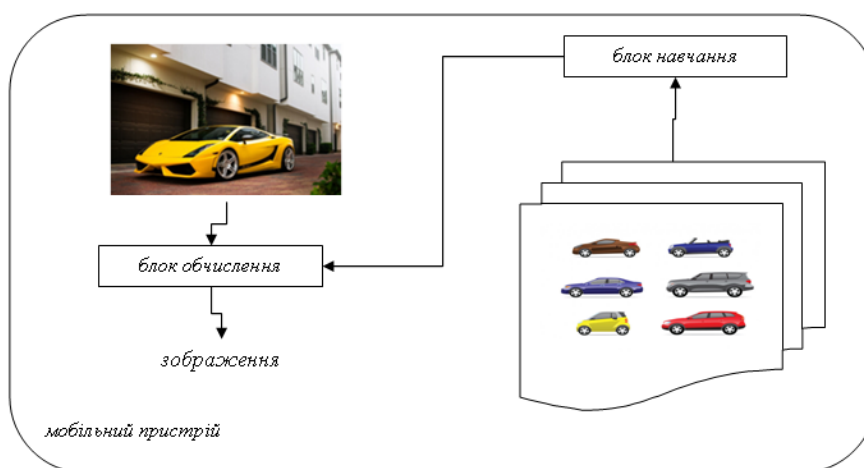


Рис. 4. Виведення та навчання на пристрої

Висновки. У роботі розкрито принципи впровадження машинного навчання на мобільні пристрої. Нинішні обмеження обчислювальної потужності, затримок, ризиків конфіденційності та обмеженої пам'яті створюють труднощі та можливості для впровадження машинного навчання на мобільні додатки. З урахуванням обмежень, запропоновано п'ять архітектур для впровадження машинного навчання на мобільних пристроях, окресливши плюси та мінуси кожної з них. Хмарні архітектури є популярним способом впровадження машинного навчання на мобільних пристроях, але технологічна індустрія розвивається з експоненціальною швидкістю, і машинне навчання на пристроях, незабаром, може стати стандартом у мобільних додатках. Наразі повне розгортання виведення інформації та навчання на пристроях все ще нереальне, та й не є необхідним. Зрештою, відповідна архітектура залежить від конкретного сценарію реалізації. Нарешті, зменшення затримок, посилена безпека, можливості роботи в автономному режимі та скорочення витрат визначатимуть розвиток новаторських та інноваційних програм мобільного машинного навчання, які необхідні для подальшого розвитку та вдосконалення.

Література

1. Машинне навчання та доповнена реальність на пристроях на базі iOS із фреймворком MLARKit [Електронний ресурс] / С. С. Гороховський, О. О. Франків // Наукові записки НаУКМА. Комп'ютерні науки. – 2020. – Т. 3. – С. 4-6. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/NaUKMAkn_2020_3_4
2. Туйчев В.В., Кателініков Д.І. Розробка програмного забезпечення доповненої реальності для розпізнавання рухів з використанням технологій SWIFT, ARKIT, COREML / Тези доповідей II Всеукраїнської науково-технічної конференції «Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення», м. Житомир, 14 – 15 листопада 2019 р. – Житомир: Житомирська політехніка, 2019. – С. 39-40.

3. Тенденції розвитку сучасних інформаційних технологій. Косяков Д. Г., Ларченко О.В. – Режим доступу. – URI: <http://hdl.handle.net/123456789/6191>.
4. 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.
5. Система моніторингу завантаженості автодоріг / М. М. Гулковський, Ю.О. Борзов, О.В. Придатко // Матеріали Десятої Міжнародної наукової конференції студентів та молодих вчених «Сучасні інформаційні технології - 2020» «Modern Information Technology - 2020» (14-15 травня 2020 р., м.Одеса) / МОН України; Одес. Нац. політех. ун-т ; Ін-т комп'ют. систем. – Одеса : Наука і техніка, 2020. – С. 120-121.
6. Hollemans M. Core ML Survival Guide [Electronic resource] / Matthijs Hollemans. – 2018. – 363 p. – Mode of access: <https://leanpub.com/coreml-survival-guide>.
7. Bayerl, Sebastian & Frassetto, Tommaso & Jauernig, Patrick & Riedhammer, Korbinian & Sadeghi, Ahmad-Reza & Schneider, Thomas & Stapf, Emmanuel & Weinert, Christian. (2020). Offline Model Guard: Secure and Private ML on Mobile Devices. 460-465. 10.23919/DATE48585.2020.9116560.
8. Newnham J. Machine Learning with Core ML: An iOS developer's guide to implementing machine learning in mobile apps [Electronic resource] / Joshua Newnham. – 2018. – 378 p. – Mode of access: <https://www.amazon.com/Machine-Learning-Core-developers-implementing/dp/1788838297>.
9. He, Yihui & Lin, Ji & Liu, Zhijian & Wang, Hanrui & Li, Li-Jia & Han, Song. (2018). AMC: AutoML for Model Compression and Acceleration on Mobile Devices. 10.1007/978-3-030-01234-2_48.
10. Tan, Mingxing & Chen, Bo & Pang, Ruoming & Vasudevan, Vijay & Sandler, Mark & Howard, Andrew & Le, Quoc. (2019). MnasNet: Platform-Aware Neural Architecture Search for Mobile. 2815-2823. 10.1109/CVPR.2019.00293.
11. Wolfensparger D. Apple Arkit Revealed: Augmented and Mixed Reality for Iphone and Ipad / Dell Wolfensparger. – 2018. – 180 p.
12. Zhang, Xiangyu & Zhou, Xinyu & Lin, Mengxiao & Sun, Jian. (2018). ShuffleNet: An Extremely Efficient Convolutional Neural Network for Mobile Devices. 6848-6856. 10.1109/CVPR.2018.00716.
13. Dai, Xiangfeng & Spasic, Irena & Meyer, B. & Chapman, Samuel & Andres, Frederic. (2019). Machine Learning on Mobile: An On-device Inference App for Skin Cancer Detection. 10.1109/FMEC.2019.8795362.
14. Ramu, Arulmurugan & K.R, Sabarmathi & Haldorai, Anandakumar. (2019). Classification of sentence level sentiment analysis using cloud machine learning techniques. Cluster Computing. 22. 10.1007/s10586-017-1200-1.
15. Sandler, Mark & Howard, Andrew & Zhu, Menglong & Zhmoginov, Andrey & Chen, Liang-Chieh. (2018). Inverted Residuals and Linear Bottlenecks: Mobile Networks for Classification, Detection and Segmentation.

Duan Mnatang¹, Zhong ziqiao²

Master of E.O. Paton Institute of Materials Science and Welding
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"¹
Master of E.O. Paton Institute of Materials Science and Welding
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"²

STRENGTHENING AND TOUGHENING OF ALUMINUM ALLOYS

The paper focuses on the problem of traditional strengthening of aluminum alloys, such as the solid solution strengthening, second phase strengthening, grain refinement strengthening, and mechanical hardening. Composite reinforcement is the use of high-strength powder, wire, and sheet materials to undergo pressure, welding, spraying and solution dipping methods with the aluminum matrix composite, so that the matrix could obtain high strength. This article reveals the four traditional strengthening mechanisms of aluminum alloys, briefly introduces the mechanism of composite strengthening, and compares several strengthening modes. According to the shape of the composite material, composite reinforcement can be divided into fiber, particle and material wrapping one. Most of the traditional strengthening methods are to improve the strength of aluminum alloys by sacrificing plasticity and adding defects (mainly dislocations) in the crystal to impede the dislocation movement. This paper also briefly introduces the process of composite strengthening, which is different from the traditional strengthening methods which enhance the material characteristics by obstructing the movement of dislocations. The composite strengthening relies on good infiltration between the fiber and the matrix for a tight joint, so that the fiber and the matrix can obtain a good bond strength. Most of the traditional strengthening mechanisms increase the strength of the alloy at the expense of plasticity, which restricts the development of the comprehensive aspects of aluminum alloys. At present, the main methods of aluminum alloy strengthening are grain refinement and second phase strengthening. In particular, the second phase strengthening has a significant effect on the performance improvement of aluminum alloys. In the future development of aluminum alloys, it is not only necessary to improve the strength, but also to make comprehensive performance in all aspects better. Composite strengthening involves the advantages of each component, making up for their own drawbacks, and has a good development prospect.

Key words: strengthening of aluminum alloys, traditional strengthening, composite strengthening, toughening.

Дуань Маньтан, Чжун цзицяо

УПРОЧНЕНИЕ И ЗАКАЛКА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

В статье описаны традиционные способы упрочнения алюминиевых сплавов: упрочнение твердым раствором, вторичной фазы, измельчением зерна и механическое упрочнение. Композитное упрочнение – это использование высокопрочных порошковых, проволочных и листовых материалов для обработки давлением, сваркой, распылением и методами погружения в раствор композита алюминиевой матрицы, благодаря чему матрица приобретает высокую прочность. В данной статье рассматриваются четыре традиционных механизма упрочнения алюминиевых сплавов в сравнительном аспекте, кратко представлен механизм композитного упрочнения. Зависимо от формы композитного материала, композитное упрочнение можно разделить на упрочнение волокнами, частицами и обертывание материалом. Большинство традиционных методов упрочнения направлены на повышение прочности алюминиевых сплавов путем потери пластичности и добавления дефектов (в основном дислокаций) в кристалл, чтобы затруднить движение дислокаций. В данной статье также кратко представлен механизм композитного упрочнения, которое отличается от традиционных методов, повышающих характеристики материала путем препятствования движению дислокаций. Композитное упрочнение основывается на хорошей инфильтрации между волокном и матрицей для тесного сцепления, так что волокно и матрица могут получить хорошую прочность связи. Большинство традиционных механизмов упрочнения повышают прочность сплава за счет пластичности, что ограничивает развитие комплексных аспектов алюминиевых сплавов. В настоящее время основными методами упрочнения алюминиевых сплавов являются измельчение зерна и упрочнение вторичной фазы. В частности, упрочнение вторичной фазы оказывает значительное влияние на улучшение эксплуатационных характеристик алюминиевых сплавов. В дальнейшем развитии алюминиевых сплавов необходимо не только улучшать прочность, но и решать вопрос по улучшению комплексных характеристик во всех аспектах. Композитное упрочнение сочетает в себе преимущества каждого компонента, компенсируя их собственные недостатки, и поэтому его дальнейшее изучение является перспективным.

Ключевые слова: упрочнение алюминиевых сплавов, традиционное упрочнение, композитное упрочнение, закалка.

Дуань Маньтан, Чжун цзицяо

ЗМІЦНЕННЯ І ЗАГАРТУВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

Анотація. У статті описані традиційні способи зміцнення алюмінієвих сплавів, такі як зміцнення твердим розчином, зміцнення вторинної фази, зміцнення подрібненням зерна та механічне зміцнення. Композитне зміцнення - це використання високоміцних порошкових, дрітчастих та листових матеріалів для обробки тиском, зварюванням, розпиленням і методами занурення в розчин композиту алюмінієвої матриці, завдяки чому матриця набуває високу міцність. У даній статті розглядаються чотири традиційних механізми зміцнення алюмінієвих сплавів у порівняльному аспекті, коротко представлений механізм композитного зміцнення. Відповідно до форми композитного матеріалу, композитне зміцнення можна розділити на зміцнення волокнами, частинками та

обгортання матеріалом. Більшість традиційних методів зміцнення спрямовані на підвищення міцності алюмінієвих сплавів шляхом зменшення пластичності та додавання дефектів (в основному дислокацій) в кристал, щоб утруднити рух дислокацій. У даній статті також коротко представлено механізм композитного зміцнення, яке відрізняється від традиційних методів, що підвищують характеристики матеріалу шляхом перешкоджання руху дислокацій. Композитне зміцнення ґрунтується на хорошій інфільтрації між волокном і матрицею для тісного зчеплення, так що волокно й матриця можуть отримати хорошу міцність зв'язку. Більшість традиційних механізмів зміцнення підвищують міцність сплаву за рахунок пластичності, що обмежує розвиток комплексних аспектів алюмінієвих сплавів. В даний час основними методами зміцнення алюмінієвих сплавів є подрібнення зерна та зміцнення вторинної фази. Зокрема, зміцнення вторинної фази значно впливає на поліпшення експлуатаційних характеристик алюмінієвих сплавів. В подальшому розвитку алюмінієвих сплавів необхідно не тільки покращувати міцність, але й вирішувати питання щодо поліпшення комплексних характеристик у всіх аспектах. Композитне зміцнення поєднує в собі переваги кожного компонента, компенсуючи їх власні недоліки, і тому його подальше вивчення видається перспективним.

Ключові слова: зміцнення алюмінієвих сплавів, традиційне зміцнення, композитне зміцнення, загартовування.

Problem statement. It is well known that materials are the cornerstone of development for Human Civilization; from the Stone Age to the Bronze Age, the Iron Age, and now the New Material Age; every progress of human civilization is inseparable from the invention and use of new materials [1]. In recent years, with people's attention to environmental pollution and fuel economy issues, the designing of new metallic materials with light weight and good overall performance for gradually replacing steel parts, is the mainstream of energy conservation and fuel efficiency improvement in today's transportation field [2-4]. Among them, the light metal materials, which are represented by aluminum alloys, magnesium alloys and titanium alloys, are more and more widely used. Aluminum alloy is the most common light alloy material in our life and production activities. Compared with steel, the density of aluminum alloy is one third of that of steel, and the alloys not only have high specific strength, strong plasticity, good physical properties, and rich varieties, but they also have excellent electrical conductivity and corrosion resistance. Aluminum alloy has become an important material in the field of aerospace and transportation [4].

Analysis of research and publications. However, pure aluminum is soft and cannot be used in structural components, so aluminum alloys need to be strengthened in order to accomplish the requirements of structural components [5]. Theoretically, there are two ways to improve the strength of metals by technological means, the first being to completely eliminate dislocations and other defects within the metal so that its strength approaches its theoretical strength (it has been shown that the theoretical value of the yield strength of an intact crystal is more than a thousand times higher than the measured value). However, it is still quite difficult to do so. Another way is to introduce a large number of defects in the crystal to impede the movement of dislocations (it has been shown that the plastic deformation of metals is caused by the movement of dislocations) and to increase the strength of the metal. Examples include the solid solution strengthening, grain size reduction, second phase strengthening (precipitation strengthening, dispersion strengthening) and strain hardening [6-8]. It is worth noting that an effective combination of these strengthening methods can also approach the theoretical strength of the metal from another side [9]. The purpose of this work is to test and complement the results of the received theoretical provisions, discusses the four traditional strengthening mechanisms of aluminum alloys, and briefly introduces the mechanism of composite strengthening, and compares several strengthening mechanisms.

Results

1. Strengthening mechanism of aluminum alloy

1.1. Solid solution strengthening

At present, solid solution strengthening is one of the most widely used and most matured strengthening methods in the field of metallic materials. Normally, a small amount of other metals are added to the pure metal to form an alloy phase in which the solute atoms fuse into the solvent lattice while still maintaining the solvent type, which is called a solid solution. Solid solution strengthening is a kind of strengthening to form point defects; solute atoms are dissolved into the metal matrix to increase the dislocation density of the base metal and produce lattice distortion. The stress field generated by the distortion interacts with the elastic stress field around the dislocation, constituting an obstacle to dislocation slip and thereby increasing the stress required for plastic deformation i.e., the impurity atoms cause lattice strain which can "anchor" dislocations. Alloying elements, such as Mg, Mn and Cu can 'pin' dislocations, thereby strengthening the Al-based alloys. The solid solution strengthening effect depends on the concentration of solute atoms, the relative size of the atoms, the type of solid solution, and electronic factors. The greater the difference in the number of valence electrons between solute atoms and aluminum atoms, the greater the solid solution strengthening effect [6-8, 10].

1.2. Grain refinement strengthening

The microstructure of metallic materials is composed of a large number of grains stacked. The empirical relationship between yield stress and grain size for polycrystals was derived by Hall and Petch after extensive experiments in 1951[11].

$$\sigma = \sigma_0 + k d^{\frac{1}{2}}$$

where: σ_0 is the frictional resistance to dislocation motion in the crystal, which is related to the material type; k is a constant to be obtained experimentally; and d represents the grain size.

It can be seen that when the grain size is reduced, the yield strength of the crystal increases dramatically due to the effect of the interaction of grain boundaries and dislocations. Fine grain strengthening is also one of the most common means of metal strengthening in industry, which can effectively improve the strength and plasticity of metals. Other strengthening mechanisms basically increase the strength while losing the plasticity of the alloy [6]. As shown in the Figure 1 below, there are several ways of grain refinement for aluminum alloys. Grain refinement mainly focuses on the use of grain refiners, stirring and vibration, rapid solidification, and super plastic deformation, etc. According to research, use of chemical grain refinement is an effective way to increase the strength of cast Al alloys [12].

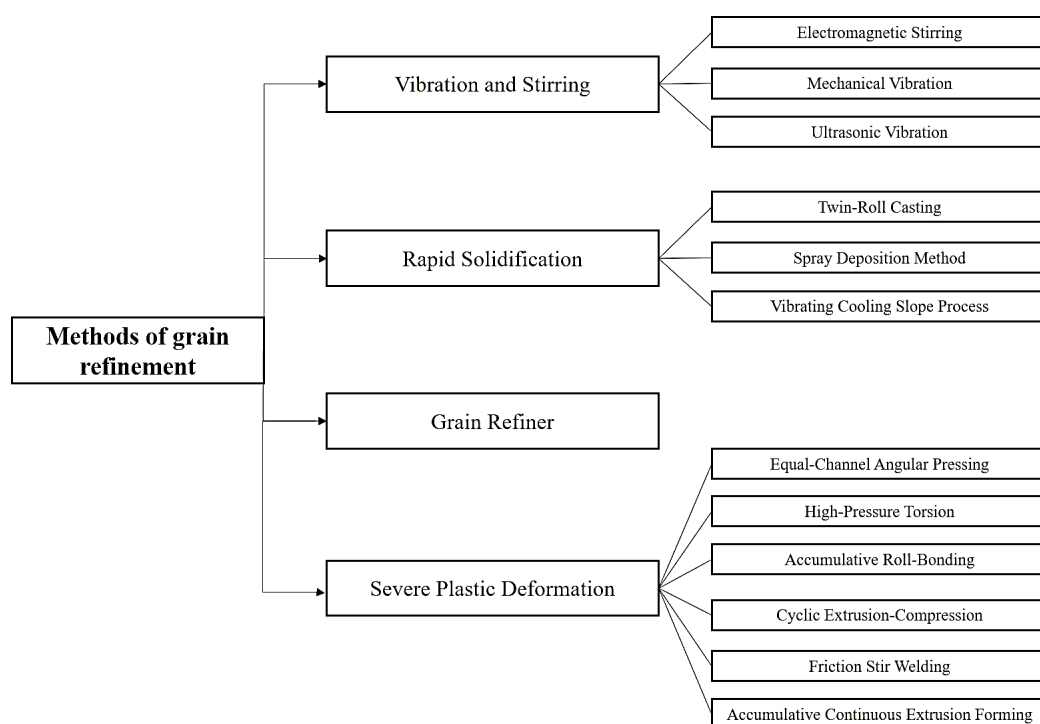


Fig. 1. Methods of grain refinement

1.3. Second phase strengthening

On a Friday in 1906, Alfred Wilm of Germany tried to strengthen the Al-Cu alloy by quenching, but after quenching the specimens were soft. However, after a weekend, they were measured again and found to be significantly stronger, but the exact strengthening method was not known. Later, with the development of modern experimental instruments, this mystery was first solved by Guinier and Preston in 1937 through their work on X-ray diffraction [13, 14]. The essence of age strengthening is that the dislocation movement is impeded by small, hard, diffusely distributed second-phase particles in the base metal, which are stronger than the individual solute atoms, and the dislocation movement must bypass or cut through these obstacles (particles), thus increasing the yield strength of the material [15]. Table 1 below shows the second phase precipitation sequence of common aluminum alloy series. The precipitation of the second phase is a complicated process, and the precipitated substances change with time.

There are two common methods to introduce the second phase into the base metal; one is to use the precipitation of the supersaturated solid solution for precipitation strengthening by aging heat treatment, and the other is to introduce the second phase from outside the system by mechanical or chemical methods (such as sintering by adding the second phase powder, internal oxidation, etc.) called dispersion

strengthening. Generally speaking, the larger the volume content of the precipitated phase and the greater the dispersion, the better the strengthening effect of the alloy[8].

Tabl.1.

Precipitation sequence of aluminum alloy

Series	Precipitation sequence	Strengthening phase
2XXX[16]	SSSS→solute clusters→GP zones→ θ'' → θ' → θ (Al ₂ Cu)	Al ₂ Cu
6XXX[17]	SSSS→atomic clusters→GP zones (pre β'')→ β' → β (Mg ₂ Si)	Mg ₂ Si
7XXX[18]	SSSS→VCR→GP zones→intermediate structures→ η' → η (MgZn ₂)	MgZn ₂
SSSS- supersaturated solid solution, VCR-vacancy-rich clusters, GP-Guinier-Preston		

1.4. Strain hardening

The essence of work hardening is the strengthening of the dislocation density of metal materials during the cold deformation process. According to statistics, after the metal is violently deformed, the dislocation density increases from 10^6 roots/cm² to more than 10^{12} roots/cm²[19]. Because of the higher density of dislocations in the alloy, there are more opportunities for dislocations to cross each other during the sliding process when the deformation continues, and the greater the mutual resistance, so the greater the deformation resistance and the alloy is strengthened. This strengthening is general. When the strength of the material increases, the plasticity of the material will decrease. How to increase the strength of the material without reducing its plasticity, or increase the strength and plasticity of the material at the same time, is a research hotspot of this strengthening method. In addition, All aluminum alloys can be strengthened by work hardening[6, 20].

1.5. Composite Strengthening

In addition to the above-mentioned strengthening mechanisms, there are also composite reinforcements of aluminum alloys. Composite reinforcement is the use of high-strength powder, wire, and sheet materials to undergo pressure, welding, spraying and solution dipping methods with the aluminum matrix composite, so that the matrix obtains high strength. According to the shape of the composite material, composite reinforcement can be divided into fiber reinforced, particle reinforced and wrapped material. The strengthening mechanism is different from the above four methods. It is not due to the obstruction of the dislocation movement, but by the good infiltration between the reinforcement material and the matrix material to obtain a good bond strength so giving full play to the advantages of each component material such that the entire composite material has a high strength and toughness. Composite reinforcement methods are mechanical composite methods (such as blasting composite, pressure processing composite), metallurgical methods (such as casting, spray deposition, self-propagation high-temperature synthesis) and chemical methods (such as gluing, surface coating). Composite reinforcement combines the advantages of each component to make up for their respective shortcomings, and has a very good development prospects[21, 22].

1.6. Comparison of strengthening mechanisms

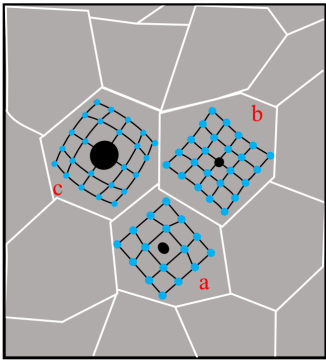
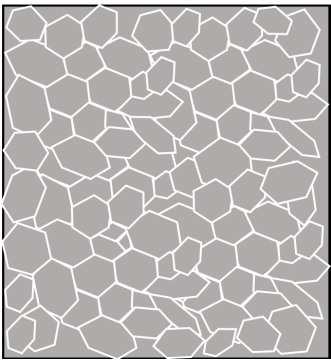
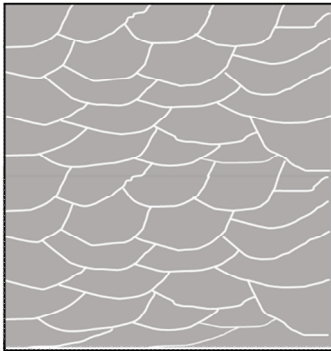
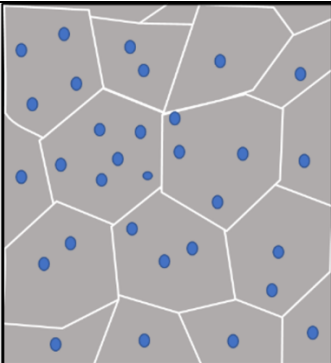
The above-mentioned strengthening and toughening mechanisms have certain applications in aluminum alloys, but the degree of strengthening is different. In the following table 2, the schematic diagrams of different strengthening methods and the comparison between strengthening methods are shown. The main dislocation barriers are solute atoms. The dislocation barriers for grain refinement are grain boundaries. The second phase strengthening dislocation barriers are precipitates. For work hardening, it mainly increases the dislocation density and strengthens the aluminum alloy. The second phase is the main method of strengthening the aluminum alloy, especially, grain refinement strengthens the aluminum alloy more obviously.

Conclusion

Most of the traditional strengthening mechanisms increase the strength of the alloy at the expense of plasticity, which restricts the development of the comprehensive aspects of aluminum alloys. At present, the main methods of aluminum alloy strengthening are grain refinement and second phase strengthening. In particular, the second phase strengthening has a significant effect on the performance improvement of aluminum alloys. The chemical grain refinement in grain refinement is compared with other fine grains, and the strengthening effect of chemical methods is more obvious. In the future development of aluminum alloys, it is not only necessary to improve the strength, but also to face the improvement of comprehensive performance in all aspects. Composite strengthening combines the advantages of each component, making up for their own shortcomings, and has a good development prospect.

Tabl.2.

Comparison of traditional reinforcement mechanisms in a tabular format

Mechanism (Dislocation barrier)	Schematic	Comparative description
Solid solution strengthening (Solute atoms) a-interstitial solid solution b,c-substitutional solid solution		Solid solution strengthening is limited by the degree of solid solution and the degree of supersaturation. When the alloy composition is certain, the solid solution degree is also certain, and the solid solution strengthening has no direct application value. The purpose of solid solution treatment (strengthening) is to prepare the structure for precipitation strengthening, and its strengthening effect is smaller than that of precipitation strengthening.
Grain refinement strengthening (Grain boundaries)		Fine grain strengthening is also a major means of strengthening high-strength aluminum alloys, and has a wide range of direct applications, and its strengthening effect can be described by the Hall-Petch relationship. Its effect on the strength and toughness of aluminum alloys is greater than that of solid solution strengthening and deformation strengthening.
Strain hardening (Other dislocations)		All aluminum alloys can be strengthened by deformation strengthening. Deformation strengthening is generally used to change the internal structure of the material through deformation. For heat-treatable aluminum alloys, strain hardening is the preparation of precipitation strengthening, and for non-heat treatment strengthened aluminum alloys, strain hardening causes stresses within the alloy, which need to be relieved by heat treatment at a later stage.
Second phase strengthening (Precipitates)		Second-phase strengthening is a major strengthening tool for high-strength aluminum alloys and has a wide range of direct applications. The strengthening effect is not only related to the characteristics, quantity, size, shape, and distribution of the second phase, but also related to the crystallographic matching between the second phase and the matrix, the interfacial energy, and interfacial bonding.

References

1. Spaldin, N. A. (2017). Fundamental materials research and the course of human civilization. *arXiv preprint arXiv:1708.01325*.
2. Aluminium Alloys - Aluminium Usage in The Transportation Industry. (2003, May 5). Retrieved September 15, 2021, from Azom.com website: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1964>

3. Boyko, V., Czekaj, E., Warmuzek, M., & Mykhalenkov, K. (2017). Design of new casting alloys of al-mg-si-mn system with alloying additions, its structure and mechanical properties. *Akademia Gorniczo-Hutnicza Im. Stanislaw Staszica. Metallurgy and Foundry Engineering*, 43(3), 141. doi: <https://doi.org/10.7494/mafe.2017.43.3.141>
4. Sun, X. (2021, May 31). Applications of Aluminum Alloys in Rail Transportation. IntechOpen. <https://www.intechopen.com/online-first/75650>
5. Hsu, C.-H. (2020). Process performance analysis and improvement for the manufacture of 6063 aluminum alloy. *Metals*, 10(5), 605. <https://doi.org/10.3390/met10050605>
6. Embury, J. D., Lloyd, D. J., & Ramachandran, T. R. (1989). Strengthening mechanisms in aluminum alloys. In *Treatise on Materials Science & Technology* (pp. 579–601). Elsevier.
7. Kostyryzh, A. G. (2021). Strengthening mechanisms in metallic materials. *Metals*, 11(7), 1134.
8. Kostyryzh, A. G. (2021). Strengthening Mechanisms in Metallic Materials. *Metals*, 11(7), 1134. doi: <https://doi.org/10.3390/met11071134>
9. Ning, K. Q., Peng, B. S., Sheng, Z. J., & Ning, A. L. (2012). Strengthening Mechanism of High Strength Aluminum Alloy. *Journal of Shaoyang University (Natural Science Edition)*, 04.
10. Bhat, B. N. (2018). *Aerospace materials and applications*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.
11. Ryen, Ø., Holmedal, B., Nijs, O., Nes, E., Sjölander, E., & Ekström, H.-E. (2006). Strengthening mechanisms in solid solution aluminum alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 37(6), 1999–2006.
12. <https://doi.org/10.1007/s11661-006-0142-7>
13. Hansen, N. (2004). Hall–Petch relation and boundary strengthening. *Scripta Materialia*, 51(8), 801–806. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.06.002>
14. Guan, R.-G., & Tie, D. (2017). A review on grain refinement of aluminum alloys: Progresses, challenges and prospects. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 30(5), 409–432. doi: <https://doi.org/10.1007/s40195-017-0565-8>
15. Polmear, I. J. (2004, August). Aluminium Alloys--A Century of Age Hardening. In *Materials forum*, 28(1-14), 13.
16. Wilm, A. (1911) «DRP 244554 (German patent) 1906».
17. Lu, Z., Jiang, S., He, J., Zhou, J., Song, W., Wu, Y., ... & Liu, X. (2016). Second phase strengthening in advanced metal materials. *Acta Metall Sin*, 52(10), 1183–1198.
18. Wang, S. C., & Starink, M. J. (2007). Two types of S phase precipitates in Al–Cu–Mg alloys. *Acta Materialia*, 55(3), 933–941.
19. Baruah, M., & Borah, A. (2020). Processing and precipitation strengthening of 6xxx series aluminium alloys: A review. *International Journal of Materials Science*, 1(1), 40–48. doi: <https://doi.org/10.22271/27078221.2020.v1.i1a.10>
20. H. Löffler, I. Kovács, and J. Lendvai. (1983). Decomposition processes in Al–Zn–Mg alloys. *Journal of Materials Science*, 18(8), 2215–2240. doi: <https://doi.org/10.1007/bf00541825>
21. Ohring, M. (1995). *Engineering materials science*. Elsevier.
22. Poole, W. J., Embury, J. D., & Lloyd, D. J. (2011). Work hardening in aluminium alloys. In *Fundamentals of Aluminium Metallurgy* (pp. 307–344). Woodhead Publishing.
23. Mistry, J. M., & Gohil, P. P. (2018). Research review of diversified reinforcement on aluminum metal matrix composites: fabrication processes and mechanical characterization. *Science and Engineering of Composite Materials*, 25(4), 633–647. doi: <https://doi.org/10.1515/secm-2016-0278>
24. Nturanabo, F. (2019, May 10). Novel Applications of Aluminium Metal Matrix Composites. IntechOpen. doi: <https://www.intechopen.com/chapters/67052>

УДК 537.32.

DOI 10.36910/775.24153966.2021.72.10

Б.О. Решетило¹, В.В. Лотиш¹, О.К. Яковенко²¹Луцький національний технічний університет²КП «Волинська обласна клінічна лікарня» Волинської облради**ВИЗУАЛІЗАЦІЯ ТА ОБРОБКА МЕДИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ФОРМАТУ DICOM ЗАСОБАМИ PYTHON**

У статті досліджено сучасні алгоритми обробки медичних зображень формату DICOM засобами Python. Розглянуто проблему низької якості медичного зображення. Висвітлено переваги обраних методів дослідження та їх алгоритм дій.

Ключові слова: медична візуалізація, методи візуалізації, формат Dicom, бібліотеки numpy, scipy, matplotlib, шкала Хаунсфілда, метод вододілу Watershed Transform, Python.

Б.А. Решетило, В.В. Лотыш, О.К. Яковенко**ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И ОБРАБОТКА МЕДИЦИНСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ФОРМАТА DICOM СРЕДСТВАМИ PYTHON**

В статье исследованы современные алгоритмы обработки медицинских изображений формата DICOM средствами Python. Рассмотрена проблема низкого качества медицинского изображения. Освещены преимущества выбранных методов исследования и их алгоритм действий.

Ключевые слова: медицинская визуализация, методы визуализации, формат Dicom, библиотеки numpy, scipy, matplotlib, шкала Хаунсфилда, метод водораздела Watershed Transform, Python.

B.A. Reshetilo, V.V. Lotysh, O.K. Yakovenko**VISUALIZATION AND PROCESSING OF MEDICAL IMAGES IN DICOM FORMAT WITH PYTHON MEANS**

The article reflects modern methods of processing medical images of DICOM format using Python. The problem of low quality of the studied medical image is posed and solved. The advantages of the selected research methods and their algorithm of actions are reflected.

Keywords: medical imaging, imaging techniques, Dicom format, numpy, scipy, matplotlib libraries, Hounsfield scale, Watershed Transform watershed method, Python.

Постановка проблеми. Технології покращення медичного рентгенологічного зображення дали великий поштовх в реалізації сучасного методу діагностики - комп'ютерної томографії високої роздільної здатності (КТВРЗ), яка дозволяє лікарю точніше визначити стан будь-якого органу людини, його розміри, положення, форму, стан поверхні, його функції та щільність будь-якої тканини.

На сьогоднішній день КТВРЗ будь-якого органу людини, в тому числі органів грудної клітки (ОГК) – це один з провідних методів точного встановлення діагнозу, проте, однією з проблем, з якою стикається лікар під час інтерпретації рентгенологічного зображення, є іноді низька якість самого зображення яка зумовлена різними факторами. Зростання обсягів інформації яка зберігається, обробляється і перетворюється, утворюють неодмінну умову в створенні та вдосконаленні методів сучасної діагностики захворювань ОГК, особливо в умовах існуючої пандемії коронавірусної хвороби-2019 (COVID-19) [9].

З розвитком сучасної медичної діагностики вимоги до стандартів візуалізації внутрішніх біологічних структур організму людини постійно зростають, що призвело до розгалуження візуалізації на різні види для точнішого виявлення не лише морфологічних, а й функціональних змін, які відбуваються в здоровому організмі та при різних захворюваннях.

В теперішній час через плівку чи екран лікарі бачать стан органу людини не лише у двовимірному, а й в трьохвимірному вигляді. Віртуально повертаючи, є можливість роздивитись будь-який ракурс органу навіть в реальному часі. Це дало можливість якісніше проводити діагностику з наступним лікуванням різних захворювань хірургічними та не хірургічними методами [1].

У даній статті наведено сучасні методи обробки медичного зображення КТВРЗ ОГК, послідовність дій та засоби вдосконалення результатів візуалізації на основі яких створено програмне забезпечення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Визначаючи конкретніше дане питання, слід зазначити, що розгляд методів обробки зображення висвітлено в працях Н.В. Туманська, К.С.

Барська, С.В.Скринченко, Т.М. Кічангіна, Прэтт У., Рисована Л.М., Радзішевська Є.Б. та ін. Окремі аспекти роботи з форматом Dicom та теоретичний, практичний курс обробки зображень за допомогою бібліотек мови Python: numpy, matplotlib, skipy, відображаються в роботах Mustra Mario, Delac Kresimir, Grgic Mislav, Van derWalt, S., Colbert, S. C. & Varoquaux, Travis E. O. та ін..

Метою статті є огляд існуючих алгоритмів для обробки медичного зображення КТБРЗ ОГК з використанням програмного середовища Python.

Основна частина. Одним з найпопулярніших загальних форматів зображення та стандартом створення, збереження, архівування, передачі даних та візуалізації медичних зображень є DICOM.

Основною особливістю цього стандарту є те, що він зберігає велику кількість даних про пацієнта, місце, час та методику дослідження [2].

Стандарт DICOM має безліч можливостей ідентифікувати та пов'язувати конкретні набори даних із багатьма різними медичними структурами, такими як інформація про установи чи інформація про відповідальність [3].

Це поштовх в розвитку сфери медичного програмного забезпечення, що дає можливість візуалізувати дані про дослідження організму пацієнта для подальшого лікування та отримати файл стандарту DICOM відразу після сканування.

Стандартний файл формату Dicom містить в собі загальну інформацію, дані про пацієнта, характерну особливість апарату обстеження, назву медичного закладу, інформація про діагностуючого лікаря, вид діагностування, параметри обстеження та певні його особливості, унікальні ключі ідентифікації, цифрове зображення збережене в файлі формату DICOM [4].

Для розробки програмного забезпечення обрано мову програмування Python через певні її особливості: простота читання та написання коду, вирішення різних завдань обробки зображень за допомогою певних пакетів, зрізи масивів.

Для роботи з форматом Dicom обрано бібліотеки: pydicom, numpy, pandas, matplotlib, scipy. Кожна є унікальною в сфері свого застосування.

Перші три етапи для візуалізації медичного зображення: загрузка файлу, перетворення параметрів в певний формат та отримання масиву з певних точок зрізу, проводяться за допомогою бібліотеки pydicom.

Для наступних етапів обробки медичних зображень використовують наступні бібліотеки.

Найбільш популярною є numpy. Цей модуль використовується для роботи з числами, таблицями, матрицями в різних форматах, для аналізу даних у вигляді швидких функцій. Пакет numpy підходить для цифрової обробки зображень, яка базується на маніпулюванні 2D піксельними масивами. Numpy підтримує багатовимірні масиви та надає численні функції для загальних завдань з обробкою зображення. Завдяки певним ознакам: використання алгоритмів, мала кількість циклів для полегшеної індексації ітерацій, чіткий код, складні функції, наявність інструментів для інтеграції та засоби лінійної алгебри, numpy є базовим пакетом фактичного стандарту для багатовимірних масивів у Python [5].

Для маніпулювання даними з величезними можливостями: швидкість проведення досліджень нових даних, тестування гіпотез, отримання звіту, використовують бібліотеку pandas.

Ця бібліотека є однією з головних переваг Python, оскільки вона забезпечує роботу даними та функції для роботи зі структурованими даними. Це найкращий інструмент для запису, читання даних та роботою з великою кількістю табличних даних формату csv.

За допомогою модуля Pandas можливі наступні дії: індексування, маніпулювання, перейменування, сортування, об'єднання фрейму даних; відновлення, додавання, видалення стовпці з фрейму даних; відновлення відсутніх файлів; побудова гістограм. Це робить Pandas незамінною бібліотекою в застосуванні Python для Data Science. Застосування Pandas спрощує представлення зображення, представлених набором даних, методами візуалізації.

Для візуалізації даних двовимірної і тривимірної графіки, представлених в масивах numpy використовують модуль matplotlib [6].

Бібліотекою числових процедур для мови програмування Python, яка забезпечує базові функції для моделювання є scipy. Цей набір інструментів включає алгоритми оптимізації, інтегрування, інтерполяції, задачі власних значень, алгебраїчні рівняння, диференціальні рівняння, підтримують великі багатовимірні масиви та забезпечують численні функції для загальних завдань обробки зображень [7].

Наведені вище бібліотеки є основними засобами для вирішення таких завдань: візуалізації

2D та 3D зображення, робота з масивами даних, функцію моделювання.

За допомогою бібліотеки `pydicom` зчитується всі дані медичного зображення, `pumpy` - перетворює зображення в піксельний масив, `pandas` – здійснює запис та маніпуляції, `matplotlib` – для візуалізації графічно, `scipy` – для моделювання.

Розглянемо можливість застосування вищеперелічених модулів для роботи з зображенням грудної клітки людини отриманих комп'ютерним томографом (КТ) і збереженим у форматі DICOM.

Першим етапом обробки медичного зображення грудної клітки є отримання метаданих DICOM.

Для редагування всіх полів метаданих DICOM використовуємо пакет `pydicom` з підключенням модуля `os` для роботи з операційною системою. Вибираємо каталог з файлом формату Dicom: `filepath = './data/'`. Вказуємо індивідуальний префікс файлу DICOM перед номером: `dcmprefix = 'Image_'`. Для перевірки полів метаданих вибираємо перше зображення DICOM: `firstdcm = dcmprefix + '%04d.DICOM' % 1`.

Нові поля метаданих зберігаємо в нову директорію: `newdir = './data-edited/'`.

Для подальшої роботи використовуємо цикл з методом `os.listdir` для отримання списку всіх файлів у вказаному каталозі з заданою умовою методом `endswith()`, який повертає `true`, якщо рядок закінчується вказаним форматом файлу, інакше повертає `false`.

Завантажуємо набір даних DICOM (`ds`): `ds = dicom.read_file(filepath + firstdcm)`.

Результат етапу представлено на рис. 2.

Другим етапом є нормалізація, яка надає медичним зображенням контрастності та усуває залежність зображення від освітлення та кольору.

Для нормалізації зображення формату DICOM імпортуємо такі бібліотеки як `opencv`, `pumpy`, `matplotlib`.

Задаємо відповідні значення вікна по центру та ширині командами `window_center`, `window_width`.

Вибираємо файл певного формату командою `dicom_path` та завантажуюмо зріз КТ зображення операцією `slice = dicom.read_file(dicom_path)`.

Завантажений зріз перетворюємо в піксельний масив з змінним масштабом операціями: `s = int(slice.RescaleSlope)`; `b = int(slice.RescaleIntercept)`; `image = s * slice.pixel_array + b`. Використовуючи операцію бібліотеки `matplotlib`: `plt.subplots`, `plt.title('DICOM ->array')`, `plt.imshow(image, cmap='gray')` — показали перетворене зображення на графіку у відтінках сірої карти.

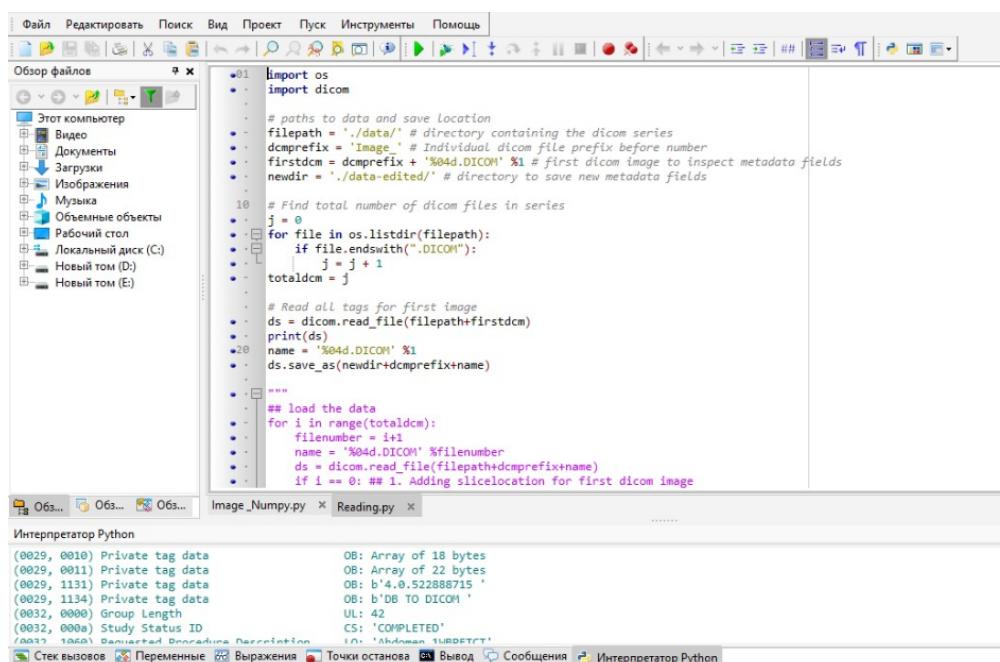


Рис. 1. Фрагмент коду в IDE редакторі

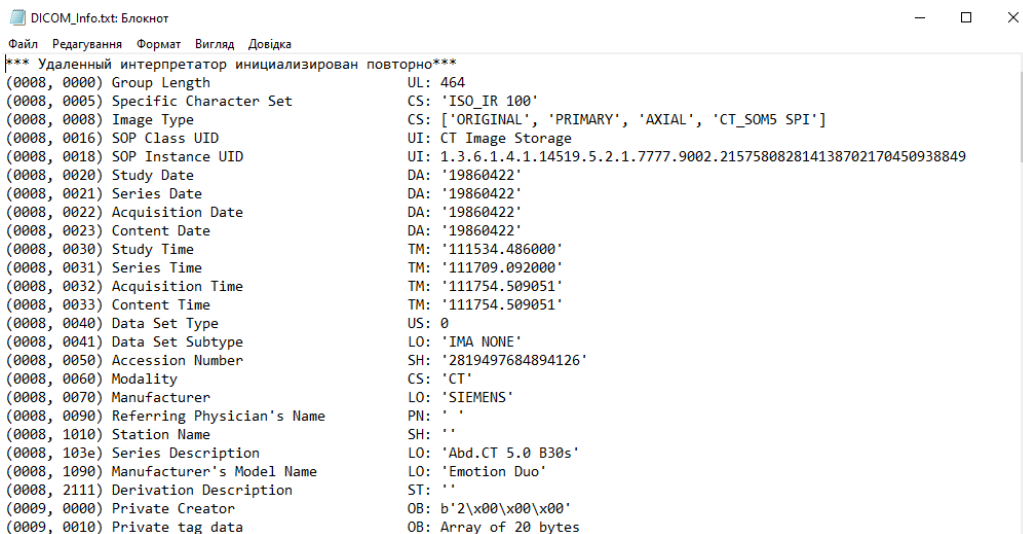
Над отриманим зображенням здійснюємо останній етап: нормалізація, використовуючи операцію бібліотеки `pumpy` — `pumpy.clip` для відсікання значень у масиві. Нормалізоване

результуюче зображення виводимо разом з операціями `matplotlib.pyplot.subplots`, `plt.title`, `plt.imshow`. Інтерфейс програми та виведені зображення грудної клітки наведено на рисунках 3-5.

Тканини з меншою щільністю будуть перекриті чорним кольором, тканини з більшою густиною - білим.

Для реалізації цього етапу до отриманого цифрового зображення: КТВРЗ ОГК, завантажуюмо бібліотеки Python: `dicom`, `numpy`, `matplotlib`, `tkinter`. Після чого оцифровуємо зображення в піксельний масив `512x512` та зберігаємо його на диск. За допомогою операції `get_pixels_hu` перетворюємо необроблені значення в одиниці HU.

В даній роботі зображення — це цифрові масиви `numpy`, як підтримують тип даних `astype`, тому для того, щоб уникнути спотворення використовуємо діапазони `int16` (`image=image.astype(np.int16)`; `image[image<=-2000]=0`). Наступним кроком є представлення вікна зрізу функціями бібліотеки `matplotlib` та зображення гістограми з одиницями вимірювання та частотою для значення шкали HU від `-1000` до `+1000` (рис. 6).

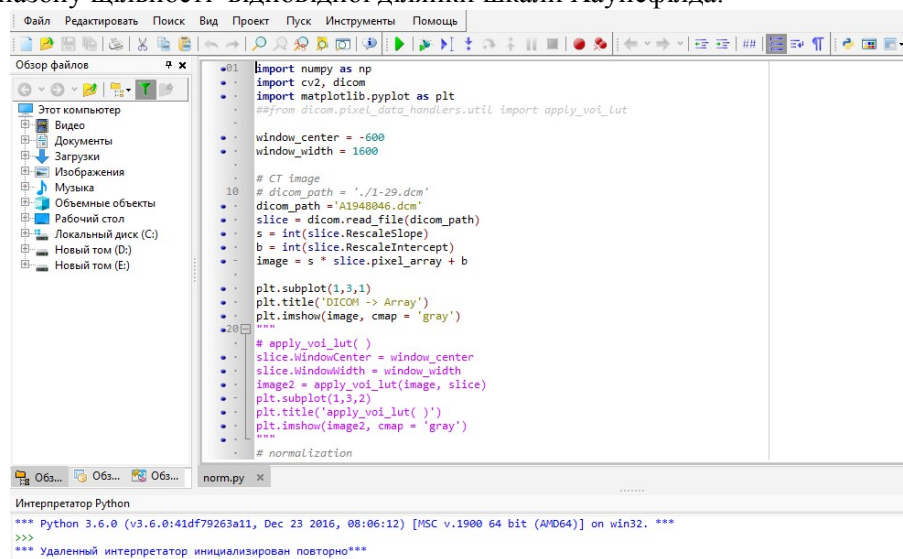


```

*** Удаленный интерпретатор инициализирован повторно***
(0008, 0000) Group Length          UL: 464
(0008, 0005) Specific Character Set  CS: 'ISO_IR 100'
(0008, 0008) Image Type              CS: ['ORIGINAL', 'PRIMARY', 'AXIAL', 'CT_SOM5 SPI']
(0008, 0016) SOP Class UID           UI: CT Image Storage
(0008, 0018) SOP Instance UID        UI: 1.3.6.1.4.1.14519.5.2.1.7777.9002.215758082814138702170450938849
(0008, 0020) Study Date              DA: '19860422'
(0008, 0021) Series Date              DA: '19860422'
(0008, 0022) Acquisition Date         DA: '19860422'
(0008, 0023) Content Date             DA: '19860422'
(0008, 0030) Study Time               TM: '111534.486000'
(0008, 0031) Series Time              TM: '111709.092000'
(0008, 0032) Acquisition Time         TM: '111754.509051'
(0008, 0033) Content Time            TM: '111754.509051'
(0008, 0040) Data Set Type            US: 0
(0008, 0041) Data Set Subtype         LO: 'IMA NONE'
(0008, 0050) Accession Number         SH: '2819497684894126'
(0008, 0060) Modality                 CS: 'CT'
(0008, 0070) Manufacturer             LO: 'SIEMENS'
(0008, 0090) Referring Physician's Name PN: ''
(0008, 1010) Station Name             SH: ''
(0008, 103e) Series Description        LO: 'Abd.CT 5.0 B30s'
(0008, 1090) Manufacturer's Model Name LO: 'Emotion Duo'
(0008, 2111) Derivation Description    ST: ''
(0009, 0000) Private Creator           OB: b'2\x00\x00\x00'
(0009, 0010) Private tag data         OB: Array of 20 bytes
  
```

Рис. 2. Вивід метаданих Dicom

Шкала Хаунсфілда включає в себе 4096 значень — від `-1024` до `+3071` одиниць Хаунсфілда (HU). За допомогою вікна візуалізації здійснюється зміна яскравості і контрастності КТ зображень таким чином, щоб на екрані монітора в шкалі сірого кольору видно тільки тканини необхідного діапазону щільності відповідної ділянки шкали Хаунсфілда.



```

import numpy as np
import cv2, dicom
import matplotlib.pyplot as plt
from dicom.pixel_data_handlers.util import apply_voi_lut

window_center = -600
window_width = 1600

# CT image
dicom_path = './1-29.dcm'
dicom = dicom.read_file(dicom_path)
slice = dicom.read_slice(slice)
s = int(slice.RescaleSlope)
b = int(slice.RescaleIntercept)
image = s * slice.pixel_array + b

plt.subplot(1,3,1)
plt.title('DICOM -> Array')
plt.imshow(image, cmap = 'gray')

# apply_voi_lut
slice.WindowCenter = window_center
slice.WindowWidth = window_width
image2 = apply_voi_lut(image, slice)
plt.subplot(1,3,2)
plt.title('apply_voi_lut')
plt.imshow(image2, cmap = 'gray')

# normalization
  
```

Рис. 3. Фрагмент коду нормалізації в IDE редакторі

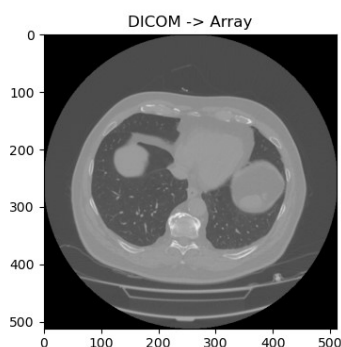


Рис. 4. Початкове зображення

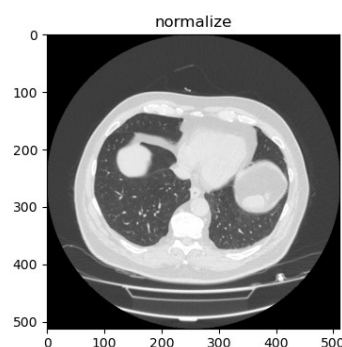


Рис.5. Нормалізоване зображення

Наступним кроком виводимо зображення формату DICOM в одиницях HU з накладанням двох карт: сірої та теплової для кращої візуалізації. (fig, axs = plt.subplots(nrows=1, ncols=2, figsize=(18,8)); ax= axs[0] ; ax.imshow(first_patient_pixels, cmap='gray', vmin=vmin, vmax=vmax); ax.set_title("HU", fontsize=20); ax.set_axis_off()). Даний результат наведено на рисунках 7-8.

Щоб побачити певну структуру організму необхідно та достатньо вести мінімальне та максимальне значення по шкалі HU. Використовуючи кісткову тканину з HU_MIN=400 ТА HU_max=600 візьмемо її за основу для візуалізації.

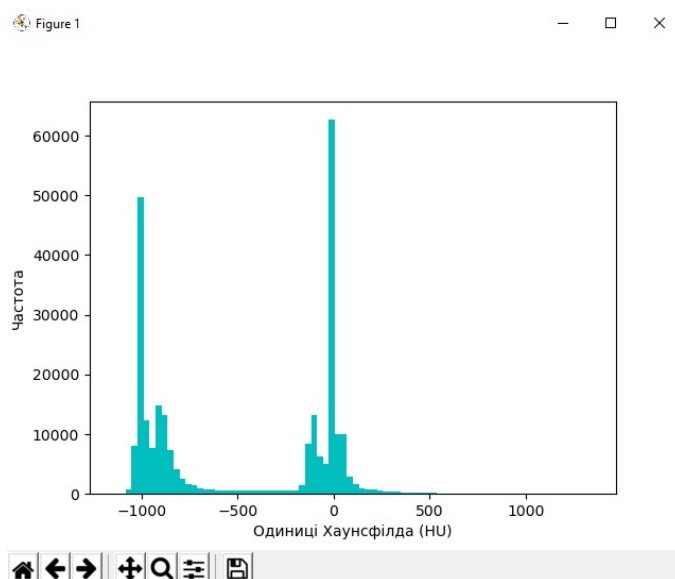


Рис. 6. Гістограма даних в одиницях Хаунсфілда

З отриманим новим піксельним масивом вивили гістограму з видаленням нульових значень та зображення по новій шкалі з накладанням сірої та теплової карт. Даний етап повторюється діями з попереднім.

Виведені результати з інтерфейсом програми наведені на рисунках 9-10.

Щоб ліквідувати шуми з зображення використовуємо метод покращення з пакетами dicom, numpy, cv2, matplotlib, os, scipy, skimage. Значення пікселів перетворили в одиниці шкали HU операцією def_transform_to_hu вказуючи перетворення масштабу. Будуємо графіки з встановленням границь вікна зображення операцією def_window_image(image, window_center, window_width) та перетворенням значень в пікселі матриці. Даний етап проводимо функцією def_load_and_plot_image. Виведений результат зображено на рисунку 11.

Покращимо якість отриманих зображень і відрегулюємо їх розмір.

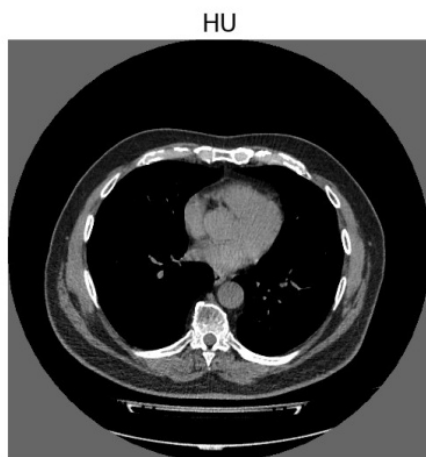


Рис. 7. Початкове зображення

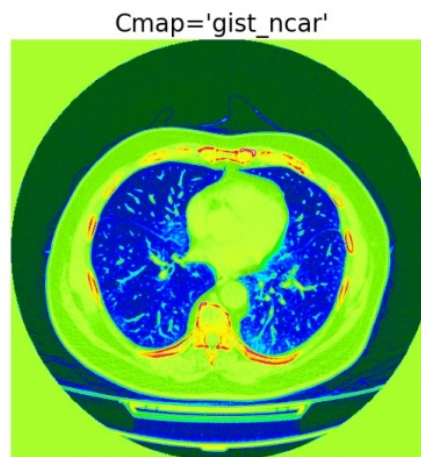


Рис. 8. Зображення з тепловою картою

Завдяки `morphology.dilation` створюється сегментація зображення з масивом квадратного розміру 5x5. Ці операції виконуємо функцією `def remove_noise`, де зчитане зображення - `dicom.read_file(file_path)`, переводимо в масив - `medical_image.pixel_array` та перетворюємо за допомоги шкали HU. Розмір `label_count` - це кількість знайдених класів / сегментацій.

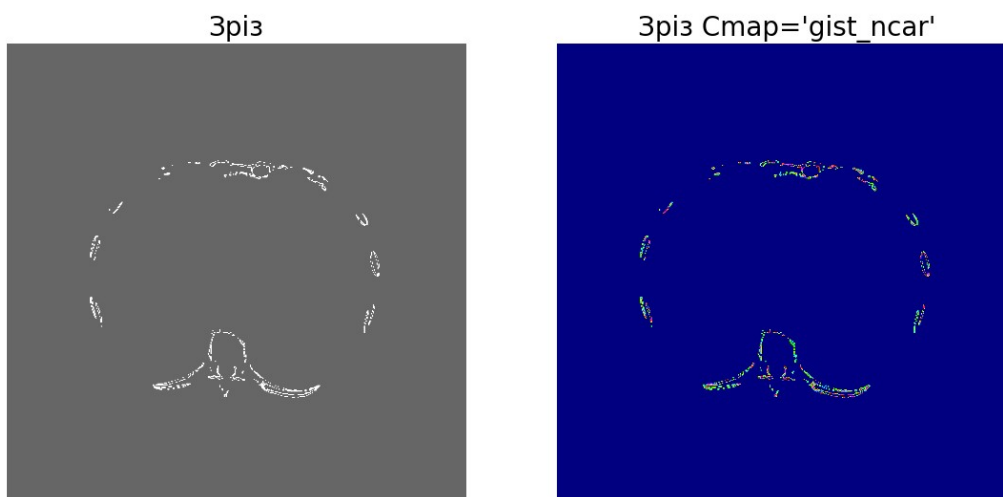


Рис. 9. Результати з інтерфейсом програми

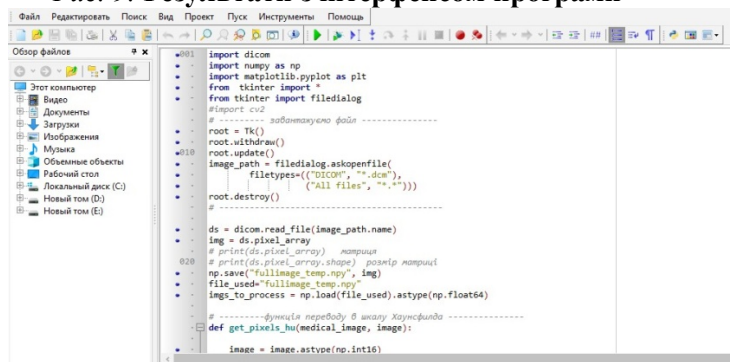


Рис. 10. Інтерфейс представлення зображень за допомоги шкали Хаунсфілда

Для покращення зображення використовуємо `mask` бібліотеки `scipy`, збереженням необхідної області та видаленням непотрібного фону операціями `coords`, `top_left`, `bottom_right`. Оброблене зображення виводимо операціями пакета `matplotlib` (рис. 14). Наступними діями відцентрували та вирізали зображення (рис. 15). Для фінальної візуалізації зображення органів грудної клітки міняємо пікселі на пікселі вихідного коду (`final_image[pad_top:pad_top + height, pad_left:pad_left + width] = image`). На рисунках 12-15 наведений результат та фрагмент скрипту.

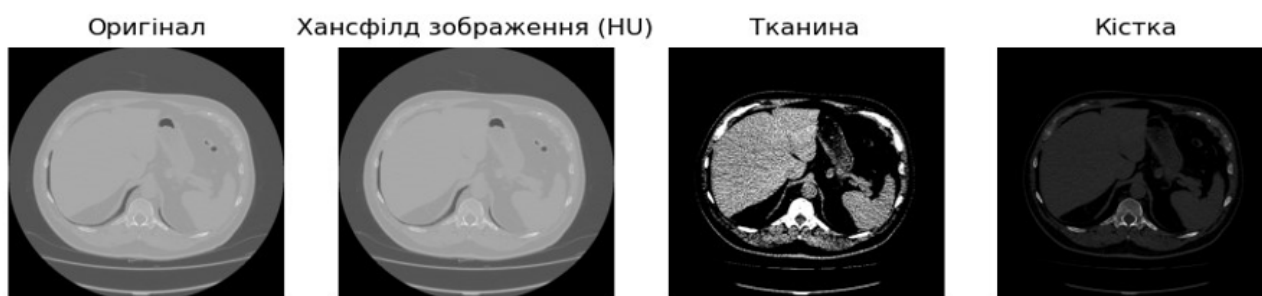


Рис. 11. Виведення оригінального та перетворених зображень

Запропоновані раніше методи сегментації використовують порогове значення зображення на основі HU (значення Хаунсфілда) або інші методи, які базуються на виборі регіонів.

Watershed Transform - це потужний алгоритм сегментації, який базується на “вододілах”. Основна ідея полягає в розміщенні “водного джерела” в кожному локальному мінімумі області, для того щоб затопити всю область при джерелах і побудувати “бар'єри”, коли різні “водні джерела” зустрічаються. Отриманий набір “бар'єрів” становить “вододіл” області [8].

Для реалізації використовуємо наступні бібліотеки: dicom, numpy, pandas, os, scipy, skimage, matplotlib, time.

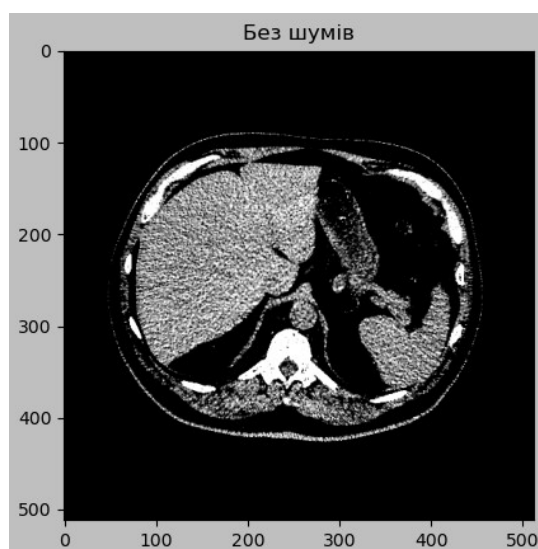


Рис. 12. Покращене зображення формату Dicom без шумів

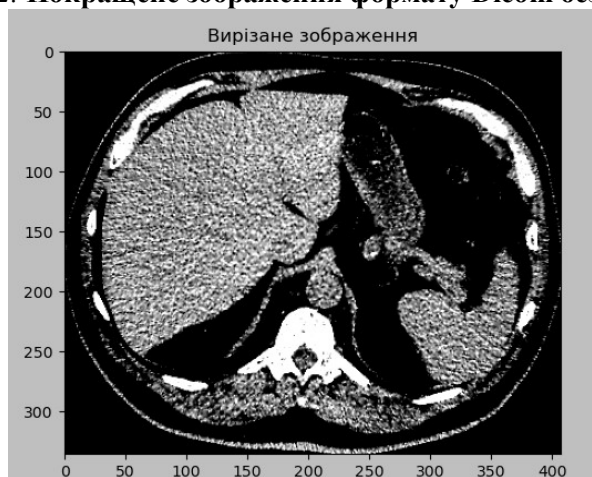


Рис. 13. Вирізане зображення

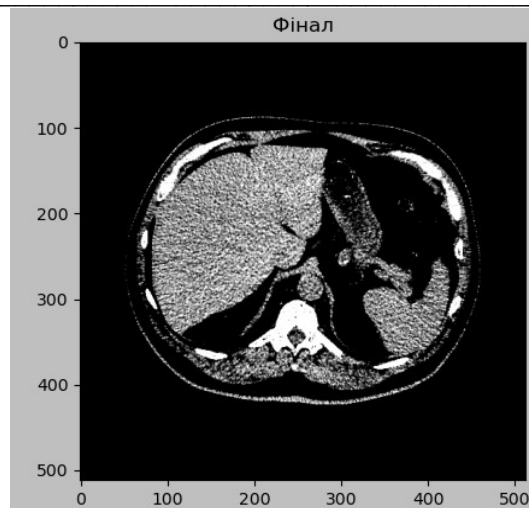


Рис. 14. Покращене зображення формату Dicom

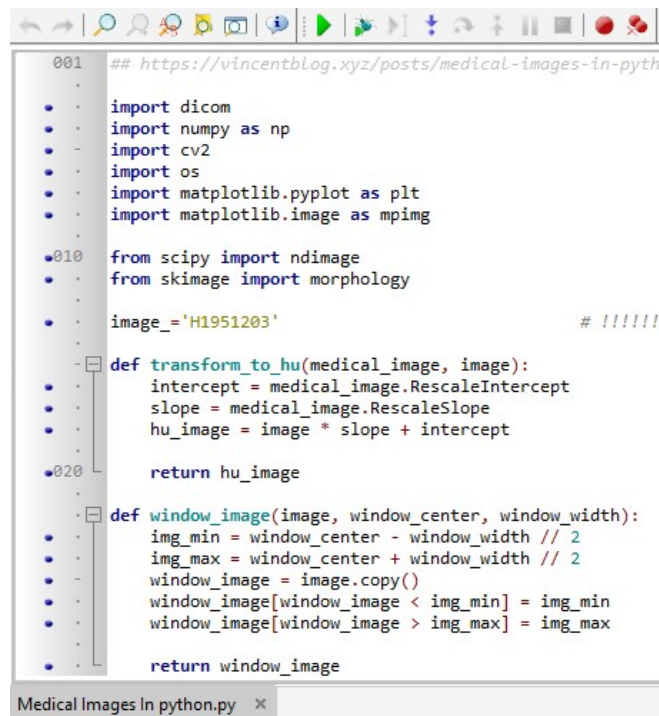


Рис. 15. Фрагмент скрипту

Завантажуємо скановане зображення КТВРЗ ОГК операцією `def load_scan(path)` (рис. 16). Провели перетворення в піксельний масив в одиниці шкали HU операцією `def fet_pixels_hu`. Візьмемо випадковий фрагмент для проведення сегментації. Результат наведений на рис. 17.

```

def load_scan(path):
    print(path)
    slices = [dicom.read_file(path + s) for s in os.listdir(path)]
    slices.sort(key = lambda x: int(x.InstanceNumber))

```

Рис. 16. Скрипт завантаження та сортування

Для використання контрольованої маркерами сегментації вододілу нам потрібно буде ідентифікувати маркери: зовнішній, внутрішній та накладанням їх обох. Для початку створюємо внутрішній маркер: `marker_internal`. Робимо з ним такі дії: сегментацію - `segmentation.clear_border`, встановлюємо міру мітки - `measure.label`, встановлюючи відповідно зону - `areas`. Створюємо зовнішній маркер – `external`, багатовимірним двійковим розширенням із заданим елементом структурування `ndimage.binary_dilation`. Створюємо маркер вододілу - `marker_watershed`, який

повертає масив `pr.zeros`, додаваючи внутрішній та зовнішній маркер. Отримані маркери для зразка зрізу виводені на рисунку 18.

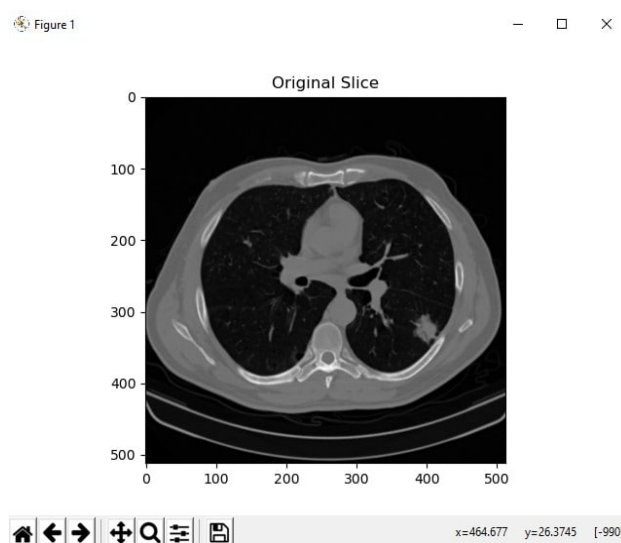


Рис. 17. Оригінальний зріз зображення

Оператор Sobel виконує двовимірне вимірювання просторового градієнта на зображенні і таким чином підкреслює області з високою просторовою частотою, які відповідають краям. Для наступних дій вводимо функцію `def seperate_lungs(image, iterations = 1)`, де буде сегментація легенів за допомогою різних технік. Початковими параметри є скановані зображення, ітерації, а результатом буде сегментовані легені, легеневий фільтр, контур легенів, вододіл легенів та Sobel Gradient. Створимо Sobel Gradient операцією `sobel_filtered` та `sobel_gradient`.

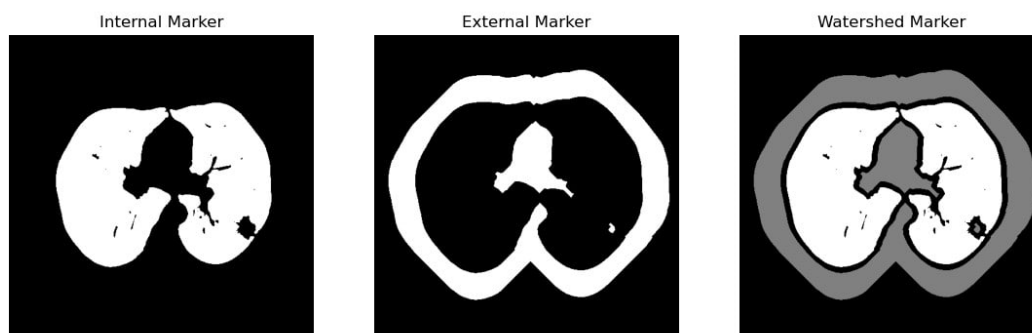


Рис. 18. Створені маркери

Наступним етапом буде використання алгоритму вододілу. Передаємо зображення, згорнене оператором Sobel, та маркер вододілу до `morphology.watershed`. Отримуємо матрицю, позначену за допомогою алгоритму сегментації вододілу. Зменшуємо зображення до контурів після алгоритму Watershed операцією `outline`. Для видалення дрібних та непотрібних деталей на зображення використовуємо операцію `blackhat_struct`. В наших діях дана операція повертає темні плями зображення. Щоб створити легеневий фільтр використовуємо `lungfilter`: внутрішній маркер та контур (рис.19).

```
lungfilter = np.bitwise_or(marker_internal, outline)
lungfilter = ndimage.morphology.binary_closing(lungfilter, structure=np.ones((5,5)), iterations=3)
...
```

Рис. 19. Скрипт фільтру.

Сегментуємо легені за допомогою операції `segmented`, використовуючи фільтр `lungfilter` та зображення.

Результати цифрової обробки зображення методом вододілу зображено на рисунках 20-23, програмний код зображено на рис. 24.



Рис. 20. Створення градієнта Sobel



Рис. 21. Використання методу вододілу

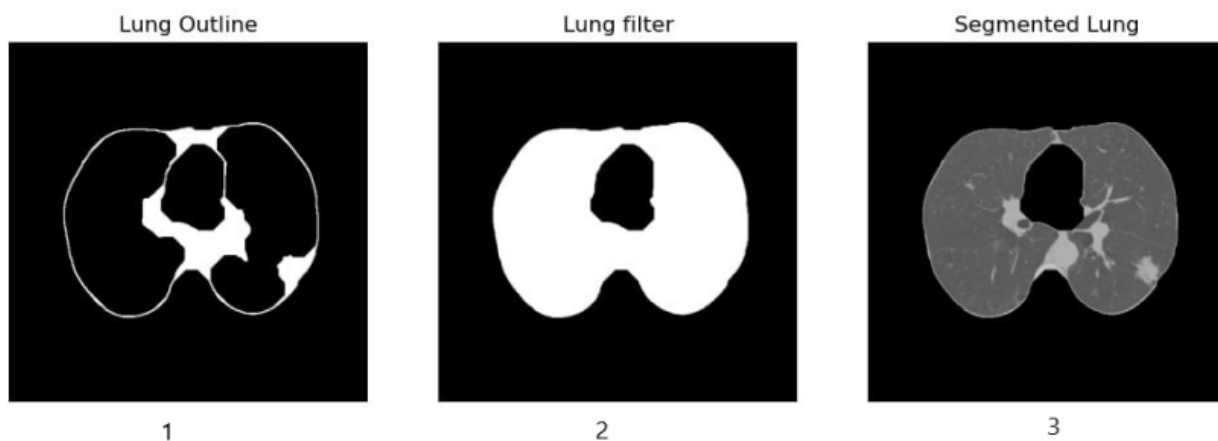


Рис. 22. Обробка зображення:

- 1) зменшення зображення до контурів після алгоритму Watershed;
- 2) створення легеневого фільтру за допомогою внутрішнього маркера та контуру;
- 3) сегментація легенів за допомогою lungfilter.

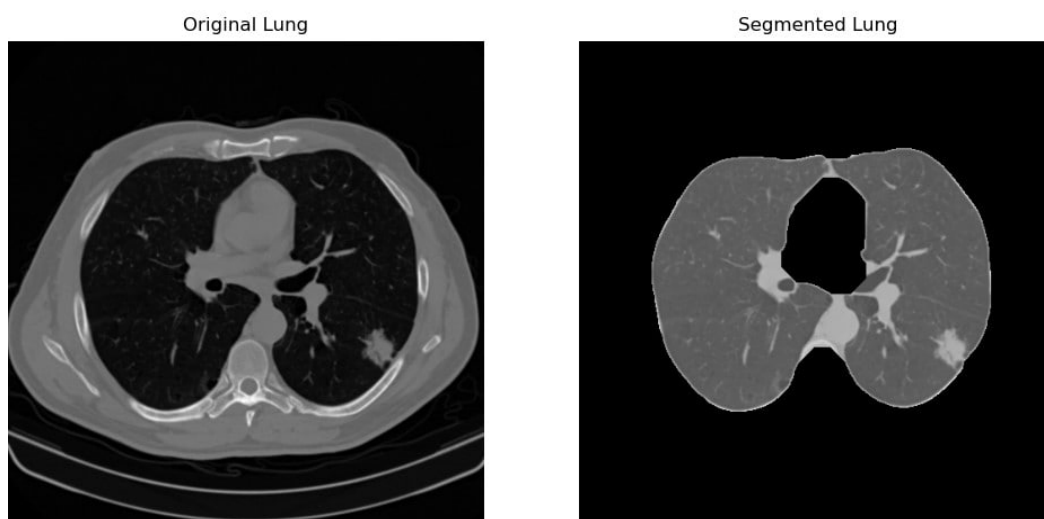


Рис. 23. Порівняння цифрової обробки між первинним зображенням та сегментованим.

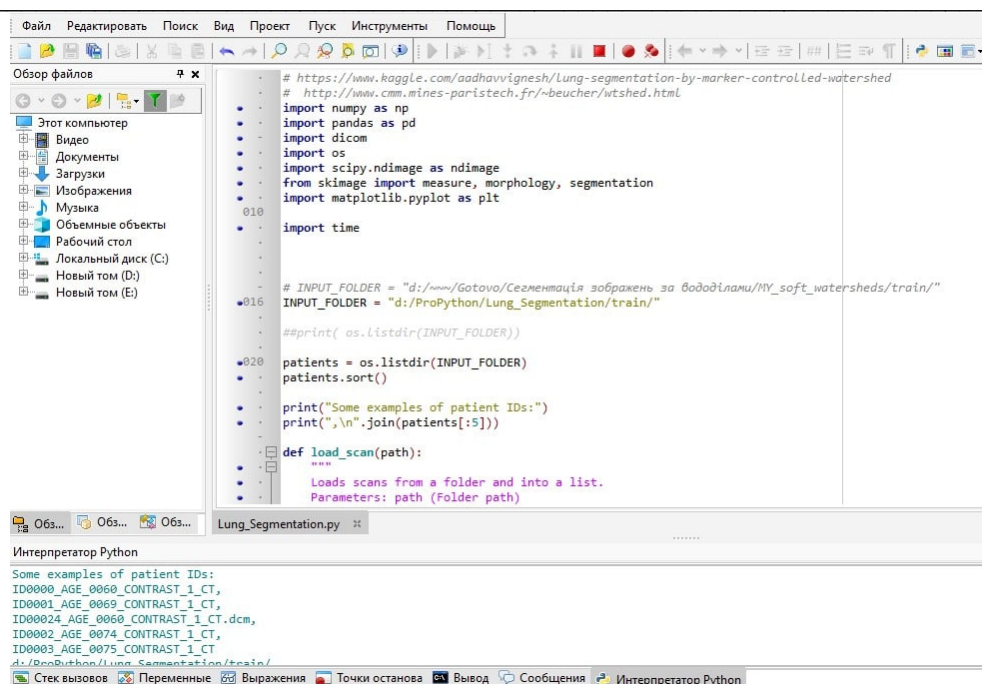


Рис. 24. Фрагмент коду реалізації алгоритму Watershed

Висновок. Розглянуто алгоритми та проведена програмна реалізація роботи з зображеннями отриманими за допомогою КТБПЗ і збереженими у форматі DICOM. Мовою реалізації алгоритмів обрано Python.

В якості тестових зображень використано КТБПЗ ОГК людини.

Предмет подальших досліджень. Проведення досліджень обробки зображень з отриманням цифрових моделей інших структур. Розробка спеціалізованих інструментів сегментації та поліпшення їх функціоналу зі спільним використанням результатів різних видів медичної діагностики.

Література:

1. Василенко В. Х. Пропедевтика внутренних болезней / В. Х. Василенко, А. Л. Гребенева, Н. Д Михайловой. – Москва: Медицина, 1974
2. Стандарт DICOM [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://dicom.nema.org>
3. Технология построения твердотельных моделей бедренных костей на основе данных компьютерной томографии [Електронний ресурс] / В. М.Соловьёв, П. В. Ирмагов, М. С. Ирматова, М. Г. Щербаков – Режим доступу до ресурсу: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologiya-postroeniya-tverdotelnyh-modeley-bedrennyh-kostey-na-osnove-dannyh-kompyuternoy-tomografii/viewer>
4. Mustra Mario, Delac Kresimir, Grgic Mislav. Overview of the DICOM Standard // ELMAR, 2008. 50th International Symposium. Zadar, Croatia. P. 39–44
5. NumPy, часть 1: начало работы [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://pythonworld.ru/numpy/1.html>
6. Ravishankar C. Image Processing and Acquisition using Python / C. Ravishankar, P. Sridevi., 2020. – 451 с.
7. Van derWalt, S., Colbert, S. C. & Varoquaux, G. The NumPy array: a structure for efficient numerical computation. Comput. Sci. Eng. 13, 22–30 (2011).
8. Beucher S. The watershed transformation applied to image segmentation[J]. SCANNING MICROSCOPY-SUPPLEMENT-, 1992: 299-299.
9. Yakovenko O., Khanin O., Lotysh V., CLINICAL FEATURES OF SEVERE COVID-19 WITH LETHAL OUTCOME IN VOLYN REGION RESIDENTS. Ukr. Pulmonol. J. 2021; 2: 16–24. DOI: 10.31215/2306-4927-2021-29-2-16 -24

УДК 678.549

DOI 10.36910/775.24153966.2021.72.11

В.П. Кашицький, В.М. Малець, О.Л. Садова, М.І. Вишинський, Р.П. Голодюк

Луцький національний технічний університет

РОЗРОБКА СКЛАДУ БІОКОМПОЗИТІВ, НАПОВНЕНИХ ДЕРЕВНИМ БОРОШНОМ, З ПІДВИЩЕНОЮ СТІЙКІСТЮ ДО ГОРІННЯ

В статті досліджено вплив антипіренових добавок на основі борної кислоти на стійкість до горіння біокомпозитів наповнених деревним борошном. Оптимізовано склад композицій, яка містить деревне борошно та водний розчин борної кислоти, що дозволило отримати біокомпозити з високою стійкістю до горіння порівняно з необробленими частинками деревного борошна. Доведено позитивний вплив антипіренів на зниження здатності до горіння та димоутворення, що дозволяє підвищити ступінь безпечності під час експлуатації біокомпозитних виробів та значно розширити сфери застосування даних матеріалів.

Ключові слова: антипіренова добавка, розчин борної кислоти, поверхня частинок, адсорбція, апретування, змочування.

В.П. Кашицкий, В.М. Малец, О.Л. Садова, М.И. Вышинский, Р.П. Голодюк

РАЗРАБОТКА СКЛАДА БИОКОМПОЗИТОВ, НАПОЛНЕННЫХ ДРЕВЕСНОЙ МУКОЙ, С ПОВЫШЕННОЙ УСТОЙЧИВОСТЕЙ К ГОРЕНИЮ

В статье исследовано влияние антипириновых добавок на основе борной кислоты на устойчивость к горению биокмпозитов, наполненных древесной мукой. Оптимизирован состав композиции, содержащей древесную муку и водный раствор борной кислоты, что позволило получить композиции с высокой стойкостью к горению по сравнению с необработанными частицами древесной муки. Доказано положительное влияние антипиренов на снижение способности к горению и дымообразованию, что позволяет повысить степень безопасности при эксплуатации биокмпозитных изделий и значительно расширить сферы применения данных материалов.

Ключевые слова: антипириновая добавка, раствор борной кислоты, поверхность частиц, адсорбция, апретирование, смачивание.

V. Kashytskyi, V. Malets, O. Sadova, M. Vyshenskyi, R. Holodiuk

DEVELOPMENT OF THE COMPOSITION OF BIOCOMPOSITES FILLED WITH WOOD FLOUR WITH INCREASED RESISTANCE TO COMBUSTION

The article investigates the effect of flame retardant additives based on boric acid on the resistance to combustion of biocomposites filled with wood flour. The composition of the composite containing wood flour and aqueous boric acid solution was optimized. This allowed to obtain composites with high resistance to combustion compared to unprocessed particles of wood flour. It is shown that flame retardants reduce the ability of biocomposites to combustion and smoke generation, which allows to increase safety during operation of biocomposite products and significantly expand the scope of these materials.

Keywords: flame retardant additive, boric acid solution, surface of particle, adsorption, finishing, wetting.

Постановка проблеми. Матеріали на основі продуктів деревини ефективно використовують для виготовлення конструкційно-оздоблювальних елементів у будівництві (внутрішні обшивки стін і перегородки громадських будівель), в меблевому виробництві (офісні і спеціальні меблі), на транспорті (судно- і вагонобудуванні) [1]. Для виготовлення елементів декору та напівфабрикатів широко використовують низькоякісну сировину, відходи лісозаготівель, лісопиляння і деревообробки. В результаті застосування відходів забезпечується істотна економія цільної деревини та безвідходність виробництва [2].

Крім загальних властивостей даним матеріалам можуть надаватися додаткові спеціальні властивості, зокрема, стійкість до горіння [3]. Стандартні листові деревостружкові плити, що мають високу питому поверхню, характеризуються підвищеною пожежонебезпекою. Тому дані матеріали мають ряд обмежень для масового застосування у класичних сферах [4]. Насамперед це стосується багатоповерхових будівель, театрів і концертних залів, залізничних поїздів, морських і повітряних суден, де створюються умови для швидкого поширення пожежі, а тому їх використання є особливо небезпечним [5].

Причиною переважної більшості пожеж є загоряння дерев'яних і целюлозних матеріалів, що відбувається під дією малопотужних джерел запалювання. У зв'язку з цим

виникає необхідність розробки вогнестійких деревних матеріалів, які не здатні до самостійного горіння та тління, використання яких виключить можливість поширення полум'я і тим самим зменшить ймовірність розвитку пожежі. Зниження здатності до горіння дозволить істотно розширити область їх застосування [6].

Найбільш ефективним способом зниження здатності до горіння пожежонебезпечних матеріалів є їх вогнезахист в процесі виготовлення, що передбачає насичення водним розчином антипірену деревних частинок або волокон з наступним сушінням до необхідної вологості [7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Виробники біокомпозитів інтенсивно розробляють нові екологічно безпечні підходи в напрямку зниження здатності до горіння матеріалів. В роботі [5] акцентовано увагу на використанні фосфоровмісних антипіренів, які відносять до потенційно небезпечних для навколишнього середовища і життєздатності людини.

Екологічно безпечними є на сьогоднішній день деякі неорганічні гідроксиди. Так, гідроксиди магнію і алюмінію застосовують в якості антипіренів для біокомпозитів. Але безгалогенові добавки мають деякі недоліки, такі як незадовільні фізико-механічні властивості, низьку теплостійкість і проблеми в технологічному процесі, що виникають під час формування виробів в розплавленому стані [6].

В роботі [7] визначено, що широко використовують як екологічно безпечні антипірени полімерні нанокомпозити на основі шаруватих силікатів і вуглецевих нанотрубок, легкоплавке скло, інтумісцентні системи і еко-антипірени на основі відновної природної сировини (лігніну) і природних полісахаридів (крохмалю).

Авторами публікації [8, 9] встановлено, що серед безлічі розроблених засобів вогнезахисту найбільш ефективними є речовини на основі окисних крохмальних реагентів. Механізм вогнезахисної дії таких покриттів пов'язаний з утворенням на обробленій поверхні під час високотемпературного нагрівання або у випадку безпосередньої дії полум'я спіненого коксового шару. Даний шар проявляє теплозахисний і бар'єрний ефект у випадку перенесення горючих матеріалів в зону полум'я та кисню до поверхні матеріалу.

Механізм вогнезахисту окислених крохмальних реагентів з утворенням на поверхні деревини коксового шару з високою теплоізоляційною здатністю пов'язаний зі зміною термохімічних властивостей матеріалу. Водні розчини окисленого лігніну також проявляють себе в якості ефективних антипіренів для деревини і целюлозно-паперових виробів [10]. Дані антипірени є екологічно безпечними, не утворюють токсичних продуктів, належать до відновлюваної сировини і представляють собою новий клас екоматеріалів [11].

Постановка завдань. Метою даної роботи є дослідження впливу антипіренової добавки на основі борної кислоти на стійкість до горіння біокомпозитного матеріалу, наповненого деревним борошном. Для досягнення даної мети необхідно провести аналіз впливу антипірену у вигляді водного розчину або спиртового розчину борної кислоти на здатність до займання, а також визначити оптимальне співвідношення компонентів.

Викладення основного матеріалу. Випробування на стійкість до горіння визначали за ГОСТ 30244-94. В процесі випробування проводили реєстрацію температури в печі, в центрі і на поверхні зразка. У випадку досягненні температурного балансу випробування припиняли і фіксували його тривалість. Тримач зі зразком витягували з печі та визначали втрату маси для кожного зразка.

В якості наповнювача для розробленого біокомпозиту використано деревне борошно, отримане шляхом подрібнення на млинах з відходів обробки деревини (тирса, стружка, тріска) з розміром частинок 40-50 мкм. Деревне борошно займається на повітрі при температурах вище 200 °С. Як антипіренову добавку використано водний та 3%-й спиртовий розчин борної кислоти [10], молекули якої після видалення рідини адсорбувалися поверхнею частинок деревного борошна, утворюючи апретуючий шар.

Формування досліджуваних зразків полягало в отриманні однорідної композиції, до складу якої входили антипіренова добавка та деревне борошно. Залежно від об'єму зразків підбирали кількісний склад компонентів, вміст яких представлено в таблиці 1.

Експериментально встановлено, що горіння охоплює всю поверхню матеріалу, в результаті чого на зразку складу № 1 присутній чорний карбонізований шар (рис. 1, а, б). В процесі експерименту відбувалось значне димоутворення та зафіксовано появу полум'я.

Встановлено, що для складу зразків № 4 візуально помітно присутність антипіренової добавки на поверхні деревного борошна (рис. 1, в, г).

Табл. 1.

Склад композицій біокомпозитних матеріалів

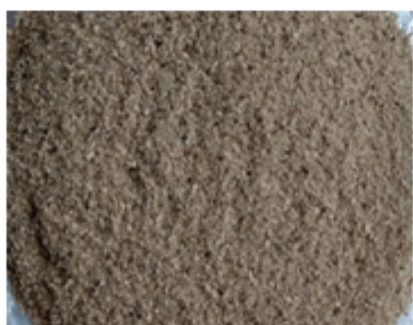
№ зразка	Деревне борошно, г	Борна кислота (порошок), г	Дистильована вода, мл	Борна кислота (спиртовий розчин), мл
1	8	—	—	—
2	8	5	40	—
3	2	—	—	20
4	2	—	—	6
5	1	3	5	—
6	1	5	5	—
7	1	7	5	—
8	1	10	5	—



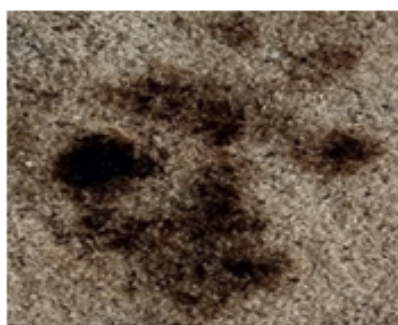
а



б



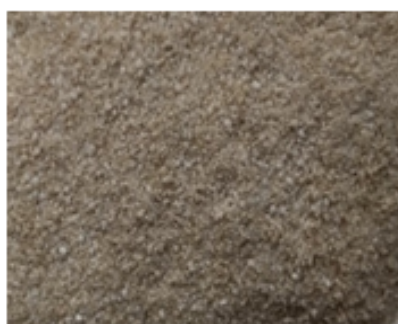
в



г



д



е

Рис. 1. Загальний вигляд поверхні біокомпозитних зразків після визначення стійкості до горіння: а – склад № 1 до випробування; б – склад № 1 після випробування; в – склад № 4 до випробування; г – склад № 4 після випробування; д – склад № 8 до випробування; е – склад № 8 після випробування

Слід відмітити, що антипіренова добавка розподілена нерівномірно. Зафіксовано, що полум'я охопило поверхню композиції, в якій адсорбовано незначна кількість антипіренової добавки. На поверхні композиції присутні ділянки, що містять чорний карбонізований шар. В процесі проведення експерименту зафіксовано незначне димоутворення та поява полум'я, що супроводжувалось підвищеним потріскуванням через наявність апрету.

Також зафіксовано, що займання та процес горіння відбувались нерівномірно по поверхні біокомпозитного матеріалу. Це пояснюється присутністю антипіренової добавки на поверхні частинок деревного борошна та нерівномірним розподілом щільності композиції. Очевидно, що наявність антипіренової добавки каталізує процеси коксоутворення та формує захисний шар на поверхні біокомпозитного матеріалу.

Для композиції складу № 8 візуально зафіксовано наявність антипіренової добавки, що розподілена рівномірно на поверхні частинок деревного борошна (рис.1 д, е). Це вказує про високий ступінь гомогенізації та насичення поверхні, що досягається шляхом механічного вимішування компонентів при формуванні матеріалу та оптимальним складом композиції.

На поверхні зразка складу № 8 після випробування відсутній чорний карбонізований шар. В процесі проведення експерименту відсутнє димоутворення, що вказує на високу стійкість до горіння біокомпозиту даного складу. Це пояснюється наявністю на поверхні частинок деревного борошна рівномірно розподілених дрібнодисперсних кристалів борної кислоти, які за умови підвищеної температури (100° С) розкладаються з утворенням борного ангідриду та води. Борний ангідрид є хімічно стійкою сполукою, яка не приймає участь у окисно-відновних реакціях. Це забезпечує інертність отриманої сполуки до окисних екзотермічних реакцій, що дозволяє підвищити стійкість про горіння органічних матеріалів.

В результаті експериментальних досліджень (рис. 2) встановлено, що мінімальну стійкість до горіння має деревне борошно, яке необроблене антипіреновою добавкою, оскільки ступінь втрати по масі становить 13,25%, що пояснюється відсутністю захисного шару на поверхні біокомпозитного матеріалу.

Під час апретування деревного борошна борною кислотою у вигляді спиртового розчину при співвідношенні 1:10 (зразок № 3) ступінь пошкодження по масі становить 5,1%. Зафіксовано, що введення апрету у даному співвідношенні відносно необробленого деревного борошна підвищує стійкість до горіння на 25%.

Для зразка складу № 4, який апретований борною кислотою (спиртовий розчин) у співвідношенні 1:3 ступінь пошкодження по масі становить 4,27%. Встановлено, що апретування спиртовим розчином у такому співвідношенні відносно необробленого деревного борошна підвищує стійкість до горіння на 31%. Ефективність використання спиртового розчину борної кислоти для обробки деревного борошна у співвідношенні 1:3 є вищою порівняно зі зразком складу № 3, оскільки стійкість до горіння підвищується на 11%. Це пов'язано з меншим вмістом спирту, який залишається адсорбованим в порах частинок деревного борошна і має високу схильність до горіння.

В результаті апретування деревного борошна борною кислотою (водний розчин порошку) при співвідношенні 1:1,6 (зразок № 2) ступінь пошкодження по масі становить 2,1%. Експериментально встановлено, що антипіренова добавка у такому співвідношенні порівняно з необробленим деревним борошном підвищує стійкість до горіння біокомпозиту на 63%. Стійкість до горіння такого зразка порівняно із зразком складу № 4, який апретований спиртовим розчином, збільшується на 23%, оскільки вода видаляється з поверхні частинок деревного борошна і на поверхні залишаються дрібнодисперсні кристали борної кислоти.

Для зразка складу № 5, який апретований водним розчином борної кислоти у співвідношенні 1:3, ступінь пошкодження по масі становить 1,63%. Експериментально встановлено, що апретування в такому співвідношенні підвищує стійкість до горіння на 81% порівняно з необробленим деревним борошном. Обробка антипіреновою добавкою зразка складу № 5 у такому співвідношенні порівняно зі зразком складу № 2, який апретований розчином борної кислоти у співвідношенні 1:1,6, підвищує стійкість до горіння на 12%, оскільки композиція містить менше води. Надлишкова кількість води знижує рівень концентрованості розчину, який не забезпечує ефективного насичення поверхні частинок деревного борошна через повільне видалення молекул води, що знижує стійкість композиції до горіння.

Ступінь пошкодження по масі для зразка складу № 6, який апретований водним розчином у співвідношенні деревного борошна до порошку борної кислоти 1:2,5 становить 1,33%. Апретування у такому співвідношенні порівняно зі зразком складу № 5, який апретований у співвідношенні 1:2,5 підвищує стійкість до горіння на 15%, оскільки застосовано водний розчин з вищим вмістом борної кислоти.

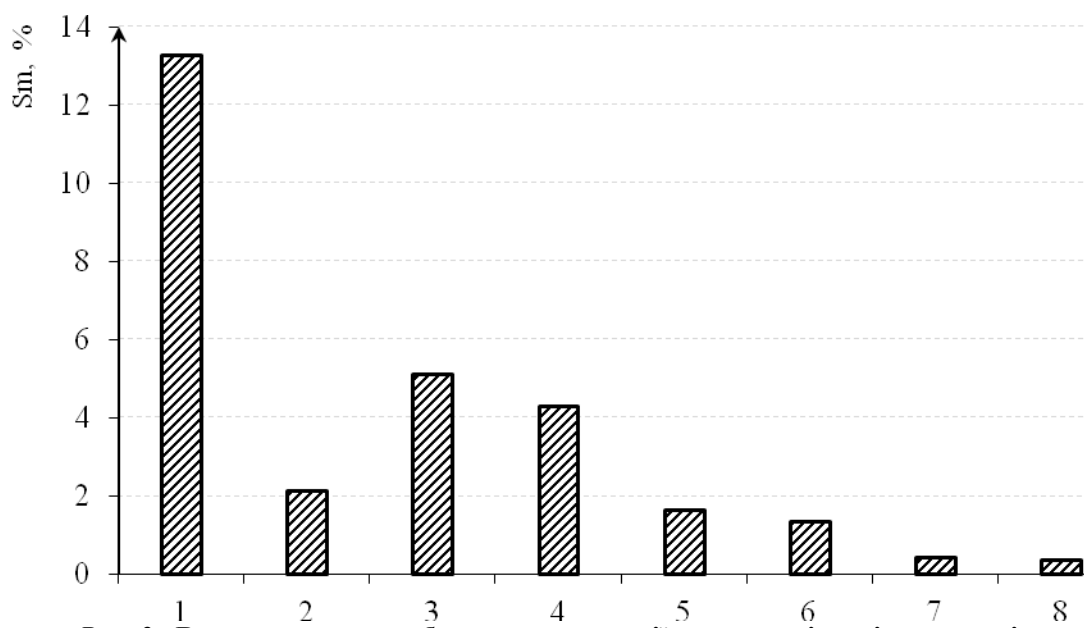


Рис. 2. Втрата маси розроблених композицій залежно від вмісту антипіренової добавки

Найвищу стійкість до горіння мають композиції складу № 7 і № 8. Для зразка складу № 7 (співвідношення деревного борошна до порошку борної кислоти – 1:7) ступінь пошкодження по масі становить 0,42%. Експериментально встановлено, що апретування деревного борошна у такому співвідношенні порівняно з необробленою композицією підвищує стійкість до горіння у 30 разів. Для зразка складу № 8 (співвідношення деревного борошна до порошку борної кислоти – 1:10) ступінь пошкодження по масі становить 0,33%, при цьому стійкість до горіння композиції порівняно з необробленим деревним борошном збільшується у 40 разів. Це пояснюється високою концентрацією антипіренової добавки, яка забезпечує формування захисного шару на поверхні біокompatитного матеріалу. Такий шар створює захисний дифузійний бар'єр, який знижує проникність окиснювачів всередину композиції і підвищує стійкість до горіння біокompatитів.

Висновки. Експериментально встановлено, що найвищу стійкість до горіння мають зразки складів № 7 та № 8 зі співвідношенням вмісту компонентів 1:7 та 1:10 (вміст деревного борошна до вмісту водного розчину борної кислоти) зі ступенем пошкодження по масі 0,42% та 0,33% відповідно. Апретування деревного борошна у такому співвідношенні порівняно з необробленим деревним борошном підвищує стійкість до горіння біокompatитів у 30-40 разів. Застосування водних розчинів борної кислоти забезпечує високу здатність апрету до змочування поверхні частинок деревного борошна, що призводить до інтенсивного насичення поверхні адсорбентом порівняно з використанням спиртових розчинів. Антипіренові добавки діють головним чином завдяки активного впливу на хімічні процеси, які проходять по радикально-ланцюговому механізму в газовій фазі під час горіння. Активні радикали, які появляються в результаті процесу горіння знижують свою активність через наявність радикалів борної кислоти, які утворюються під час термолізу антипіренової добавки і виводяться із зони горіння. Механізм сповільнення процесу горіння підсилений утворенням на межі розподілу фаз стійкого коксового шару, який проявляє теплозахисний і бар'єрний ефект.

Список використаної літератури

1. Sinclair, R.G., 1996. The case for polylactic acid as a commodity packaging plastic. J. Macromol. Sci., Part A 33: 585-597.
2. Middleton, J.C., Tipton, A.J., 2000. Synthetic biodegradable polymers as orthopedic devices. Biomaterials 21: 2235-2246
3. Auras, R., Harte, B., Selke, S., 2004. An overview of polylactides as packaging materials. Macromol. Biosci. 4: 835-864.
4. Drumright, R.E., Gruber, P.R., Henton, D.E., 2000. Polylactic acid technology. Adv. Mat. 12: 1841-1846.

5. Horbens, M., 2008. Orientierende Untersuchungen zum Einsatz von Holzfasern in Holz-Polymer-Verbunden. Diploma thesis, Technical University Dresden and Fraunhofer Institute for Applied Polymer Research, Potsdam, Germany.
6. Huda, M.S., Mohanty, A.K., Drzal, L.T., Schut, E., Misra, M., 2005. "Green" composites from recycled cellulose and poly(lactic acid): Physico-mechanical and morphological properties evaluation. *J. Mat. Sci.* 40: 4221-4229.
7. Mathew, A.P., Oksman, K., Sain, M., 2006. Mechanical properties of biodegradable composites from poly lactic acid (PLA) and microcrystalline cellulose (MCC). *J. Appl. Polym. Sci.* 97: 2014-2025.
8. Oksman, K., Mathew, A.P., Bodeson, D., Kvien, I., 2006. Manufacturing process of cellulose whiskers/polylactic acid nanocomposites *Comp. Sci. Technol.* 66: 2776-2784.
9. Firdous Habib and Madhu Bajpai. UV Curable Heat Resistant Epoxy Acrylate Coatings // *Chemistry and Chemical Technology*. – 2010. т- Vol.4, № 3. – P.205-216.
10. Petersson, L., Kvien, I., Oksman, K., 2007. Structure and thermal properties of poly(lactic acid)/cellulose whiskers nanocomposite materials. *Comp. Sci. Technol.* 67: 2535-2544.
11. Melnychuk M., Malets V., Sosnowski M., Mykhaylyuk I., Boyarska I. (2021) Preparation and Characterization of a Biocomposite Based on Casein and Cellulose. In: Ivanov V., Trojanowska J., Pavlenko I., Zajac J., Peraković D. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. DSMIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham.

УДК: 621.97.01

DOI 10.36910/775.24153966.2021.72.12

Д.А. Гусачук, О.Д. Клименко, І.О. Парфентьева, М.В. Дмитріюк, Н.Ю. Імбірович,
Ю.П. Фещук, М.М. Карпюк

Луцький національний технічний університет

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ГАРЯЧОГО ШТАМПУВАННЯ ПОКОВКИ ВУШКА ГІДРОЦИЛІНДРУ В ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ QFORM

В роботі виконані дослідження та оптимізація процесу гарячого штампування поковок для виготовлення проушини гідроциліндру у програмному комплексі QForm. Основними критеріями оптимізації були мінімальна кількість формуютьовуючих переходів, якісне заповнення робочих порожнин штампу, мінімізація витрат матеріалу та енергії формоутворення, з метою можливої реалізації технології на малопотужному штампувальному молоті в одному суцільному штампі. В результаті симуляції формоутворення оптимізована кількість та конструкція профілюючих переходів, і відповідних їм рівчаків молотового штампу, розроблена конструкція штампу.

Ключові слова: гаряче штампування, багатоперехідний процес штампування, поковки, технологічне конструювання, молот, оптимізація, QForm

Д.А. Гусачук, А.Д. Клименко, И.А. Парфентьева, Н.В. Дмитриук, Н.Ю. Имбиревич,
Ю.П. Фещук, Н.Н. Карпюк

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКИ ПОКОВКИ ПРОУШИНЫ ГИДРОЦИЛИНДРА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ QFORM

В работе выполнены исследования и оптимизация процесса горячей штамповки поковок для изготовления проушины гидроцилиндра в программном комплексе QForm. Основными критериями оптимизации были минимальное количество формообразующих переходов, качественное заполнение рабочих полостей штампа, минимизация затрат материала и энергии формообразования, с целью возможной реализации технологии на мало мощном штамповочном молоте в одном штампе. В результате симуляции формообразования оптимизировано количество и конструкцию профилирующих переходов, и соответствующих им ручьев молотового штампа, разработана конструкция штампа.

Ключевые слова: горячая штамповка, многопереходный процесс штамповки, поковки, технологическое конструирование, молот, оптимизация, QForm

D. Husachuk, O. Klymenko, I. Parfentieva, M. Dmytryuk, N. Imbirovych, Yu. Feshchuk, M.
Karpyuk

THE OPTIMIZATION OF THE HOT FORGING PROCESS OF AN EYE-END FOR HYDRAULIC CYLINDER IN THE QFORM SOFTWARE PACKAGE

The research and optimization of the process of hot die forming of forgings for the manufacture of a hydraulic cylinder eyelet in the QForm software package have been carried out, in this work. The main optimization criteria were the minimum number of shaping stages, high-quality filling of the die working cavities, minimization of material consumption and shaping energy, with the aim of the possible implementation of the technology on the low-power drop hammer in one die. As a result of the simulation of shaping, the number and design of the profiling stages and the coincide die cavities of hammer were optimized, and the design of the die was developed.

Key words: hot die forging, multi-stage forging process, forgings, technology design, drop hammer, optimization, QForm

Постановка проблеми. Багатоперехідні процеси гарячого штампування дозволяють виготовляти велике різноманіття деталей, як за формою та розмірами, так і матеріалами. В цих процесах важливо оптимальним чином спроектувати переходи формоутворення. Якщо раніше налаштування та підготовка штампувальних переходів в основному проводилося на основі практичного досвіду, інтуїції та використання експериментальних штамсів, то сьогодні доцільним є застосування спеціалізованих програмних пакетів, які засновані на методах FE (кінцевих елементів) та FV (кінцевих об'ємів) [1-3]. Використання цих програм дозволяє створювати оптимізацію процесу штампування більш ефективним, надійним та дешевим способом, і в менші терміни.

Важливим етапом формоутворення поковок в гарячештампувальному виробництві є процеси профілювання початкової заготовки з метою її фасонування під профіль чистового рівчака штампу. Успішне профілювання дозволяє покращити умови пластичної деформації в чистових рівчаках, досягнути кращої якості отримуваних поковок, зменшити витрати металу, підвищити стійкість робочої поверхні кінцевих рівчаків, з рештою підвищити ресурсозбереження та конкурентну привабливість технологій гарячого штампування. Проте, профільна підготовка

заготовок, як правило, є трудомісткою, вимагає виконання окремих переходів, часто і операцій технологічного процесу виготовлення поковки, окремого обладнання та інструменту, що ускладнює виробництво та збільшує капіталовкладення, які можна виправдати лише великою кількістю поковок. За умов сучасної індивідуальності промислових замовлень та контрактів, характеру їх різноформатності при малих об'ємах випуску виробів, гарячештампувальне виробництво складних фасонних поковок, отримання яких вимагає декількох профілюючих переходів, є невигідним. Собівартість таких поковок може складати до 95 % (іноді вище) від їх ціни, що робить спеціалізовані процеси штампування невиправдано дорогими та не конкурентними серед інших технологічних способів заготівельного виробництва.

Часто виробничі об'єднання та підприємства, стикаючись з такою ситуацією, відмовляються від впровадження процесів штампування, спираючись на значні витрати, пов'язані з проектною підготовкою, розробкою спеціалізованого інструменту, його випробуванням, налагодженням та виготовленням. З іншого боку, саме структурна проробка металу під час пластичної деформації дозволяє отримувати якісні заготовки із значним ресурсом характеристик міцності, довготривалої стійкості під час експлуатації в умовах динамічних навантажень. Поєднання цих двох аспектів є актуальним завданням штампувальних виробництв та визначає їх конкурентні можливості перед багатьма іншими технологічними процесами формоутворення якісних виробів. Ефективним рішенням такого завдання може бути використання методів симуляції процесів пластичного формоутворення в спеціалізованому програмному середовищі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В сучасних умовах господарювання машинобудівних підприємств, об'єм комерційного замовлення, здебільшого, є малим та недостатнім для запровадження процесів вироблення штампованих заготовок, з використанням спеціалізованих пресів, інструмент яких є дорогим [4-6]. Тому, такі процеси можна розглядати на предмет можливості їх реалізації з використанням більш простого інструменту та обладнання, зокрема, повітряних, пароповітряних штампувальних молотів, налагодження, модернізація та експлуатація яких є більш дешевими [7]. Ще більшої економії в статті витрат у собівартості поковок можна досягнути зменшуючи кількість переходів штампувальних операцій, які вимагають використання окремого інструменту та обладнання [8, 9]. Водночас, слід уникати процесів кування, оскільки, вони, як правило, є надто трудомісткі, та вимагають використання кваліфікованих працівників. Осадка, як основна підготовча операція, також може бути використана як профілююча [10-12], з її різновидами аж до вертикальної висадки. Проте, використання різноманітного підкладного інструменту збільшує трудомісткість, виробничі витрати та є невигідним для технологічних процесів штампування. Добре відомі процеси молотового штампування з реалізацією осадки в одному штампі [13], на окремій площадці для осаджування, можна використати для проектування та дослідження варіанту реалізації місцевої осадки із защемленням кінця заготовки з метою одночасної реалізації профілювання початкової заготовки. Це зменшить витрати на окремі процеси профілювання. Гарних результатів профілювання перед штампуванням фасонних поковок досягають використанням процесів вальцювання [13, 14], проте це також вимагає впровадження окремих операцій технологічного процесу, розробки спеціалізованого інструменту та використання окремих машин, ковальських вальців, що може бути виправданим для випадків виробництва великих партій поковок. Способи багатоступового чи спареного штампування [10, 13] вимагають збільшення розмірів штампувального інструменту, що для фірми виконавця замовлення було не раціональним, бо вимагало придбання окремого більш потужного обладнання.

Постановка завдання та мета дослідження. Вигідним варіантом реалізації технологічних процесів штампування може бути вироблення обмеженої кількості заготовок для дрібних деталей машинобудування, де можливе використання малопотужних ковальсько-штампувальних машин, зокрема, молотів. Дрібні деталі систем гідроприводів – штоки, вушка та провусини гідроциліндрів і подібні їм конструктивні елементи, часто мають фасонну форму та вимагають перерозподілу металу під час пластичного формування в рівчакових штампах. Актуальним для такого роду технологічних процесів є оптимізація профілювання заготовок без використання додаткового інструменту та обладнання, щоб зберегти конкурентні переваги перед іншими способами виготовлення. Ефективними засобами реалізації цього, на стадії проектування технологічних процесів, є сучасні програмні CAD, CAE, CAM системи моделювання, що засновані на FEM методах та враховують багатоваріантність інженерних завдань, в поєднанні з візуальними

інтерактивними засобами формування структури багатоперехідних процесів формоутворення. В роботі використаний один з найбільш ефективних на ринку багатозадачних цифрових систем аналізу та симуляції процесів обробки металів тиском – програмний комплекс QForm фірми “Micas Simulation Ltd” [15].

Метою роботи було оптимізувати технологію виготовлення поковок вушка силового гідроциліндру в умовах дрібного комерційного замовлення та використання одного ковальського агрегату для формуютьючих операцій гарячого штампування. В процесі моделювання процесу намагалися розмістити всі профілюючі та формуютьючі переходи в одному молотовому штампі. Це значно скоротить витрати на підготовку та організацію виробництва, які займають значну частку за статтями собівартості гарячештапованих заготовок.

Викладення основного матеріалу. Моделювання та FEM симуляція процесів пластичного формоутворення матеріалів дозволяє максимально заощадити матеріальні витрати виробництва, що не завжди досягається розрахунковими та табличними методами проектування технологічних процесів ковальсько-штампувального виробництва. Це пов'язано з значним завищенням розрахункових параметрів, що закладені у традиційних алгоритмах розрахунку та проектування, зокрема гарячештапованих поковок, у відповідності до діючих стандартів. Наявні зараз CAD, CAE системи (QForm-3D та інші) дозволяють удосконалити процес проектування заготовок в заготівельному виробництві, дозволяючи зменшити витрати на одиницю продукції. Крім того, сучасні програми моделювання процесу формоутворення дозволяють оптимізувати пластичне течіння металу, шляхом підбору форми профілюючих заготівельних рівчаків. У роботі, з метою організації проекту розрахунку переходів формоутворення поковки вушка гідроциліндру (рис. 1) були використані цифрові просторові моделі поковок, отримані в програмі Solidworks. За конфігурацією поковку слід віднести до видовжених в плані, які вимагають перерозподілу металу перед остаточним формуванням. Виконуючи побудову розрахункової заготовки встановлено, що для поковки вушка доцільне використати підкатного рівчака, але зі значним надлишком об'єму середньої заготовки. Це не дозволяє кардинально зменшити витрати металу. Тому, в роботі було прийнято рішення використати площадку для плющення кінця заготовки для формування зони кільця вушка, з моделюванням процесу в CAE комплексі QForm 9.0.7 (ключ ліцензії U2636 (id:1639796648)). Розміри початкової заготовки становили 53×165 мм. Передачу геометрії об'єктів в проект програми QForm виконували через просторові моделі з розширенням step. Моделі чистового рівчака розроблялись за моделлю гарячої поковки з облойним заусенцем.

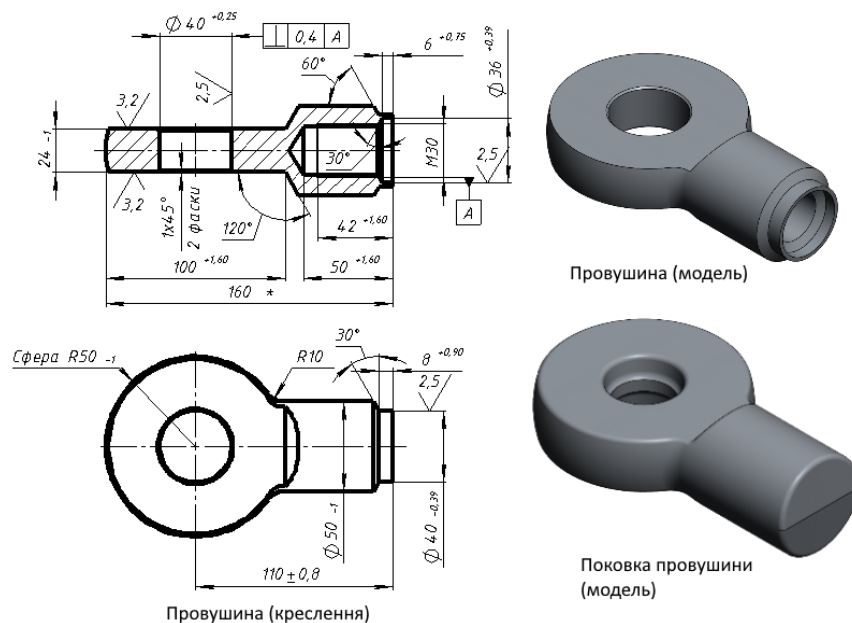


Рис. 1. Вушко гідроциліндру, просторова модель та модель поковки

В процесі моделювання встановлено, що простим плющенням кінця заготовки не вдається сформувати поковку вушка (рис. 2). Це пов'язано з недостатнім перерозподілом металу заготовки та відсутністю його об'єму в зоні вушка. З метою оптимізації формування було запропоновано

© Д.А. Гусачук, О.Д. Клименко, І.О. Парфентьева, М.В. Дмитріюк, Н.Ю. Імбірович, Ю.П. Фецул, М.М. Карпюк

виконати вертикальну висадку, з формуванням потовщення на верхньому кінці заготовки, при фіксації нижнього кінця у конічній порожнині (рис. 3), та, відповідно, набором металу для формування вушка. Як відомо висадка довгих заготовок, з відношенням довжини до діаметру більше 3,0 є нестабільним процесом та для задовільного її виконання вимагає прийняття конструктивних рішень [12]. Зокрема, підвищити повздовжню стійкість заготовки у вертикальному напрямку можна застосовуючи фіксацію її кінців, з повздовжнім підпиранням. Тому, в процесі оптимізації геометрії робочих контурів інструменту, в конструкції верхньої плити, також як і нижньої, було спроектоване конічне заглиблення. Геометрію конусних заглиблень та їх конструктивні розміри оптимізували в процесі симуляції всіх переходів формоутворення поковки: висадки, плющення висадженого кінця, чорнового штампування, чистового штампування. В процесі симуляції процесу висадки розміри заготовки були оптимізовані до значень: 52×175 мм, що перевищує оптимальні умови звичайної осадки циліндричних заготовок в 1,2...1,4 рази. Дослідженнями встановлено, що під час висадки заготовка розширювалась зверху до діаметру з максимальним його значенням 65,9 мм. За рахунок осадки виступаючої частини її довжина зменшувалась до значення 138,5 мм, яке передбачалось збільшити під час плющення набраної частини металу, що вимагало моделювання та оптимізації.

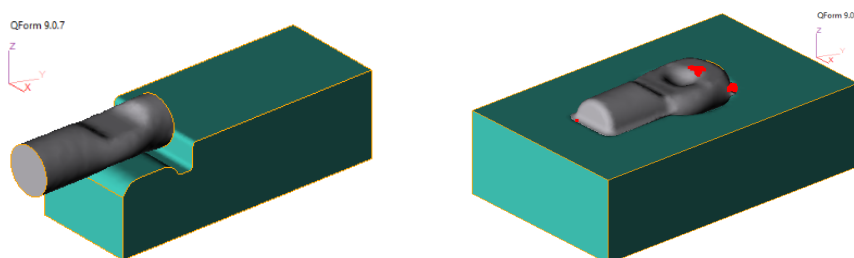


Рис. 3. Моделювання процесу плющення заготовки та штампування в чорновому ривчаку (затиски металу та недоштампування при недостатньому профілюванні)

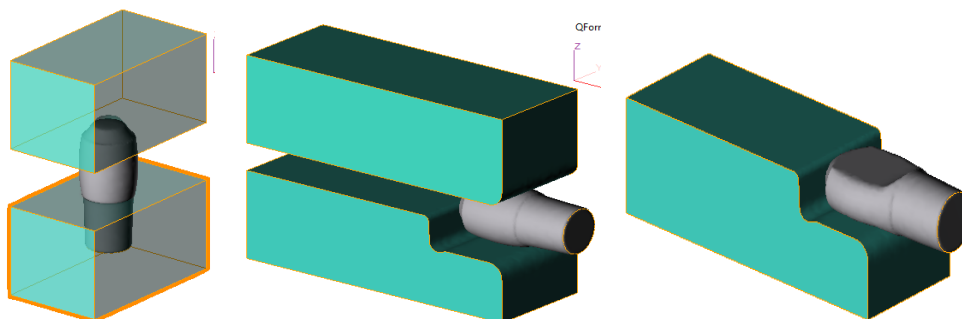


Рис. 3. Моделювання переходів висадки та плющення

Шляхом моделювання та геометрично-розмірної оптимізації заготівельних та штампувальних переходів було досягнуто задовільного виконання формоутворення поковки вушка. Встановлено, що після висадки профіль заготовки є більш оптимальним для виконання плющення потовщеного кінця. В процесі плющення заготовка частково видовжується. Моделюванням отримано оптимальні значення товщину ділянки плющення – 35 мм. При цій товщині довжина заготовки досягає значення 153 мм, яке є близьким (з мінусовим відхиленням) до довжини розрахункової заготовки. Крім того, в процесі моделювання вісь плющення зміщена вниз. Це дозволить полегшити орієнтування заготовки при ударах молоту та досягнути потрібного дозування металу. Заготовка в процесі плющення утримується за вільний кінець кліщами з круглими губками.

В роботі виконували спробу виконання чистового штампування профільованої заготовки, безпосередньо, після плющення. Проте, в процесі підбору параметрів та симуляції в QForm такий спрощений варіант формоутворення не дозволяє отримати остаточно сформовану поковку. Уникнути дефектів в зонах намітки центрального отвору попереку кільця вушка не вдається, також присутні ділянки недоштампування. Облойний заусенець, за такого варіанту штампування,

має значний ступінь нерівномірності по периметру поковки, що робить ймовірним появу недоштампувань за головною віссю поковки у випадку неточного позиціонуванні профільованої заготовки в кінцевому рівчаку.

Для оптимізації кінцевого формування доцільно застосувати чорновий рівчак. Це дозволить покращити умови течіння металу та забезпечить формування якісної намітки отвору вушка та отримати більш рівномірний облойний заусенець, що буде гарантувати потрібну якість чистової поковки, її стабільність та повторюваність в процесі. Просторові моделі інструменту для чорнового штампування будували за моделлю чорнової поковки, профіль якої початково був сконструйований за традиційними вимогами проектування [13] та коректувався в процесі симуляції в QForm. Зокрема, у зоні кільця вушка оптимізувалась геометрія заглиблень та відповідні виступи у верхньому та нижньому інструментах, для початкової намітки отвору.

В результаті моделювання процесу чорнового та чистового штампування профільованої заготовки (рис. 4), яка отримана з початковою висадкою досягнуті оптимальні умови пластичного формування. Модель кінцевої чистової поковки вушка має рівномірний заусенець по контуру та повністю оформлену просторову форму. Можливі затиски металу повністю витиснені в облойний заусенець та відсутні в тілі поковки.

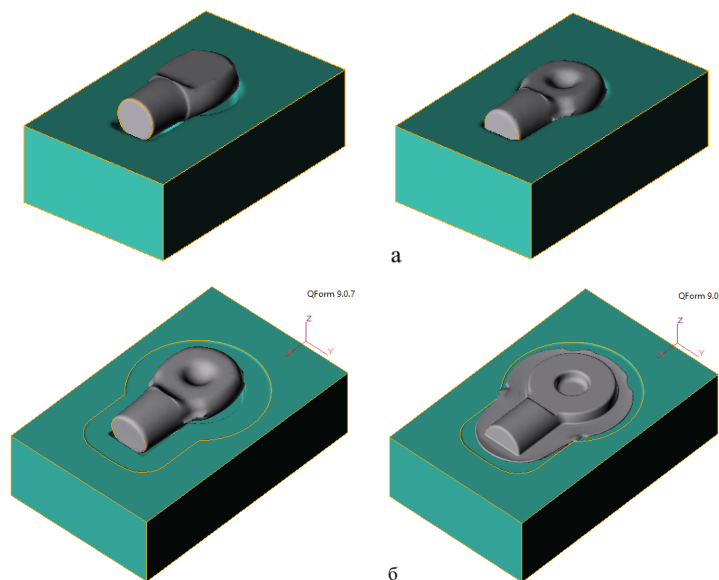


Рис. 4. Моделювання чорнового (а) та чистового (б) штампування оптимізованої заготовки (ліворуч – початок формування, праворуч – кінець)

За результатами FEM аналізу в програмному комплексі QForm робота (енергія) та зусилля приймають найбільшого значення для кінцевого переходу – чистового штампування поковки вушка гідроциліндру (рис. 5).

Як видно максимальні значення зусилля при чистовому формуванні поковки сягають майже 8 МН, а робота пластичної деформації – 17,2 кДж. Ці параметри зростають порівняно плавно, що свідчить про достатню оптимізацію форми профільованої чорнової поковки та стабільність плину металу. Найбільший ріст зусилля та роботи деформування спостерігається в діапазоні відстаней між інструментом, які відповідають інтенсивному виходу металу в облойний місток. Таким чином штампування на молоті поковки вушка доцільно виконати в чотири переходи: висадка, плющення, чорнове та чистове штампування. Всі рівчаки можна виконати в блочних чи суцільних штампах. За енергетичними параметрами процесу, отриманими в процесі симуляції, для здійснення всього циклу формоутворення можна використати пароповітряний, чи іншого типу, молот з енергією удару понад 20 кДж.

Отримані симуляцією процесу кінцевого формоутворення силові параметри штампування добре корелюють зі значеннями, отриманими розрахунковим методом. В роботі визначали необхідну масу падаючих частин молоту згідно аналітичної залежності для некруглих в плані штампу поковок, що враховує: умовний опір матеріалу деформуванню при температурі штампування, приведений діаметр некруглої в плані поковки та її геометричні розміри. Умовний

опір деформуванню сталі 35 при гарячому штампуванні приймали для температури нижньої межі штампування 850 °C (65 МПа).

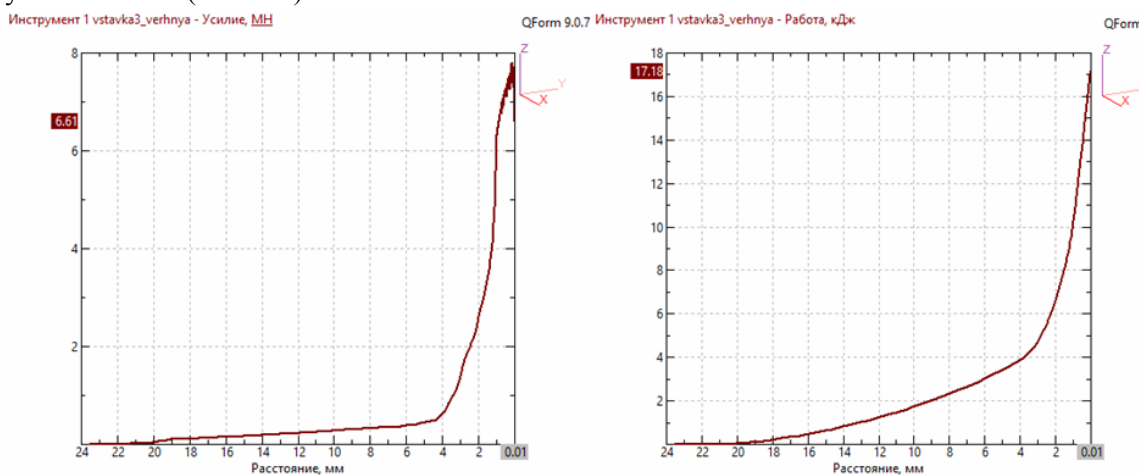


Рис. 5. Зусилля та робота деформування в залежності від відстані між верхнім та нижнім інструментом для чистового штампування

Симуляцією процесу багатоперехідного штампування поковки вушка встановлено, що температура сталі в кінці циклу штампування сягала 900...930 °С, в тілі поковки, та не менше 850 °С в зоні облойного містка. Отримане розрахункове значення маси падаючих частин становило 807 кг, що приблизно на 5 % більше за значення, встановлені комп'ютерною симуляцією процесу. В результаті для процесу молотового штампування поковки вушка, згідно запропонованого процесу формоутворення, можна рекомендувати малопотужний штампувальний молот, зокрема, моделі M2140, із масою падаючих частин 1000 кг.

На основі моделювання та комп'ютерної симуляції процесу в роботі були спроектовані ескізи (рис. 6) та цифрові моделі переходів штампування поковки вуська гідроциліндру. Комбінацією висадки та плющення вдається досягнути оптимального профілювання початкової заготовки, що покращує умови пластичного формування металу в штампувальних рівчаках.

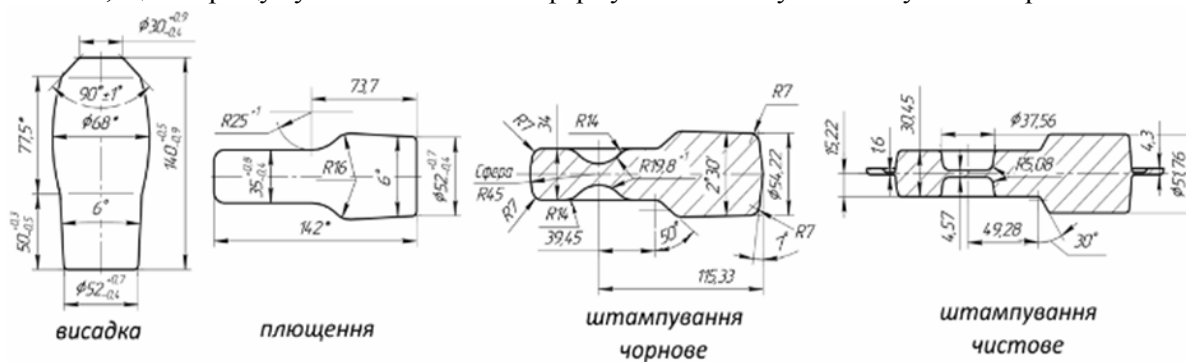


Рис. 6. Переходи гарячого штампування поковки вушка

Моделюючи геометрію конічних заглиблень для першого переходу – висадки, отримано оптимальну їх геометрію. Конусність отвору у нижньому інструменті можна встановити з ухилом на сторону, відповідно, у 7° , що є мінімальним значенням штампувальних уклонів для молотового штампування. При співвідношенні глибини до діаметру заглиблення, приблизно, в одиницю (навіть менше), істотне заклинювання заготовки після висадки мало ймовірне, за умов охолодження защемленого кінця у рівчаку штампа. Видалення та зняття заготовки тут можливе підважуванням її кліщами за розширену середню частину.

За результатами моделювання в QForm, використовуючи отримані цифрові просторові моделі переходів штампування, в роботі виконаний дизайн та розробка конструкції штампу для штампувального молота M2140. При цьому використані модельний інструмент, вставки, конструкція яких оптимізована в програмі. З практики виконання процесів штампування на молотах, модельний інструмент доцільно скомбінувати у послідовності, яка показана на рисунку 7, б. Штампувальні рівчаки, відповідно, розміщені у центральній зоні дзеркала штампу, їх

позиціювання визначали за мінімально допустимим значенням стінки між рівчачками у відповідності до їх глибини. Заготівельні профілюючі рівчачки доцільно розмістити по краях дзеркала штампу. З лівої сторони доцільно розмістити рівчак для висадки, з правої – площадку для плющення.

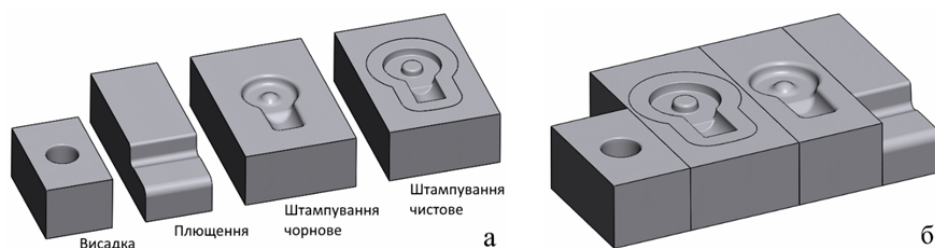


Рис. 7. Комбінування модельних вставок в молотовому штампі

На основі прийнятих конструкторських рішень та розрахунків щодо вибору положень рівчаків, було розроблено просторову конструкцію штампу для молота М2140, який складається з суцільних верхнього та нижнього штампів (рис. 8). З фронтальної сторони штампів передбачені западини під кліщі для маніпулювання та видалення поковок зі штампу, конструкція яких є стандартною, так само як і опорних хвостових частин. З задньої сторони штампів виконані кутові замки для попередження зсуву штампів в площині роз'єму. Згідно розробленої конструкції площа дзеркала штампу становить 780 см^2 , що не менше норми на одну тону падаючих частин молота.

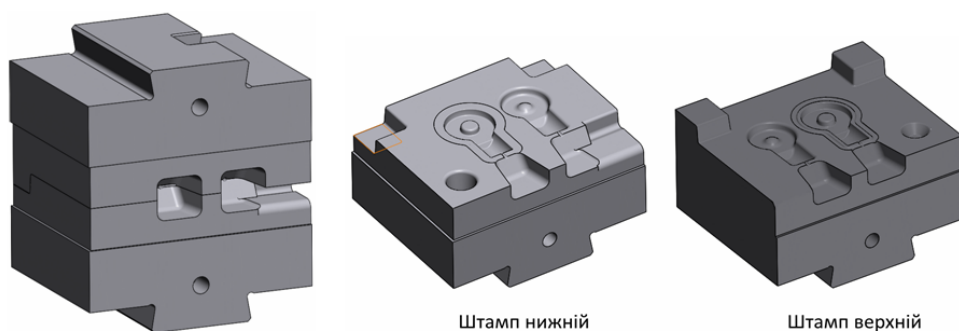


Рис. 8. 3D-модель молотового штампу для штампування поковки вушка гідроциліндру

Площадка плющення, яка розміщена з правої сторони штампу, опущена вниз так, щоб її робочий простір повністю розміщувався в нижньому напівштампі. Робоча поверхня верхнього штампу в цій зоні має звичайну плоску поверхню в рівень дзеркала штампу, з виконанням скруглення на фронтальному куті. Таке розміщення дозволяє утворити задній упор у вигляді стінки в нижньому штампі, що дозволить легко позиціювати заготовку після висадки та, відповідно спростить процес виконання штампування. Висадку варто виконувати легкими ударами молоту за два, три удари, з поворотом заготовки навколо осі для мінімізації ймовірності втрати стійкості заготовки та її повздовжнього згину.

Виготовлення такого штампу буде займати значну частку витрат на організацію виробничого процесу. Проти ці витрати будуть меншими у випадку розділення процесу формування на окремі операції, із застосуванням окремого інструменту та обладнання. Для зменшення вартості штампу можна рекомендувати його виготовлення зі сталі 5ХГМ, яка є більш дешевою за хромонікелеві сталі та придатною до використання на малопотужних молотах з масою падаючих частин до трьох тон.

Висновки. В роботі виконано оптимізацію технології виготовлення поковок вушка силового гідроциліндру в умовах дрібного комерційного замовлення з використанням технології гарячого пластичного формування, яка забезпечує високу якість структури сталі. FEM симуляцією процесу у програмному комплексі QForm обґрунтовано мінімізацію переходів штампування. Встановлено, що комбінацією переходів висадки та плющення вдається досягнути оптимального профілювання початкової заготовки, виконати потрібний набір металу в зоні кільця вушка гідроциліндру, та, відповідно, покращити умови пластичного формування металу в штампувальних рівчачках, зі зменшенням об'єму штампувальних відходів. В процесі моделювання всі профілюючі та

формоутворюючі переходи розміщено в одному молотовому штампі, що зменшує витрати на виготовлення інструменту, які займають значну частку за статтями собівартості гарячештапованих заготовок для потреб машинобудування.

Список використаних джерел:

1. Jong, de, J. E. (1983). Numerical analysis of metalforming processes: applications and experimental verification. Technische Hogeschool Eindhoven. <https://doi.org/10.6100/IR107405>.
2. Niu J. T., Li H. T., Meng X. D. and Karjaleinen P.: Numerical simulation methods and their application in material hot-working, Acta Metallurgica Sinica, Vol. 13, No2, 2000, pp 494-501.
3. Behrens B. A., Schäfer F., Hundertmark A., Bouguecha A.: Numerical Analysis of Tool Failure in Hot Forging Processes, 17th International Scientific And Technical Conference "Design and Technology of Drawpieces And Die Stampings" Poznań-Wąsowo, 22-24 September 2008, pp 163 – 175.
4. Сучасні технології точного об'ємного штампування / Євстратов В. О. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – №46(952). – С. 33-40
5. Бурко В.А. Основные способы получения профилированных заготовок в ресурсосберегающих технологиях объемной штамповки / А.В. Бурко // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту: зб. наук. праць / ПДТУ. – Маріуполь, 2012. – Вип.24. – С. 75-83.
6. Володин И.М. Система основных принципов проектирования процессов горячей объемной штамповки и созданные на её основе технологии / И.М. Володин, А.А. Ромашев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2008. – № 9. – С. 19-29.
7. Гринкевич В.А. Бесштамповое профилирование на прессах с повышением точности формоизменения на окончательных операциях / В.А. Гринкевич, В.В. Кухарь, К.К. Диамантопуло // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – № 5. – 2010. – С. 19-23.
8. Кухарь В.В., Бурко В.А. Ресурсосберегающие технологии штамповки медных осесимметричных (круглых в плане) поковок на основе предварительного формирования бокового профиля заготовок свободной подготовительной осадкой / В.В. Кухарь, А.В. Бурко // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту: зб. наук. праць / ПДТУ. – Маріуполь, 2014. – Вип.29. – С. 75-83.
9. Movrin D., Plančak M., Vilotić D., Milutinović M., Skakun P., Lužanin O., Trbojević I.: Optimization and design of multistage hot forging processes by numerical simulation and experimental verification, Journal for Technology of Plasticity, Vol. 35 (2010), No.1-2, pp. 75-89, <https://www.researchgate.net/publication/277101911>.
10. Kukhar, V., Burko, V., Prysiazhnyi, A., Balalayeva, E., & Nyhribeda, M. (2016). Development of alternative technology of dual forming of profiled workpiece obtained by buckling. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(7(81), 53–61. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.72063>.
11. Воронцов А.Л. Определение формы боковой поверхности заготовки при осадке / А.Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2007. – № 3. – С. 7-16.
12. Experimental Research and Method for Calculation of 'Upsetting-with-Buckling' Load at the Impression-Free (Dieless) Preforming of Workpiece / V. Kukhar, V. Artiukh, A. Prysiazhnyi, A. Pustovgar // E3S Web Conf., 33 (2018) 02031, DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183302031>.
13. Ковка и штамповка. Справочник. В 4-х томах. Под. ред. Е.И. Семенова. Т.2. Горячая объемная штамповка. – М.: Машиностроение, 1986. – 592 с.
14. Смирнов В.К. Горячая вальцовка заготовок / В.К. Смирнов, К.И. Литвинов, С.В. Харитонин – М.: Машиностроение, 1980. – 150 с.
15. About Micas Simulations Limited / QForm (qform3d.co.uk).

Рецензент В.І. Шваб'юк, професор кафедри прикладної математики та механіки ЛНТУ, доктор технічних наук

УДК 538.945

DOI 10.36910/775.24153966.2021.72.13

В.Є. Сахнюк, А.М. Шутовський, С.А. Федосов, О.М. Вілігурський

Волинський національний університет імені Лесі Українки

ВПЛИВ СИМЕТРІЇ ПАРАМЕТРА ВПОРЯДКУВАННЯ НА СТРУМ-ФАЗОВУ
ЗАЛЕЖНІСТЬ В SIS КОНТАКТАХ

Досліджено рівноважні струмові стани в тунельних надпровідних контактах на основі двозонних надпровідників. В основі дослідження використано квазікласичні рівняння для функцій Гріна, записаних в t -представленні. Отримано формулу для залежності струму від різниці фаз параметрів впорядкування та проаналізовано вплив симетрії параметрів впорядкування на величину надпровідного струму в SIS контакті.

Ключові слова: параметр впорядкування, функції Гріна, густина струму

В.Е. Сахнюк, А.Н. Шутовский, С.А. Федосов, О.Н. Вилигурский

ВЛИЯНИЕ СИММЕТРИИ ПАРАМЕТРА УПОРЯДОЧЕНИЯ НА ТОК-ФАЗОВУЮ
ЗАВИСИМОСТЬ В SIS КОНТАКТАХ

Исследованы равновесные токовые состояния в туннельных сверхпроводящих контактах на основе двухзонных сверхпроводников. В основе исследования использованы квазиклассические уравнения для функций Грина, записанных в t -представлении. Получена формула зависимости тока от разности фаз параметров упорядочения и проанализировано влияние симметрии параметров упорядочения на величину сверхпроводящего тока в SIS контакте.

Ключевые слова: параметр упорядочения, функции Грина, плотность тока.

V. Sakhnyuk, A. Shutovskyi, S. Fedosov, O. Viligurskiy

INFLUENCE OF ORDER PARAMETER SYMMETRY ON CURRENT-PHASE DEPENDENCE
IN SIS JUNCTIONS

Equilibrium current states in tunnel superconducting junctions based on two-band superconductors have been studied. The study is based on quasiclassical equations for Green's functions written in the t -representation. The formula for the dependence of the current on the phase difference of the order parameters is obtained and the influence of the symmetry of the order parameters on the value of the superconducting current in the SIS contact is analyzed.

Keywords: order parameter, Green's functions, current density.

Постановка проблеми. Численні роботи присвячені дослідженню ефекту Джозефсона в надпровідних контактах, що включають двозонні надпровідники (див. огляд [1]). Однак більшість з цих досліджень має справу з контактами, утвореними звичайним надпровідником та двозонним надпровідником. Для дослідження таких контактів використовують різні підходи: формалізм рівнянь Боголюбова-де-Жена, метод тунельного гамільтоніана, рівняння Горькова для функцій Гріна, метод функціонального інтеграла.

Після відкриття надпровідності в сполуках на основі заліза [2] постало питання про симетрію параметра впорядкування в таких надпровідниках. Як відомо залізовмісні надпровідники є двозонними і характеризуються двома параметрами впорядкування Δ_1 і Δ_2 та, відповідно, двома фазами φ_1 і φ_2 . В таких надпровідниках можуть реалізовуватись стани з симетрією s_{++} , коли обидві фази є однакові $\varphi_1 = \varphi_2$, або стани з симетрією $s_{\pm}$, коли фази зсунуті на π ($\varphi_1 = \varphi_2 + \pi$) [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В сполуці MgB_2 симетрія параметра впорядкування є добре відомою [4] – фази обох параметрів впорядкування для основного стану є рівні (симетрія s_{++}). Для залізовмісних надпровідників [2, 5] наразі обговорюється можливість реалізації обох типів симетрії параметра впорядкування $s_{\pm}$ та s_{++} і це питання є відкритим. У роботі [6] використано модель з кусково-сталім параметром [7] впорядкування для опису $0-\pi$ перемикання внаслідок міжзонного зв'язку в надпровідних контактах на основі залізовмісних надпровідників. Хорошим інструментом для дослідження симетрії параметра впорядкування є фазочутливі методи, в основі яких є ефект Джозефсона. Тому теоретичні дослідження залежності струму від різниці фаз є важливою складовою в розумінні симетрії параметра впорядкування в незвичайних надпровідниках.

Постановка завдань. Метою нашої роботи є одержати формулу для залежності струму від різниці фаз в надпровідних контактах типу SIS (S – надпровідник (superconductivity), I – діелектрик (insulator)), що утворені двома ідентичними двозонними надпровідниками з $s_{\pm}$, або s_{++} симетріями параметра впорядкування. А також на основі одержаного результату з'ясувати яким чином відображається на струм фазовій залежності симетрія параметра впорядкування.

Викладення основного матеріалу. В основі досліджень використано рівняння Горькова для мацубарівських функцій Гріна [7]. На основі цих рівнянь побудовано квазікласичні рівняння для функцій Гріна записаних в t -представленні. Працювати з квазікласичними рівняннями простіше оскільки вони, на відміну від рівнянь Горькова, є системою диференціальних рівнянь першого порядку.

Модель та основні рівняння. Для опису двозонного надпровідника використовують гамільтоніан [8]

$$\hat{H}_B = \sum_{l,\sigma} \int d\vec{r} \hat{\psi}_{l,\sigma}^+ (\vec{r}) \hat{\xi} \hat{\psi}_{l,\sigma} (\vec{r}) - \sum_{l,l'} g_{l,l'} \int d\vec{r} \left[\Delta_l^* (\vec{r}) \hat{\psi}_{l',\downarrow} (\vec{r}) \hat{\psi}_{l',\uparrow} (\vec{r}) + \Delta_{l'} (\vec{r}) \hat{\psi}_{l,\uparrow}^+ (\vec{r}) \hat{\psi}_{l,\downarrow}^+ (\vec{r}) \right]. \quad (1)$$

Тут l та l' є індекси зон, які набувають значень 1 та 2; $g_{l,l'}$ – константи зв'язку, що описують взаємодію між зонами l та l' (внаслідок рівноправності обох зон виконується умова $g_{l,l'} = g_{l',l}$); $\Delta_l(\vec{r})$ – комплексні функції, що називаються параметрами впорядкування; $\hat{\psi}_{l,\sigma}^+(\vec{r})$ та $\hat{\psi}_{l,\sigma}(\vec{r})$ – ферміївські оператори породження та знищення, відповідно; $\hat{\xi} = \frac{\hat{p}^2}{2m} - \mu$ – закон дисперсії для електронів, де $\mu = \frac{p_0^2}{2m}$ – хімічний потенціал, у формулі для якого фігурує імпульс Фермі p_0 .

В мікроскопічній теорії надпровідності вважається досить потужним метод функцій Гріна [7], в якому для випадку двозонного надпровідника основним є рівняння

$$\left(i\omega_n - \sigma_z \left[\hat{\xi} + U(\vec{r}) \right] - \hat{\xi}_l(\vec{r}) \right) \hat{G}_{l,\omega_n}(\vec{r}, \vec{r}') = \delta(\vec{r} - \vec{r}'), \quad (2)$$

яке задовольняє матрична функція Гріна

$$\hat{G}_{l,\omega_n}(\vec{r}, \vec{r}') = \begin{pmatrix} G_{l,\omega_n}(\vec{r}, \vec{r}') & -\tilde{F}_{l,\omega_n}(\vec{r}, \vec{r}') \\ -F_{l,\omega_n}(\vec{r}, \vec{r}') & \tilde{G}_{l,\omega_n}(\vec{r}, \vec{r}') \end{pmatrix} \quad (3)$$

Компоненти цієї функції є фур'є-образи мацубарівських функцій Гріна

$$\begin{aligned} G_l(\vec{r}, \vec{r}'; \tau - \tau') &= \langle T_\tau \hat{\psi}_{l,\downarrow}^+(\vec{r}', \tau') \hat{\psi}_{l,\downarrow}(\vec{r}, \tau) \rangle = T \sum_{\omega_n} \hat{G}_{l,\omega_n}(\vec{r}, \vec{r}') e^{-i\omega_n(\tau - \tau')}, \\ F_l(\vec{r}, \vec{r}'; \tau - \tau') &= \langle T_\tau \hat{\psi}_{l,\uparrow}^+(\vec{r}, \tau) \hat{\psi}_{l,\downarrow}^+(\vec{r}', \tau') \rangle = T \sum_{\omega_n} F_{l,\omega_n}(\vec{r}, \vec{r}') e^{-i\omega_n(\tau - \tau')}, \\ \tilde{G}_l(\vec{r}, \vec{r}'; \tau - \tau') &= \langle T_\tau \hat{\psi}_{l,\uparrow}(\vec{r}', \tau') \hat{\psi}_{l,\uparrow}^+(\vec{r}, \tau) \rangle = T \sum_{\omega_n} \tilde{G}_{l,\omega_n}(\vec{r}, \vec{r}') e^{-i\omega_n(\tau - \tau')}, \\ \tilde{F}_l(\vec{r}, \vec{r}'; \tau - \tau') &= \langle T_\tau \hat{\psi}_{l,\downarrow}(\vec{r}, \tau) \hat{\psi}_{l,\uparrow}(\vec{r}', \tau') \rangle = T \sum_{\omega_n} \tilde{F}_{l,\omega_n}(\vec{r}, \vec{r}') e^{-i\omega_n(\tau - \tau')}. \end{aligned}$$

В рівнянні (2): $\hat{\xi}_l(\vec{r}) = \sum_{l'} g_{l,l'} \begin{pmatrix} 0 & \Delta_l(\vec{r}) \\ \Delta_l^*(\vec{r}) & 0 \end{pmatrix}$; $\omega_n = \pi T(2n+1)$ – непарна мацубарівська частота

($n \in N$, T – температура); $\sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$ – матриця Паулі.

Вважатимемо, що тонка діелектрична плівка розміщена в площині $z = 0$. Що стосується двох надпровідників, то вони займають області $z < 0$ та $z > 0$. У такому випадку просторова однорідність порушується лише в напрямку осі OZ , внаслідок чого диференціальне рівняння (2) набуває такого вигляду:

$$\left(i\omega_n - \sigma_z \left[\hat{\xi} + U(z) \right] - \hat{\xi}_l(z) \right) \hat{G}_{l,\omega_n}(\vec{r}, \vec{r}') = \delta(\vec{r} - \vec{r}'). \quad (4)$$

Тонку діелектричну плівку моделюватимемо δ -функційним потенціальним бар'єром:

$$U(z) = U_0 \delta(z).$$

Для побудови так званих квазікласичних рівнянь [7] для тунельного надпровідного контакту на основі двозонних надпровідників ми скористаємось повним набором власних функцій в одночастинковій квантово-механічній задачі про рух електрона за наявності δ -функційного потенціального бар'єру. Рівняння, що описує такий рух має вигляд

$$\left(\hat{\xi} + U(z) \right) \psi_p^{(k)}(\vec{r}) = \xi_p \psi_p^{(k)}(\vec{r}). \quad (5)$$

Розв'язком рівняння (5) є функції:

$$\psi_{\vec{p}}^{(k)}(\vec{r}) = \frac{\exp(i\vec{p}_{\perp}\vec{r})}{2\pi} \chi_{p_z}^{(k)}(z), \quad (6)$$

де індекс k набуває двох значень 1 та 2, $\vec{p}_{\perp}$ – перпендикулярна до осі OZ складова імпульсу,

$$\chi_{p_z}^{(1)}(z) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sin p_z z, \quad (7)$$

$$\chi_{p_z}^{(2)}(z) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left[\sqrt{D} \cos p_z z + \sqrt{R} (\text{sign}(z)) \sin p_z z \right].$$

Коефіцієнт проходження D та коефіцієнт відбиття R знаходяться за формулами $D = \frac{p_z^2}{p_z^2 + K^2}$ та $R = 1 - D$, де $K = mU_0$. Використовуючи повний набір хвильових функцій (6), можна перейти від функції Гріна в конфігураційному представленні (3) до функцій Гріна в імпульсному представленні $\hat{G}_{l,\omega_n}^{i,k}(\vec{p}_1, \vec{p}_2)$ скориставшись розкладом

$$\hat{G}_{l,\omega_n}(\vec{r}, \vec{r}') = \sum_{i,k} \int d\vec{p}_1 \int d\vec{p}_2 \hat{G}_{l,\omega_n}^{i,k}(\vec{p}_1, \vec{p}_2) \psi_{\vec{p}_1}^{(i)}(\vec{r}) \psi_{\vec{p}_2}^{*(k)}(\vec{r}'). \quad (8)$$

Працюючи в імпульсному просторі ми можемо скористатися тим фактом, що характерні імпульси, які дають основний внесок у значення фізичних величин є близькі до ферміївських. Тому можемо покласти, що $p = p_0 + \xi / v_0$ та виконати відповідні спрощення. А далі перейти у простір змінних t спряжених до ξ , використовуючи повний набір функцій $(2\pi v_0 x)^{-1/2} \exp(-i\xi t)$ та $(2\pi v_0 x)^{-1/2} \exp(i\xi t)$. Деталі такої процедури, яку називають побудовою квазікласичних рівнянь для функцій Гріна в t -представленні можна знайти в монографії [7]. Тому тут одразу випишемо квазікласичні рівняння в t -представленні для SIS контакту на основі двозонних надпровідників.

$$\left(i\omega_n + i\sigma_z \frac{\partial}{\partial t} \right) \hat{G}_{l,\omega_n}^{i,k}(t, t') - \sum_{i'} \hat{\mathcal{E}}_l^{i,i'}(t, x) \hat{G}_{l,\omega_n}^{i',k}(t, t') = \delta_{i,k} \delta(t - t'). \quad (9)$$

Тут $\hat{\mathcal{E}}_l^{i,i'}(t, x) = \sum_{l'} g_{l,l'} \hat{\Delta}_{l'}^{i,i'}(t, x)$, де

$$\begin{aligned} \hat{\Delta}_l^{1,1}(t, x) &= \frac{1}{2} [\hat{\Delta}_l(v_0 x t) + \hat{\Delta}_l(-v_0 x t)], \\ \hat{\Delta}_l^{1,2}(t, x) &= \frac{1}{2} [i\sqrt{D} + \sqrt{R} (\text{sign}(t))] [\hat{\Delta}_l(v_0 x t) - \hat{\Delta}_l(-v_0 x t)], \\ \hat{\Delta}_l^{2,1}(t, x) &= \frac{1}{2} [-i\sqrt{D} + \sqrt{R} (\text{sign}(t))] [\hat{\Delta}_l(v_0 x t) - \hat{\Delta}_l(-v_0 x t)], \\ \hat{\Delta}_l^{2,2}(t, x) &= \frac{1}{2} [\hat{\Delta}_l(v_0 x t) + \hat{\Delta}_l(-v_0 x t)]. \end{aligned} \quad (10)$$

Фізична величина $v_0 = \frac{p_0}{m}$, яка фігурує у формулі (10) є швидкість Фермі. Для безрозмірної

величини x ми маємо формулу $x = \frac{p_z}{\sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}}$. Оскільки $p_z > 0$, то $0 < x < 1$. Коефіцієнти D та

R у формулі (10) обчислено в наближенні $p_z \cong p_0 x$ та $p_z' \cong p_0 x$. Усі необхідні обрахунки виконано в околі імпульсу Фермі p_0 . Такого типу наближення допомогли нам отримати диференціальні рівняння першого порядку (9). Варто зауважити, що диференціальне рівняння (9) можна звести до диференціального рівняння

$$\left(i \frac{\partial}{\partial t} + i\omega_n \sigma_z \right) \hat{\mathcal{G}}_l^{i,k}(t, t') - \sum_{i'} \sigma_z \hat{\mathcal{E}}_l^{i,i'}(t, x) \hat{\mathcal{G}}_l^{i',k}(t, t') = \delta_{i,k} \delta(t - t') \quad (11)$$

для матричної функції Гріна

$$\hat{\mathcal{G}}_l^{i,k}(t, t') = \begin{pmatrix} G_{l,\omega_n}^{i,k}(t, t') & \tilde{F}_{l,\omega_n}^{i,k}(t, t') \\ -F_{l,\omega_n}^{i,k}(t, t') & -\tilde{G}_{l,\omega_n}^{i,k}(t, t') \end{pmatrix}, \quad (12)$$

яка пов'язана з функцією $\hat{G}_{l,\omega_n}^{i,k}(t, t')$ за допомогою співвідношення $\hat{\mathcal{G}}_l^{i,k}(t, t') = \hat{G}_{l,\omega_n}^{i,k}(t, t') \sigma_z$. Вихідне рівняння (4) є диференціальним рівнянням другого порядку. Отримані квазікласичні рівняння (9) або (11) є диференціальними рівняннями вже першого порядку, що, власне, і є основною перевагою таких рівнянь.

Густина струму. В теорії надпровідних контактів густина струму через функції Гріна виражається загальною формулою [7]

$$\vec{j}(\vec{r}) = \frac{ie}{m} T \sum_{l, \omega_n} \lim_{\vec{r}' \rightarrow \vec{r}} (\nabla_{\vec{r}'} - \nabla_{\vec{r}}) G_{l, \omega_n}(\vec{r}, \vec{r}'). \quad (13)$$

Після виконання вище описаної процедури переходу до функцій Гріна в t – представленні та покладаючи $t = 0$, оскільки густину струму обчислюватимемо в площині $z = 0$, одержимо наступну формулу

$$j(0) = 2\pi i e v_0 N(0) T \sum_{l, \omega_n} \int_0^1 x \sqrt{D(x)} [G_{l, \omega_n}^{2,1}(0, 0) - G_{l, \omega_n}^{1,2}(0, 0)] dx. \quad (14)$$

Тут $N(0) = \frac{m^2 v_0}{2\pi^2}$ – густина електронних станів на поверхні Фермі. Отже, для розрахунку густини струму потрібно розв'язати диференціальні рівняння для функцій Гріна (11). Переходячи до знаходження розв'язку рівнянь (11) використовуватимемо модель з кусково сталим параметром впорядкування. У цій моделі вважають, що абсолютні величини параметрів впорядкування є сталими в межах кожного з надпровідників, а фази є різними, тобто

$$\Delta_l(z) = \Delta_l [\theta(-z) \exp(i\varphi_l) + \theta(z) \exp(i\chi_l)]. \quad (15)$$

В результаті для функцій Гріна при $t < 0$ знаходимо

$$\begin{aligned} \hat{G}_l^{1,1}(t, t') &= \frac{1}{2i} [\hat{L}^{(1)}(t, t') + \hat{L}^{(2)}(t, t')], \\ \hat{G}_l^{2,1}(t, t') &= \frac{C}{2i} [\hat{L}^{(2)}(t, t') - \hat{L}^{(1)}(t, t')], \end{aligned} \quad t < 0. \quad (16)$$

де

$$\hat{L}^{(k)}(t, t') = e^{i\omega_n^{(k)} t} \begin{pmatrix} \alpha_k(t') & -\frac{1}{b_k} \beta_k(t') \\ -b_k \alpha_k(t') & \beta_k(t') \end{pmatrix} + \frac{1}{2\omega_n^{(k)}} [\omega_n^{(k)} (\text{sign}(t - t')) + \hat{A}_k] e^{-|t-t'|\omega_n^{(k)}}. \quad (17)$$

У формулі (17) ми маємо комплексне число $b_k = \frac{\omega_n^{(k)} + \omega_n}{iE_l^{(k)}}$, де $\omega_n^{(k)} = \sqrt{\omega_n^2 + |E_l^{(k)}|^2}$, $E_l^{(1)} = \sum_{l'} g_{l,l'} \Delta_{l'} \exp(i\varphi_{l'})$, $E_l^{(2)} = \sum_{l'} g_{l,l'} \Delta_{l'} \exp(i\chi_{l'})$ та чотири сталі інтегрування: $\alpha_1(t')$, $\alpha_2(t')$, $\beta_1(t')$, $\beta_2(t')$. Якщо $t > 0$, то загальний розв'язок матиме вже такий вигляд:

$$\begin{aligned} \hat{G}_l^{1,1}(t, t') &= \frac{1}{2i} [\hat{M}^{(1)}(t, t') + \hat{M}^{(2)}(t, t')], \\ \hat{G}_l^{2,1}(t, t') &= \frac{C^*}{2i} [\hat{M}^{(2)}(t, t') - \hat{M}^{(1)}(t, t')], \end{aligned} \quad t > 0. \quad (18)$$

де

$$\hat{M}^{(k)}(t, t') = e^{-i\omega_n^{(k)} t} \begin{pmatrix} \gamma_k(t') & b_k^* \delta_k(t') \\ \frac{1}{b_k^*} \gamma_k(t') & \delta_k(t') \end{pmatrix} + \frac{1}{2\omega_n^{(k)}} [\omega_n^{(k)} (\text{sign}(t - t')) + \hat{A}_k] e^{-|t-t'|\omega_n^{(k)}}. \quad (19)$$

У формулі (19) ми маємо чотири сталі інтегрування: $\gamma_1(t')$, $\gamma_2(t')$, $\delta_1(t')$ та $\delta_2(t')$. Функції Гріна $\hat{G}_l^{1,1}(t, t')$ та $\hat{G}_l^{2,1}(t, t')$ мають бути неперервними функціями, а отже мають виконуватись «умови зшивання»

$$\begin{aligned} \hat{L}^{(1)}(0, t') + \hat{L}^{(2)}(0, t') &= \hat{M}^{(1)}(0, t') + \hat{M}^{(2)}(0, t'), \\ C [\hat{L}^{(2)}(0, t') - \hat{L}^{(1)}(0, t')] &= C^* [\hat{M}^{(2)}(0, t') - \hat{M}^{(1)}(0, t')]. \end{aligned} \quad (20)$$

Ці умови дають можливість зафіксувати невідомі сталі в розв'язках (16) та (18) і цим побудова функцій Гріна в t – представленні завершується. Тоді, підставляючи одержані результати для функцій Гріна в (14), одержимо струм-фазову залежність для тунельного надпровідного контакту на основі двозонних надпровідників

$$j = \sum_{i,k} j_{i,k} \sin(\chi_i - \varphi_k), \quad (21)$$

де

$$j_{i,k} = 2\Delta_i\Delta_k \sum_l g_{l,i}g_{l,k} \frac{T}{T_c} \sum_{\omega_n} \int_0^1 \frac{x D(x) dx}{\omega_n^{(1)}\omega_n^{(2)} + \frac{D(x)}{2} \left(\omega_n^2 - \omega_n^{(1)}\omega_n^{(2)} + \sum_{i,k} g_{l,i}g_{l,k}\Delta_i\Delta_k \cos(\chi_i - \varphi_k) \right)}, \quad (22)$$

Як бачимо права частина (21) складається з чотирьох доданків, кожен з яких описує протікання струму з першої і другої зони одного надпровідника до обох зон другого надпровідника, що схематично зображено на рис. 1.

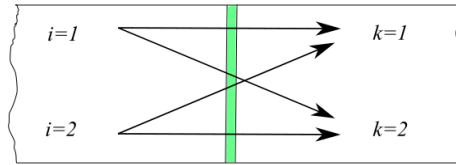


Рис. 1. Схематичне зображення складових повного струму, що протікає з одного надпровідника в інший крізь плівку діелектрика в тунельному надпровідному контакті

Розглянемо загальну формулу (21) для двох частинних випадків s_{++} та $s_{\pm}$ симетрій параметра впорядкування. В результаті для струм-фазової залежності одержимо

$$\frac{j}{j_0} = \sum_{l=1}^2 \int_0^1 Q_l^{\pm}(T) \operatorname{tg} \left(\frac{Q_l^{\pm}(T)}{2} \sqrt{1 - D(x) \sin^2 \left(\frac{\chi_1 - \varphi_1}{2} \right)} \right) \frac{T}{T_c} \frac{\sin(\chi_1 - \varphi_1) x D(x) dx}{\sqrt{1 - D(x) \sin^2 \left(\frac{\chi_1 - \varphi_1}{2} \right)}}. \quad (23)$$

Величина $Q_l^{\pm}(T) = g_{l,1} \frac{\Delta_1}{T} \pm g_{l,2} \frac{\Delta_2}{T}$ відображає тип симетрії спарювання: знак "+" відповідає s_{++}

симетрії, а знак "-" відповідає $s_{\pm}$ симетрії $j_0 = \frac{\pi}{2} e v_0 N(0) T_c$.

На рисунку 2 зображено графіки залежності струму від різниці фаз для обох типів симетрії параметра впорядкування і при різних температурах.

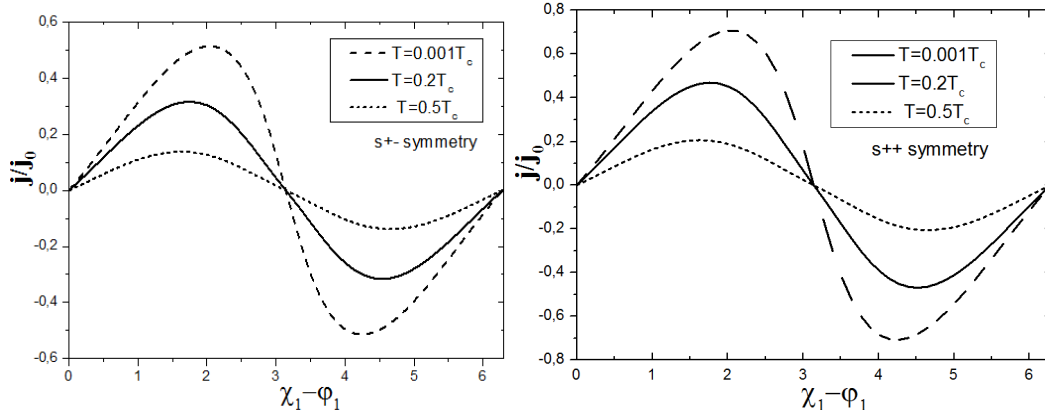


Рис. 2. Струм-фазова залежність в тунельному надпровідному контакті, утвореному однаковими надпровідниками із $s_{\pm}$ та s_{++} симетріями для параметрів впорядкування при різних значеннях температури. В чисельних розрахунках покладено:

$$g_{1,1} = 0.3, g_{2,2} = 0.15, g_{1,2} = 0.1.$$

Як бачимо, максимальний струм досягає більших значень у випадку, коли надпровідники, що утворюють контакт мають s_{++} симетрію. У випадку ж, коли контакт утворюють надпровідники з $s_{\pm}$ симетрією, то критичний струм контакту приблизно на 25% є меншим. Також бачимо, що із зменшенням температури максимум струму в контакті досягається при різниці фаз, що перевищує $\pi/2$. Найбільш помітно це для температури $T = 0.001T_c$.

Вплив константи міжзонного зв'язку на величину струму в контакті зображено на рисунку 3. Як бачимо характер цього впливу несуттєво залежить від симетрії параметрів впорядкування, із збільшенням коефіцієнта міжзонного зв'язку величина струму зростає.

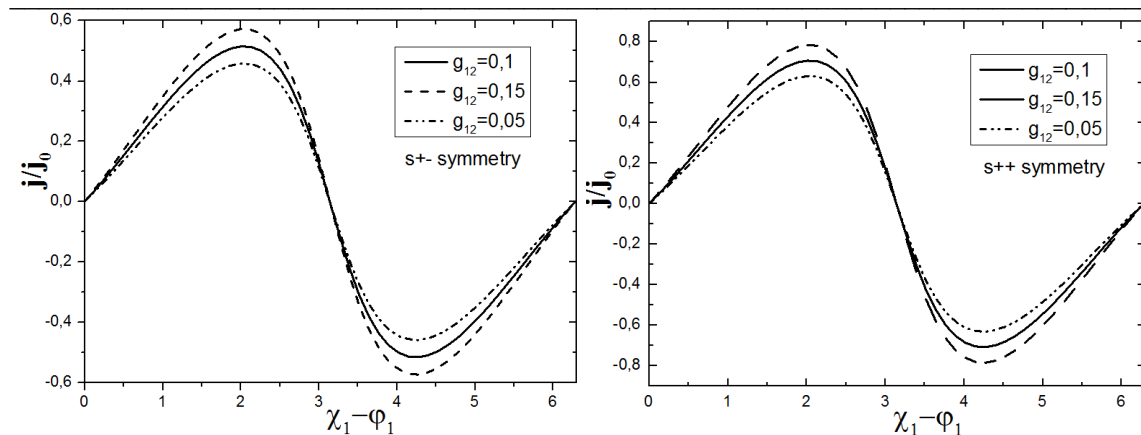


Рис. 3. Струм-фазова залежність в тунельному надпровідному контакті, утвореному однаковими надпровідниками із $s_{\pm}$ та s_{++} симетріями для параметрів впорядкування при різних значеннях коефіцієнта міжзонного зв'язку. В чисельних розрахунках покладено:

$$g_{1,1} = 0.3, g_{2,2} = 0.15, T = 0.001T_c.$$

Висновки. Маючи формулу для гамільтоніана (1) системи вільних електронів, які перебувають у полі комплексних джерел електронних пар, побудовано матричне диференціальне рівняння (4) другого порядку для матричної функції Гріна (3). За допомогою перетворень Фур'є виконано перехід від функцій Гріна в конфігураційному представленні до функцій Гріна у так званому t -представленні, для яких побудовано диференціальні рівняння уже першого порядку та одержано вираз для густини струму через ці функції. Всі необхідні обрахунки виконано на поверхні Фермі, тобто в околі імпульсу Фермі p_0 . Матричні диференціальні рівняння першого порядку для матричних функцій Гріна у t -представленні проінтегровано для довільних значень коефіцієнта проходження D крізь потенціальний бар'єр $U(z) = U_0 \delta(z)$, яким моделюється плівка діелектрика в тунельному надпровідному контакті типу SIS. Знайдені розв'язки використано з метою мікроскопічного розрахунку густини надпровідного струму в контакті. Одержана загальна формула для струму (21) складається з чотирьох доданків, які відображають проходження струму з першої і другої зон одного надпровідника в обидві зони другого надпровідника (рис. 1). В практичному плані корисною є формула (23), яку можна використати для з'ясування симетрії параметра впорядкування. Як видно з рис. 2 для s_{++} симетрії максимальне значення струму в контакті є вищим, ніж для випадку $s_{\pm}$. Цей результат можна використати при експериментальному дослідженні симетрії параметра впорядкування.

Список використаних джерел:

1. Yerin Y., Omelyanchouk A.N. Proximity and Josephson effects in microstructures based on multiband superconductors (Review Article). *Low Temp. Phys.* 2017. Vol. 43, № 9. 1013.
2. Kamihara Y., Watanabe T., Hirano M., Hosono H. Iron-Based Layered Superconductor $\text{La}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$ ($x = 0.05-0.12$) with $T_c = 26$ K. *J. Am. Chem. Soc.* 2008. Vol. 130, № 11. P. 3296–3297.
3. Xi X.X. Two-band superconductor magnesium diboride. *Rep. Prog. Phys.* 2008. Vol. 71, № 11. 116501.
4. Giubileo F., Roditchev D., Sacks W., et al. Two-Gap State Density in MgB_2 : A True Bulk Property or A Proximity Effect? *Phys. Rev. Lett.* 2001. Vol. 87, № 17. 177008.
5. Stewart G.R. Superconductivity in iron compounds. *Rev. Mod. Phys.* 2011. Vol. 83, № 4. 1589.
6. Tao Y.C., Liu S.Y., Bu N., Wang J., Di Y.S. Tunable $0-\pi$ transition by interband coupling in iron-based superconductor Josephson junctions. *New J. Phys.* 2015. Vol. 18, № 1. 013010.
7. Свідзинський А. В. Мікроскопічна теорія надпровідності : монографія. Луцьк : ВНУ ім. Лесі Українки, 2011. 422 с.
8. Zhitomirsky M.E., Dao V.-H. Ginzburg-Landau theory of vortices in a multigap superconductor. *Phys. Rev. B.* 2004. Vol. 69, № 5. 054508.

О.П.Карасевська^{1,2}, І.Ю.Троснікова¹, Т.О.Соловйова¹, С.В. Завадюк^{1,3}, П.І.Лобода¹

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"¹

Інститут металофізики імені Г.В.Курдюмова НАНУ²

Казенне науково-виробниче об'єднання «Форт» МВС України³

ВПЛИВ ТЕРМООБРОБКИ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАННИЙ СТАН МАТЕРІАЛІВ, ОТРИМАНИХ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ ІНЖЕКЦІЙНОГО ЛИТТЯ ПОРОШКУ

У роботі встановлено, що матеріали Catamold8740 та PolyPOM8740 після спікання мають перлітно-феритну структуру з наявними структурними неоднорідностями та дрібнокристалічними сторонніми включеннями. Методами рентгеноструктурного аналізу встановлено вплив термічної обробки на напружено-деформований стан низьколегованих сталей Catamold8740 та PolyPOM8740 та показано, що макронапруження у матеріалах зменшуються на порядок. Максимальні макронапруження в порошкових сумішах при спіканні досягають $\sigma_{\text{макро}} \sim 1.4$ ГПа. Після термообробки залишкові макронапруження істотно зменшуються і становлять $\sigma_{\text{макро}} \sim 150$ –200 МПа в обох матеріалах. Мікронапруження в матеріалі Catamold8740 після термообробки залишаються на рівні ~ 700 –840 МПа, а в PolyPOM8740 мікронапруження падають практично до нуля (< 60 МПа).

Ключові слова: інжекційне лиття порошку, перлітно-феритна структура, спікання, напруження

О.П.Карасевская, И.Ю.Тросникова, Т.О.Соловйова, С.В. Завадюк, П.И.Лобода

ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ ИНЖЕКЦИОННОГО ЛИТЬЯ ПОРОШКА

В работе установлено, что материалы Catamold8740 и PolyPOM8740 после спекания имеют перлитно-ферритную структуру с имеющимися структурными неоднородностями и мелкокристаллическими посторонними включениями. Методами рентгеноструктурного анализа установлено влияние термической обработки на напряженно-деформированное состояние низколегированных сталей Catamold8740 и PolyPOM8740 и показано, что макронапряжения в материалах уменьшаются на порядок. Максимальные макронапряжения в порошковых смесях при спекании достигают $\sigma_{\text{макро}} \sim 1.4$ ГПа. После термообработки остаточные макронапряжения существенно уменьшаются и составляют $\sigma_{\text{макро}} \sim 150$ –200 МПа в обоих материалах. Микронапряжения в материале Catamold8740 после термообработки остаются на уровне ~ 700 –840 МПа, а в PolyPOM8740 микронапряжения падают практически до нуля (< 60 МПа).

Ключевые слова: инжекционное литье порошка, перлитно-ферритная структура, спекание, напряжение

O. Karasevskaya, I. Trosnikova, T. Solovyova, S. Zavadyuk, P. Loboda

INFLUENCE OF HEAT TREATMENT ON STRESS-DEFORMED STATE FOR MATERIALS OBTAINED BY POWDER INJECTION MOLDING

It was found that the materials Catamold8740 and PolyPOM8740 after sintering have a pearlitic-ferritic structure with existing structural inhomogeneities and fine-crystalline foreign inclusions. The influence of heat treatment on the stress-strain state of low-alloy steels Catamold8740 and PolyPOM8740 was established by X-ray diffraction analysis methods and it was shown that macro stresses in materials decrease by an order of magnitude. The maximum macro stresses in powder mixtures during sintering reach $\sigma_{\text{macro}} \sim 1.4$ GPa. After heat treatment, the residual macro stresses are significantly reduced and amount to $\sigma_{\text{macro}} \sim 150$ –200 MPa in both materials. The microstresses in the Catamold8740 material after heat treatment remain at the level of ~ 700 –840 MPa, and in the PolyPOM8740 the microstresses drop to almost zero (< 60 MPa).

Keywords: powder injection molding, pearlitic-ferrite structure, sintering, stress

Постановка проблеми. Підвищення вимог до рівня фізико-механічних властивостей матеріалів, до їх стабільності у роботі в екстремальних умовах нерідко змушує створювати конструкційні матеріали під виробу, що проектується, проводячи взаємопов'язані конструкторські та матеріалознавчі дослідження. В результаті, як альтернатива традиційним технологіям, стрімко розвиваються і удосконалюються методи порошкової металургії, здійснюється сфероїдизація частинок твердої фази "in-situ" на стадії підготовки сплаву, яка випереджає стадію лиття, а на цій основі відбувається створення і освоєння нових технологій – технологій інжекційного лиття структурованих багатофазних матеріалів [1, 2]. У зв'язку з інтенсивним розвитком сучасних технологій, спостерігається тенденція до ускладнення та мінітюаризації промислових виробів. Це призводить до потреби у розробленні технології виготовлення складних компонентів з підвищеними фізико-механічними властивостями у великій кількості. Технологія інжекційного

лиття порошків (ІПП) входить у перелік найбільш перспективних технологій, що мають великий потенціал для вдосконалення виробництва у багатьох галузях промисловості [2].

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

У роботах [3-5] встановлено вплив хімічної та розмірної неоднорідності вихідних порошків "Catamold 8740" та кінетики спікання на формування структури та механічні властивості деталей, що працюють в умовах ударних навантажень. Показано, що зі збільшенням швидкості нагрівання пресовок порошкової суміші "Catamold 8740" від 2°C/хв до 5°C/хв зменшується неоднорідність мікроструктури, що зумовлена локально неоднорідним ущільненням та активується сплавоутворення при температурах 900°C – 1340°C. Ударна в'язкість, визначена за методом Шарпі з V-подібним надрізом зі збільшенням температури спікання та швидкості нагріву від 2°C/хв (1270°C) до 5°C/хв. (1340°C) зростає від 10,39 Дж/см² до 11,52 Дж/см² [3]. Встановлено, що збільшення часу витримки за температури спікання 1340°C від 30 до 90 хв призводить до зменшення ударної в'язкості в 1,4 рази, що пов'язано зі збільшенням розміру зерен [4].

Постановка завдань дослідження. Метою даної роботи є встановлення впливу параметрів термообробки сталей ІПП на їх фазовий склад та напружено-деформований стан фазових складових для забезпечення підвищених механічних властивостей деталей.

Викладення основного матеріалу. Технологія лиття порошків полягає у вприскуванні суміші дрібного металічного порошку і зв'язки на відповідних для цього вприскуючих пресах. Вихідна сировина являє собою суміш зв'язки із дрібним металічним порошком. Порошок отримують шляхом розпилення металу. Розмір частинок порошку 5-20 нм. Зв'язувальна речовина утворюється з полімерного матеріалу.

У якості вихідних порошків було використано готові суміші низьколегованих сталей: Catamold 8740 виробництва фірми BASF, Німеччина; та PolyPOM8740 виробництва фірми PolyMIM, Німеччина. Хімічний склад обох матеріалів наведений у таблиці 1.

Табл. 1.

Хімічний склад порошків Catamold8740 та PolyPOM8740

Порошок	Хімічний склад, %						
	C	Cr	Mo	Ni	Mn	Si	Fe
Catamold8740	0.45-0.55	0.40-0.60	0.25-0.40	0.50-0.80	≤0.1	0.3-0.55	Залишок
PolyPOM8740	0.45-0.55	0.40-0.60	0.25-0.40	0.50-0.80	≤0.1	0.3-0.55	Залишок

Виготовлення зразків виконувалося на інжекційному термопластавтоматі Power 250/50 з використанням модифікованого інжекційного циліндру для роботи з сумішами ІПП діаметром 25мм. Потім зразки піддавалися видаленню пластифікатора. Для первинного видалення пластифікатора (поліацеталь) було використано пари азотної кислоти (HNO₃ >98%) при температурі 115 °C. Видалення пластифікатора вважається закінченим, якщо втрата маси складає не менше 10,5%. Після цього проводилось спікання у вакуумній печі.

В сучасних печах, які використовуються в технології ІПП, термічне видалення зв'язки (при температурі 600°C), суміщене з операцією спікання. Це дозволяє значно скоротити робочий цикл та зменшити витрати на електроенергію.

Спікання зразків проводили в середовищі азоту в печі MIM3045 (ELNIK, США) за двох різних режимів:

1. Швидкість нагрівання 5°C/хв до 1340°C з витримкою 30 хв.
2. Швидкість нагрівання 2°C/хв. до 1270°C з витримкою 30 хв.

Термообробка деталей проводиться з метою підвищення механічних параметрів деталей. Нагрів під аустенізацію до 850°C відбувався в соляній ванні (NaCl 75% ; KCl 25%). Охолодження проводили у селітрі за температури 170°C. Операція відпуску проведена з витримкою 60 хв за температури 300°C.

Механічні та фізичні властивості спечених матеріалів згідно сертифікатів виробників вказані у таблиці 2.

Окрім пористості та розміру пор на механічні властивості впливає розмір зерен. Ріст зерен металу прискорюється зі збільшенням щільності матеріалу. Пори, які наявні в структурі матеріалу, знижують площу контакту зерна та сповільнюють міграцію границь, таким чином, уповільнюючи зростання зерен. Зі зникненням пористості, збільшення площі границь призводить до укрупнення зерен.

Табл. 2.

Властивості спечених матеріалів Catamold8740 та PolyPOM8740

Позначення матеріалу	Щільність	Міцність на розтяг			Твердість (макро)
		Границя міцності	Границя пружності	Видовження	
	г/см ³	МПа	МПа	%	
Catamold 8740 (гартування, відпуск 300°C)	7.5	1600	1400	5	50HRC
PolyPOM8740 (гартування, відпуск 300°C)	7.6	1665	1600	5	50HRC

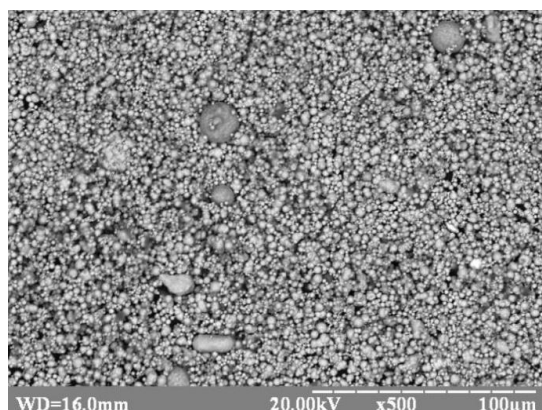
Тому, під час спікання, об'єм зерен лінійно збільшується з часом (t), тобто $G^3 \sim t$. Взаємозв'язок між розміром зерна G та відносною пористістю ε визначається за формулою:

$$G = \frac{\theta \cdot G_0}{\sqrt{\varepsilon}},$$

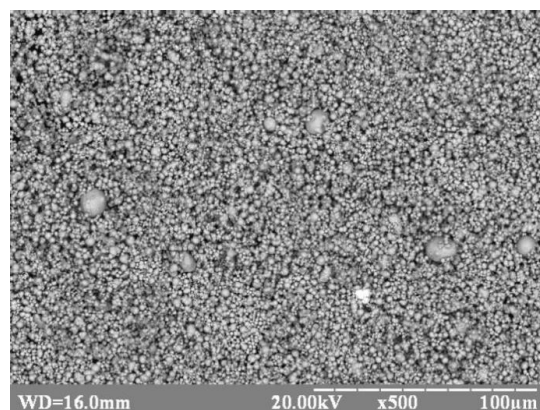
де G_0 – початковий розмір зерен;

θ – геометрична константа, близько 0,6 [6].

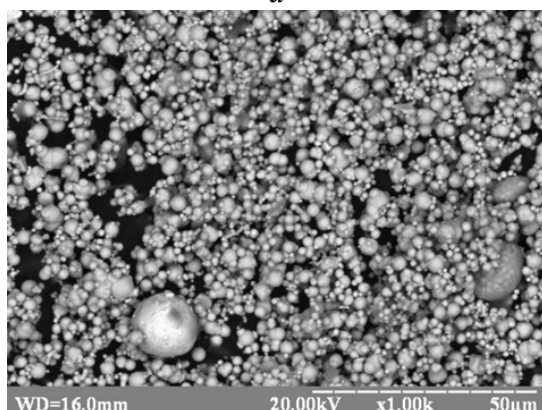
З метою визначення впливу розмірів порошків, їх форми та розподілу за розмірами на властивості спечених матеріалів ІЛП було досліджено мікрознімки частинок порошку, отримані за допомогою електронного мікроскопу (рис. 1).



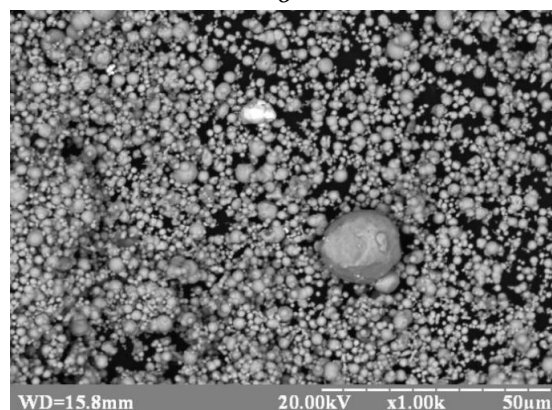
а



б



в



г

а, в – Catamold8740; б, г – PolyPOM8740

Рис.1. Мікрознімки порошків

Аналіз морфологічних характеристик порошку проводився у програмі SeoImageLab. Результати вимірювань середнього розміру частинок та їх розподіл представлені на рисунку 2.

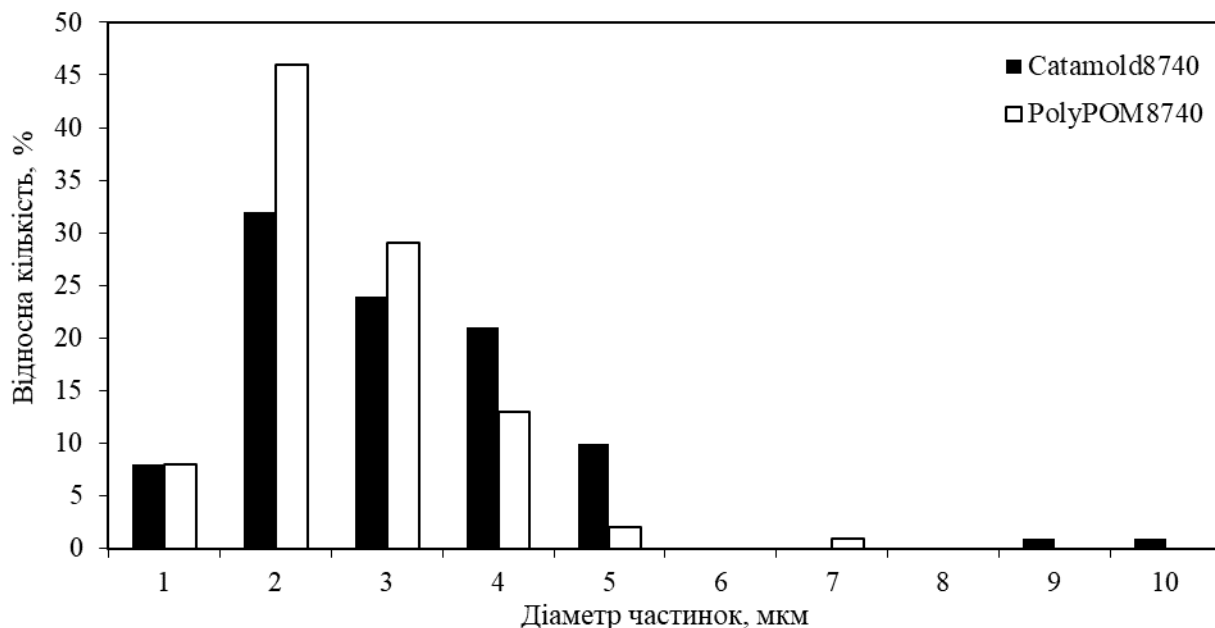
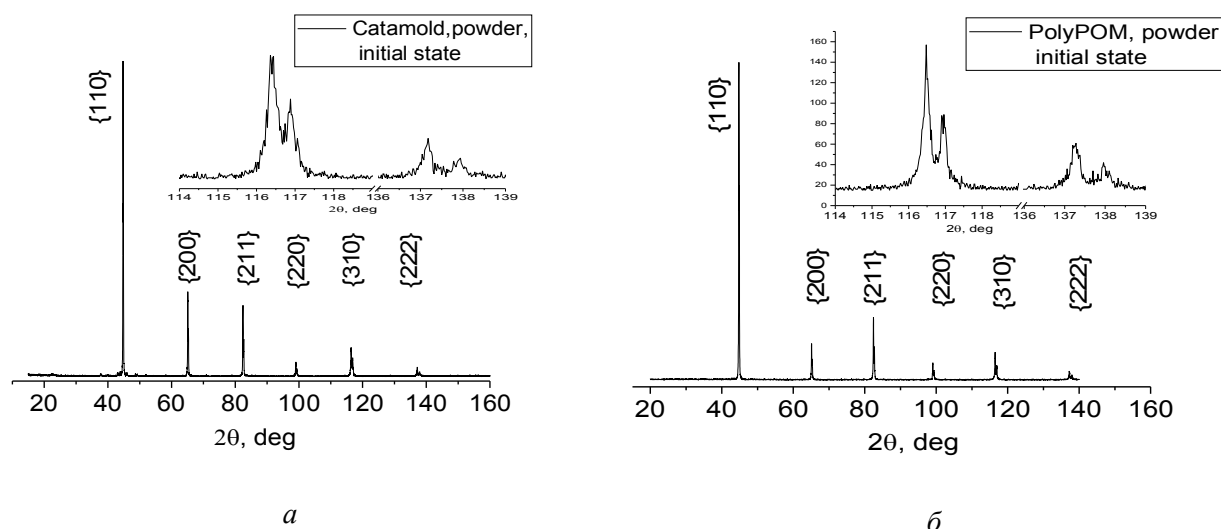


Рис. 2. Розподіл порошків за розміром для матеріалів Catamold8740 та PolyPOM 8740

Рентгеноструктурний аналіз дозволяє визначати фазовий склад матеріалу та структуру речовини, що включає просторову групу елементарної комірки фазових складових, їх розміри і форму, а також визначити групу симетрії кристалу [7].

У порошковому стані матеріали Catamold8740 і PolyPOM8740 перебувають в ОЦК фазовому стані із незначною кількістю додаткових фаз, об'єм яких, оцінений за методом Рітвельда, становить ~0.2мас.% без визначення їх фазового складу внаслідок недостатньої кількості відбитків (рис.3).



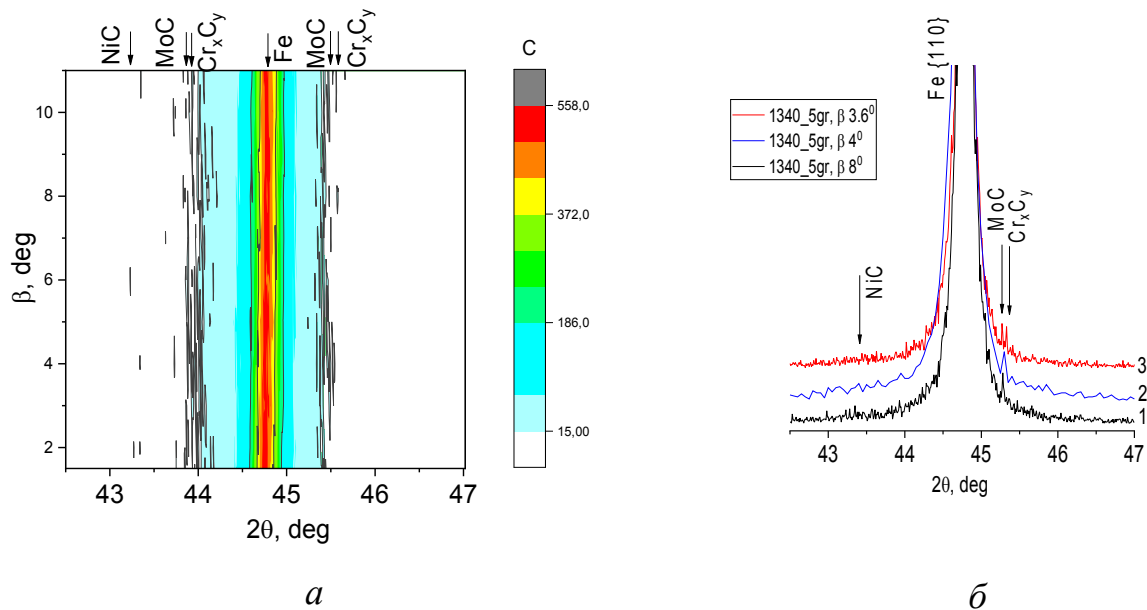
а – Catamold8740; б – PolyPOM8740

Рис. 3. “ θ – 2θ ” рентгенограми матеріалів у порошковому початковому стані

Мікροструктурні дослідження показали, що при спіканні матеріалів Catamold8740 та PolyPOM8740 спостерігається утворення структурної неоднорідності та дрібнокристалічних сторонніх включень. Для спостереження їх утворення було використано RSM (Reciprocal Space Mapping) рентгенівський метод дослідження (рис. 4).

На рисунку 4, а чітко проявляються додаткові фази, які співпадають із кутами відбиття для карбідів і, можливо, оксидів Мо, Ст. Велика кількість дрібних відбитків при значному різноманітті можливих фаз і неможливість застосування стандартних методів кількісного аналізу (методи Рітвельда, Патерсона та ін.) не дають визначити кількісний фазовий склад додаткових фаз. Але при

використанні конкретних, спеціальних положень зразків додаткові дрібні включення чітко проявляються.

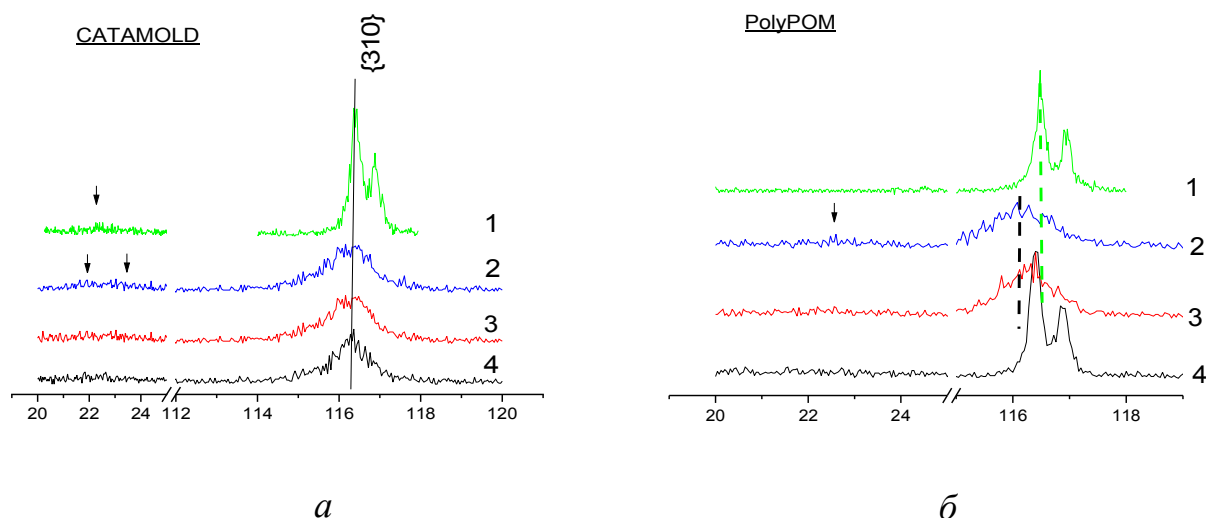


a – за методом RSM; *б* – "θ–2θ": крива 1: $\beta=3.6^\circ$, крива 2: $\beta=4^\circ$, крива 3: $\beta=8^\circ$

Рис. 4. Рентгенограми при дискретних значеннях кута β повороту зразка (Catamold8740, 1340 °C, 5°C/хв)

На рисунку 4, *б* на "θ–2θ" рентгенограмі спостерігаються рефлекси від MoC та NiC при повороті зразка на кут $\beta = 3.6^\circ$, а при куті $\beta = 8^\circ$ відбитки від MoC і NiC праворуч від положення відбитка Fe {110} (кут β – координата прибору, крок пересування зразка по осям « β » і « 2θ » становив 0.1° , витримка 2 с.).

Під час спікання порошків з матеріалів Catamold8740 і PolyPOM8740 в положенні і розподілі інтенсивності на рентгенограмах для феритної фази, які можна порівняти із вихідним станом, є помітні зміни (рис. 5).



a – Catamold8740; *б* – PolyPOM8740: 1– вихідний стан; 2– 1270 °C, 2 °C/хв.; 3 – 1340 °C, 2 °C/хв.; 4 – 1340°C, 5°C/хв., термічна обробка

Рис. 5. "θ–2θ" рентгенограми з площі перетинів зразків після різних обробок

У вихідному стані (рис. 5, криві 1*a*, *б*) дублет $\text{Cu}_{\text{K}\alpha 1, \text{K}\alpha 2}$ відбитків на великих 2θ кутах чітко розділюється, після спікання за різних режимів (1340°C, 5°C/хв.; 1270°C, 2°C/хв) ширина відбитків зростає (рис. 5 криві 2, 3) і спостерігається більше PolyPOM8740 або менше Catamold8740 їх

зміщення. Матеріали Catamold8740 і PolyPOM8740 у вихідному стані і при спіканні мають подібні розподіли інтенсивності на "θ–2θ" рентгенограмах.

Втім, термічна обробка цих матеріалів призводить до суттєвої різниці на рентгенограмах: для Catamold8740 після термічної обробки ширина ліній не зменшується, тоді, як для PolyPOM8740 вона суттєво зменшується і знову розділяється дублет для відбиття на великих кутах "2θ". Положення максимумів відбитків на "θ–2θ" рентгенограмах після термічної обробки в Catamold8740 і PolyPOM8740 практично повертається в початковий стан – визначений для їх порошкового стану.

Кутове положення і ширина відбитків на "θ–2θ" рентгенограмах були використані для оцінки залишкових макро- і мікронапружень. Максимальне зміщення відбитків на "θ–2θ" рентгенограмах при спіканні порошків складає $116.458^\circ - 116.013^\circ = 0.445^\circ$ (дані для відбитка {310}).

За законом Гука напруження (σ) дорівнюють [7]:

$$\sigma = E(\varepsilon/\mu),$$

де ε – деформація;

E – модуль пружності;

μ – коефіцієнт Пуассона.

Деформацію на макрорівні можна обчислити за формулою:

$$\varepsilon = \Delta d/d,$$

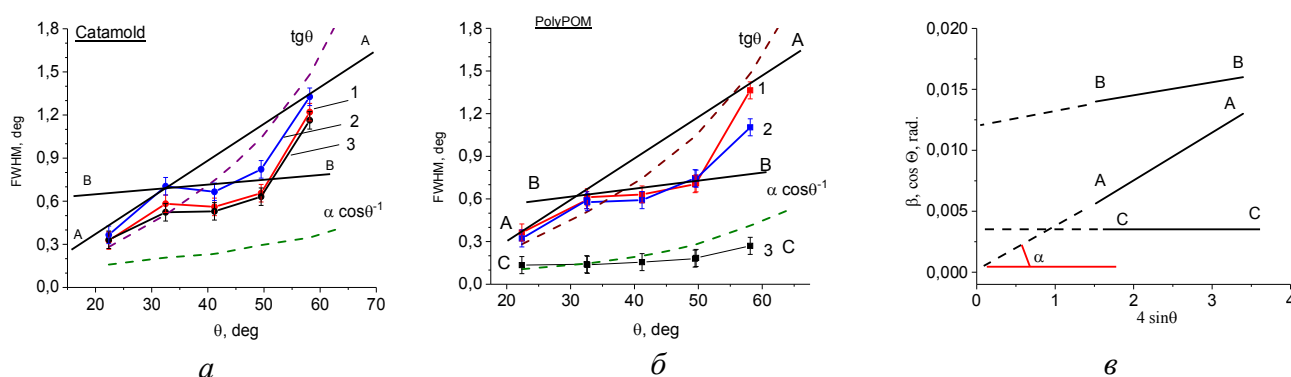
де d – міжплощинна відстань, яку обчислюють за формулою Вульфа-Брегга:

$$2d \sin\theta = n\lambda.$$

Зйомка рентгенограм проводилася в мідному випромінюванні і $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$. Деформація в порошках після спікання $0.0022/0.907 = 0.00243$, якщо $E = 200 \text{ ГПа}$, а $\mu = 0.35$, то $\sigma = 0.00243 \cdot 200 / 0.35 = 1.388 \text{ ГПа}$.

Максимальні мікронапруження в порошкових сумішах при спіканні досягають $\sigma_{\text{макро}} \sim 1.4 \text{ ГПа}$. Значення мікронапружень призводять до появи мікротріщин в матеріалах. Після термообробки залишкові мікронапруження істотно зменшуються, оскільки зміщення відбитків на "θ–2θ" рентгенограмах в цьому випадку не перевищує $0.05-0.06^\circ$ (для відбитка {310}), і тому $\sigma_{\text{макро}} \sim 150-200 \text{ МПа}$ в обох матеріалах: Catamold8740 і PolyPOM8740.

Інакше змінюються мікронапруження, які проявляються в ширині відбитків на "θ–2θ" рентгенограмах. Оскільки ширина відбитків пов'язана із розміром ОКР і мікронапруженнями, необхідно розділити їх вклади в цю ширину. Для цього використаємо метод Вільямсона – Холла і побудуємо залежності FWHM – f(θ) і $\beta \cos\theta$ – f(4sinθ) (рис. 6).



a – Catamold8740; б – PolyPOM8740; в – графік Вільямсона-Холла для обох матеріалів

Рис. 6. Залежності ширини відбитків (FWHM) від кута відбиття для різних матеріалів

Залежності FWHM–f(θ) при спіканні матеріалів Catamold8740 і PolyPOM8740 (рис. 6, а, б, криві 1, 2) подібні і немонотонні, що означає не сферичність ОКР. Лінії А-А, В-В і С-С, які обмежують залежність FWHM–f(θ) на рисунку 6 а, б перебудовані в координати $\beta \cos\theta$ – f(4sinθ) (рис. 6 в) для роздільного визначення частини ширини відбитків, що залежить від розміру ОКР (перетин з віссю ординат) і мікронапруження (кут α).

За формулою Селякова-Шеррера розмір ОКР (D): $D = \lambda / (\beta \times \cos\theta)$ із використанням $\beta = 0.9394 \text{ FWHM}$ (радіан) мають наступні значення.

© О.П.Карасевська, І.Ю.Троснікова, Т.О.Соловйова, С.В. Завадюк, П.І.Лобода

Максимальний розмір ОКР згідно перетину лінії А-А з віссю ординат $\beta \times \cos \theta = 0.0024$ рад. і $D = 1.5418 / 0.0024 \approx 600 \text{ \AA}$. Мінімальний розмір ОКР згідно перетину лінії В-В з віссю ординат $\beta \times \cos \theta = 0.01196$ рад. і $D = 1.5418 / 0.01196 \approx 130 \text{ \AA}$. Розмір ОКР у PolyPOM8740 після термообробки – лінія С-С і перетин з віссю ординат $\beta \times \cos \theta = 0.00321$ рад. і $D = 1.5418 / 0.00321 \approx 450 \text{ \AA}$. Таким чином, розмір ОКР в Catamold8740 при спіканні складає $\sim 130 \times 600 \text{ \AA}$ і не змінюється із термообробкою, розмір ОКР в PolyPOM8740 при спіканні складає $\sim 130 \times 600 \text{ \AA}$, а після термообробки стає $\sim 450 \text{ \AA}$ при формі ОКР, близькій до сферичної.

При розрахунку за законом Гука мікронапруження (мікродеформація) $\sigma_{\text{мікро}}$ обчислюється як $\varepsilon_{\text{мікро}} = \Delta d / d = (\beta / 4) \operatorname{ctg} \alpha$.

У матеріалі Catamold8740 після термообробки $\varepsilon_{\text{мікро}} = 0.00125$ (відбиток {310}) і $\sigma_{\text{мікро}} = 0.00125(200/0.35) \approx 0.7 \text{ ГПа}$ (700 МПа).

У матеріалі PolyPOM8740 після термообробки $\varepsilon_{\text{мікро}}$ близько «0» і не перевищує 0.0001 (відбиток {310}) і в такому разі $\sigma_{\text{мікро}} = 0.0001(200/0.35) \approx 0.06 \text{ ГПа}$ (60 МПа).

Асиметрія розмірів ОКР означає, що в порошках при спіканні відбувається деформація, яка призводить до появи залишкових макро- і мікронапружень ($\sim 1.4 \text{ ГПа}$ і $\sim 0.7 \text{ ГПа}$, відповідно).

Термічна обробка для матеріалів Catamold8740 і PolyPOM8740 суттєво зменшує залишкові мікронапруження і вони не перевищують $\sim 150\text{--}200 \text{ МПа}$.

Мікронапруження в матеріалі Catamold8740 після термообробки залишаються на рівні $\sim 700\text{--}840 \text{ МПа}$ – їх можна вважати орієнтованими у зв'язку із значною анізотропією розмірів ОКР ($600/130 \approx 4\div 5$ разів є ця різниця). В матеріалі PolyPOM8740 мікронапруження падають практично до нуля ($< 60 \text{ МПа}$), а ОКР мають форму, близьку до сферичної із розміром $\sim 450 \text{ \AA}$.

Висновки. Методами рентгенофазового аналізу було встановлено, що після спікання обидва матеріали мають перлітно-феритну структуру. Максимальні мікронапруження в порошкових сумішах при спіканні досягають $\sigma_{\text{макро}} \sim 1.4 \text{ ГПа}$. Значення мікронапружень призводить до появи мікротріщин в матеріалах. Після термообробки залишкові мікронапруження істотно зменшуються і становлять $\sigma_{\text{макро}} \sim 150\text{--}200 \text{ МПа}$ в обох матеріалах. Мікронапруження в матеріалі Catamold8740 після термообробки залишаються на рівні $\sim 700\text{--}840 \text{ МПа}$ – їх можна вважати орієнтованими у зв'язку із значною анізотропією розмірів ОКР ($600/130 \approx 4\div 5$ разів є різниця). В матеріалі PolyPOM8740 мікронапруження падають практично до нуля ($< 60 \text{ МПа}$), а ОКР мають форму, близьку до сферичної із розміром $\sim 450 \text{ \AA}$.

Список використаних джерел:

1. Metal Injection Moulding [Електронний ресурс]. / Електронні текстові дані. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.kineticdata.com/>. – Назва з екрану.
2. Kryachek V.M. Injection molding [Електронний ресурс] // V. M. Kryachek. – Електронні текстові дані // – 2014. – V.43. – №7-8. – Р. 336.
3. Zavadiuk S., Loboda P., Soloviova T., Trosnikova I., Karasevska O. Optimization of the Sintering Parameters for Materials Manufactured by Powder Injection Molding // Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 2020. – Vol. 59. – pp. 22–28.
4. Чеберяко А.В., Троснікова І.Ю., Завадюк С.В., Лобода П.І. Вплив кінетичних параметрів спікання на фізико-механічні властивості матеріалів, отриманих інжекційним литтям із порошків. Міжнародна наукова конференція «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 10», 10 – 11 грудня 2020 р. Київ, Україна. – С. 101.
5. Zavadiuk S.V., Loboda P.I., Soloviova T.O., Trosnikova I.Yu., Karasevska O.P. Fracture Features of Low-Alloy Steel Produced by Metal Injection Molding // Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 2021. – Vol. 59. – p.641–650.
6. Randall German. Sintering: From Empirical Observations to Scientific Principles. – Butterworth-Heinemann. – 2014. – p. 544.
7. Лобода П.І., Карасевська О.П., Троснікова І.Ю. Рентгеноструктурний аналіз матеріалів у дисперсному стані / Навчальний посібник: - Київ: «Центр учбової літератури», 2017. – с.139.

УДК 539.3:620.22: 621.762

DOI 10.36910/775.24153966.2021.72.15

А.В. Кузьмов^{1,2}, М.Б. Штерн^{1,2}

1- Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України

2- Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЗНАХОДЖЕННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИМИ МЕТОДАМИ МІКРОМЕХАНІКИ РІЗНООПІРНОЇ РЕОЛОГІЇ СПІКАННЯ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ ЯКІ МІСТЯТЬ ПЛОЩИННІ ДЕФЕКТИ

Робота присвячена вдосконаленню реологічної теорії спікання порошкових матеріалів. Запропоновано теоретичну методику визначення в'язких властивостей пористих матеріалів порошкового походження з розподіленими мікродефектами. Нелінійно-в'язка різноопірна (різна жорсткість на розтяг та стиск) поведінка такого матеріалу знаходиться шляхом мікромеханічного осереднення на представницькому осередку. Модулі в'язкості є функціями пористості й пошкодженості. Відповідно була обрахована ціла низка значень кожного з модулів в'язкості для певного дискретного діапазону густини та пошкодженості. Виявлено що ступінь знеміцнення матеріалу внаслідок площинних дефектів суттєво залежить не лише від знаку навантаження, але і від схеми деформування.

Ключові слова: пошкоджені пористі матеріали, мікромеханіка, нелінійна реологія спікання, різноопірність розтягу та стиску.

А.В. Кузьмов, М.Б. Штерн

НАХОЖДЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМИ МЕТОДАМИ МИКРОМЕХАНИКИ РАЗНОСОПРОТИВЛЯЕМОЙ РЕОЛОГИИ СПЕКАНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ, СОДЕРЖАЩИХ ПЛОСКИЕ ДЕФЕКТЫ

Работа посвящена усовершенствованию реологической теории спекания порошковых материалов. Предложена теоретическая методика определения вязких свойств пористых материалов порошкового происхождения с распределенными микродефектами. Нелинейно-вязкое разносопротивляемое (разная жесткость на растяжение и сжатие) поведение такого материала находится путем микромеханического осреднения на представительной ячейке. Модули вязкости являются функциями пористости и поврежденности. Соответственно, был рассчитан целый ряд значений каждого из модулей вязкости для определенного дискретного диапазона плотности и поврежденности. Установлено, что степень разупрочнения материала вследствие плоских дефектов существенно зависит не только от знака нагрузки, но и от схемы деформирования.

Ключевые слова: поврежденные пористые материалы, микромеханика, нелинейная реология спекания, разносопротивляемость растяжению и сжатию.

A. Kuzmov, M. Shtern

FINDING BY COMPUTATIONAL METHODS OF MICROMECHANICS OF MULTI- RESPONSE RHEOLOGY OF SINTERING OF POWDER MATERIALS CONTAINING PLANAR DEFECTS

The work is devoted to the improvement of the rheological theory of sintering of powder materials. A theoretical method for determining the viscous properties of porous materials of powder origin with distributed microdefects is proposed. The nonlinear-viscous multi-response (different tensile and compressive stiffness) behavior of such material is found by micromechanical averaging on the unit cell. According to the mechanics of composites, the geometry of the cell represents the structure of a heterogeneous material and the boundary conditions on a unit cell make it possible to relate the stress-strain state at the macro- and meso-level. The averaging was carried out by computer simulation using the finite element method with an adaptive mesh, which was automatically condensed in places of a large gradient of the stress-strain state. The structure of the unit cell corresponds to the powder material with planar defects that significantly exceed the particle size of the powder. In the proposed model the rheological response of a porous damaged material is specified by three moduli, and the structure of such a material is described by two internal state parameters: porosity and defect concentration. That is, the rheological moduli are functions of porosity and damage. Accordingly, a number of values of each of the moduli were calculated for a certain discrete range of density and damage. It was found that the degree of the material softening due to planar defects significantly depends not only on the sign of the load, but also on the deformation scheme.

Keywords: powder damaged materials, micromechanics, nonlinear sintering rheology, multi-response rheology.

Вступ. Проблема, яка розглядається у представленій роботі полягає у вивченні впливу щілиноподібних дефектів, які виникають при отриманні порошкових матеріалів, а також їх вмісту на процеси, що супроводжують спікання пористих заготовок. Вивчення площинних дефектів притаманно усім розділам матеріалознавства, пов'язаним із виготовленням матеріалів на основі переробки дисперсних складових. Саме вони розглядаються як один з найбільш характерних

атрибутів порошкових матеріалів, що пов'язані як із технологіями їх отримання так і умовами експлуатації [1-6].

Причинами появи таких щілин в структурі матеріалу є зокрема фактори, що сприяють не тільки ущільненню і формуванню внутрішніх границь, але також і локальному розпушенню. Серед причин їх утворення можуть бути макроскопічні чинники, наприклад надмірне схоплювання зразка зі стінками печі або виникнення неузгодженості осаджування різних ділянок зразків, що значною мірою притаманне спіканню шаруватих матеріалів та виробів, обмежених зовнішнім шаром іншої природи. Також причини можуть полягати в мікро- та мезоскопічних чинниках, як наприклад нерівномірним розподілом пор за розміром, що може призводити до «зонального відособлення» при спіканні. Сюди ж слід віднести агломерацію дрібнодисперсних порошоків чи утворення в структурі матеріалу каркасу з частинок тугоплавкої фази. Також після пресування в структурі порошкових заготовок міжчастинкові контакти можуть бути розподілені нерівномірно і існують певні ділянки з відсутністю міжчастинкових контактів, що по суті є дефектами. Походження таких дефектів детально вивчалося М. Ю. Бальшиним [5] та його численими послідовниками. Саме у зв'язку із цим у порошковій металургії і було введено уявлення про роль ефективного контактного перерізу порошкових матеріалів, який, в першу чергу, є наслідком пресування, як першого етапу їх отримання. У багатьох випадках подальше спікання зменшує їх кількість, але певна частини щілиноподібних дефектів залишається і помітно впливає на механічні характеристики виробу. Зокрема, про це свідчать дані *рис. 1*, опубліковані у роботі [6]

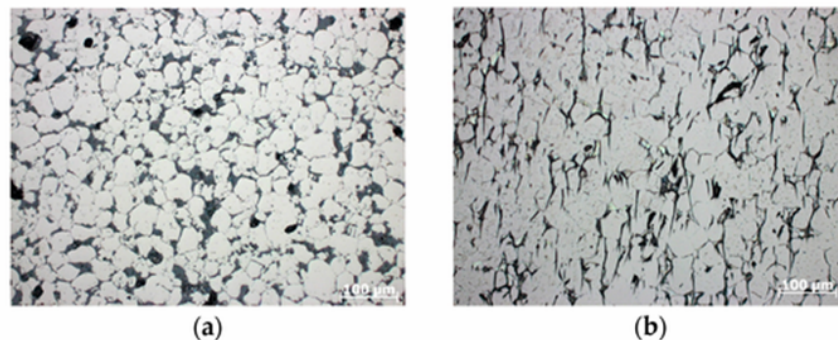


Рис. 1. Мікроструктура спеченого карбіду титану (TiC-50%), отриманого за температур спікання 1300 С (а) та 1350 С (б) [6].

Тож, не зважаючи на наявність спікання, у спеченому матеріалі може існувати залишкова пористість як у вигляді квазісферичних пор, так і у вигляді щілиноподібних дефектів. До цього варто додати, що сучасні процеси спікання супроводжуються наявністю зовнішнього навантаження, за наявності якого певні частини виробу можуть перебувати у стані розтягування.

Тому для забезпечення бажаних властивостей в порошкових матеріалах важливо розуміти вплив наведеного типу дефектів на консолідацію формовок в процесі спікання. Одним з найефективніших методів теоретичного опису процесу спікання порошкових заготовок є реологічна теорія спікання. Виходячи з цього вбачається доцільним врахувати в реологічній теорії спікання наявність площинних дефектів, а також описати осереднену міру дефектності структури матеріалу певним інтегральним параметром.

Треба зазначити що раніше одним з авторів була запропонована оцінка впливу дефектів на коефіцієнти об'ємної та зсувної в'язкості пористого матеріалу при розтягуючих середніх напруженнях на основі аналітичної поправки шляхом утримання першого члена розкладу в ряд по концентрації дефектів. За наявності ж стискаючих середніх напружень припускалося, що коефіцієнти в'язкості не залежать від дефектності. Проте якщо розглядати чотири різні модулі в'язкості, то питома дисипація для такого матеріалу буде розривною функцією швидкостей деформацій, що фізично не обґрунтовано. Тому в даній роботі здійснена спроба побудови на основі прямого комп'ютерного моделювання на представницькому осередку термодинамічно коректної моделі спікання пористих матеріалів з розподіленими дефектами. Крім того обчислювальне моделювання методом скінчених елементів дає змогу враховувати великі концентрації дефектів аж до граничних коли матеріал втрачає суцільність. Розглядається ситуація, коли розміри пор набагато менше розмірів тріщин, які, в свою чергу, істотно менше, за зразок в цілому. Припускається, що орієнтація тріщин має хаотичний характер і в ході деформування

матеріал не набуває анізотропію. Виходячи з цього двовимірні дефекти можна розглядати як деякі плоскі розрізи в пористому ізотропному континуумі. Припускалося, що поведінка цього континууму що оточує плоский дефект описується реологічною теорією спікання В. В. Скорохода [1].

Структура модельного матеріалу та представницький осередок. Моделювали матеріал, що містить періодично розташовані в пористій матриці хрестоподібно сполучені дефекти, які можна зокрема розглядати як відшарування в періодично розташованих прямокутних агломерованих гіперчастинках. Товщина відшарувань бралась дуже малою і тому їх наявність не впливає на густину матеріалу, яка обумовлюється лише густиною пористої матриці. Ефективні властивості вважали залежними від двох параметрів стану, що описують негомогенність матеріалу, а саме пористості матриці і міри площинних дефектів $0 \leq k < 1$, що задавалась як відношення сумарної довжини несущальності вздовж умовної пористої гіперчастинки до загальної її довжини $k = \frac{l}{L}$ (Рис.2). Таким чином методом скінчених елементів розв'язувалась низка задач по мікромеханічному усередненню властивостей відповідно до різних значень з двопараметричного діапазону (θ, k) .

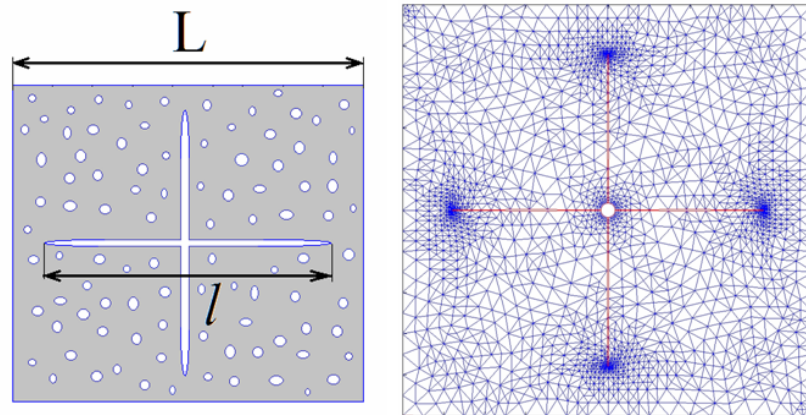


Рис. 2. Представницький осередок і сітка скінчених елементів

Вважали, що досліджувані матеріали задовольняють принципу еквівалентної гомогенності [7], згідно з яким якщо масштаб довжини усереднення є більшим за масштаб неоднорідності (агломерованої гіперчастинки), але малим у порівнянні з характерним розміром тіла, то задача про деформування може бути розв'язана з використанням усереднених властивостей. Для відшукування ефективних модулів в'язкості порошкового матеріалу, розглядали плоску задачу лінійної теорії в'язкості, вважаючи матеріал матриці лінійно в'язким та ізотропним відповідно до реологічної теорії спікання В. В. Скорохода. Відповідно течія матеріалу матриці описується визначальними співвідношеннями

$$\sigma_{ij} = 2\eta(\theta)(e_{ij} - \frac{1}{3}e\delta_{ij}) + \zeta(\theta)e\delta_{ij} + P_L(\theta)\delta_{ij} \quad (1)$$

$$\zeta(\theta) = \frac{4(1-\theta)^3}{3\theta}\eta_0; \quad \eta(\theta) = (1-\theta)^2\eta_0; \quad P_L(\theta) = \frac{3\sigma}{R}(1-\theta)^2;$$

де ζ і η - коефіцієнти об'ємної та зсувної в'язкості пористої матриці, η_0 - коефіцієнт зсувної в'язкості твердої фази, P_L - потенціал спікання або, що те ж саме, «макроскопічний Лапласівський тиск», σ - коефіцієнт поверхневого натягу на поверхні пор, R - розмір частинок порошку, δ_{ij} - символ Кронекера.

Вважали, що в процесі будь-якого однопроменевого (віднульового) навантаження конфігурація дефектів не змінюється і для кожного такого навантаження ефективні властивості можна обчислити усередненням лінійно-в'язких властивостей. При цьому для різних напружено-деформованих станів конфігурація відкритих та закритих тріщин є різною і це дає змогу врахувати різноопірність матеріалу. Зауважимо що за таких припущень, залежність між напруженнями та швидкостями деформацій для пористого дефектного матеріалу є однорідною

функцією першого порядку, хоча і нелінійною. Слід також зауважити, що оскільки розміри частинок та пор між ними набагато менше розмірів тріщин, то капілярні сили на поверхні дефектів не впливатимуть на реологію (проте можуть впливати на затягування дефектів) і ефективний потенціал спікання визначається співвідношенням

$$P_L^{eff}(\theta, k) = \frac{\zeta_{eff}^+(\theta, k)}{\zeta(\theta)} P_L(\theta) \quad (2)$$

де ζ_{eff}^+ – ефективний модуль об'ємної в'язкості дефектного пористого матеріалу з розімкненими дефектами. Зазначимо, що внаслідок однорідності залежності між напруженнями та швидкостями деформацій, та тим фактом, що всебічному деформуванню можуть відповідати тільки гідростатичні напруження можна говорити про такий модуль при всесторонньому розтягу.

Тому достатньо знайти лише ефективні в'язкі властивості пористого матеріалу з дефектами, а потенціал спікання визначиться за формулою (2). Тому подальший розгляд стосується лише ефективних властивостей в'язкості у випадку реології пористої матриці вигляду

$$\sigma_{ij} = 2\eta(\theta)(e_{ij} - \frac{1}{3}e\delta_{ij}) + \zeta(\theta)e\delta_{ij} \quad (3)$$

Граничні умови на представницькому осередку задавали в параметричному вигляді

$$\begin{aligned} V_x^{micro} &= e_{xx} \cdot x + e_{xy} \cdot y, \\ V_y^{micro} &= e_{xy} \cdot x + e_{yy} \cdot y, \end{aligned} \quad (4)$$

де V_x^{micro} , V_y^{micro} – компоненти швидкості на границі елементарного осередку; x , y – координати в масштабі осередку, e_{ij} – компоненти макроскопічного тензору швидкостей деформацій.

За таких граничних умов середні по осередку значення компонент тензору швидкостей деформацій становитимуть $\langle e_{ij}^{micro} \rangle = e_{ij}$. Відповідно до (1) поле швидкості в об'ємі осередку буде параметрично залежати від e_{ij} . Тому дисипативний потенціал ефективного мікронеоднорідного середовища $W = W(e_{ij})$ може бути обчислена шляхом усереднення за об'ємом осередку параметрично залежного від e_{ij} поля дисипативного потенціалу мікродеформацій.

Нелінійна різнопірна реологія матеріалів з площинними дефектами. Питому дисипацію вважали залежною лише від двох інваріантів: першого інваріанта тензору швидкостей деформацій (швидкості зміни об'єму) $\langle e_{ii} \rangle = e_0$ і другого інваріанта девіатора тензора швидкостей деформацій (інтенсивності зсувних деформацій) $\gamma_0 = \sqrt{\left(e_{ij} - \frac{1}{3}e\delta_{ij}\right) \cdot \left(e_{ij} - \frac{1}{3}e\delta_{ij}\right)}$, де δ_{ij} – символ Кронекера.

Для опису в'язкої поведінки порошкових матеріалів скористаємось кусково-лінійним наближенням різноопорної теорії в'язкості ізотропних матеріалів, аналогічним до такого в теорії пружності різнопірних матеріалів [8-10]. Подамо дисипативний потенціал у вигляді несиметричного еліпсоїда в координатах (e, γ)

$$W = \begin{cases} \frac{\zeta_{eff}^+}{2} \cdot e^2 + \eta_{eff} \gamma^2; & e > 0 \\ \frac{\zeta_{eff}^-}{2} \cdot e^2 + \eta_{eff} \gamma^2; & e < 0 \end{cases}, \quad (5)$$

вважаючи, що в кожній з півплощин $e > 0$ і $e < 0$ поведінка матеріалу описується класичною лінійною теорією в'язкості, але модулі об'ємної в'язкості ζ_{eff}^+ та ζ_{eff}^- є різними, при тому, що модуль зсувної в'язкості η_{eff} , внаслідок неперервності двох зімкнених поверхонь, є однаковим (рис.3).

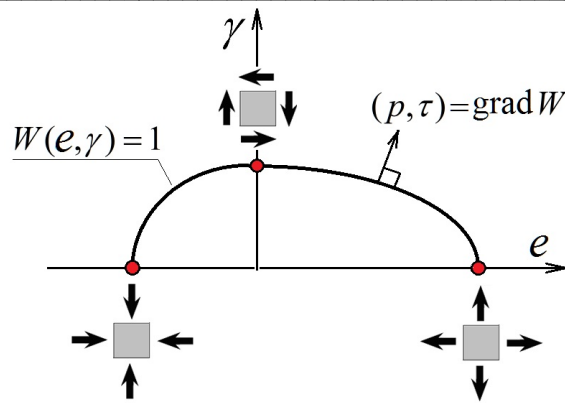


Рис.3. Контур рівних значень макроскопічного дисипативного потенціалу та промені напружено-деформованих станів, за якими здійснюється усереднення

За таких припущень визначальні співвідношення різноопірної в'язкої поведінки є трипараметричними: як випливає з (5) для знаходження дисипативного потенціалу достатньо взяти три різні макроскопічні однопроменеві деформації. В якості такого набору деформацій брались: чистий зсув, всебічний розтяг та всебічний стиск; (Рис.3). Конфігурація дефектів типу щілин за різних умов деформування та відповідні граничні умови показані на Рис.4. Вважали, що під дією деформації всебічного розтягу та чистого зсуву дефекти були розімкненими, а за всебічного стиску були повністю зімкненими тобто на модельній комірці вони були відсутніми.

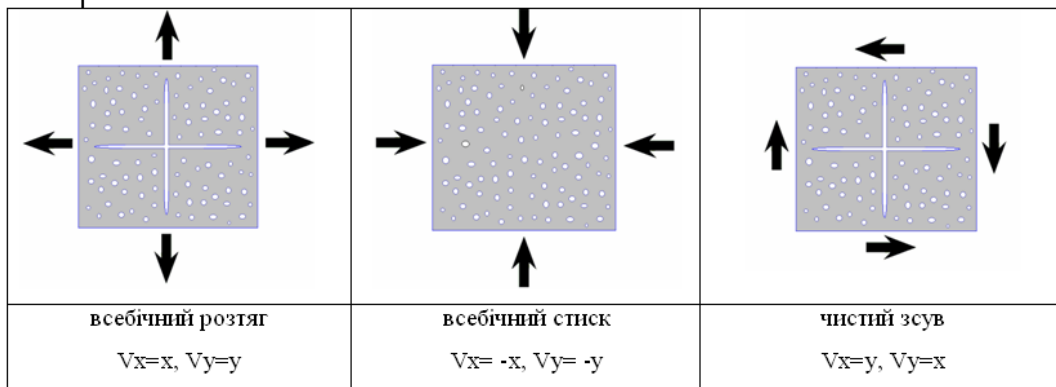


Рис. 4. Конфігурація дефектів типу щілин відповідно до різних схем деформування.

За таких припущень реакція матеріалу з дефектами на всебічний стиск не відрізнятиметься від реакції пористої матриці тобто $\zeta_{eff}^- = \zeta(\theta) = \frac{4(1-\theta)^3}{3\theta} \eta_0$. Таким чином пропонувану нелінійну різноопірну модель спікання можна виразити лише через два параметри $\zeta_{eff}^+(\theta, k)$ та $\eta_{eff}(\theta, k)$ залежні від вмісту дефектів k .

Результати обчислювального моделювання та висновки. При чисельному обрахунку методом скінчених елементів ζ_{eff}^+ та η_{eff} вміст дефектів k брався в діапазоні $[0 \ 0.95]$, тобто аж до величин дуже дефектного матеріалу близького до повного руйнування, а величина пористості θ до 0.5 тому що за більших значень реологічні співвідношення для пористої матриці стають менш коректними.

Як видно з Рис.5 наявність дефектів дуже суттєво, більш ніж на порядок, зменщує матеріал на всебічний розтяг. Причому спочатку при рості дефектності зменшення більш швидке, а при дефектності близькій до гранично допустимої суттєво сповільнюється.

Між тим, рис.6 показує, що зменшення внаслідок дефектів при чистому зсуві набагато менше ніж при всебічному розтягу. Крім того, на відміну від всебічного розтягу, матеріал практично рівномірно зменшується з ростом дефектів. При інших схемах розтягуючих

деформацій величина знеміцнення варіюватиметься в залежності від близькості типу деформування до чистого зсуву чи до всебічного стиску, тобто від відношення $\frac{e}{\gamma}$.

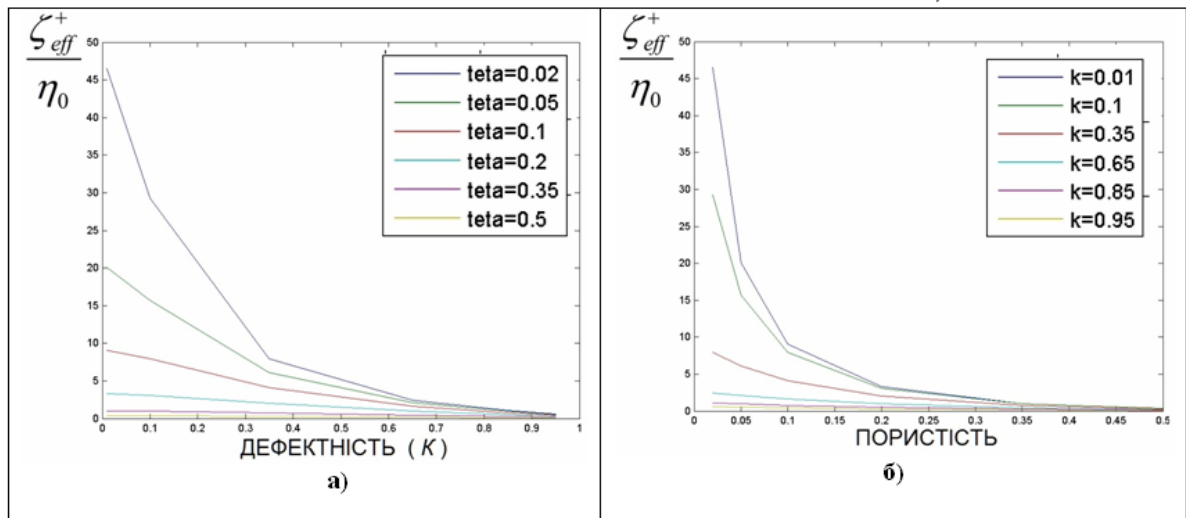


Рис. 5. Залежності для $\zeta_{eff}^+(\theta, k)$ нормовані зсувною в'язкістю твердої фази а) від дефектності для різних значень пористості. б) від пористості для різних значень дефектності

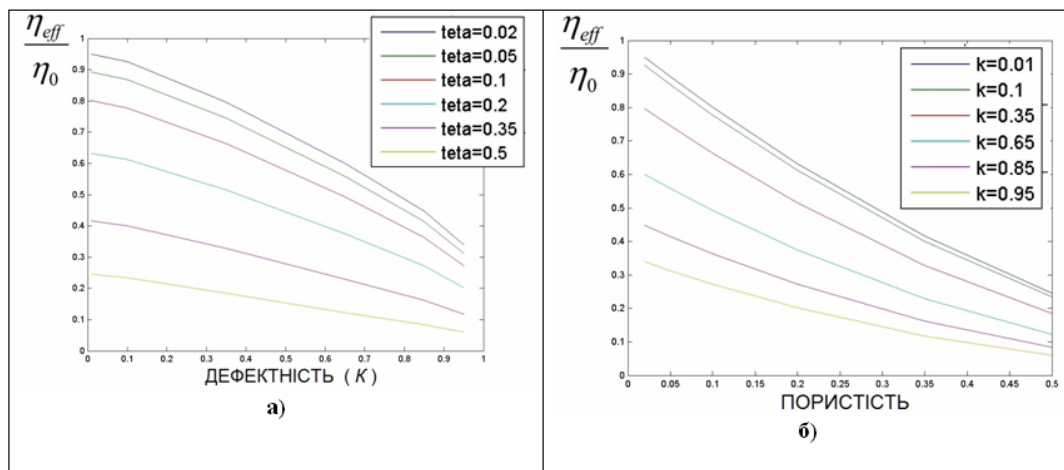


Рис.6. Залежності для $\eta_{eff}(\theta, k)$ нормовані зсувною в'язкістю твердої фази а) від дефектності для різних значень пористості. б) від пористості для різних значень дефектності

Між тим, Рис.6 показує, що знеміцнення внаслідок дефектів при чистому зсуві набагато менше ніж при всебічному розтягу. Крім того, на відміну від всебічного розтягу, матеріал практично рівномірно знеміцнюється з ростом дефектів. При інших схемах розтягуючих деформацій величина знеміцнення варіюватиметься в залежності від близькості типу деформування до чистого зсуву чи до всебічного стиску, тобто від відношення $\frac{e}{\gamma}$. При

стискаючих схемах деформування знеміцнення внаслідок дефектності теж залежатиме від $\frac{e}{\gamma}$, але завжди буде ще менш помітне ніж при чистому зсуві, аж до повної нечутливості до дефектів при всебічному стиску.

Таким чином вдалося за допомогою моделювання обчислювальними методами мікромеханіки розповсюдити реологічну модель спікання В.В.Скорохода на випадок пористих матеріалів з двовимірними дефектами. Хоча модель нелінійна та різноспірна до розтягу та стиску вона залежить лише від трьох модулів в'язкості, причому один береться з вихідної лінійної теорії і

лише два залежать як від пористості так і від дефектності. Потенціал спікання теж виражається через константи вихідної лінійної теорії спікання та один з двох вищезгаданих чисельно обрахованих модулів для нелінійної теорії.

Список використаних джерел.

1. Скороход В.В. Реологические основы теории спекания, К., Наукова думка, 1972, -149с.
2. V.V. Skorokhod, M. B. Shtern, E.A. Olevsky, Continuum theory for sintering of porous bodies: model and application/ //Science of Sintering. – 1991. – 23, №2 – P. 79 – 91
3. Салганик Р.Л. Механика сред с большим числом трещин, *Механика твердого тела*, Известия АН СССР, 1974, №4
4. Скороход В.В. Реологические задачи в теории спекания металлических порошков // Сб. докладов IV Международной конференции по порошковой металлургии. – ЧССР, 1974,- Т.1- С.19 -30
5. Бальшин М. Ю., Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокон, М.: Изд-во «Металлургия», 1972. - 336 с.
6. E. Korosteleva, V. Korzhova, M. Krinitcyn, Sintering Behavior and Microstructure of TiC-Me Composite Powder Prepared by SHS, *Metals* 2017, 7(8), pp. 290 – 300
7. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. – М: Мир. – 1982. – 396 с.
8. Амбарцумян С.А. Разномодульная теория упругости. – М.: Наука, 1982. - 320 с.
9. Kuzmov, A., Vdovychenko, O., Shtern, M. et al. Modeling of Multimodulus Elastic Behavior of Damaged Powder Materials Using Computational Micromechanics. *Powder Metall Met Ceram* 59, 491–498 (2021).
10. О.В. Вдовиченко, А.В. Кузьмов, О.Г. Кіркова, М.Б. Штерн Моделювання пружної поведінки пористих порошкових матеріалів за різних схем деформування // *Современные проблемы физического материаловедения* – Киев: ИПМ им. И.Н.Францевича НАН Украины. – 2017. – Вып. № 25. – С. 85-90.

С. О. Примиська*Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"***МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ
КАТАЛІТИЧНОЇ ОЧИСТКИ**

У цій статті представлений огляд в якому показано, як різні математичні моделі процесів каталітичної очистки використовуються в наш час. Серед них найкраще зарекомендували себе чисельні методи аналізу для розв'язку диференціальних рівнянь або їх систем. Для диференціальних рівнянь при описі об'єкта в динаміці необхідно задавати початкові умови та граничні умови. Для стаціонарних об'єктів, які описуються рівняннями в часткових похідних, задають тільки граничні умови. У роботах де розв'язувалися диференціальні рівняння використовувалася метод переходу до нестационарних завдань, які апроксимувалися системами кінцевих рівнянь. Показана можливість виконання математичної обробки експериментальних даних за допомогою графічних методів та апарату інтерполювання функцій. З'ясовано, що за допомогою методу скінченних різниць знайдено чисельний розв'язок крайової задачі для моделювання тепло-, масо- та вологообміну в ґрунтових масивах з урахуванням каталітичних мікро- або наночастинок. Доведено, що для моделювання нестационарних режимів у нерухомому адіабатичному адсорбційно-каталітичному наближенні краще використовувати одновимірну тритемпературну математичну модель. Подібну одновимірну математичну модель можна застосовувати і для опису процесу фільтрації суспензії твердих частинок через пористий тканинний фільтр. Були встановлені кінетичні закономірності процесу каталітичної гідроочищення атмосферного газойлю, на каталізаторі KF-905-1.3Q, за допомогою надійної математичної моделі, придатної для прогнозування та оптимізації найважливіших показників якості атмосферного газойлю. Таким чином, було досліджено можливість попереднього сорбційного очищення стічних вод виробництва соєвого молока сорбентами, отриманими з відходу сільськогосподарського виробництва, показана перспективність використання даних реагентів з використанням методу інтерполяційних поліномів. Також були продемонстровані математична модель для системи у динамічних режимах роботи, які підтвердили адекватність розробленої моделі реальної системи регулювання технологічним процесом каталітичного очищення газів. Показано, як за допомогою інтерполяційних базаточленів Лагранжа можна будувати аналітичні вирази, які описують залежність зміни фізико-хімічних параметрів стічної рідини від концентрацій реагенту.

Ключові слова: математичне моделювання, каталітична очистка, диференціальні рівняння, чисельні методи аналізу.

С.А. Примысская**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ**

В данной статье представлен обзор, в котором показано, как различные математические модели процессов каталитической очистки используются в наше время. Среди них лучшие всего зарекомендовали себя многочисленные методы анализа, с помощью которых можно решить дифференциальное уравнение либо их совокупность в виде системы дифференциальных уравнений. Важной особенностью математического описания, содержащего обычные дифференциальные уравнения, необходимость задачи начальных условий. Такие уравнения (особенно в частных производных) используют для математического описания динамики объектов с распределенными параметрами или стационарных режимов для объектов с параметрами, распределенными по нескольким координатам. Для указанных уравнений при описании динамики объекта наряду с исходными условиями нужно также задавать предельные условия, которые в общем случае являются функциями времени. Для стационарных объектов, описываемых уравнениями в частных производных, задают только предельные условия. Задачи с уравнениями у частных производных, как правило, отличаются наибольшей сложностью, и в большинстве случаев решение каждой конкретной задачи требует серьезной работы. В работах по решению дифференциальных уравнений использовался метод перехода к нестационарным задачам, которые аппроксимировались системами конечных уравнений. Представлена возможность выполнения математической обработки экспериментальных данных с помощью графических методов и аппарата интерполирования функции. Выяснено, что с помощью метода конечных разниц найдено численное решение краевой задачи для моделирования тепло-, массо- и влагообмена в ґрунтовых массивах с учетом каталитических микро- или наночастиц. Доказано, что для моделирования нестационарных режимов в неподвижном адіабатическом адсорбційно-каталітичеському приближении лучше использовать одномерную тритемпературную математическую модель. Подобную одномерную математическую модель можно применять и для описания процесса фильтрации суспензии твердых частиц через ячеистый тканевый фильтр. Были установлены кинетические закономерности процесса каталитической гидроочистки атмосферного газойля на каталізаторе KF-905-1.3Q с помощью надежной математической модели, пригодной для прогнозирования и оптимизации важнейших показателей качества атмосферного газойля. Таким образом, была исследована возможность предварительной сорбционной очистки сточных вод производства соевого молока сорбентами, полученными из ухода сельскохозяйственного производства, показана перспективность использования данных реагентов с использованием метода интерполяционных полиномов. Также была продемонстрирована математическая модель для системы в динамических режимах работы, подтвердившая адекватность разработанной модели реальной системы

регулювання технологічним процесом каталітичної очистки газів. Показано, як з допомогою інтерполяційних многочленів Лагранжа можна будувати аналітичні вирази, описуючі залежність змінних фізико-хімічних параметрів скляної рідини від концентрації реагента.

Ключевые слова: математическое моделирование, каталитическая очистка, дифференциальные уравнения, многочисленные методы анализа.

S. Prymska

MATHEMATICAL MODELING OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF CATALYTIC CLEANING

This article presents an overview that shows how different mathematical models of catalytic purification processes are used today. Among them, numerical methods of analysis for solving differential equations or their systems have proved to be the best. An important feature of the mathematical description, which contains ordinary differential equations, is the need to specify the initial conditions. Differential equations in partial derivatives are used to mathematically describe the dynamics of objects with distributed parameters or stationary modes for objects with parameters distributed over several coordinates. For these equations, when describing the dynamics of the object, along with the initial conditions, you must also specify the boundary conditions, which in the general case are functions of time. For stationary objects, which are described by equations in partial derivatives, set only the boundary conditions. Problems with equations in partial derivatives, as a rule, are of the greatest complexity, and in most cases the solution of each specific problem requires serious work. The method of transition to nonstationary problems, which were approximated by systems of finite equations, was used in the works on solving differential equations. The possibility of performing mathematical processing of experimental data using graphical methods and apparatus for interpolating the function is shown. It was found that the numerical solution of the boundary value problem for modeling heat, mass and moisture exchange in soil massifs taking into account catalytic microparticles or nanoparticles was found using the finite difference method. It is proved that it is better to use a one-dimensional three-temperature mathematical model for modeling nonstationary regimes in a stationary adiabatic adsorption-catalytic approximation. A similar one-dimensional mathematical model can be used to describe the process of filtering a suspension of solid particles through a porous tissue filter. The kinetic regularities of the process of catalytic hydrotreating of atmospheric gas oil on the catalyst KF-905-1.3Q were established using a reliable mathematical model suitable for forecasting and optimizing the most important indicators of the quality of atmospheric gas oil. Thus, the possibility of preliminary sorption treatment of wastewater from soy milk production with sorbents obtained from agricultural waste was investigated, the prospects of using these reagents using the method of interpolation polynomials were shown. A mathematical model for the system in dynamic modes of operation was also demonstrated, which confirmed the adequacy of the developed model of the real control system by the technological process of catalytic gas purification. It is shown how, with the help of Lagrange interpolation polynomials, it is possible to construct analytical expressions that describe the dependence of the change in the physicochemical parameters of the wastewater on the reagent concentration.

Keywords: mathematical modeling, catalytic purification, differential equations, numerical methods of analysis.

Вступ. Задачі промислового каталізу невід'ємно пов'язані з необхідністю вирішення систем нелінійних диференціальних рівнянь. Їх аналітичне рішення в більшості випадків було неможливе в наслідок багатьох факторів. У зв'язку з цим насамперед у Німеччині з 1925 р., а потім у США почала розвиватися теорія подібності до хіміко-технологічних процесів. Однак практика її застосування призводила до помилок при масштабному переході та у країнах Заходу сформувалася система дослідних установок поступово зростаючого розміру для здійснення масштабного переходу від лабораторних досліджень до промислових умов. Новизна математичного моделювання хіміко-технологічних процесів у 1957–1960 рр. полягала у розширенні можливостей вирішення математичних завдань, наданих електронно-обчислювальною технікою. Першою такою науковою базою для моделювання була лампова аналогова моделювальна установка МН-7, яка дозволяла проводити розв'язання систем нелінійних звичайних рівнянь до шостого порядку [1].

Аналіз останніх досліджень. Розвиток математичного моделювання був дуже тісно пов'язаний з великими досягненнями у сфері обчислювальної математики. Істотно розвинуто метод кінцевих різниць як ефективний метод розв'язання диференціальних рівнянь. Широке застосування цього методу для завдань промислового каталізу було принципово неможливе раніше у зв'язку з необхідністю проведення великої кількості арифметичних операцій. У роботах з розв'язання диференціальних рівнянь використовувався метод переходу до нестационарних завдань, які апроксимувалися системами кінцевих рівнянь. В одновимірному випадку для здійснення неявних різницевої схем застосовувався метод прогонки або метод розрахунку, що «біжить». Для багатовимірних завдань найбільш дієвим методом був метод розщеплення (метод дробових кроків). Але зі зростанням потужності комп'ютерних машин, а також з розвитком розробки програмного забезпечення, з'являється потреба у вдосконаленні математичних моделей різноманітних технологічних процесів, насамперед процесів каталітичної очистки. При математичному моделюванні різних процесів та явищ в наш час, найчастіше використовуються чисельні методи аналізу, оскільки вони дають більш точні результати, хоча і вимагають відповідних машинних ресурсів. У цій роботі проведено огляд різних математичних моделей для

процесів каталітичної очистки, які почали використовувати за останній час. Крім того, деякі математичні методи були вперше застосовані для деяких процесів каталітичної очистки. Також в даній статті показано, нові методи математичного моделювання які дозволили більш адекватно описати технологічну задачу ніж у минулі роки.

Цілями даної статті є порівняння сучасних методів математичного моделювання, де ми покажемо переваги нелінійних методів над лінійними, коли вперше була застосована одновимірна модель в каталітичних процесах. Вперше, що за допомогою методу скінченних різниць знайдено чисельний розв'язок крайової задачі для моделювання тепло-, масо- та вологообміну в ґрунтових масивах з урахуванням каталітичних мікро- або наночастинок. А також продемонстрована можливість виконання математичної обробки експериментальних даних за допомогою графічних методів та апарату інтерполювання функції.

Виклад основного матеріалу. В роботі [2] представлена математична модель, яка базується на нестационарній кінетичній моделі, враховує вплив зміни технологічних параметрів, обсягу і складу сировини, що переробляється, а також типу каталізатора. Розробка такої математичної моделі була використана для оптимізації процесу гідроочищення атмосферного газозойлю. За основу математичної моделі каталітичного перетворення реагентів в хімічному реакторі було обрано кінетичну схему у вигляді диференціальних рівнянь, де кожне рівняння відповідало протіканню конкретної реакції. Було показано, що на створення схеми перетворення вуглеводнів величезний вплив мали методи поділу та дослідження покомпонентного складу сировини. На основі наведеної в роботі схеми перетворень вуглеводнів складена кінетична математична модель процесу гідроочищення атмосферного газозойлю. Модель являє собою систему диференціальних рівнянь, що відображає зміну кожного псевдокомпонента від часу протікання процесу. Знаходження кінетичних параметрів здійснено на основі експериментальних даних, отриманих на лабораторній каталітичній установці. Встановлені кінетичні закономірності процесу каталітичного гідроочищення атмосферного газозойлю, на каталізаторі KF-905-1.3Q, лягли в основу надійної математичної моделі, придатної для прогнозування та оптимізації найважливіших показників якості атмосферного газозойлю.

В роботі [3] описано пропозиції щодо модернізації існуючої системи регулювання вузла каталітичного очищення газів. Показано, що найбільш відповідним математичним апаратом, що дозволяє вирішувати завдання моделювання та управління такого роду об'єктів, є апарат нечітких множин. Дана модернізація дозволяє нечітко розглядати певні робочі параметри, які роблять взаємний вплив один на одного, шляхом введення в регулятора, побудованого на пристрої нечіткої логіки. Результати моделювання даної системи у динамічних режимах роботи підтвердили адекватність розробленої моделі реальної системи регулювання технологічним процесом каталітичного очищення газів.

Відкриття впорядкованих мезопористих матеріалів відкрило великі можливості для нових застосувань у гетерогенному каталізі, наприклад, в процесах очищення ґрунту. Таким чином у роботі [4] була виконана розробка математичної моделі для моделювання тепло-, масо- та вологообміну в ґрунтових масивах з урахуванням каталітичних мікро- або наночастинок. Була представлена нелінійна математична модель розподілу забруднень у ненасичених каталітичних пористих середовищах в неізотермічних умовах. За допомогою методу скінченних різниць знайдено чисельний розв'язок відповідної крайової задачі, а також представлено аналітичне рішення масообміну в каталітичних мікро- або наночастинках (1):

$$\sigma_1 \frac{\partial c_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_1(c_1) \frac{\partial c_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{T_1} \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \nu(c_1) \frac{\partial c_1}{\partial x} - \gamma_1 c_1 + \gamma_2 c_2 \quad (1)$$

Чисельні експерименти та їх аналіз проводили за допомогою програмного комплексу NanoSurface.

У роботі [5] було запропоновано загальну модель поглинання з неелементарною хімічною реакцією. Моделювання системи проводилося в межах плівки застійної рідини, що оточує бульбашки в реакторі барботажної колони. Для розв'язування основних диференціальних рівнянь використовувався метод скінченних різниць. Модель розв'язана для загальних порядків реакції компонентів із загальною граничною умовою. Тому він включає всі кінетичні режими, засновані на теорії плівки, і здатний передбачити систему поглинання зі складною оборотною або необоротною хімічною реакцією. Також в роботі був досліджувався вплив різних параметрів, таких як константа рівноваги, концентрація компонентів та порядок хімічних реакцій, на

посилення поглинання. Результати показали, що початкова концентрація та порядок реакції компонентів можуть суттєво впливати на посилення поглинання.

В роботі [6] була виконана математична обробка експериментальних даних за допомогою графічних методів та апарату інтерполювання функції. За допомогою інтерполяційних багаточленів Лагранжа [7] були побудовані аналітичні вирази, що описують залежність зміни фізико-хімічних параметрів стікної рідини від концентрації реагенту, що досліджується. Інтерполяція функції є найважливішим апаратом чисельного аналізу, основі якого будується більшість методів розв'язання різних прикладних завдань. Завдання інтерполювання полягає у наступному. За n даними дискретним значенням $x_1, x_2, \dots, x_n$ і відповідним їм значенням $f(x_1), \dots, f(x_n)$ функції будують аналітичний вираз функції $f(x)$, що дає можливість отримати будь-яке значень x . Це дозволяє замість багаторазового безпосереднього проведення експериментальних вимірювань отримати результати вимірювань з аналітичних виразів і формул. Використовуваний у роботі [6] інтерполяційний многочлен Лагранжа (2) був записаний як:

$$L_n(x) = \sum_{i=1}^n f(x_i) \Phi_i(x) \quad (2)$$

Були наведені аналітичні вирази, що описують зміну значень хімічного споживання кисню в залежності від часу контакту та виду сорбенту, що використовується:

- тирси: $f(x) = 0,0004x^4 - 0,1027x^3 + 9,7135x^2 - 328,88x - 18000$;
- лушпиння оболонок насіння гороху $f(x) = 0,0012x^4 - 0,2424x^3 + 16,905x^2 - 369,9x + 18000$;
- пшеничної соломи $f(x) = 0,001x^4 - 0,2208x^3 + 16,182x^2 - 373,96x + 18000$;
- ячної муки $f(x) = 0,0009x^4 - 0,1845x^3 + 12,664x^2 - 277,79x + 18000$;
- лляна костра $f(x) = 0,001x^4 - 0,2208x^3 + 16,182x^2 - 373,96x + 18000$;
- пшеничного лушпиння $f(x) = 0,0009x^4 - 0,1845x^3 + 12,664x^2 - 277,79x + 18000$.

Таким чином, було досліджено можливість попереднього сорбційного очищення стічних вод виробництва соєвого молока сорбентами, отриманими з відходу сільськогосподарського виробництва, показана перспективність використання даних реагентів з використанням методу інтерполяційних поліномів.

Нещодавно у роботі [8] повідомлялося про застосування іонних рідин на основі нафталіну для застосування фотолюмінесценції при кімнатній температурі, досліджене за допомогою математичного моделювання. Показано переваги зонного очищення, заснованого на теорії затвердіння/сегрегації. Розділення розчиненої речовини і розчинника поступово збільшувалося через проходи розплавленої зони, які рухалися вздовж бруска. Домішки накопичувалися на його кінцях, в результаті чого у проміжній області утворювався матеріал високої чистоти. Ця робота спрямована на вирішення завдання, використовуючи напіваналітичну/числову модель у поєднанні з двома підходами до штучного інтелекту. Експериментальні профілі домішок родаміну після ряду проходів розплавленої зони в нафталіновому бруску порівнювалися з теоретичними прогнозами математичної моделі для цілей перевірки. Два підходи до штучного інтелекту, що використовуються роєм, є біологічними алгоритмами: Particle Swarm Optimization, який імітує поведінку польоту птаха, задаючи швидкість і координати для кожного птаха та Cuckoo Search. Показано, що кожен алгоритм успішно взаємодіє з математичною моделлю, який дозволив оптимізувати очищення нафталіну шляхом зонного рафінування. Обидва алгоритми продемонстрували, що кращого ефекту очищення можна досягти, використовуючи більші довжини зони для початкових проходів зони. Показано, що Cuckoo Search потребує менше ітерацій для досягнення конвергенції порівняно з оптимізацією Particle Swarm.

Коефіцієнт розподілу розчиненої речовини, також відомий як коефіцієнт розподілу (k), є співвідношенням твердого і рідкого складу, тобто $k = C_S / C_L$, зазвичай визначається з урахуванням рівноважних умов охолодження, тобто за допомогою фазових діаграм. Було показано, що суміш розчинених речовин зустрічається лише в дифузійному шарі (δ), домішки дифузії в розплав (D), а також рівномірна концентрація домішок в рідині, що залишилася (C_L) за рахунок ефектів конвекції. Ефективний коефіцієнт розподілу був визначений як [9]:

$$k_{ef} = \frac{k}{k + (1 - k) \exp\left(\frac{-v\delta}{D}\right)} \quad (3)$$

Рівняння (3) також дозволило оцінити вплив швидкості зміщення межі тверде тіло/рідина (v) на значення коефіцієнта розподілу, $k_{ef} \rightarrow k$ при $v \rightarrow 0$, а $k_{ef} \rightarrow 1$ при $v \rightarrow \infty$, $k \leq k_{ef} \leq 1,0$. Вираз k_{ef} можна застосувати до аналізу перерозподілу розчину в кінцевій системі, якщо її довжина значно

перевищує дифузійний прикордонний шар у рідині. Що стосується ефектів очищення, то бажаним є максимальний ступінь змішування, що забезпечується $k_{ef} \rightarrow k$, який також дозволяє використовувати більш високі швидкості переміщення зони, як це було видно з рівняння (3).

В роботі [10] було проведене математичне моделювання каталітичного гідрування рослинних олій, яке включало стадію фільтрації. Була розроблена одновимірна математична модель, яка врахувала основні фізичні явища процесу фільтрації, такі як просочування частинок через пористий фільтр, нагромадження частинок уздовж пор фільтра та поступове їх згортання та зростання. Модель дозволила передбачити, що сканування полідисперсних частинок проникає крізь фільтруючу тканину, і в той же час накопичується всередині тканини та на її зовнішній поверхні. Передбачено, що гідравлічний опір кеку збільшується лише за рахунок зростання його висоти, а гідравлічний опір фільтруючого полотна збільшується за рахунок частинок, які затрималися в порах. Було проведено чисельний аналіз моделі в діапазоні параметрів, характерних для промислових умов. Встановлено, що ефективність процесу, яка була визначена як мінімальний час, необхідний для фільтрації певної кількості гідрогенізованої олії до максимального ступеня очищення каталізатора, залежить головним чином від часу, за який утворюється шар достатньої висоти. Модель була перевірена шляхом порівняння прогнозованих результатів з експериментальними даними. Для опису процесу фільтрації суспензії твердих частинок через пористий тканинний фільтр розроблено одновимірну математичну модель. Одновимірна математична модель передбачає, що: пористість, діаметр пор та інші структурні властивості шару кеку не змінюються з часом; після того, як висота кеку досягає критичного значення H_{cake} , частинки більше не можуть проникати через фільтр, а осідають на його зовнішній поверхні. Таким чином, після розв'язання системи диференціальних рівнянь було показано, що висота гідравлічного опору в кожен момент часу може бути виражена як (4):

$$H_{cake}(t) = \frac{m^{in} - m^{out} - \bar{m} - \tilde{m}}{S} \cdot \left(\frac{1}{\rho_{solid}} + \frac{(n-1)}{\rho_{liquid}} \right) \quad (4)$$

В роботі [11] була проведена оптимізація геометрії шару адсорбент-каталізатор в адсорбційно-каталітичному процесі видалення летких органічних сполук за допомогою математичного моделювання. Для 2D осесиметричного моделювання процесу з внутрішнім розташуванням нагрівача, що ініціює самодостатню регенерацію адсорбент-каталізатор, було використано комерційне програмне забезпечення COMSOL Multiphysics. Модель враховувала реакції адсорбції та окислення на внутрішній поверхні гранул, масообмін між газовим потоком і шаром каталізатора, дифузію в гранулах та теплообмін у шарі. Моделювання показало збій регенерації адсорбент-каталізатор у циліндричному шарі. У той же час значно ефективнішими виявилися ложі з входною частиною у формі усіченого конуса. За допомогою математичного моделювання було розглянуто різні кути сторони конуса та витрати газу. У дослідженні визначено оптимальні параметри геометрії для найкращої продуктивності процесу. Для призначення рівнянь моделі використовувалися вбудовані фізичні інтерфейси. Каталітичний шар був представлений у вигляді пористого середовища з інтерфейсом «Reactive Pellet Bed», що дає додатковий розмір, пов'язаний з радіусом гранул. Таким чином, матеріальний баланс у шарі встановлювався інтерфейсом «Транспортування розбавлених форм у пористих середовищах» з включеним модулем «Реактивний шар гранул» (5).

$$\varepsilon_p \frac{\partial c_i}{\partial t} - \nabla \cdot (D_{e,i} \nabla c_i) + u \cdot \nabla c_i = S_i \quad (5)$$

У роботі [12] було розглянуто новий підхід до підвищення ефективності адсорбційно-каталітичного очищення газів від летких органічних сполук, який був заснований на застосуванні структурованого комбінованого нерухомого шару, що складається з великих гранул адсорбенту-каталізатора і мікрОВОЛОКНИСТОГО каталізатора. Чисельне математичне моделювання показало, що в ході високотемпературної окисної регенерації сорбенту-каталізатора за рахунок значно більш високої зовнішньої питомої поверхні мікрОВОЛОКНИСТОГО каталізатора нагрівається значно швидше, ніж великі гранули сорбенту-каталізатора. Це дозволило ефективно окислювати неокислені леткі органічні сполуки, що десорбуються з поверхні сорбенту-каталізатора, тим самим мінімізуючи десорбційні втрати та суттєво підвищуючи ступінь очищення газів. Для моделювання нестационарних режимів у нерухомому адіабатичному адсорбційно-каталітичному шарі використовувалася одновимірна тритемпературна математична модель, що враховує протікання реакційних і сорбційних процесів, тепло і масообмін як між потоком газу і поверхнею каталізаторів, так і всередині гранул сорбента-каталізатора, а також теплопровідність. Для спрощення моделі

враховувалася інерційність системи лише стосовно поверхневих концентрацій проміжних речовин і температури каталізаторів, параметри газової фази (температура, склад) вважалися квазістаціонарними стосовно них. Зміна концентрацій реагентів у газовій суміші по довжині шару з урахуванням процесів зовнішнього масобміну описувалося рівняннями (6) (7).

$$u \frac{\partial C_A}{\partial l} = \beta_p^A S_p (C_{p|R}^p - C_A) + \beta_f^A S_f (C_A^f - C_A) \quad (6)$$

$$u \frac{\partial C_0}{\partial l} = \beta_p^0 S_p (C_{p|R}^p - C_0) + \beta_f^0 S_f (C_0^f - C_0) \quad (7)$$

В роботі [13] розроблено математичну модель, яка дозволяє адекватно реєструвати технологічний процес очищення прозорих нафтових фракцій у нафтопереробній та нафтохімічній промисловості, проаналізовано положення сучасних методів, що використовуються для виконання завдань оптимізації, та знайдено оптимальне рішення. Також було виконано [14] математичне моделювання процесу очищення стічних вод методом активного мулу для можливості підвищення ефективності в промисловості WOD-KAN.

Висновок. З огляду досліджень видно, що при математичному моделюванні різних процесів та явищ в наш час, найчастіше використовуються чисельні методи аналізу для розв'язку диференціальних рівнянь або їх систем. Для диференціальних рівнянь при описі об'єкта в динаміці необхідно задавати початкові умови та граничні умови. Для стаціонарних об'єктів, які описуються рівняннями в часткових похідних, задають тільки граничні умови. У роботах з розв'язання диференціальних рівнянь використовувався метод переходу до нестаціонарних завдань, які апроксимувалися системами кінцевих рівнянь. Показана можливість виконання математичної обробки експериментальних даних за допомогою графічних методів та апарату інтерполювання функції. З'ясовано, що за допомогою методу скінченних різниць знайдено чисельний розв'язок крайової задачі для моделювання тепло-, масо- та вологообміну в ґрунтових масивах з урахуванням каталітичних мікро- або наночастинок. Доведено, що для моделювання нестаціонарних режимів у нерухомому адіабатичному адсорбційно-каталітичному наближенні краще використовувати одновимірну тритемпературну математичну модель. Подібну одновимірну математичну модель можна застосовувати і для опису процесу фільтрації суспензії твердих частинок через пористий тканинний фільтр. Були встановлені кінетичні закономірності процесу каталітичної гідроочистки атмосферного газойлю, на каталізаторі KF-905-1.3Q, за допомогою надійної математичної моделі, придатної для прогнозування та оптимізації найважливіших показників якості атмосферного газойлю. Таким чином, було досліджено можливість попереднього сорбційного очищення стічних вод виробництва соєвого молока сорбентами, отриманими з відходу сільськогосподарського виробництва, показана перспективність використання даних реагентів з використанням методу інтерполяційних поліномів. Також були продемонстрована математична модель для системи у динамічних режимах роботи, які підтвердили адекватність розробленої моделі реальної системи регулювання технологічним процесом каталітичного очищення газів. Показано, як за допомогою інтерполяційних багаточленів Лагранжа можна будувати аналітичні вирази, які описують залежність зміни фізико-хімічних параметрів стічної рідини від концентрації реагенту. Планується продовжувати роботу над експериментальним випробування двох із запропонованих підходів до процесів каталітичної очистки.

Список використаних джерел:

1. Слинко М. Г. История развития математического моделирования каталитических процессов и реакторов. Теоретические основы химической технологии. 2007. Т. 41, № 1. С. 16–34.
2. Пучкова А. А. Математическое моделирование процесса гидроочистки атмосферного газойля. Химия и химическая технология в XXI веке: материалы XXI Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых имени выдающихся химиков ЛП Кулёва и НМ Кижнера, посвященной 110-летию со дня рождения профессора АГ Стромберга, 21–24 сентября 2020. С. 404–405.
3. Морозов И. Н., Пророков А. Е., Богатилов В. Н. Модернизация и математическое моделирование системы регулирования узла каталитической очистки газов агрегата производства неконцентрированной азотной кислоты. Труды Кольского научного центра РАН. 2011. Т. 7.

4. Vlasyuk A., Zhukovskyy N., Zhukovska V., Pinchuk O., Rajab H. Mathematical Modeling of Heat, Mass and Moisture Transfer in Catalytic Porous Media. WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics. 2020. Vol. 15. P. 52-59. DOI:10.37394/232011.2020.15.8
5. Jangara H., Shayesteh K., Asl M. S. Mathematical modeling of absorption accompanied by a non-elementary reversible chemical reaction. Chemical Engineering Research and Design. 2020. Vol. 157. P. 58–64. DOI:10.1016/j.cherd.2020.02.030
6. Шакиров Ф. Ф., Ахмадиев М. Г., Фридланд С. В., Шайхiev И. Г. Математическое моделирование процессов очистки сточных вод с применением интерполяционных полиномов. Вестник Казанского технологического университета. 2009. Т. 6.
7. Бахвалов, Н.С. Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. Москва : Наука, 1987. 356 с.
8. Silva-Santos C. H., Morais J. V. F, Bertelli F., Garcia A., Cheung N. Purification of naphthalene by zone refining: Mathematical modelling and optimization by swarm intelligence-based techniques. Separation and Purification Technology. 2020. Vol. 234. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116089>
9. Pfann W.G. Principles of zone-melting. Trans. Am. Inst. Min. Metall. Eng. 1952. Vol. 194. P. 747–753.
10. Vernikovskaya N. V., Chumachenko V. A., Romanenko A. V., Dobrynkin N. M. Filtration of the catalyst suspension in hydrogenated oil through the woven cloth: Mathematical model of the process accounting for dynamics of the cake growth and filter pore blockage. Separation and Purification Technology. 2019. Vol. 212. P. 355–367. DOI:10.1016/j.seppur.2018.11.007
11. Zazhigalov S., Chumakova N., Zagoruiko A. Adsorption-catalytic process for removal of volatile organic compounds from lean waste gases: Optimization of the adsorbent-catalyst bed geometry. Chem. Eng. & Proces. Inten. 2018. Vol. 132. P. 1–10.
12. Зажигалов С. В., Чумакова Н. А., Загоруйко А. Н. Моделирование мультидисперсной адсорбционно-каталитической системы для очистки отходящих газов от органических примесей. Теоретические основы химической технологии. 2013. Т. 47, № 2. С. 224–224.
13. Исмаиллы Н. С., Магеррамова Т. М. Математическое моделирование технологических устройств по очистке прозрачных нефтяных фракций от органических кислот и разработка системы оптимизации управления. Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів та студентів «Інформаційні технології в сучасному світі: дослідження молодих вчених». 2018. С. 53.
14. Drewnowski J. Modelowanie matematyczne w procesie oczyszczania ścieków metodą osadu czynnego. Kurier WOD-KAN. 2016. Vol. 1. P. 8–9.

Ю.Ю. Жигуц¹, В.Д. Рудь²ДВНЗ «Ужгородський національний університет»¹Луцький національний технічний університет²

ТЕХНОЛОГІЯ ЛАЗЕРНОГО НАПИЛЕННЯ ТОНКИХ ПЛІВОК

Для розв'язання проблеми отримання періодичних тонкоплівкових багатошарових структур сформованих з складних сполук необхідна інформація про основні параметри конденсації пари на підкладку. Результати розв'язку цієї проблеми можуть бути використані при лазерному осадженні плівок для отримання дзеркал м'якого рентгенівського діапазону та надграток. Теоретичні і експериментальні дослідження авторів присвячені дослідженню нових можливостей лазерного напилення плівок речовин гігантськими лазерними імпульсами, що поєднують складний хімічний склад та унікальні фізичні властивості, а саме сегнетоелектрика $SbSJ$, який характеризується аномально високими значеннями п'єзоефіцієнта та сегнетоелектричних параметрів, та п'єзоелектрика $Bi_{12}GeO_{20}$. Для цих матеріалів в експериментах при напиленні за допомогою мас-спектрометрії визначались основні параметри лазерної плазми. Авторами проведений аналіз електронограм та структури плівок $SbSJ$, визначені основні параметри та оптимальні умови нанесення плівок на підкладку.

Ключові слова: лазерні імпульси, мішень, фаза, плівка, напилення, випаровування, цуги, структура.

Ю.Ю. Жигуц, В.Д. Рудь

ТЕХНОЛОГИЯ ЛАЗЕРНОГО НАПЫЛЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК

Для решения проблемы получения периодических тонкопленочных многослойных структур сформированных из сложных соединений необходима информация про основные параметры конденсации пара на подкладку. Результаты решения этой проблемы могут быть использованы при лазерном осаждении пленок для получения зеркал мягкого рентгеновского диапазона и подрешеток. Теоретические и экспериментальные исследования авторов посвящены исследованию новых возможностей лазерного напыления пленок веществ гигантскими лазерными импульсами, которые объединяют сложный химический состав и уникальные физические свойства, а именно сегнетоэлектрика $SbSJ$, который характеризуется аномально высокими значениями пьезокэффициента и сегнетоэлектрических параметров, и пьезоэлектрика $Bi_{12}GeO_{20}$. Для этих материалов в экспериментах при напылении с помощью масс-спектрометрии определялись основные параметры лазерной плазмы. Авторами проведен анализ электронограмм и структуры пленок $SbSJ$, определены основные параметры и оптимальные условия нанесения пленок на подкладку.

Ключевые слова: лазерные импульсы, мишень, фаза, пленка, напыление, испарение, цуги, структура.

Yu. Zhiguts, V. Rudj

LASER SPRAYING TECHNOLOGY OF THIN FILMS

Information of the main parameters of vapour condensation on the lining, as a resulted of solve the problem of obtaining periodic thin-envelope multilayer structures formed from complex compounds, is required. The results of solving this problem can be used in laser deposition of envelope to obtain mirrors of the soft X-ray range and sublattices. The authors' theoretical and experimental studies are devoted to the study of new possibilities for laser deposition of envelope of substances by giant laser pulses that combine a complex chemical composition and unique physical properties, namely, the ferroelectric $SbSJ$, which is characterized by anomalously high values of the piezoelectric coefficient and ferroelectric parameters, and the piezoelectric $Bi_{12}GeO_{20}$. In experiments with deposition using mass spectrometry, the main parameters of the laser plasma for these materials were determined. The authors analysed the electrograms and structure of $SbSJ$ envelopes, determined the main parameters and optimal conditions for applying the envelope to the substrate.

Key words: laser pulses, target, phase, film, sputtering, evaporation, trains, structure.

Вступ. Унікальні властивості лазерного випромінювання: когерентність, висока імпульсна потужність, мала кутова розбіжність надають можливість порівняно легко фокусувати його оптичними системами, отримуючи при цьому надзвичайно високі густини потужності. Перші ж дослідження дії такого лазера на поверхню дали несподіваний результат – кінетична енергія емітованих компонент при потужностях лазера до 10^6 Вт складала сотні електронвольт. Більшість параметрів лазерної плазми нелінійним чином залежать від густини потужності лазерного випромінювання. З іншого боку, ідея розігрівання речовини до термоядерних температур лазерним випромінюванням [1], стимулювала низку досліджень плазми, пов'язаних з високоінтенсивним опроміненням конденсованих речовин [1-6].

Мета дослідження. Розробити спосіб отримання тонких плівок складних сполук з одночасним визначенням найважливіших параметрів конденсації при опроміненні цугом лазерних імпульсів.

Постановка проблеми. У сучасній мікроелектроніці важливе місце займає проблема отримання періодичних тонкоплівкових багатошарових структур сформованих з складних сполук. Саме тому дослідження способу отримання плівок та встановлення параметрів конденсації

набувають особливо великого значення. Результати розв'язку цієї проблеми можуть бути використані при лазерному осадженні плівок для отримання дзеркал м'якого рентгенівського діапазону та надграток.

Теоретичні і експериментальні дослідження.

Масову товщину плівок оцінювали за зсувом резонансної частоти п'єзокварцового вібратора з чутливістю 0,2 нм. Оскільки на графіках розмірних залежностей питомого опору плівок в діапазоні розглянутих товщин плівок присутні лінійні ділянки, то у відповідності до моделі плоскопаралельного шару Фукса-Зондгаймера зробили висновок, що мікроструктура плівок не змінюється при зміні її товщини для багатошарової сандвічевої шаруватої структури.

Авторами проведений статистичний аналіз добротності отриманих результатів.

Попередньо визначено кількість експериментальних вимірювань необхідних для отримання вибірки невеликого об'єму, щоб оцінити середній розмір товщини плівки H з точністю $\varepsilon=0,05$ і надійністю $\alpha=0,95$. Для обчислення середнього квадратичного відхилення S було взято вибірку об'ємом $n_1=5$ шт. В результаті обробки дослідних даних цієї вибірки $S=0,06$ нм.

Визначаємо за формулою функцію $S_n(t_c)$ [7]:

$$S_n(t_c) = \frac{\alpha + 1}{2}, \quad (1)$$

$$S_n(t_c) = \frac{0,95 + 1}{2} = 0,975.$$

За [7] у залежності від значення $S_n(t_c)=0,975$ і $n_1=5$ знаходимо значення $t_c=2,8$. Підставимо знайдені величини у формулу (2):

$$n = \frac{t_c^2 S^2 + \varepsilon^2}{\varepsilon^2}, \quad (2)$$

отримаємо

$$n = \frac{2,8^2 \cdot 0,06^2 + 0,05^2}{0,05^2} \cong 12,3.$$

Отже, об'єм малої вибірки для добротності результатів (надійності) 0,95 склав $n=13$.

Цей розрахунок встановив необхідну кількість замірювання даних.

Для дослідження нових можливостей лазерного напилення плівок гігантськими лазерними імпульсами були вибрані речовини, які поєднують складний хімічний склад та унікальні фізико-хімічні властивості.

I. Сегнетоелектрик – напівпровідник $SbSJ$, який характеризується аномально високими значеннями п'єзоефіцієнта та сегнетоелектричних параметрів.

II. П'єзоелектрик $Bi_{12}GeO_{20}$. Для нього в експериментах при напиленні за допомогою мас-спектрометрії [6, 8] визначались основні параметри лазерної плазми.

Діаграма направленості розпилення в діапазоні густин потоку $q=10^8 \dots 10^{10}$ Вт/см² симетрична відносно нормалі до поверхні мішені в центрі фокальної плями. При цьому розпилення відбувається переважно в тілесний кут ~ 1 ср.

Просторові параметри розпилення контролювалися таким чином: проводилось осадження плівки декількома десятками "пострілів" на підкладку паралельну поверхні мішені; напилена плівка розглядалась у відбитому монохроматичному світлі (інтерференційні лінії однакової товщини, що спостерігались при цьому, мали вигляд концентричних кіл з центром, який знаходиться на нормалі до поверхні мішені). Вже при густині потоку $q=5 \cdot 10^7$ Вт/см² експериментально спостерігається помітне випаровування мішені. Подальше збільшення q призводить до порівняно більш сильного зростання маси випареної речовини. В діапазоні густин потоку $10^8 \dots 10^{10}$ Вт/см² маса випареної за 1 імпульс речовини складає

$2 \cdot 10^{-6} \dots 5 \cdot 10^{-5}$ г. Для пікової потужності лазерного випромінювання $W=10^7$ Вт, максимальне випаровування мішені $SbSJ$ досягається при густині потоку $q=5 \cdot (10^8 \dots 10^9)$ Вт/см². Для мішені $Bi_{12}GeO_{20}$ це значення рівне $q=5 \cdot 10^9$ Вт/см². Необхідно відмітити, що для широкого класу речовин з різними фізико-хімічними властивостями максимальне випаровування мішеней досягається при $q=5 \cdot 10^8 \dots 10^9$ Вт/см², що вказує на подібність механізмів випаровування під дією лазерного випромінювання. При більшій густині нагріваючого випромінювання починається екранування мішені продуктами розпилення з інтенсивним її нагрівом, а випарена маса складає при цьому $m=3,8 \cdot 10^{-5}$ г, що добре узгоджується з масою, вирахованою інтегруванням товщини напиленої плівки в межах тілесного кута переважного розпилення. Прямі виміри кількості випареної речовини

вказують на коректність приведеного способу оцінки в діапазоні густини потужності $q=10^8 \dots 10^{10}$ Вт/см². Глибина випаровування за один імпульс складає $l_{vol}=m/\rho \cdot S=10^{-4}$ см, де S – площа фокальної плями. Перед фронтом випаровування є нагрітий внаслідок теплопровідності шар товщиною (L_T):

$$L_T = \sqrt{\sigma \tau} = \sqrt{\frac{k \tau}{c_p}} = 10^{-5} \text{ см} \ll L_{vol}, \quad (3)$$

де σ – коефіцієнт температуропровідності (см²/с), τ_L – тривалість лазерного імпульсу (с), ρ – густина речовини (г/см³), k – коефіцієнт теплопровідності, c_p – питома теплоємність,

Це означає, що в нашому випадку механізм випаровування не обумовлений теплопровідністю. Визначимо густину частинок газової фази безпосередньо біля поверхні підкладки. Із закону збереження потоку частинок на межі пара-підкладка можна записати:

$$m \cdot n \cdot v_{mid} = \rho \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t}, \quad (4)$$

де m – маса молекули або атома, n – шукана густина пари, v_{mid} – середня швидкість компонент, Δh – товщина осадженого за один імпульс шару матеріалу, Δt – час осадження.

Результати обчислення і вимірювань представлені в табл. 1.

Як видно з формули (2) і проведених розрахунків густина частинок зменшується з відстанню за законом $n \sim \frac{\Delta h}{\Delta t} \sim \frac{1}{L^3}$ ($\Delta t \sim L$, $\Delta h \sim \frac{1}{L^3}$ в діапазоні $L=5 \dots 10$ см. Це відповідає вільному поширенню частинок. Дещо занижені значення n в діапазоні $L=5 \dots 10$ см по відношенню до кубічної залежності пов'язані з ревіпаровуванням плівок.

Табл. 1

Результати встановлення густини частинок газової фази

Параметри	L , см	0,3	1	2	5	10
$q=10^9$ Вт/см ² , $m=2 \cdot 10^{-5}$ г	n , см ⁻³	$1 \cdot 10^{19}$	$3 \cdot 10^{17}$	$4 \cdot 10^{16}$	$3 \cdot 10^{15}$	$5 \cdot 10^{14}$
$q=5 \cdot 10^8$ Вт/см ² , $m=1,5 \cdot 10^{-6}$ г	n , см ⁻³	$7 \cdot 10^{18}$	$2 \cdot 10^{17}$	$3 \cdot 10^{16}$	$2 \cdot 10^{15}$	$4 \cdot 10^{14}$
$q=10^8$ Вт/см ² , $m=5 \cdot 10^{-6}$ г	n , см ⁻³	$2 \cdot 10^{18}$	$5 \cdot 10^{16}$	$1 \cdot 10^{16}$	$6 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{14}$
$q=10^9$ Вт/см ² , $m=8 \cdot 10^{-5}$ г	n , см ⁻³	$1 \cdot 10^{19}$	$2,6 \cdot 10^{17}$	$3,3 \cdot 10^{16}$	$2 \cdot 10^{15}$	$2,6 \cdot 10^{14}$
$q=5 \cdot 10^8$ Вт/см ² , $m=5 \cdot 10^{-6}$ г	n , см ⁻³	$5,6 \cdot 10^{18}$	$1,5 \cdot 10^{17}$	$2 \cdot 10^{16}$	$1,5 \cdot 10^{15}$	$1,8 \cdot 10^{14}$
$q=10^8$ Вт/см ² , $m=1,2 \cdot 10^{-5}$ г	n , см ⁻³	$1,3 \cdot 10^{18}$	$4 \cdot 10^{16}$	$5 \cdot 10^{15}$	$3 \cdot 10^{14}$	$4 \cdot 10^{14}$

Апроксимація степеневі залежності коректна аж до розмірів плями фокусування $\sim \sqrt{S} = 3$ мм, тобто області переходу одновимірного руху в тривимірний. Саме в цій області відбуваються всі процеси, які формують енергетичний спектр і склад частинок, що вилітають (іонізація, рекомбінація, прискорення). При густинах потоку нагріваючого випромінювання $q \geq 10^9$ Вт/см² характер емісії з поверхні напівпровідника в значній мірі визначається рекомбінаційними процесами. І дійсно, при таких параметрах лазерного випромінювання густина у фокальному об'ємі досягає значень $n \approx 10^{19}$ см⁻³, а в мас-спектрах присутні іони S^{2+} , J^{2+} з потенціалами іонізації $J=23,4$ еВ та $19,4$ еВ, що відповідає електронній температурі $T_e \approx 4 \dots 5$ еВ. Згідно рівняння іонізаційного стану [8], при таких параметрах плазмового згустку в фокальному об'ємі має досягатися майже повна іонізація. Однак, в лазерній емісії все ж таки значну частку складають нейтральні компоненти ($\alpha=10^{-2} \dots 10^{-4}$), що вказує на наявність рекомбінаційних процесів в фокальному об'ємі. Таким чином, при дії гігантського імпульсу лазера обмежений об'єм речовини мішені за дуже короткий час перетворюється в високотемпературний згусток плазми, який адіабатично розширюється. Застосований метод випаровування складної сполуки дає змогу здійснювати осадження плівок в екстремальних умовах надшвидкого надходження на підкладку іонів та збуджених атомів і молекул. Можливість досягнення великих пересичень, коли критичними зародками є окремі атоми, велика степінь енергетичної активації частинок, які конденсуються, сприяють реакціям «кристалізації», що служить причиною зниження температури орієнтованого росту та отримання суцільних монокристалічних плівок напівпровідників [9, 10]. При температурі підкладки $t_{pad}=20 \dots 100^\circ\text{C}$ отримані плівки були аморфними, а при більших температурах підкладки електронограми містили кільцеві лінії, що добре вклалися в кристалічну ґратку SbSJ. Для $t_{pad}=140 \dots 150^\circ\text{C}$ отримувались орієнтовані плівки. Незважаючи на великі швидкості осадження, температура підкладки залишається одним з найважливіших параметрів процесу конденсації. Це підтверджується аморфністю плівок, отриманих при низьких температурах підкладки. Однак подальше підвищення густини потоку лазерного

випромінювання, яке викликає збільшення середньої швидкості частинок $V > (2 \dots 5) \cdot 10^6$ см/с ($q \geq 10^9$ Вт/см² для SbSJ, $q \geq 10^{10}$ Вт/см² для Bi₁₂GeO₂₀) недоцільно тому, що енергія частинок пари, яка виділяється при конденсації, призводить до інтенсивного ревипаровування плівок аж до повної очистки окремих ділянок підкладки, а також ділянок плівки напиленої попередніми імпульсами. Цьому сприяють також значні напірні тиски $p = 1 \dots 100$ атм., які створюються паром біля підкладки.

Плівки SbSJ, осаджені на сколі (001) KCl, розташованому по відношенню до мішені так, що падіння відбувалося практично перпендикулярно, мали порівняно гладку поверхню, за виключенням невеликої кількості місць, які локально підсилюють дифракційний контраст і декорують поверхню відколу. На сколі (010) KCl конденсація відбувалася при більших кутах падіння і з значно (приблизно на порядок) меншою швидкістю конденсації. Для цих плівок характерний прояв грубого рельєфу поверхні відколу відтіненням, що показано на рис. 1 (а, б) та утворення стовпчастих наростів поблизу слабо заповнених конденсатом округлих островків із середнім розміром ~ 4000 Å, показаних на рис. 1 (в).

При цьому напрямом від сильно- до слабконтрастних ділянок округлих фігур співпадає з напрямком поступлення пари на підкладку. Падіння пучка під скосом і положення густини частинок, які конденсуються, сприяє збільшенню поздовжньої компоненти швидкості їх руху на підкладці, що була розташована перпендикулярно до падіння пучка, коли швидкість утворення зародків перевищувала швидкість їх дифузійного розсмоктування [10].

При цьому ефект відтінення в умовах нахилоного падіння пучка є цілком закономірним. Утворення ж на атомарно гладкій поверхні спочатку округлих, незаповнених конденсатом ділянок, які відтіняються черговим імпульсним поступленням речовини має, імовірно, електричну природу, оскільки в парі присутні іонні комплекси.

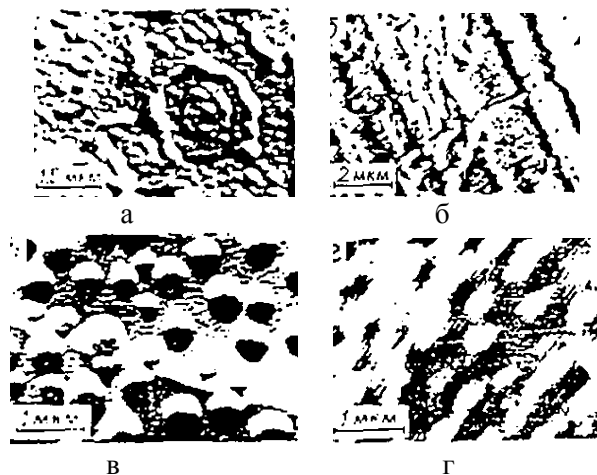


Рис. 1. Електронні мікрофотографії плівок SbSJ, напилених на відкол (010) KCl при падінні пучка під кутом відмінним від 90°

Контроль стехіометрії отриманих плівок виконувався таким чином. Напилені плівки розмішували поруч з вихідною мішенню і мас-спектрометричним методом виконували локальний аналіз та порівняння складів. При цьому мас- та енергетичні спектри з хорошою точністю співпадали з відповідними спектрами, отриманими для вихідної мішені. Крім того був проведений контроль хімічного складу плівок методом локального рентгеноспектрального аналізу. Виконаний подальший аналіз повністю підтвердив відповідність складу плівок хімічному складу мішені, яка підлягала випаровуванню.

Аналіз результатів дослідження. При густинах потоку $q \approx 5 \cdot 10^7$ Вт/см² випаровування мішені досить слабе, товщина осадженого за імпульс шару $d_1 = v_1 \cdot \Delta t = \frac{\Delta h}{\Delta t}$, менша або має порядок наномолекулярного шару. Формування плівки відбувається через стадію зародкоутворення. Підвищення густини потоку q і пов'язане з цим збільшення товщини осадженого за імпульс шару призводить до утворення суцільного шару, не проходячи стадію острівкового зростання. У випадку коли товщина осадженого за імпульс шару близька до мономолекулярного можливе протікання структурно-морфологічних перетворень. Подальше збільшення $q \geq 5 \cdot 10^8$ Вт/см² призводить до різкого збільшення викиду речовини і, як наслідок, гартування нерівноважних станів. Однак при цьому температура підкладки [11, 12] залишається найважливішим параметром, який визначає структурну досконалість конденсатів. Спостерігається також пониження температури епітаксії плівок з ростом q .

відмічене раніше авторами [11, 12]. Подальше збільшення q призводить до різкого збільшення енергії компонент плазми. При осадженні плівок виділяються значна енергія, яка перевищує ~ 300 еВ/частинку, конденсація відбувається через рідку фазу і в цьому випадку навіть незначне збільшення q , зменшення відстані мішень-підкладка L , або підвищення температури підкладки відразу підвищує інтенсивне реєстрування. При великих густинах пари, викликаних $q > q_{\text{opt}}$, її конденсація може відбуватися при газодинамічному розширенні без участі підкладки [8]. Наслідком цього є крапельний викид осадженої речовини. З врахуванням цього для кожного конкретного випадку необхідно вибирати оптимальну густину потоку лазерного випромінювання $q \geq q_{\text{кр}}$, що викликає інтенсивний викид речовини з одного боку. З іншого боку, зростання q обмежене ростом енергії частинок пари, що контролювалася мас-спектрометричним методом, і не мала перевищувати деяку граничну величину, залежну від відстані мішень-підкладка L та температури підкладки $t_{\text{пад}}$.

Висновки. У загальному, умова отримання суцільних досконалих плівок за допомогою гігантських імпульсів в найбільшій степені визначається густиною величини потоку лазерного випромінювання, товщиною осадженого за імпульс шару, відстані мішень-підкладка та температурою підкладки. Ці параметри, в певних межах, можуть цілеспрямовано вибиратися у залежності від поставленої задачі. Проведені дослідження показують, що досить перспективний і технологічний метод отримання плівок складних речовин за допомогою випаровування мішені гігантськими імпульсами лазера можна успішно застосовувати лише визначивши оптимальні режими випаровування та характеристики плазми. Це досить просто і ефективно можна здійснити за запропонованою вище методикою з використанням часово-пролітної мас-спектрометрії.

Список використаних джерел:

1. Попов, В.К. Мощные эксимерные лазеры и новые источники когерентного излучения в вакуумном ультрафиолете / В.К. Попов // УФН. – 1985. – Т. 147. – Вып. 3. – С. 587 - 604.
2. Гончаров, В.К. Формирование конденсированной фазы металлов при воздействии на них субмикросекундных лазерных импульсов / В.К. Гончаров, К.В. Козадаев // ИФЖ. – 2010. – Т. 83. – № 1. – С 80 - 84.
3. Гончаров, В.К. Исследование воздействия высокоэнергетического излучения на вещество с целью создания новых материалов и технологий / В.К. Гончаров, К.В. Козадаев, М.В. Пузырев, В.И. Попечиц // Вестник БГУ. – 2010. – Серия 1. – №1. – С. 3 - 10.
4. Канцырев, В.Л. Имплантация в кремний излучением мощного Kr-F лазера / В.Л. Канцырев, Н.В. Морозов, Б.А. Олышвангер и др. // Письма в ЖТФ. – 1991. – Т. 17. – Вып. 2. – С. 56 - 61.
5. Hutt, K.W. Laser initiated electron avalanches observed in a laser microprobe mass spectrometer / K.W. Hutt, E.R. Wallach // J. Appl. Phys. – 1989. – № 66 (5). – P. 127 - 130.
6. Опачко, И.И. Особенности получения пленок сложного соединения с помощью гигантских лазерных импульсов / И.И. Опачко, В. Лукша, И.П. Запесочный, С.С. Поп, Ю.Ю. Фирцак // УФЖ. – 1977. – № 4. – С. 659 - 663.
7. Жигуц Ю.Ю. Наукові дослідження в технології машинобудування. Навчальний посібник. – Ужгород: Видавництво УжНУ, 2008. – 225 с.
8. Зельдович, Я.Б. Физика ударных волн и высокотемпературных явлений / Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер. – М.: – 1966. – 686 с.
9. Беляев, В.П. Пространственные, временные и энергетические характеристики излучения лазера на парах меди / В.П. Беляев, В.В. Зубов, А.А. Исаев и др. // Квант. электр. – 1985. – Т. 12. – № 5. – С. 74 – 79.
10. Бекетова, З.П. О возможности получения сверхтонких плотных монокристаллических пленок с помощью лазера / З.П. Бекетова, С.В. Гомонов, В.С. Коверин и др. // Изв. ВУЗов, Радиофизика. – 1975. – Т. 18. – С. 908 - 910.
11. Афанасьев, Ю.В. Высокотемпературные и плазменные явления, возникающие при взаимодействии мощного лазерного излучения с веществом / Ю.В. Афанасьев, О.Н. Крохин // Физика высоких плотностей энергии. – М.: Мир. – 1974. – С. 311 - 353.
12. Жигуц Ю.Ю. Особливості ефективного напilenня шаруватих структур періодичним лазерними імпульсами / Ю.Ю. Жигуц, І.І. Опачко // Міжвузівський збірник Луцького національного технічного університету «Наукові нотатки». – 2017. – № 59. – С. 112 - 118.

Рецензент проф., док. фіз.-мат. наук,
професор кафедри електронних систем
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»

Опачко Іван Іванович

УДК 539.3

DOI 10.36910/775.24153966.2021.72.18

А.О. Сяський, В.А. Сяський, Н.В. Шевцова
Рівненський державний гуманітарний університет

МОДЕЛЮВАННЯ КОНТАКНОЇ ВЗАЄМОДІЇ БЕРЕГІВ МІЖФАЗНОГО РОЗРІЗУ ПО ДУЗІ КОЛА МІЖ ОРТОТРОПНОЮ ПЛАСТИНКОЮ І ЗАМКНЕНИМ ПРУЖНИМ РЕБРОМ

Запропоновано наближений розв'язок мішаної контактної задачі для нескінченної ортотропної пластинки з круговим отвором, контур якого підкріплено замкненим пружним ребром великої кривини, за наявності на межі їх сполучення симетричного міжфазного розрізу, береги якого у процесі деформації гладко контактують. Математичну модель задачі побудовано у вигляді системи інтегральних рівнянь відносно контактних зусиль між пластинкою і ребром. Методом механічних квадратур і колокації досліджується вплив на напружений стан пластинки і ребра та величину ділянки гладкого контакту ортотропії матеріалу пластинки.

Ключові слова: міжфазний розріз, ортотропна пластинка, підсилювальне ребро, контактні зусилля, інтегральні рівняння, гладкий контакт.

А.А. Сяський, В.А. Сяський, Н.В. Шевцова МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БЕРЕГОВ МЕЖФАЗНОГО РАЗРЕЗА ПО ДУГЕ ОКРУЖНОСТИ МЕЖДУ ОРТОТРОПНОЙ ПЛАСТИНКОЙ И ЗАМКНУТЫМ УПРУГИМ РЕБРОМ

Предложено приближенное решение смешанной контактной задачи для бесконечной ортотропной пластинки с круговым отверстием, контур которого усилен замкнутым упругим ребром большой кривизны, при наличии на границе их соединения симметричного межфазного разреза, берега которого в процессе деформации гладко контактируют. Математическую модель задачи построено в виде системы интегральных уравнений относительно контактных усилий между пластинкой и ребром. Методом механических квадратур и колокации исследуется влияние на напряженное состояние пластинки и ребра, а также на величину участка гладкого контакта ортотропии материала пластинки.

Ключевые слова: межфазный разрез, ортотропная пластинка, усиливающее ребро, контактные усилия, интегральные уравнения, гладкий контакт.

A.O. Siaskyi, V.A. Siaskyi, N.V. Shevtsova MODELING OF CONTACT INTERACTION OF THE EDGES OF THE INTERFACIAL SECTION ALONG THE ARC OF THE CIRCLE BETWEEN THE ORTHOTROPIC PLATE AND THE CLOSED ELASTIC RIB

Under the conditions of the generalized plane stress state it is researched a mixed contact problem for an infinite orthotropic plate with a circular hole, the contour of which is reinforced by a closed elastic rib. The line connecting the plate and the elastic rib contains a symmetrical interfacial section, the edges of which are in smooth contact during the deformation process.

The components of the deformation tensor (relative elongation, angle of rotation of the normal and curvature) at the points of the contour of the hole of the plate are represented with integral dependences on the contact forces. The authors choose a closed elastic rod of large curvature with a constant rectangular cross section as a model of the reinforcing element.

Using the basic equations of the linear theory of closed rods of large curvature, the mathematical model of the problem is constructed in the form of a system of three singular integral equations with Hilbert kernel in order to find the contact forces between the plate and the rib. The approximate solution of the issue is found with the help of the combined method of mechanical quadrature and collocation. This method investigates the influence of the material orthotropy on the stress state of the plate and the reinforcing rib and on the size of the smooth contact area.

Keywords: interphase section, orthotropic plate, amplifying edge, contact forces, singular integral equations, smooth contact.

Постановка проблеми. У сучасних конструкціях, машинах і спорудах широко використовуються пружні анізотропні пластинки з отворами, які є не тільки порівняно легкими, але й достатньо надійними. Для зменшення високої концентрації напружень біля отворів їх контури підсилюють замкненими пружними ребрами.

Розв'язок задачі про визначення напружено-деформованого стану пластинки та підсилювального ребра суттєво залежить від математичної моделі, яка описує напружено-деформований стан ребра. Найбільш повно такі задачі досліджені для випадків, коли підсилення моделюється пружною лінією сталої чи змінної жорсткості на розтяг (стиск) і згин або криволінійним стрижнем сталого поперечного перерізу, лінія фактичного сполучення якого з пластинкою не співпадає з його геометричною віссю.

При виготовленні або експлуатації пластинок з ребрами жорсткості на межі поділу матеріалів можуть виникати різні дефекти, зокрема, міжфазні розрізи нульової ширини, які зумовлюють подальше міжфазне руйнування пластинчастої конструкції за дії силових чи

температурних навантажень. Тому дослідження, які пов'язані з вивченням впливу таких дефектів на міцність пластинчастих елементів конструкцій з ребрами жорсткості, є важливим напрямком оцінки надійності їхньої роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасній науковій літературі набула поширення модель криволінійного стрижня великої кривини сталого прямокутного поперечного перерізу [1,2]. Використовуючи цю модель у роботах [3,4] побудовано наближені розв'язки мішаних контактних задач для нескінченної ізотропної (ортотропної) пластинки з круговим отвором, контур якого підсилено замкненим пружним ребром, за наявності на межі їх сполучення симетричного міжфазного розрізу, береги якого у процесі деформації не контактують. За наявності гладкого контакту берегів міжфазного розрізу такі задачі залишаються недослідженими.

Системне дослідження прямолінійних і дугових тріщин в однорідних і кусково-однорідних пружних тілах проведено в [5 - 9].

Постановка завдань. Нехай нескінченна ортотропна пластинка товщиною $2h$ послаблена круговим отвором одиничного радіуса, контур якого γ підсилено замкнутим пружним ребром сталого поперечного перерізу. Пластинчаста конструкція перебуває в умовах узагальненого плоского напруженого стану, створеного рівномірно розподіленими на нескінченності зусиллями p і q , що діють у двох взаємно-перпендикулярних напрямках.

Спільна серединна площина пластинки та ребра віднесена до системи прямокутних (x, y) і полярних (ρ, λ) координат з полюсом у центрі отвору. Системи відліку обираємо так, щоб координатні осі визначали напрямки дії зовнішнього навантаження та головні напрямки ортотропії матеріалу пластинки (рис. 1).

Припустимо, що на лінії сполучення пластинки і ребра зовні ділянки $[-\alpha_0^*; \alpha_0^*]$ виник симетричний відносно осі Ox міжфазний розріз, береги якого за дії заданого навантаження на ділянці $[\pi - \beta_0^*; \pi + \beta_0^*]$ гладко контактують. Межі цієї ділянки наперед невідомі.

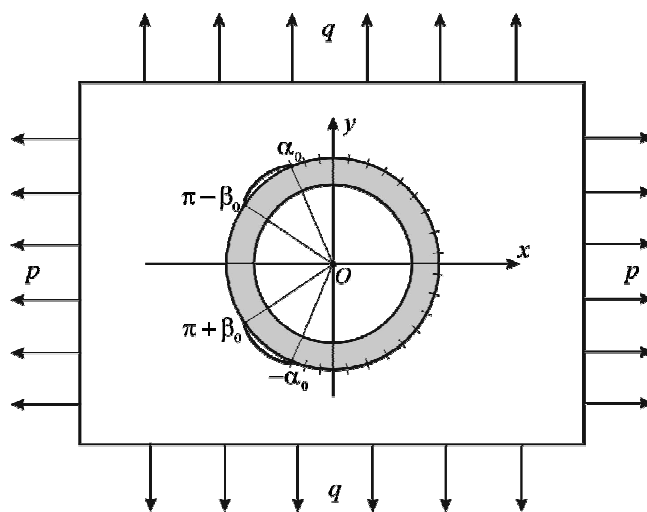


Рис. 1. Розрахункова схема пластинки

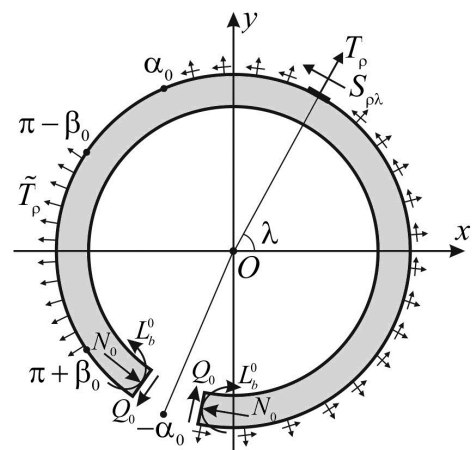


Рис. 2. Розрахункова схема підсилювального ребра

Мета досліджень: визначення компонент напруженого стану на контурі γ в пластинці та зовнішньому, внутрішньому і осьовому поздовжніх волокнах ребра; визначення величини ділянки гладкого контакту; дослідження залежності цих величин від ортотропії матеріалу пластинки.

Викладення основного матеріалу. Напружено-деформований стан пластинки визначають контактні зусилля T_ρ^0 , $S_{\rho\lambda}^0$ на ділянці $[-\alpha_0; \alpha_0]$, контактні зусилля $\tilde{T}_\rho$ на ділянці $[\pi - \beta_0; \pi + \beta_0]$, які прикладені до контуру γ з боку підсилювального ребра, та зовнішнє навантаження на нескінченності.

При такому навантаженні параметри деформації в точках контуру γ визначаються зі співвідношень [3,10], які можна подати у вигляді

$$\begin{aligned}
\varepsilon_\lambda(\lambda) &= \frac{1}{2E_x h} \left\{ c_1 T_\rho(\lambda) + \frac{c_2}{\pi} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} \left[T_\rho^0(t) - S_{\rho\lambda}^0(t) \operatorname{ctg} \frac{\lambda-t}{2} \right] dt - \right. \\
&\quad \left. - \frac{c_3}{\pi} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} T_\rho^0(t) \operatorname{ctg} \frac{\lambda-t}{2} dt + \frac{c_2}{\pi} \int_{\pi-\beta_0}^{\pi+\beta_0} \tilde{T}_\rho(t) dt - \frac{c_3}{\pi} \int_{\pi-\beta_0}^{\pi+\beta_0} \tilde{T}_\rho(t) \operatorname{ctg} \frac{\lambda-t}{2} dt + \varepsilon_\lambda^0 \right\}; \\
V(\lambda) &= \frac{1}{2E_x h} \left\{ c_1 S_{\rho\lambda}(\lambda) - \frac{c_3}{\pi} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} \left[T_\rho^0(t) - S_{\rho\lambda}^0(t) \operatorname{ctg} \frac{\lambda-t}{2} \right] dt + \right. \\
&\quad \left. + \frac{c_4}{\pi} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} T_\rho^0(t) \operatorname{ctg} \frac{\lambda-t}{2} dt - \frac{c_3}{\pi} \int_{\pi-\beta_0}^{\pi+\beta_0} \tilde{T}_\rho(t) dt + \frac{c_4}{\pi} \int_{\pi-\beta_0}^{\pi+\beta_0} \tilde{T}_\rho(t) \operatorname{ctg} \frac{\lambda-t}{2} dt + V^0 \right\}; \\
k(\lambda) &= 1 - \varepsilon_\lambda(\lambda) + \frac{dV(\lambda)}{d\lambda}; \quad \lambda \in [-\alpha_0; 2\pi - \alpha_0].
\end{aligned} \quad (1)$$

Тут введено позначення:

$$\begin{aligned}
c_1 &= \beta_1 \beta_2 - \nu_x; \quad c_2 = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} [(1 - \beta_1 \beta_2) \cos^2 \lambda - 1]; \\
c_3 &= \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} (1 - \beta_1 \beta_2) \sin \lambda \cos \lambda; \quad c_4 = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} [(1 - \beta_1 \beta_2) \sin^2 \lambda - 1]; \\
\varepsilon_\lambda^0 &= \frac{1}{2} [(1 + \beta_1 + \beta_2 - \beta_1 \beta_2) p + (-1 + \beta_1 + \beta_2 + \beta_1 \beta_2) \beta_1 \beta_2 q] - \\
&\quad - \frac{1}{2} (p - \beta_1 \beta_2 q) (1 + \beta_1 + \beta_2 + \beta_1 \beta_2) \cos 2\lambda; \quad V^0 = \frac{1}{2} (p - \beta_1 \beta_2 q) (1 + \beta_1 + \beta_2 + \beta_1 \beta_2) \sin 2\lambda; \\
T_\rho &= \begin{cases} T_\rho^0, & \lambda \in [-\alpha_0; \alpha_0]; \\ \tilde{T}_\rho, & \lambda \in [\pi - \beta_0; \pi + \beta_0]; \end{cases} \quad S_{\rho\lambda} = \begin{cases} S_{\rho\lambda}^0, & \lambda \in [-\alpha_0; \alpha_0]; \\ 0, & \lambda \in [\pi - \beta_0; \pi + \beta_0]; \end{cases}
\end{aligned} \quad (2)$$

E_x, ν_x – модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона матеріалу пластинки в напрямку осі Ox ; β_1, β_2 – корені характеристичного рівняння [11]; $\varepsilon_\lambda, V, k$ – відносне видовження, кут повороту нормалі та кривина.

Якщо контактні зусилля стануть відомі, то кільцеві зусилля на γ можна встановити за формулою, наведеною в [10].

Замкнене підсилювальне ребро перебуває у пружній рівновазі під дією контактних зусиль $T_\rho^0, S_{\rho\lambda}^0, \tilde{T}_\rho$, що передаються до його зовнішньої бічної поверхні від пластинки. Його моделюємо замкненим криволінійним стрижнем великої кривини прямокутного поперечного перерізу [2].

Відповідно до прийнятої моделі, напружений стан ребра визначають поздовжня N і поперечна Q сили та згинальний момент L_b , що діють у поперечних перерізах стрижня і віднесені до його осі. Деформації поздовжніх волокон підсилення характеризуються відносним видовженням $\varepsilon_\lambda^{(c)}$, кутом повороту нормалі θ_b і кривиною $k^{(c)}$.

Задача розрахунку замкнутого ребра статично невизначена. Використовуючи ідею методу сил [2], умовно розріжемо його площиною $\lambda = -\alpha_0$, а до торців перерізу прикладемо статично зрівноважені сили N_0, Q_0 та згинальні моменти L_b^0 (рис. 2). У результаті одержимо статично визначений розімкнений стрижень, який перебуває у рівновазі за дії навантаження на торцях і контактних зусиль, що передаються до нього від пластинки. З умов рівноваги частини ребра між поперечними перерізами $\lambda = -\alpha_0$ і $\lambda = \lambda$ знаходимо

$$\begin{aligned}
N(\lambda) &= N_0 \cos(\lambda + \alpha_0) - Q_0 \sin(\lambda + \alpha_0) + f_1(\lambda) \cos \lambda + f_2(\lambda) \sin \lambda; \\
Q(\lambda) &= N_0 \sin(\lambda + \alpha_0) + Q_0 \cos(\lambda + \alpha_0) + f_1(\lambda) \sin \lambda - f_2(\lambda) \cos \lambda;
\end{aligned} \quad (3)$$

$$L_b(\lambda) = L_b^0 + (1 - \eta) N_0 - \int_{-\alpha_0}^{\lambda} S_{\rho\lambda}(t) dt - (1 - \eta) N(\lambda), \quad \lambda \in [-\alpha_0; 2\pi - \alpha_0],$$

де

$$f_1(\lambda) + if_2(\lambda) = \begin{cases} i \int_{-\alpha_0}^{\lambda} [T_{\rho}^0(t) + iS_{\rho\lambda}^0(t)] e^{it} dt, & \lambda \in [-\alpha_0; \alpha_0]; \\ 2i(N_0 \sin \alpha_0 + Q_0 \cos \alpha_0), & \lambda \in [\alpha_0; \pi - \beta_0]; \\ 2i(N_0 \sin \alpha_0 + Q_0 \cos \alpha_0) - i \int_{\pi - \beta_0}^{\lambda} \tilde{T}_{\rho}(t) e^{it} dt, & \lambda \in [\pi - \beta_0; \pi + \beta_0]; \end{cases}$$

$$f_1(\pm \alpha_0) = f_1(\pi \pm \beta_0) = 0; \quad f_2(-\alpha_0) = f_2(\pi + \beta_0) = 0; \quad (4)$$

$$f_2(\alpha_0) = f_2(\pi - \beta_0) = 2(N_0 \sin \alpha_0 + Q_0 \cos \alpha_0); \quad i = \sqrt{-1}.$$

Деформації зовнішнього поздовжнього волокна ребра, яке контактує з пластинкою, визначаються за формулами [3,4]

$$\varepsilon_{\lambda}^{(c)}(\lambda) = \frac{1}{E_0 F_0} \left[N(\lambda) + \frac{\eta + \eta_c}{\eta_c} L_b(\lambda) \right]; \quad \frac{d\theta_b(\lambda)}{d\lambda} = \frac{1}{E_0 F_0} \left[N(\lambda) + \frac{L_b(\lambda)}{\eta_c} \right];$$

$$k^{(c)}(\lambda) = 1 - \varepsilon_{\lambda}^{(c)}(\lambda) + \frac{d\theta_b(\lambda)}{d\lambda}, \quad \lambda \in [-\alpha_0; \pi + \beta_0], \quad (5)$$

в яких $2h_0$, 2η – висота і ширина підсилювального ребра; E_0 – модуль Юнга матеріалу ребра; $F_0 = 2h_0 \times 2\eta$ – площа поперечного перерізу; $E_0 F_0$ – жорсткість ребра на розтяг (стиск); η_c – відстань від осі ребра до нейтрального для чистого згину поздовжнього волокна з радіусом кривини $r_0 = 1 - \eta - \eta_c$.

Початкові параметри N_0 , Q_0 , L_b^0 визначаються з умови рівноваги підсилювального ребра як жорсткого цілого

$$\int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} [T_{\rho}^0(t) \cos t - S_{\rho\lambda}^0(t) \sin t] dt + \int_{\pi - \beta_0}^{\pi + \beta_0} \tilde{T}_{\rho}(t) \cos t dt = 0 \quad (6)$$

та умов однозначності компонент вектора зміщення точок контуру γ і кута повороту нормалі до нього

$$\int_0^{\pi} L_b(t) \cos t dt = 0; \quad \theta_b(\pi) = 0. \quad (7)$$

Нормальні напруження в зовнішньому і внутрішньому волокнах ребра та найбільші дотичні напруження в осьовому волокні визначаються за формулами [2 - 4]

$$\sigma^{(1)}(\lambda) = \frac{1}{F_0} \left[N(\lambda) + \frac{\eta + \eta_c}{\eta_c} L_b(\lambda) \right]; \quad \sigma^{(2)}(\lambda) = \frac{1}{F_0} \left[N(\lambda) + \frac{\eta_c - \eta}{\eta_c} \frac{L_b(\lambda)}{1 - 2\eta} \right];$$

$$\tau_{\rho\lambda}^{(c)}(\lambda) = \frac{3}{2} \frac{Q(\lambda)}{F_0}. \quad (8)$$

Співвідношення (3)-(8) складають повну систему рівнянь для визначення напружено-деформованого стану статично невизначеного ребра.

Математична модель задачі. Крайові умови сумісного деформування пластинки і підсилювального ребра на ділянці їх сполучення формулюємо у вигляді умов ідеального механічного контакту в диференціальній формі

$$\varepsilon_{\lambda}(\lambda) = \varepsilon_{\lambda}^{(c)}(\lambda); \quad V(\lambda) = \theta_b(\lambda), \quad \lambda \in [-\alpha_0; \alpha_0], \quad (9)$$

а на ділянці гладкого контакту – у вигляді рівності кривин

$$k(\lambda) = k^{(c)}(\lambda), \quad \lambda \in [\pi - \beta_0; \pi + \beta_0]. \quad (10)$$

Відсутність контактних зусиль на ділянках відставання ребра від пластинки враховано при

записі співвідношень (1), (2), (4).

Підставляючи (1), (5) з урахуванням (2) - (4) в крайові умови (9), (10), одержимо систему трьох сингулярних інтегральних рівнянь з ядрами Гільберта для визначення функцій T_p^0 , $S_{p\lambda}^0$, $\tilde{T}_p$. Цю систему доповнюємо умовами (6), (7), які слугують для визначення сталих N_0 , Q_0 , L_b^0 .

Співвідношення (1), (5), (6), (7), (9), (10) визначають математичну модель сформульованої задачі.

Наближений розв'язок задачі. Точний розв'язок системи (1), (5), (6), (7), (9), (10) знайти не вдається. Для її наближеного розв'язання необхідно встановити структуру шуканих функцій на кінцях ділянок $[-\alpha_0; \alpha_0]$ і $[\pi - \beta_0; \pi + \beta_0]$.

На ділянці гладкого контакту пластинки і ребра функція $\tilde{T}_p$ обмежена і неперервна, а на його кінцях дорівнює нулю ($\tilde{T}_p(\pi \pm \beta_0) = 0$). Контактні зусилля T_p^0 , $S_{p\lambda}^0$ на кінцях $\lambda = \pm \alpha_0$ ділянки їх сполучення мають кореневу особливість. З огляду на це наближений розв'язок системи (1), (5), (6), (7), (9), (10) можна побудувати комбінованим методом механічних квадратур і колокації. Квадратурні формули цього методу при відсутності контакту берегів міжфазного розрізу наведені в [3, 4]. При числовій реалізації задачі величина ділянки гладкого контакту визначалася методом послідовних наближень.

Аналіз числових розрахунків. Для нескінченної пластинки з круговим отвором, виготовленої з матеріалів скло-епоксид (СЕ), графіт-епоксид (ГЕ), епоксид-скло (ЕС), епоксид-графіт (ЕГ) та ізотропного матеріалу (ІМ), і підсилювального ребра з параметрами

$$h_0/h = 1; \quad \rho_0 = 1; \quad \eta/\rho_0 = 0.2; \quad \alpha_0 = 120^\circ; \quad \sqrt{E_x E_y} / E_0 = 0.2$$

досліджено вплив на напружений стан пластинки і ребра, а також на величину ділянки гладкого контакту, ортотропії матеріалу пластинки.

Результати числового розрахунку величин $T_p = 2h\sigma_p$, $S_{p\lambda} = 2h\tau_{p\lambda}$, $T_\lambda = 2h\sigma_\lambda$ на контурі γ в пластинці та $F_0\sigma^{(1)}$, $F_0\sigma^{(2)}$, $F_0\tau_{p\lambda}^{(c)}$ – у ребрі при $p = 0$; $q \neq 0$ наведені на рис. 3 – 5.

Таблиця 1 ілюструє залежність максимальних значень компонент напруженого стану від наявності ділянки гладкого контакту між пластинкою та підсилювальним ребром. Характеристики досліджуваних ортотропних матеріалів і лінії, які відповідають цим матеріалам на рисунках, а також значення полярних кутів λ_1 , λ_2 , для яких дотичні напруження в пластинці та підсиленні набувають максимальних значень, і кута β_0 подані в таблиці 2.

Табл. 1

Максимальні значення компонент напруженого стану в пластинці і ребрі (в долях q) за наявності контакту берегів розрізу (чисельник) та при відсутності контакту (знаменник)

Матеріал пластинки	$T_{\rho}(\lambda)$		$S_{\rho\lambda}(\lambda)$	$T_{\lambda}(\lambda)$		$F_0\sigma^{(1)}(\lambda)$		$F_0\sigma^{(2)}(\lambda)$		$F_0\tau_{\rho\lambda}^{(c)}(\lambda)$
	$\lambda = 0$	$\lambda = \pi$	$\lambda = \lambda_1$	$\lambda = 0$	$\lambda = \pi$	$\lambda = 0$	$\lambda = \pi$	$\lambda = 0$	$\lambda = \pi$	$\lambda = \lambda_2$
ГЕ	$\frac{2.119}{1.150}$	$\frac{-1.268}{0}$	$\frac{1.277}{0.874}$	$\frac{0.043}{0.026}$	$\frac{1.178}{1.369}$	$\frac{0.215}{0.150}$	$\frac{-2.803}{-1.842}$	$\frac{5.355}{4.300}$	$\frac{5.572}{4.660}$	$\frac{0.593}{0.930}$
	$\frac{1.249}{0.793}$	$\frac{-0.574}{0}$	$\frac{1.104}{1.154}$	$\frac{0.208}{0.142}$	$\frac{1.612}{1.625}$	$\frac{0.359}{0.262}$	$\frac{-1.953}{-1.490}$	$\frac{4.229}{3.608}$	$\frac{3.722}{3.883}$	$\frac{0.637}{0.808}$
СЕ	$\frac{1.249}{0.793}$	$\frac{-0.574}{0}$	$\frac{1.104}{1.154}$	$\frac{0.208}{0.142}$	$\frac{1.612}{1.625}$	$\frac{0.359}{0.262}$	$\frac{-1.953}{-1.490}$	$\frac{4.229}{3.608}$	$\frac{3.722}{3.883}$	$\frac{0.637}{0.808}$
	$\frac{1.249}{0.793}$	$\frac{-0.574}{0}$	$\frac{1.104}{1.154}$	$\frac{0.208}{0.142}$	$\frac{1.612}{1.625}$	$\frac{0.359}{0.262}$	$\frac{-1.953}{-1.490}$	$\frac{4.229}{3.608}$	$\frac{3.722}{3.883}$	$\frac{0.637}{0.808}$
ІМ	$\frac{0.783}{0.499}$	$\frac{-0.404}{0}$	$\frac{1.057}{1.076}$	$\frac{0.374}{0.246}$	$\frac{1.947}{1.897}$	$\frac{0.279}{0.193}$	$\frac{-1.590}{-1.267}$	$\frac{3.584}{3.158}$	$\frac{2.930}{3.378}$	$\frac{0.634}{0.719}$
	$\frac{0.783}{0.499}$	$\frac{-0.404}{0}$	$\frac{1.057}{1.076}$	$\frac{0.374}{0.246}$	$\frac{1.947}{1.897}$	$\frac{0.279}{0.193}$	$\frac{-1.590}{-1.267}$	$\frac{3.584}{3.158}$	$\frac{2.930}{3.378}$	$\frac{0.634}{0.719}$
ЕС	$\frac{0.462}{0.338}$	$\frac{-0.199}{0}$	$\frac{0.929}{0.912}$	$\frac{0.269}{0.207}$	$\frac{2.668}{2.609}$	$\frac{0.177}{0.141}$	$\frac{-1.261}{-1.089}$	$\frac{3.011}{2.775}$	$\frac{2.630}{2.897}$	$\frac{0.597}{0.623}$
	$\frac{0.462}{0.338}$	$\frac{-0.199}{0}$	$\frac{0.929}{0.912}$	$\frac{0.269}{0.207}$	$\frac{2.668}{2.609}$	$\frac{0.177}{0.141}$	$\frac{-1.261}{-1.089}$	$\frac{3.011}{2.775}$	$\frac{2.630}{2.897}$	$\frac{0.597}{0.623}$
ЕГ	$\frac{0.676}{0.435}$	$\frac{-0.061}{0}$	$\frac{0.752}{0.740}$	$\frac{-0.016}{-0.024}$	$\frac{5.861}{5.793}$	$\frac{-0.002}{-0.022}$	$\frac{-0.922}{-0.922}$	$\frac{2.485}{2.419}$	$\frac{2.353}{2.422}$	$\frac{0.530}{0.534}$
	$\frac{0.676}{0.435}$	$\frac{-0.061}{0}$	$\frac{0.752}{0.740}$	$\frac{-0.016}{-0.024}$	$\frac{5.861}{5.793}$	$\frac{-0.002}{-0.022}$	$\frac{-0.922}{-0.922}$	$\frac{2.485}{2.419}$	$\frac{2.353}{2.422}$	$\frac{0.530}{0.534}$

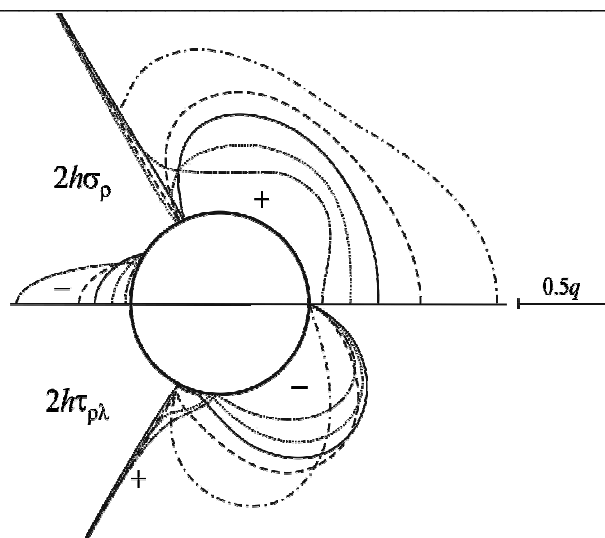


Рис. 3. Епюри контактних зусиль на контурі γ в пластинці

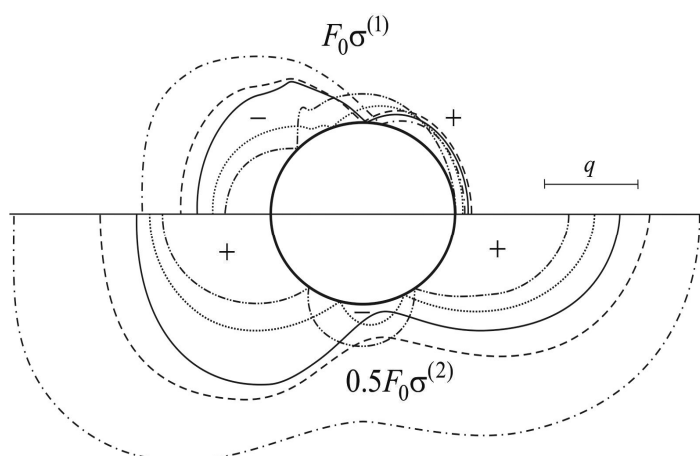


Рис. 4. Епюри нормальних напружень у крайніх поздовжніх волокнах ребра

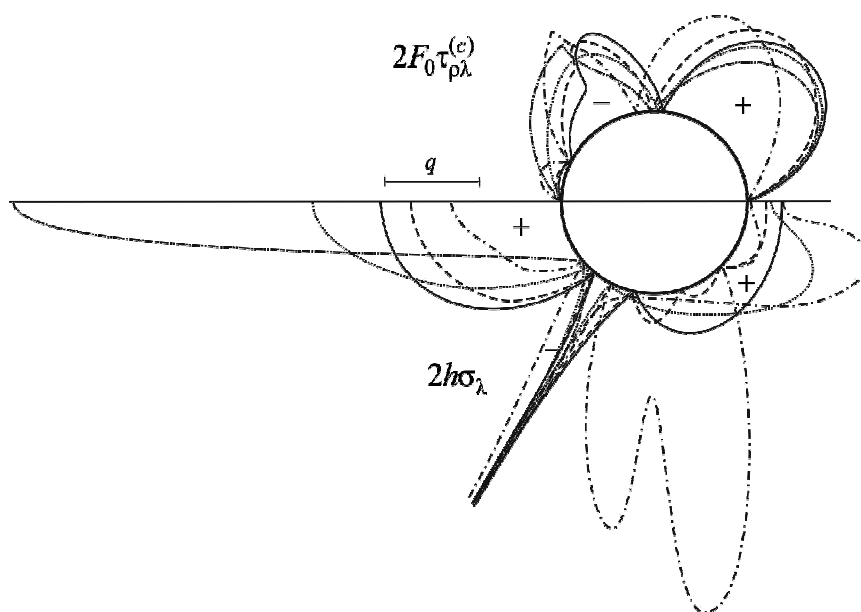


Рис. 5. Епюри найбільших дотичних напружень у ребрі та кільцевих зусиль на контурі γ в пластинці

Табл. 2

**Характеристики ортотропних матеріалів і лінії, що відповідають цим матеріалам на
рисунках, та значення кутів $\lambda_1, \lambda_2, \beta_0$**

Матеріал пластинки	β_1	β_2	ν_x	E_x / E_y	Лінії	λ_1 (град)	λ_2 (град)	β_0 (град)
ГЕ	6.999	0.714	0.250	25	— · — · —	77.148	64.716	28.262
СЕ	2.271	0.763	0.250	3	— — — —	56.008	49.667	32.858
ІМ	1	1	0.300	1	————	46.337	42.904	35.624
ЕС	0.440	1.310	0.083	1/3	··········	42.903	42.903	36.348
ЕГ	0.143	1.401	0.010	1/25	— · · — · ·	35.741	39.371	38.100

Одержані результати свідчать про те, що ортотропія матеріалу пластинки суттєво впливає на розподіл компонент напруженого стану в пластинці і ребрі. Так, при збільшенні відношення E_x / E_y , суттєво збільшуються максимальні значення $T_p(0)$, $\sigma^{(1)}(\pi)$, $\sigma^{(2)}(\pi)$. При цьому для величин $T_p(\pi)$, $T_\lambda(\pi)$ спостерігається обернена залежність. Вплив ортотропії матеріалу пластинки на величини $S_{p\lambda}(\lambda_1)$, $\tau_{p\lambda}^{(c)}(\lambda_2)$ значно менший ніж на інші величини.

В околі торців міжфазного розрізу нормальні напруження в поздовжніх волокнах ребра обмежені і неперервні, а контактні і кільцеві напруження в пластинці приймають необмежені значення

Висновки. У рамках теорії замкнених стрижнів великої кривини та основних інтегральних співвідношень плоскої задачі теорії пружності ортотропного тіла сформульовано постановку і знайдено наближений розв'язок задачі про частковий гладкий контакт берегів міжфазного розрізу між нескінченною ортотропною пластинкою з круговим отвором і замкненим пружним ребром, які перебувають в умовах однорідного узагальненого плоского напруженого стану, створеного рівномірно розподіленими на нескінченності зусиллями, що діють у головних напрямках ортотропії матеріалу пластинки. Крайові умови задачі на ділянці сполучення пластинки і ребра формулюються у вигляді умов ідеального механічного контакту в диференціальній формі, а на ділянці гладкого контакту – у вигляді рівності кривин. Математичну модель задачі побудовано у вигляді системи трьох сингулярних інтегральних рівнянь. Для визначення початкових параметрів статично невизначеного ребра використано умови однозначності зміщень, кута повороту нормалі та умову рівноваги підсилення. Числова реалізація задачі проведена методом механічних квадратур і колокації, яким встановлено, що найбільш оптимальними з точки зору міцності пластинчастої конструкції є матеріали пластинки зі слабовираженою ортотропією. Розвинений підхід та отримані результати без особливих змін можуть бути перенесені на ортотропні пластинки з еліптичним отвором та узагальнені для ізотропних пластинок з отворами, обмеженими криволінійними гладкими контурами.

Список використаних джерел:

1. Швабюк В.І. Опір матеріалів: підручник. К.: Знання, 2016. 407 с.
2. Сяський А., Н. Шевцова Н. Застосування методу сил для статичного розрахунку замкнених криволінійних стрижнів. *Вісник ТНТУ*. 2015. № 3(79). С. 24-30.
3. Сяський А.О., Шевцова Н.В., Дейнека О.Ю. Міжфазний розріз в ортотропній пластинці з підсиленням круговим контуром. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2018. № 5. С. 176–181.
4. Сяський А.О., Шевцова Н.В., Дейнека О.Ю. Міжфазна тріщина в ізотропній нескінченній пластинці з підсиленням круговим контуром. *Вісник НУВГП. Збірник наукових праць. Технічні науки*. Рівне. 2017. Випуск 4 (80). С. 168-177.
5. Говоруха В.Б., Лобода В.В. Моделі та методи руйнування п'єзокерамічних тіл з міжфазними тріщинами. Д.: Вид-во Дніпропетр. ун-ту, 2013. 252 с.

6. Мартиняк Р.М., Середницька Х.І. Контактні задачі термопружності для міжфазних тріщин в біматеріальних тілах. Львів: Растр-7, 2017. 168с.
7. Годес А.Ю., Лобода В.В. Дугова тріщина в однорідному електрострикційному матеріалі. *Математичні методи і фізико-механічні поля*. 2015. №4(58). С.90 – 102.
8. Камінський А.О., Селіванов М.Ф., Чорноіван Ю.О. Визначення контактних напружень між берегами тріщини нормального відриву. *Доп. НАН України*. 2016. № 5. С. 36 – 42.
9. Chumak K., Malanchuk N., Martynyak R. Partial slip contact problem for solids with regular surface texture assuming thermal insulation or thermal permeability of interface gaps. *Int. J. Mech. Sci.* 2014. № 84. P.138 – 146.
10. Сяський А.О., Батишкіна Ю.В. Контактна взаємодія розімкнених стрижнів змінної жорсткості з еліптичним отвором нескінченної ортотропної пластинки. *Вісник ТДТУ*. 2004. Т.9, № 3. С. 17-24.
11. Лехницький С.Г. Анизотропные пластинки. М.: Гостехиздат, 1957. 464с.

Рецензенти:

Шваб'юк Василь Іванович, професор кафедри прикладної математики та механіки Луцького національного технічного університету, доктор технічних наук, професор;
Батишкіна Юлія Валеріївна, завідувач кафедри інформатики та прикладної математики Рівненського державного гуманітарного університету, кандидат технічних наук, доцент.

УДК 631.364:621.311.243

С.В. Коробка¹, І.Г. Стукалець¹, Н.О. Толстушко², М.М. Толстушко²Львівський національний аграрний університет¹Луцький національний технічний університет²**ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ КОНСТРУКЦІЇ ПЛОСКОГО ДЗЕРКАЛЬНОГО КОНЦЕНТРАТОРА ДЛЯ ПОТОКУ СОНЯЧНИХ ПРОМЕНІВ**

В статті подано методику розрахунку геометричних параметрів плоского дзеркального концентратора для потоку сонячних променів. Отримано аналітичні залежності для обґрунтування ефективності використання плоского дзеркального концентратора при різних азимутальних кутах орієнтації параметрів горизонтальної сприймальної поверхні повітряного колектора щодо інтенсивності надходження сонячних променів. Наведено результати експериментальних досліджень для встановлення енергетичних параметрів роботи дзеркального концентратора в комплекті з повітряним колектором.

Ключові слова: сонячна енергія, геліосушарка фруктів, дзеркальний концентратор, сприймальна поверхня, повітряний колектор.

С.В. Коробка, И.Г. Стукалец, Н.А. Толстушко, Н.Н. Толстушко

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИИ ПЛОСКОГО ЗЕРКАЛЬНОГО КОНЦЕНТРАТОРА ДЛЯ ПОТОКА СОЛНЕЧНЫХ ЛУЧЕЙ

В статье представлена методика расчета геометрических параметров плоского зеркального концентратора для потока солнечных лучей. Получены зависимости для обоснования эффективности использования зеркального плоского концентратора при различных азимутальных углах ориентации параметров горизонтальной восприимчивой поверхности воздушного коллектора относительно интенсивности поступления солнечных лучей. Представлены результаты экспериментальных исследований для определения энергетических параметров работы зеркального концентратора в комплекте с воздушным коллектором.

Ключевые слова: солнечная энергия, гелиосушилка фруктов, зеркальный концентратор, восприимчивая поверхность, воздушный коллектор.

S.V. Korobka, I.H. Stukalets, N.O. Tolstushko, M.M. Tolstushko

JUSTIFICATION OF THE DESIGN PARAMETERS OF A FLAT MIRROR CONCENTRATOR FOR THE FLOW OF SUNLIGHT

In today's world, alternative sources are increasingly being used to replace scarce traditional energy sources (electric or thermal). One such source is solar energy, which can be used to produce electricity or low-potential heat, in particular for drying wet materials of plant origin. The article presents a method for calculating the geometric parameters of a flat mirror concentrator of solar energy. Analytical dependences for substantiation of efficiency of application of a flat mirror concentrator for various azimuthal angles of orientation of parameters of a horizontal receiving surface of an air collector concerning intensity of receipt of solar beams are received. The results of experimental researches of energy characteristics of work of a mirror concentrator complete with an air collector are resulted.

Key words: solar energy, solar fruit dryer, mirror concentrator, receptive surface, air collector.

Постановка проблеми. Будь-яку освітлену Сонцем поверхню можна вважати приймачем сонячної енергії які прийнято поділяти на активні й пасивні. Перші допускають керування процесом сприйняття і наступного перерозподілу енергетичних потоків, а другі – лише можливість зменшення падаючого потоку, наприклад шляхом затінення або просторового орієнтування. Кількість сонячної енергії найперше залежать від освітлення прямими сонячними променями, бо їх внесок у загальний потік найбільший.

Усі приймачі сонячної енергії можна розглядати як площини певної орієнтації відносно Сонця та наземних орієнтирів, заданої кутовими відхиленнями відносно площини горизонту H , зеніту Z , сторін світу NS та EW і напряму на Сонце, які схематично наведені на рис. 1.

Тут z і n – нормалі до горизонтальної площини H та сприймаючої поверхні S ; n_H – проекція нормалі n на горизонтальну площину H ; θ – кут падіння променів на сприймаючу поверхню; θ_z – зенітний кут Сонця; γ – азимутальний кут сприймаючої площини, який чисельно рівний куту між меридіальним напрямком NS і проекцією нормалі сприймаючої поверхні на площину горизонту n_H . При відхиленні на схід $\gamma < 0$, а на захід – $\gamma > 0$.

У сонячній енергетиці та інших прикладних дисциплінах типовими є площини з такими орієнтаційними параметрами:

– горизонтальна площина: $\beta = 0$; $\vec{n} \parallel \vec{z}$

– вертикальна стіна, орієнтована на південь (північ): $\beta = 90^\circ$; $\gamma = 0$ (або $\gamma = 180^\circ$); $\vec{n} \perp \vec{z}$

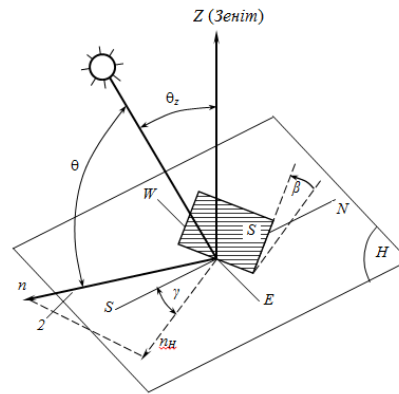


Рис. 1. Орієнтаційні параметри поверхні наземного приймача сонячної енергії S

- вертикальна стіна, орієнтована на схід (або захід): $\beta = 90^\circ$; $\gamma = -90^\circ$ (або $\gamma = -90^\circ$); $\vec{z} \perp \vec{n}$;
- площина, орієнтована на південь і нахилена під кутом до горизонту, рівним географічній широті місцевості: $\beta = \varphi$; $\gamma = 0$; у сонячний полудень $\angle(\vec{n}, \vec{z}) = \theta_z$;

За найпоширенішого випадку поверхні південної орієнтації з кутом нахилу β її орієнтаційні параметри зручно виражати через горизонтальну поверхню на умовній широті $(\varphi - \beta)$ [1]. Схема побудови для приведення до умовної широти наведена на рис. 2.

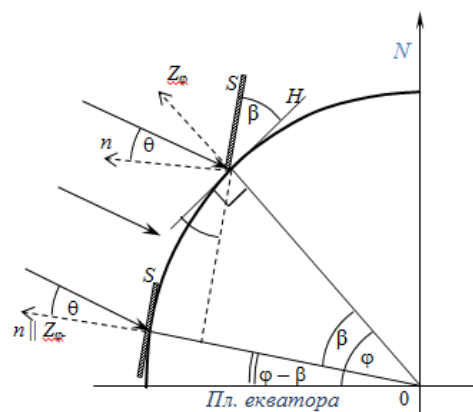


Рис. 2. Приведення похилої поверхні до горизонтальної на умовній широті $\varphi - \beta$

У тропічних широтах різниця $(\varphi - \delta)$ може приймати обидва знаки, тому при розрахунках азимутальний кут сприймаючої поверхні потрібно змінювати на протилежний за таким правилом:

$$\gamma = \begin{cases} 0^\circ, & \text{якщо } \varphi - \delta > 0; \\ 180^\circ, & \text{якщо } \varphi - \delta \leq 0, \end{cases} \quad (1)$$

Однак у багатьох випадках ефективність використання ПДК та реалізація не співпадає з очікуванням. Причина найчастіше полягає у необґрунтованому виборі розробниками конструктивних завдань, які не враховують особливості надходження та генерування сонячного випромінювання при різноманітних режимах освітлення, відмінних від природного сонячного потоку. Тому доцільно розглянути окремо вплив самостійних факторів на поточну потужність повітряного колектора., зокрема:

- кутової орієнтації параметрів сприймальної поверхні ПК;
- максимального ступеня концентрації скісних променів на шляху до світлочутливого покриття абсорбера ПК;
- коефіцієнта посилення енергетичної освітленості;
- оптимальні значення двогранного кута (фоклина) між дзеркалом і колектором (система градусних координат);
- схеми ходу променів між дзеркалом і колектором.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні існує багато методик розрахунку

ефективності використання ПДК, що базуються на застосуванні алгебри потоків радіаційного теплообміну або методів геометричної оптики [1-14].

У публікації [1] наведено геометричні побудови та математичні співвідношення лише для систем з багатократним відбиванням і високим ступенем концентрації, які використовують в обмеженому числі інсталяцій.

Автори у різних роботах наводять орієнтаційні параметри пасивних приймачів сонячної енергії та ПДК – дахів будинків, автомобільних доріг, схилів ґрунту, геліосушарок тощо зазвичай довільні. Для прикладу у [2-4] наведені розрахунки погодинної освітленості поверхні ПДК з азимутальним відхиленням $\Delta\gamma = 15^\circ$ і 30° і близьким до оптимального літнім нахилом до горизонту $\beta = \varphi - 15^\circ$. Інтенсивність прямих сонячних променів відповідає умовам ясного неба і максимальній прозорості атмосфери у період літнього сонцестояння. Однак не відображено добова зміна енергетичної ефективності та дифузного індекса ясності I_d / I_{th} від загального I_{th} / I_0 , що описують виразом, який поданий версії Ербса в працях [5].

Натомість останні версії подібних співвідношень, що подано в працях [6-8] використовують при опрацюванні результатів дистанційного моніторингу інсоляції земної поверхні. Зазвичай вони враховують набагато більше випадкових факторів впливу на поточні інсоляційні характеристики локальних територій. Завдяки великому обсягу первинних даних та їх опрацюванню потужними обчислювальними засобами і багатократною звіркою з даними наземних вимірювань, вдається оцінювати інсоляційні режими земної поверхні з високою роздільною здатністю. Сформовані на їх основі глобальні бази даних, наприклад NASA SSE, які вільно доступні користувачам у режимі реального часу складають реальну альтернативу класичним статистично обґрунтованим наближеним співвідношенням [9].

У роботі [10, 11] нерухомий повітряний колектор практично весь день освітлюється скісними променями, що відповідає частинному випадку опромінення в сонячний полудень.

В спеціалізованій літературі, наведено десятки різних співвідношень, які мають обмежену достовірність та ареал використання. Особливо вважаючи на те, що вони ґрунтуються на результатах вимірювання, проведених до останніх значних кліматичних змін. Тому кількісна параметрів сонячної радіації за ними доцільна лише після належного обґрунтування подібності прийнятому наближенню метеорологічних, географічних, сезонних та інших особливостей конкретного майданчика. Останнє підтверджується практикою розрахунків на усіх континентах

Таким чином, вирішальним аспектом для прийняття рішення під час використання ПДК в геліосушарці є обґрунтування його оптимальних конструктивно-технологічних параметрів.

Постановка завдань. Метою даного дослідження є обґрунтування оптимальних геометричних співвідношень плоского дзеркального концентратора та повітряного колектора відносно кутів орієнтації і надходження енергетичної освітленості (сонячної енергії).

Викладення основного матеріалу. Додаткове підвищення енергетичної освітленості поверхні стеження часто реалізують за допомогою плоских дзеркал. Геометричні параметри конструкції та фотометричні величини визначають за відомими правилами геометричної оптики. Загальні принципи розрахунку дзеркальних концентраторів, викладені у класичній літературі, переважно орієнтовані на реалізацію максимального ступеня концентрації з неминучими високими втратами сонячної енергії. Тоді як для більшості практично важливих інсталяцій важливіше її використання з максимальною ефективністю [12; 13; 14].

Громіздкі формули моделі ESRA незручні для оперативної оцінки робочих характеристик і моделювання продуктивності сонячних енергетичних систем. Тому на практиці іноді використовують спрощені співвідношення. Наприклад напівемпірична формула Кастрова [10], узалежнює інтегральну інтенсивність прямої сонячної радіації від атмосферної маси виразом, подібним до піргеліометричної формули Кастена:

$$G_b(m) = \frac{G_{sn}}{1 + cm} \quad (2)$$

Величина c має фізичний зміст коефіцієнта прозорості атмосфери. На практиці його розрахують за оберненим до (2) співвідношенням при найвищому піднесенні Сонця [10]. Завдяки цьому її легко узгодити з формулою моделі ESRA. Наприклад найдовшого літнього дня, коли $G_{sn} = 1323 \text{ Вт/м}^2$ і найвищої прозорості атмосфери при $T_{LK} = 2$ на широті 50° інтенсивність прямого потоку $G_b = 1056 \text{ Вт/м}^2$ (див. табл.1), стала c рівна:

$$c = \frac{1}{m} \left(\frac{G_{sn}}{G_b} - 1 \right) = \frac{1}{1,008} \left(\frac{1323}{1056} - 1 \right) = 0,2297.$$

При вищих значеннях $T_{LK} = 3,75$ і $4,0$ $c = 0,4810$ і $0,5206$ відповідно. Результати розрахунків погодинних значень наведені у таблиці 1.

Табл. 1

Інтенсивність та експозиція прямих сонячних променів у наближенні ESRA (G_b) та формули Кастрова (G_{bK}) у період літнього сонцестояння на широті 50° $G_{sn} = 1323$ Вт/м²; $H=10572$ Вт·год/м²

$G_h, E_h,$ Вт/м ²	0	1	2	3	4	5	6	7	8	8,075	ΣG
m	1,1008	1,1126	1,2072	1,3732	1,6399	2,1463	3,2024	6,2218	27,42	37,79	–
G_b $T_{LK}=2$	1056	1054	1038	1012	973	910	809	623	275	227	14207
G_{bK} $c=0,2297$	1056	1054	1036	1006	961	886	762	545	181	137	13761
G_b $T_{LK}=3,75$	865	862	838	798	742	654	523	320	69	29	10415
G_{bK} $c=0,4810$	865	862	837	797	740	651	521	331	93	69	10448
G_b $T_{LK}=4,0$	841	838	813	772	714	624	492	291	56	41	9992
G_{bK} $c=0,5206$	841	838	812	771	714	625	496	312	87	64	10075

Значення енергетичних експозицій, розрахованих за у наближенні ESRA і формулою Кастрова практично співпадають і близькі до наведеного у довіднику $H=10572$ Вт·год/м² [7]. Різниця при $T_{LK} = 3,75$ не перевищує похибки 2,5% що вказує на доцільність використання формули Кастрова для моделювання енергетичних процесів принаймні у період літнього сонцестояння.

При теоретичному моделюванні режимів інсоляції та роботи енергетичних установок, часову залежність енергетичної освітленості горизонтальної поверхні іноді апроксимують ділянкою косинусоїди, близької за формою до дзвоноподібної $G_{bh}(\tau)$ і $G_{th}(\tau)$. Зазвичай обирають кутові межі $[-\pi/2; +\pi/2]$ і періодом, рівним тривалості τ_c сонячного саява [11]:

$$E_{bh} \approx E_{max} \cos \pi \frac{\tau}{\tau_c}, \quad (3)$$

де E_{max} – максимальна енергетична освітленість у сонячний полудень. Результати розрахунків наведені у таблиці 2.

Відповідне графічне порівняння обох часових залежностей (ESRA і косинусного) проведене на рис. 3 для трьох сезонів року і кількох варіантів косинусоїди з різною тривалістю сонячного саява τ_c .

З порівняння видно, що косинусна залежність (1), яка відповідає формулі (2) істотно відрізняється від G_{bh} формою та завищеними значеннями всюди, крім моментів сходу-заходу і сонячного полудня. Зближення форми обох залежностей можна формально досягнути зменшенням періодичності косинусоїди: наприклад залежність (3) відповідає зменшеному періоду приблизно на 2 год. Натомість у сезон рівнодення період доцільно зменшити приблизно на $\approx 1,3$ год, а взимку на ≈ 50 хв відносно тривалості сонячного саява. Значення енергетичних експозицій, розрахованих за обома наближеннями, які наведені в останній колонці таблиці, дозволяють додатково оцінити енергетичний внесок у відхилення косинусної апроксимації від моделі ESRA.

Невідповідність асимптотики $G_{bh}(\tau)$ і пригоризонтної ділянки косинусоїди можна подолати зміною інтервалу її розрахунку у межах від -90° до $+90^\circ$ з відповідною модифікацією розрахункової формули до такого вигляду:

$$E_{bh} \approx \frac{1}{2} E_{max} \left(1 + \cos \pi \frac{\tau}{\tau_c} \right). \quad (4)$$

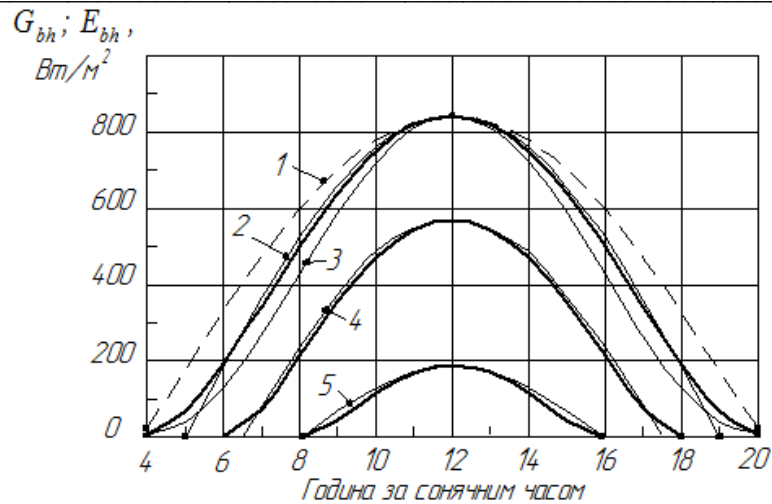


Рис. 3. Сезонні зміни G_{bh} (лінії нормальної товщини) та їх апроксимація косинусоїдами: номери 1, 2, 3, 4, 5 відповідають даним у стрічках табл. 2

Табл. 2

Горизонтальні складові сонячної енергії на широті 50° при $T_{LK}=3$

$G_h, E_h,$ $Вт/м^2$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	8,075	$H_h,$ $Вт \cdot год/м^2$
Літнє сонцестояння: $\tau_c=16,15$ год											
G_{bh}	843	821	749	637	500	344	192	65	1	0	8303
$E_{bh} = E_{max} \cdot \pi \cos(\tau/\tau_c); E_{max} = 843 \text{ Вт/м}^2;$											
1. $\tau_c=16,15$	843	827	780	703	600	475	331	175	12	0	9492
2. $\tau_c=14$	843	822	760	659	526	366	188	0	—	—	8328
$E_{bh} = \frac{E_{max}}{2} \left(1 + \cos \pi \frac{2\tau}{\tau_c} \right); E_{max} = 843 \text{ Вт/м}^2;$											
3. $\tau_c=16,15$	843	812	722	587	428	267	130	36	0,2	0	7650
Весняне рівнодення: $\tau_c=12$ год; прийнято $\tau=10,7$ год; $E_{bh} = E_{max} \cos \pi(\tau/10,7)$											
G_{bh}	570	543	471	355	216	72	0	—	—	—	4454
4. E_{bh}	570	546	475	363	220	58	0	—	—	—	4464
Зимове сонцестояння: $\tau_c=7,84$ год; формула $E_{bh} = E_{max} \cos \pi(\tau/8)$											
G_{bh}	185	166	113	42	0	—	—	—	—	—	1012
5. $\tau_c=8$	185	167	115	41	0						1016

Але відповідна цій формулі крива (3) показує значне від'ємне відхилення в області переважаючої інтенсивності, а також помітне зменшення енергетичної експозиції. Ці відхилення нівелюють переваги правильнішої асимптотики при моделюванні інсоляційних режимів і продуктивності сонячних енергетичних установок.

Обидві емпіричні формули Кастрова і косинусна зручні при теоретичному моделюванні роботи сонячних інсталяцій, бо не вимагають попередніх громіздких обчислень і великого числа вхідних параметрів. Зокрема при моделюванні енергетичних перетворень вони дозволяють замінити наближене чисельне сумування годинних експозицій точним розрахунком за відомими табличними формулами.

Однак в деяких інсталяціях прямої дії з горизонтальною поверхнею неможливо орієнтувати перпендикулярно до променів. Тому вони практично завжди освітлюються скісними променями,

інтенсивність яких доцільно посилювати дзеркально відбитими потоками. Зазвичай подібні пристрої мають певну ступінь свободи для часткового коригування нахилу та азимутального напрямку, а її освітлення можна звести до схеми, наведеної на рис. 4.

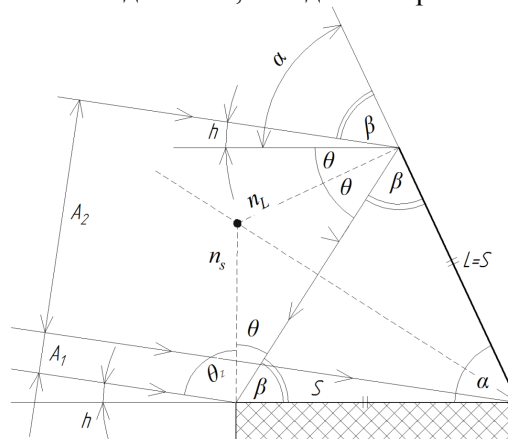


Рис. 4. Хід променів у плоскому дзеркальному концентраторі за однакової ширини відбивача і колектора: α – кут розкриття концентратора; A_1 і A_2 – переріз вхідного прямого і відбитого потоків; n_s і n_L – нормалі до площин S і L ; θ_1 і θ_2 – кути падіння на колектор і дзеркало; h – кут ковзання

Основними елементами плоского дзеркального концентратора є плоске дзеркало 1 із селективним покриттям, розташоване під певним кутом до нормалі, механізм для виставлення кута нахилу 2 та утримувальний пристрій 3 (рис. 5).

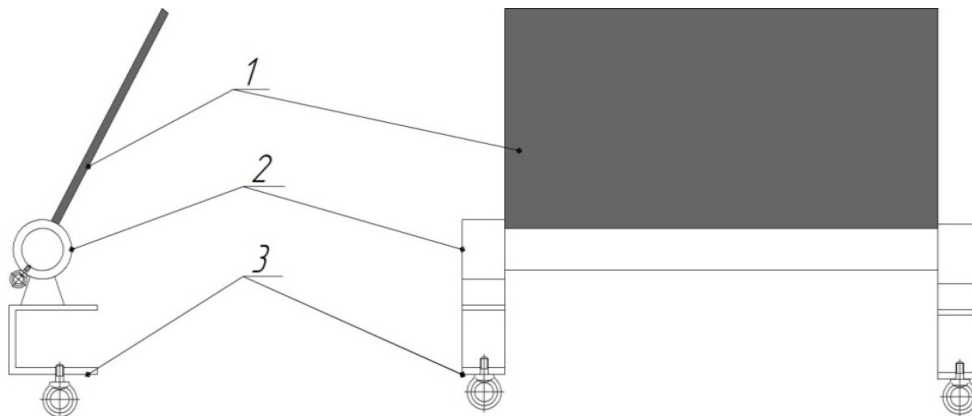


Рис. 5. Схема плоского дзеркального концентратора: 1 – плоске дзеркало; 2 – механізм для виставлення кута нахилу; 3 – утримувальний пристрій

Довжину L дзеркального відбивача приймемо рівною ширині колектора S , усі кутові величини виразимо через кут розкриття α двогранного фоклина, утвореного площинами колектора і дзеркала. За вимоги рівномірного освітлення відбитими променями поверхні колектора, відбитий промінь є основою рівнобедреного трикутника. Відтак з наведеної на рис. 2 побудови випливають такі очевидні співвідношення:

$$\left. \begin{aligned} \beta &= 90^\circ - \frac{\alpha}{2}; \quad \theta_2 = \frac{\alpha}{2}; \quad h + \beta = \alpha; \\ h &= \alpha - \beta = \alpha - 90^\circ + \frac{\alpha}{2} = \frac{3}{2}\alpha - 90^\circ; \\ \theta_1 &= 90^\circ - h = 90^\circ - \frac{3}{2}\alpha + 90^\circ = 180^\circ - \frac{3}{2}\alpha. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Кут ковзання змінюється в очевидних межах $0 < h < 90^\circ$, а верхню межу кута розкриття α визначають з такої нерівності:

$$h = \frac{3}{2}\alpha - 90^\circ < 90^\circ \text{ або } \alpha < 120^\circ. \quad (6)$$

Нижня межа кута розкриття α рівна 60° , бо інакше відбитий крайній промінь зміститься назовні від кромки колектора. Відтак ця величина не повинна виходити за межі інтервалу:

$$60^\circ < \alpha < 120^\circ. \quad (7)$$

Коефіцієнт підсилення променистого потоку очевидно рівний відношенню сумарної енергетичної освітленості колектора $E = E_1 + E_2$ до освітленості тільки прямими променями E_1 . Вони, у свою чергу, розраховуються через відповідні потоки, яка проходять перетинами A_1 і A_2 :

$$E_1 = A_1 G_b \cos \theta_1; E_2 = \rho A_2 G_b \cos \theta_2, \quad (8)$$

де ρ – коефіцієнт відбивання дзеркальної поверхні, яка у випадку скляного побутового дзеркала не перевищує значення $\approx 0,8$ [3]. Звідки

$$k = \frac{A_1 \cos \theta_1 + \rho A_2 \cos \theta_2}{A_1 \cos \theta_1} = 1 + \rho \frac{A_2 \cos \theta_2}{A_1 \cos \theta_1}. \quad (9)$$

Обидва перетини є функціями кута розкриття концентратора α :

$$A_1 = S \cdot \sin h = L \cdot \sin \left(\frac{3}{2}\alpha - 90^\circ \right) = -L \cdot \sin \left(90^\circ - \frac{3}{2}\alpha \right) = -L \cos \frac{3}{2}\alpha. \quad (10)$$

$$A_2 = L \cdot \sin(\alpha - h) = L \cdot \sin \left[\alpha - \left(\frac{3}{2}\alpha - 90^\circ \right) \right] = L \cdot \sin \left(90^\circ - \frac{\alpha}{2} \right) = L \cdot \cos \frac{\alpha}{2}. \quad (11)$$

Після скорочення та елементарних тригонометричних перетворень отримаємо такий вираз для коефіцієнта концентрації:

$$k = 1 + \rho \frac{A_2 \cos \frac{\alpha}{2}}{A_1 \cos \left(180^\circ - \frac{3}{2}\alpha \right)} = 1 + \rho \frac{\cos^2 \frac{\alpha}{2}}{\cos^2 \frac{3}{2}\alpha}. \quad (12)$$

У випадку горизонтального розміщення поверхні приймач, кут ковзання h рівний кутовій висоті Сонця над горизонтом, який є доповнюючим до зенітного: $h = 90^\circ - \theta_z$. Для площини, орієнтованої у південному напрямку і нахиленої під кутом β_n до горизонту, кут ковзання відраховується від площини сприймаючої поверхні. Тоді зручніше орієнтуватися на кут освітлення $\theta_1 = \theta_z$.

Оскільки кут розкриття α однозначно пов'язаний з кутом ковзання h , який, у свою чергу, функціонально залежить від поточного сонячного часу τ , то за потреби можна побудувати й часову залежність коефіцієнта підсилення також $k(\tau)$. Наведені геометричні побудови та виведені на їх основі співвідношення повністю виконуються тільки за умови, коли азимут дзеркальної площини рівний азимуту Сонця $\gamma = \gamma_s$. За її порушення перетин відбитого прямокутним дзеркалом потоку з площиною колектора має вигляд паралелограма, який частково виходить за межі сприймаючої поверхні.

Хід освітленості ПК сумою прямого та відбитого потоків розраховуємо за формулою:

$$E_p(\tau) \simeq k(\tau) \cdot R_\beta \cdot E^{max} \cos \pi \frac{\tau}{\tau_c}. \quad (13)$$

де τ – час відрахований від моменту сонячного полудня, год; R_β – коефіцієнт середньомісячного надходження сонячного випромінювання, що розраховується за табличними значеннями середньомісячного азимутального кута заходу Сонця [8]; E^{max} – максимальна енергетична освітленість горизонтальної поверхні повітряного колектора, Вт/м²; τ_c – тривалість надходження сонячної енергії, с; τ – коефіцієнт пропускання сонячного випромінювання.

Значення E^{max} і тривалість світлового дня τ_c для похилої поверхні встановлюють експериментально. Отримані вирази дають змогу розрахувати коефіцієнт підсилення потоку надходження сонячної енергії (12) і максимальну енергетичну освітленість (13).

Ефективність роботи плоского дзеркального концентратора залежить від коефіцієнта підсилення потоку сонячної енергії k і оптимального кута розкриття α ПДК.

Проведені розрахунки показали, що під час використання ПДК посилення потоку енергетичної освітленості на похилу поверхню ПК в ранковий період з 7^{00} до 10^{00} год. E^{max}

становить від 456 до 965 Вт/м², а у вечірній період з 17⁰⁰ до 20⁰⁰ год. – від 734 до 223 Вт/м². Таким чином, енергетична освітленість зовнішньої поверхні покриття ПК зросла в 1,2 рази, а теплопродуктивність – в 1,3 рази.

Результати досліджень дають підстави запропонувати оптимальні кути розкриття ПДК. При цьому приріст енергетичної освітленості на похилу поверхню ПК з найменшими затратами реалізується при $L = S$ з кутом розкриття від 90 до 120° і коефіцієнтом посилення потоку сонячної енергії k від 1,8 до 1,2.

Висновки. Розроблено методику розрахунку геометричних параметрів плоского дзеркального концентратора для потоку сонячних променів та обґрунтовано ефективність використання плоского дзеркального концентратора для різних азимутальних кутів орієнтації параметрів горизонтальної сприймальної поверхні повітряного колектора відносно інтенсивності надходження сонячних променів. Зокрема раціональні значення двогранного кута (фоклина) α між дзеркалом і колектором, що складають 90...120°. Визначено, що коефіцієнт підсилення потоку сонячної енергії k з найменшими затратами реалізуються від 1,8 до 1,2.

Список використаних джерел

1. Atkhanov A. K. 2010. Klassyfykatsyya sushlynykh ustanovok z ispolzovanyem solnechnoy énerhyu. Adaption of innovation technologies and forms of international collaboration in agrarian education. International conferences reports. GƏNGƏ (Azerbaydzhan), 9, 95–112.
 2. Ozarkiv I. M., Ferents O. B., Kobrynovych M. S. 2007. Osoblyvosti rozrakhunku heliosushlynoyi ustanovky dlya derevyny. Naukovyy visnyk Natsionalnoho lisotekhnichnoho universytetu, 17.1, 91–96.
 3. NASA Surface meteorology and Solar Energy. Available: <http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid/cgi?uid=3030>. Last accessed: 28.11.2016.
 4. Khazimov K. M., Bora G. C., Urmashiev B. A. 2014. Computation of optimal structural and Technical parameters of solar dryer. IJEIT – India, 32, 258–268.
 5. Bilgen E., Bakeka B. 2008. Solar collector systems to provide hot air in rural applications. Renewable Energy, 33(7), 1461–1468. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.09.018>.
 6. Kupreenko A. Y., Ysaev X. M., Baydakov E. M. 2008. K raschetu neobkhodimoy ploshchadi geliokoletektora barabannoy zernosushilki. Vestnyk Bryanskoy hosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademyy, 3, 37–41.
 7. Kassymbayev B. M., Atkhanov A. K., Karaivanov D. P. 2014. Method of calculation solar radiation intensity and its application in solar dryers-greenhouses for production of fruits and vegetables. An International Journal. «Life Science Journal». Acta Zhen gzhou University Overseas Edition. P. O. Box 180432, Richmond Hill, New York 11418, the United States, 11(10), 687–689.
 8. Shemelin V., Matuska T. 2017. Detailed Modeling of Flat Plate Solar Collector with Vacuum Glazing. International Journal of Photoenergy. Vol. 2017. P. 1–9. doi: [10.1155/2017/1587592](https://doi.org/10.1155/2017/1587592).
 9. Vishwakarma D., Kale J. 2017. Experimental study and analysis of solar air heater using of various inlet temperatures. International Journal of Research. Vol. 5, Issue 10. P. 76–80. doi: [10.5281/zenodo.1039619](https://doi.org/10.5281/zenodo.1039619).
 10. Parametric study on the thermal performance and optimal design elements of solar air heater enhanced with jet impingement on a corrugated absorber plate / Alsanossi M. Aboghrara, M. A. Alghoul, B. T. H. T. Baharudin, A. M. Elbreki, A. A. Ammar, K. Sopian, A. A. Hairuddin // International journal of photoenergy. 2018. Article ID 1469385, 21 p. doi: [10.1155/2018/1469385](https://doi.org/10.1155/2018/1469385).
 11. Kolomiets' L. V., Vorobienko P. P., Kozachenko M. T. 2009. Metrologiya, standartizatsiya, sertifikatsiya ta upravlinnya yakistyu v sistemakh zv'yazku. Odesa : VMV, 376.
 12. Tomasik M., Knaga J., Lis S., Gliniak M. 2018. Analysis of the effectiveness of the prototype PV tracking system. Applications of Electromagnetics in Modern Techniques and Medicine (PTZE), IEEE Xplore digital library, Piscataway, NJ, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 264–267. <https://doi.org/10.1109/PTZE.2018.8503095>.
 13. Kurpaska S., Knaga J., Latała H., Cupiał M., Konopacki P., Hołownicki R. 2020. The Comparison of Different Types of Heat Accumulators and Benefits of Their Use in Horticulture. Sensors, vol. 20, nr 5, 1–27. <https://doi.org/10.3390/s20051417>.
 14. Rueda-Márquez J. J., Palacios-Villarreal C., Manzano M., Blanco E., Ramírez del Solar M., Levchuk I. 2020. Photocatalytic degradation of pharmaceutically active compounds (PhACs) in urban wastewater treatment plants effluents under controlled and natural solar irradiation using immobilized TiO₂, Solar Energy, Volume 208, 480–492. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.028>.
- Рецензент Захарчук Віктор Іванович, професор кафедри автомобілів і транспортних технологій Луцького національного технічного університету, доктор технічних наук.

О.П. Карасевська^{1,2}, Т.О. Соловйова¹, П.І. Лобода¹, С.О. Наконечний¹, М.Елькаді¹,
С.В. Завадюк^{1,3}

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського¹

Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України²

КНВП «ФОРТ»³

ВПЛИВ РОЗМІРУ ЧАСТИНОК НА ВІДНОВЛЕННЯ ТА СПІКАННЯ FE ПОРОШКІВ

У статті рентгенівським методом досліджено відновлення водню карбонільного (P10) та розпиленого водою (ПЖРЗ) промислових марок порошків заліза із середнім розміром частинок 5 мкм та 100 мкм відповідно. Вивчено фазовий склад, залишкові напруження та розмір ОКР у рихлих (насипних), пресованих та спечених порошків. Показана необхідність двох етапів відновлення порошків оксиду заліза з витримкою у низькотемпературній (400°C-450°C) та високотемпературній (880°C-910°C) областях. Відновлення розпиленого водою порошків через їх складну морфологію поверхні відбувається в кілька етапів з утворенням проміжних оксидних фаз, контролюється дифузійними процесами і завершується при підвищеній температурі (~900°C). Встановлено вплив залишкових напружень на повноту процесу відновлення порошку. Досліджено відновлення бімодальних складів з різним співвідношенням за розмірами P10 та ПЖРЗ частинок порошків. Отримані найменші залишкові напруження та найвищі значення ОКР у сплавах з відношенням 50/50 P10 та ПЖРЗ.

Ключові слова: порошки заліза, відновлення, залишкові напруження, розмір ОКР, спікання

О.П. Карасевская, Т.А. Соловьева, П.И. Лобода, С.О. Наконечный, М.Элькади,
С.В. Завадюк

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ НА ВОССТАНОВЛЕНИЕ И СПЕКАНИЕ FE ПОРОШКОВ

В статье рентгеновским методом исследовано восстановление водородом карбонильного (P10) и распыленного водой (ПЖРЗ) промышленных марок порошков железа со средним размером частиц 5 мкм и 100 мкм соответственно. Изучены фазовый состав, остаточные напряжения и размер ОКР у рыхлых (насыпных), прессованных и спеченных порошков. Показана необходимость двух этапов восстановления порошков оксида железа с выдержкой в низкотемпературной (400°C-450°C) и высокотемпературной (880°C-910°C) областях. Восстановление распыленных водой порошков из-за их сложной морфологии поверхности происходит в несколько этапов с образованием промежуточных оксидных фаз, контролируется диффузионными процессами и завершается при повышенной температуре (~900°C). Установлено влияние остаточных напряжений на полноту процесса восстановления порошка. Исследовано восстановление бимодальных составов с разным соотношением по размерам P10 и ПЖРЗ частиц порошков. Получены наименьшие остаточные напряжения и высокие значения ОКР в сплавах с 50/50 P10 и ПЖРЗ.

Ключевые слова: порошки железа, восстановление, остаточные напряжения, размер ОКР, спекание

O.P. Karasevska, T.O. Soloviova, P.I. Loboda, S.O. Nakonechny, M. Elkadi, S.V. Zavadiuk
EFFECT OF PARTICLE SIZE ON THE REDUCTION AND SINTERING OF FE
POWDERS

In the article, the reduction of carbonyl (R10) and water-sprayed (PZhR3) industrial iron powders with an average particle size of 5 μm and 100 μm, respectively, have been investigated by the X-ray method. The phase composition, residual stresses and CSR size have been studied for loose (bulk), pressed and sintered powders. The necessity of two stages of reduction of iron oxide powders with exposure in low-temperature (400 °C-450 °C) and high-temperature (880 °C-910 °C) regions is shown. Due to their complex surface morphology, the recovery of powders sprayed with water occurs in several stages with the formation of intermediate oxide phases, controlled by diffusion processes, and completed at an elevated temperature (~ 900 °C). The effect of residual stresses on the completeness of the powder recovery process has been established. The recovery process of bimodal compositions with different size ratios P10 and PZhR3 of powder particles have been investigated. The lowest residual stresses and high values of CSR were obtained in alloys with 50/50 R10 and PZhR3.

Key words: iron powders, reduction, residual stresses, CSR size, sintering

Постановка проблеми. Частка металевих виробів, вироблених методами порошкової металургії (ПМ), постійно зростає [1, 2]. Використання водню для відновлення порошків Fe дозволяє мінімізувати викиди вуглекислого газу в навколишнє середовище та зменшити його внесок у шкідливий парниковий ефект. Для вдосконалення процесу ПМ важливо знизити температуру спікання, що може бути досягнуто за рахунок збільшення питомої поверхні частинок і, як наслідок, кількості контактів між частинками на одиницю об'єму. Тому дрібнодисперсні та нанопорошки все частіше використовуються в ПМ. З одного боку, дрібні частинки більш схильні до спікання через прагнення зменшити надлишок вільної енергії їх високої питомої поверхні і

© О.П. Карасевська, Т.О. Соловйова, П.І. Лобода, С.О. Наконечний¹, М.Елькаді,
С.В. Завадюк

зменшити залишкові напруження, що виникають під час кристалізації. З іншого боку, використання порошків з дрібними частинками призводить до погіршення газопроникності шихти, що пов'язано зі значним зменшенням порових каналів під час інтенсивного спікання частинок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На поверхні частинок порошків Fe, як і багатьох інших металів (наприклад, Al, Ti, Mn, Zn), утворюються оксидні шари, також кисень присутній і в основній масі частинок переважно на дефектах структури. Критерієм спонтанного окислення є зменшення енергії Гіббса, тобто $G < 0$. У цих металах значення G має негативне значення, що вказує на можливість спонтанної реакції окислення металів. Склад окалини на поверхні порошків заліза може включати кілька оксидних фаз: Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO [3-5]. Товщина і співвідношення оксидів у поверхневому шарі частинок визначає градієнт концентрації заліза в окалині і залежить від стану металу, температури, парціального тиску кисню та інших параметрів підготовки та зберігання порошку. Чим менший розмір частинок оксиду заліза, тим більше кисню потрібно видаляти при їх відновленні. У той же час видалення понад 90% кисню з ультрадисперсних частинках оксиду заліза (1-1,5 мкм) насипної щільності може бути досягнуто за кілька секунд за допомогою сумішей $\text{H}_2 + \text{CO}$ як відновника [6]. Загалом відновлення можна розділити на три етапи. Перший - це інкубаційний період, який відповідає видаленню поверхневої окалини на частинках порошків. Тривалість цього періоду збільшується зі зниженням температури. У другому періоді, періоді прискорення, ядра порошків заліза ростуть послідовно через формування перешийків. В останній період спостерігається видалення основного кисню із об'єму порошків, і швидкість відновлення зменшується внаслідок зіткнень зростаючих частинок між собою. Цей заключний етап відновлення - це початок інтенсивного процесу спікання.

Необхідно мати на увазі, що металеві домішки, такі як Cr, Mn, Ca, Al, Mg, Ti та ін., присутні в низьких концентраціях порошків оксиду Fe, об'єм і кількість яких залежить від способу отримання порошків [7, 8]. Домішки можуть попадати в порошки і через зв'язку речовину, яку додають для ущільнення порошку перед спіканням [9-11]. Якщо кисень вчасно не видаляти, домішки можуть утворювати прості та складні оксиди (шпінелі) (наприклад, Cr, Mn), які важко видалити до досягнення звичайної температури спікання порошків заліза ($\sim 1050^\circ\text{C} - 1350^\circ\text{C}$), оскільки вони стійкі до високих температур ($> 2000^\circ\text{C}$) [12, 13]. Найчастіше при вивченні відновлення частинок порошку Fe використовують методи контролю атмосфери при нагріванні [6, 7, 9, 13], термогравіметричні [5, 13, 14], магнітні [4, 15], зображення на TEM, SEM [4, 5, 7], методом XRD [4, 6] визначають об'ємну частку оксидів, залишаючи осторонь формування структурних особливостей отриманої зеренної структури заліза. Структура та напруження при відновленні порошків заліза, а також фазовий склад визначають механічні властивості готового продукту [16-20].

Постановка завдань. Метою даної роботи є вивчення відновлення порошків оксиду Fe різного розміру в насипному та ущільненому вигляді при відновленні у водні та аналіз фазового та структурного стану зразків бімодального складу після спікання.

Викладення основного матеріалу.

В якості вихідних матеріалів використовували карбонільне залізо (P10) із середнім діаметром 5 мкм та залізо, розпилене водою із середнім розміром 100 мкм (ПЖР3) (рис. 1). Органічна фенольна сполука використана при ущільненні порошків, яке отримували одностороннім пресуванням при 300 МПа. Насипна щільність порошків заліза P10 та ПЖР3 становить $3,01 \text{ г/см}^3$ та $2,86 \text{ г/см}^3$ відповідно.

Відновлення порошків вивчали на двох стадіях: 1 стадія – відновлення за низької температури (400°C) протягом 10хв при швидкості нагрівання 10°C/хв ; 2 стадія - поступовий, із швидкістю 10°C/хв , нагрів до 900°C і витримка 20хв. без низькотемпературної витримки. Охолодження відбувалося із піччю. Спікання досліджували на вихідних порошках заліза та їх сумішах у таких співвідношеннях порошків: 100мас.% P10; 30 мас. % ПЖР3 + 70 мас. % P10; 50 мас. % ПЖР3 + 50 мас. % P10; 70 мас. % ПЖР3 + 30 мас. % P10, 100мас.% ПЖР3. При спіканні порошків поєднували 1 і 2 режими відновлення із подальшим нагрівом зі швидкістю 5°C/хв до 1240°C із витримкою 60 хв і охолодженням з піччю. Перші два етапи відновлення проводили в атмосфері H_2 . Останній етап спікання проводили в атмосфері $\text{N}_2 + \text{H}_2$ при парціальному тиску 400 мбар.

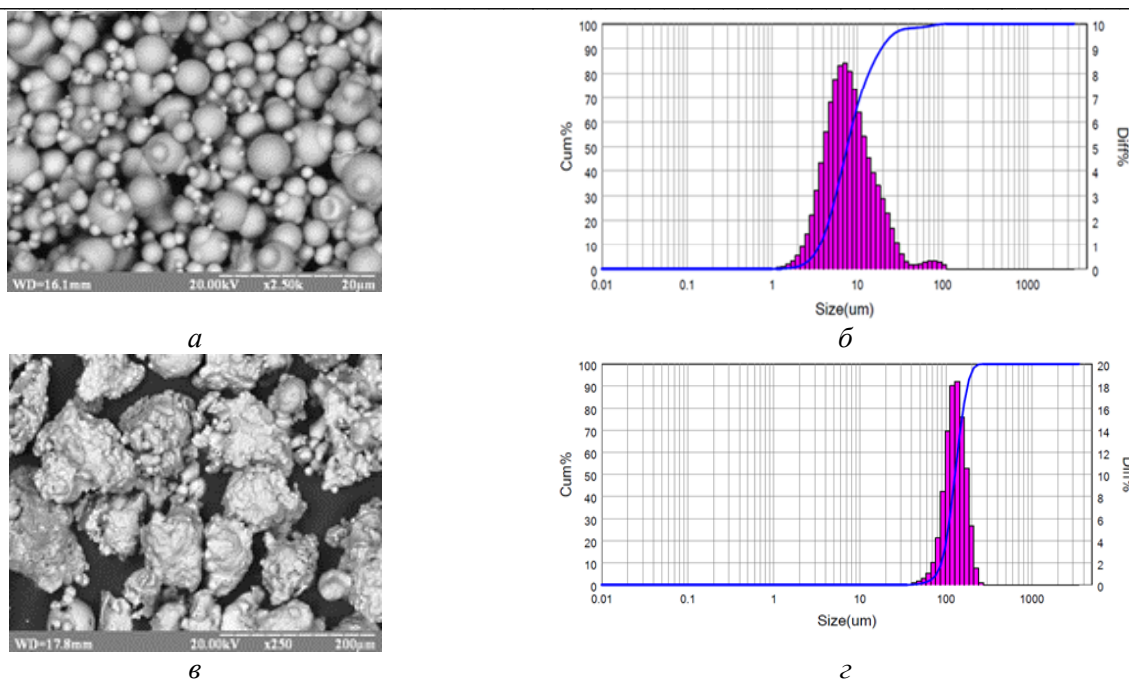


Рис.1. Загальний вигляд та розподіл по фракціях порошків P10 (а, б) та ПЖРЗ (в, г)

Мікроструктурні дослідження проводили за допомогою скануючого електронного мікроскопа (REM 106 I). Рентгенологічні дослідження, проведені на дифрактометрі Ultima IV (Ріаку, Японія), у монохроматичному випромінюванні $\text{CuK}\alpha$ з використанням програмного забезпечення для вивчення фазового та структурного стану за методом Рітвельда. Для всіх вимірювань використовувалася геометрія відбиття по Бреггу-Брентано. Зразки для мікроструктурних та рентгеновських досліджень готували за стандартною методикою. Значення залишкових напружень на макроскопічному ($\text{ЗН}_{\text{макро}}$) і мікроскопічному ($\text{ЗН}_{\text{мікро}}$) рівнях та областей когерентного розсіювання (ОКР) отримували стандартними методами [21–24]. Оцінка $\text{ЗН}_{\text{макро}}$ та $\text{ЗН}_{\text{мікро}}$ було здійснено відповідно до закону Гука [25] на підставі отриманих значень положення і ширини рефлексів за методами Рітвельду і Вільямсона – Холла, які є програмним забезпеченням дифрактометру. Розподіл частинок за розміром частинок Fe визначали за допомогою обладнання Bettersizer S3 Plus.

Характеристика порошків ПЖРЗ та P10 у вихідному стані

XRD рентгенограми порошків ПЖРЗ та P10 у вихідному стані показані на рис. 2. Для порошку ПЖРЗ (рис. 2а, б, крива 1) відбиття відповідають кристалічній фазі ОЦК з параметром кристалічної решітки $d_{\text{ex}} = 2,85882 \text{ \AA}$ близьким до $\text{Fe-}\alpha$ (карта ICDD 00-001-1252 $d_{\text{card}} = 2,860 \text{ \AA}$). На рентгенограмах порошку P10 (рис. 2а, б, крива 2) відбиття також знаходяться в положенні, що відповідає фазі ОЦК, але вони зміщені на кут $\delta 2\theta = -0,1042^\circ$ порівняно з фазою $\text{Fe-}\alpha$ і мають величезне розширення рефлексів (FWHM), незвичне для кристалічних структур. Так, $\text{FWHM}_{\{110\}}$ становить більше 1° у порошку P10, тоді як у порошку ПЖРЗ $\text{FWHM}_{\{110\}}$ становить 0.20240° .

Хімічний склад поверхневої окалини на частинках заліза рідко є однорідним за вмістом заліза і, як правило, має різні оксиди (Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO). Товщина окалини залежить від способу отримання, зберігання, розміру та форми частинок порошку і, як правило, становить 5–20 нм [4, 14, 15]. Рентгеновський шар напівпоглинання у Fe_xO_y становить ~ 23 мкм. Об'єм оксидів, які потрапляють в об'єм рентгеновського відбиття, обернено пропорційний (приблизно) їх радіусу. Це означає, що для однакової товщини окалини на порошках різного розміру їхній внесок у розподіл інтенсивності на рентгенограмах у порошку P10 у 10 разів більший, ніж у порошку ПЖРЗ. У безпосередній близькості відбиття $\{110\}$ фази $\text{Fe-}\alpha$ ($2\theta 44,74^\circ$) є відбиття від різних оксидних фаз. Магнетит (Fe_3O_4) і маггеміт $\square\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ мають кристалічні структури з близькими параметрами елементарної комірки і формують відбиття $\{400\}$ при значенні $2\theta \sim 43,8^\circ$, тоді як гематит ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) і вюстит (FeO) дають рентгеновські відбиття променів $\{110\}$ та $\{200\}$ при $2\theta \sim 42,6^\circ$ та $-2\theta \sim 43,1^\circ$ відповідно [4, 15].

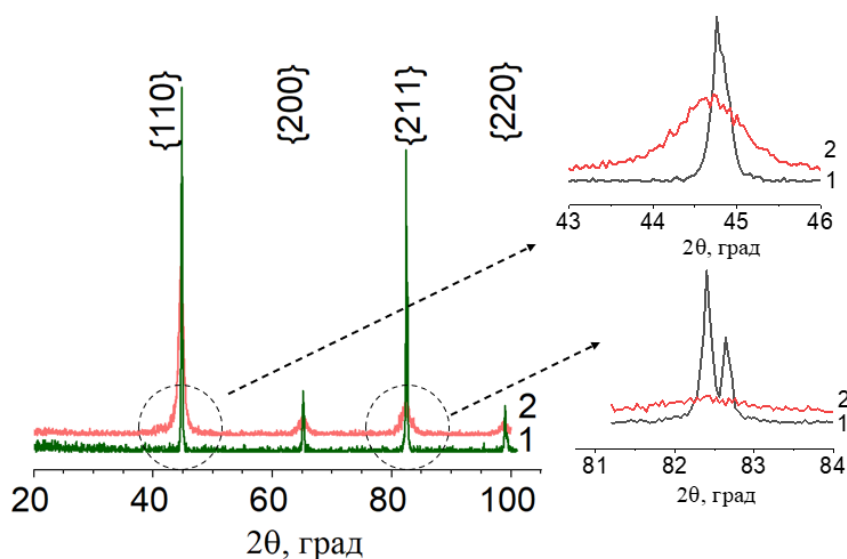


Рис. 2. Рентгенограми порошків ПЖРЗ (1) і Р10 (2) у вихідному стані

Відбиття від оксидів, із додатком на атомне впорядкування та збільшенням концентрації дефектів ґратки у зовнішніх шарах частинок порошку дозволяють пояснити величезне розширення відбитків у порошку Р10. Проявлена "аморфність рентгенограм" не дозволяє оцінити ЗН та розмір ОКР у вихідному стані порошку Р10. Для порошку ПЖРЗ така оцінка була проведена, а результати наведені в таблиці 1.

Табл. 1.

ОКР та залишкові макро-, мікронапруження в порошках заліза

Марка порошку	Вихідний стан			1 стадія відновлення			2 стадія відновлення		
	ЗН _{макро} МПа	ЗН _{мікро} МПа	ОКР Å	ЗН _{макро} МПа	ЗН _{мікро} МПа	ОКР Å	ЗН _{макро} МПа	ЗН _{мікро} МПа	ОКР Å
Р10	-	-	-	300 ±25	70 ±15	560 ±8	290 ±25	220 ±35	421 ±17
ПЖРЗ	450 ±40	165 ±2 5	430 ±24	240 ±25	115 ±20	430 ±35	120 ±20	85 ±15	791 +82

Залишкові напруження в порошку ПЖРЗ можуть бути спричинені нерівноважними умовами кристалізації в промисловому процесі, який використовує швидкісне охолодження при розпилюванні водою крапель заліза. Рентгенограми порошків Р10 та ПЖРЗ після відновлення при 400°C і 900°C показані на рис. 3. Рентгенограми містять чіткі інтенсивні відбиття, відповідні ОЦК фази.

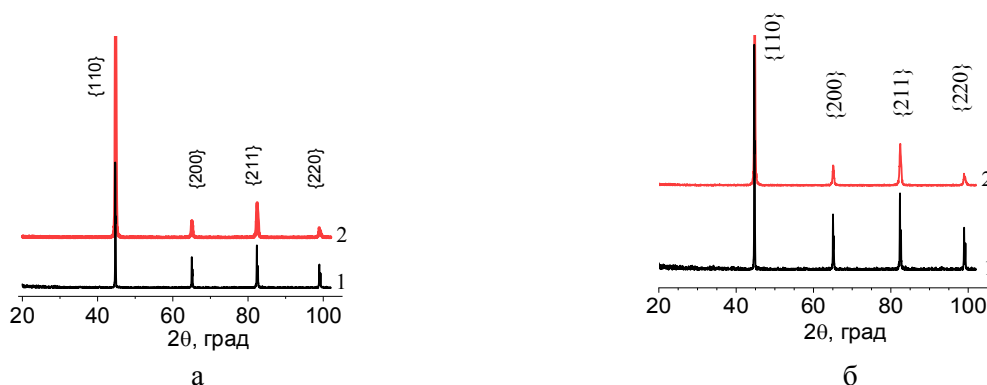
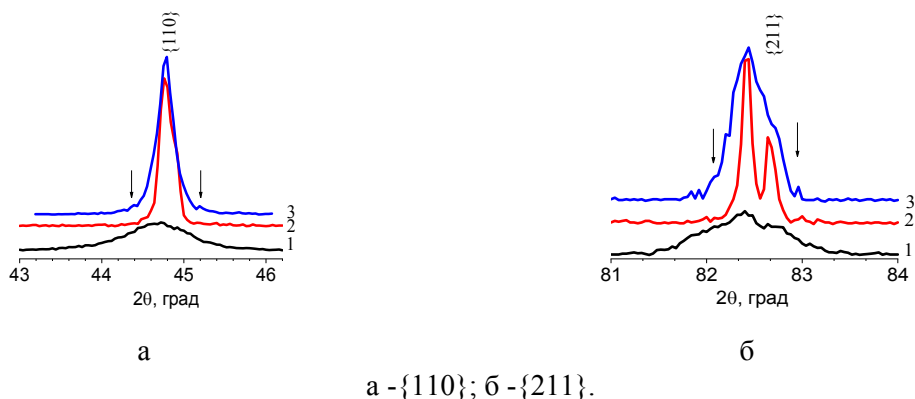


Рис. 3. Рентгенограми порошків ПЖРЗ (1) і Р10 (2) після першої (а) та другої (б) стадій відновлення

Відновлення порошку заліза P10

Порівняльний аналіз розподілу інтенсивності ($I_{q\parallel}$) відбитків у вихідному стані та після відновлення дозволяє оцінити зміни фазового та структурного станів, що відбулися у порошку P10 (рис. 4).



а - {110}; б - {211}.
Рис. 4. Рентгенограми порошків P10 у вихідному стані (1), після першої 400 °C (2) та другої 900 °C (3) стадій відновлення

Після відновлення при 400 °C (рис. 4, лінія 2) розширення відбитків суттєво зменшилось порівняно з початковим станом (рис. 4, лінія 1). Для {110} рефлексу $\text{FWHM} \approx 0.2196^\circ$ а для {211} відбиття $K_{\alpha 1,2}$ дублет рентгенівського Cu випромінювання чітко розділяється. Параметр ґратки P10 порошку після відновлення при 400 °C становить $d \approx 2,864 \text{ \AA}$. Максимальна розчинність кисню в залізі незначна: залізо містить 0,03 мас.% кисню при 900 °C, 0,021 мас.% при 850 °C, 0,009 мас.% при 700 °C - з абсолютною точністю $\pm 0,003 \text{ мас.}\%$ [26]. Оскільки максимальна розчинність кисню в залізі незначна, його вплив на параметри ґратки незначний. Залізо, що містить 0,03 мас.% кисню є практично насиченим і має параметр $2,8656 \pm 0,0005 \text{ \AA}$, який, з похибкою експерименту, збігається з параметром ґратки Fe. Відновлення оксидів Fe при 400 °C можна розглядати як першу стадію, що відповідає втраті 3,5 мас.% (із загальної величини $\sim 30 \text{ мас.}\%$) за рахунок видалення поверхневих оксидів та розкриття залізних ядер порошків. Подальший етап відновлення порошків оксиду Fe при нагріванні пов'язаний з видаленням основного кисню. Оскільки в твердому розчині заліза міститься незначна кількість кисню, основний його вміст припадає на структурні дефекти та легко окислювані домішки, такі як Cr, Si, Mn, Si та ін. На цій стадії відновлення в порошку P10 спостерігається утворення перешийків між частинками.

Розподіл $I_{q\parallel}$ відбитків {110} та {211} на рентгенограмах порошку P10 після відновлення при постійному нагріванні до 900 °C показано на рис. 4, криві 3. Порівняння $I_{q\parallel}$ відбитків після відновлення при 400 °C та 900 °C, дає підставу зазначити, що після відновлення при 900 °C розширення {110} та {211} відбитків помітно збільшилося ($\text{FWHM}_{\{110\}} \approx 0.2618^\circ$), а розподіли $I_{q\parallel}$ {211} знову не розділяються на дублет $K_{\alpha 1,2}$. Максимуми відбитків {110} та {211} на кривих 2, 3 на рис. 4 практично збігаються, але додаткові піки інтенсивності (ДПІ) з'являються поблизу відбитків Fe- α фази після відновлення при 900 °C. Особливо ДПІ помітні під великими кутами відбиття ({211}), але їх також можна побачити і під малими кутами поблизу відбиття {110}. Під час відновлення зразків порошку P10 при 900 °C припикання його частинок призводить до утворення спеченого суцільного об'єму. Це явище призводить до ускладнення видалення поверхневих і об'ємних оксидів. Процес відновлення при безперервному нагріванні дрібних порошків ($\sim 25 \text{ мкм}$) з утворенням закритої пористості слід розглядати, як дифузійний процес, який вимагає додаткового часу або підвищення температури для завершення [2, 5, 14, 27].

Оцінка $3N_{\text{макро}}$, $3N_{\text{мікро}}$ та розмірів ОКР для порошку P10 після відновлення наведені в таблиці 1. Після відновлення при 400 °C та 900 °C макронапруження у порошку P10 практично однакові ($\sim 300 \text{ МПа}$) і можуть бути зумовлені поверхневим натягом частинок. Мікронапруження після відновлення при 400 °C у ~ 3 рази менше, ніж після відновлення при 900 °C, а розмір ОКР в $\sim 1,4$ більший. Зменшення мікронапружень та збільшення розміру ОКР після відновлення при 400 °C відбувається через відносну зміну питомих об'ємів відновлених та окислених частинок

порошку та морфології їх поверхні. Після відновлення при 900°C мікронапруження збільшуються, а розмір ОКР зменшується через появу додаткових фаз у порошок Р10.

Відновлення розпиленого водою порошку заліза ПЖРЗ

Відновлення порошку ПЖРЗ при 400 °С призвело до змін розподілу I_{q} на рентгенограмах, і рефлекси на великих кутах відбиття проявляють ще більш чітко (рис. 5, лінія 2). Спостерігається збільшення розширення відбиття $\{211\}$ ($\text{FWHM } \{211\} \cong 0.2344^\circ$) порівняно з початковим значенням ($\text{FWHM } \{211\} \cong 0.1600^\circ$) та зміщення його положення ($\delta 2\theta \{211\} \cong -0.044^\circ$). Відбиття ДПІ спостерігаються в кутовому інтервалі та поблизу розподілу I_{q} відбиття $\{211\}$ Fe- α . Відновлення при 900 °С (рис. 5, лінія 3) характеризується звуженням відбитків на рентгенограмі ($\text{FWHM } \{211\} \cong 0.1356^\circ$) та їх додатковим зміщенням ($\delta 2\theta \{211\} = -0.058^\circ$) порівняно з початковим значенням. Типові частинки порошку ПЖРЗ мають нерегулярну морфологію, а на їх поверхні спостерігаються порожнини і тріщини, покриті шаром оксидів заліза. Видалення кисню на частинках такої морфології поверхні потребує більше часу, оскільки фізичні бар'єри обмежують ефективний відтік продуктів відновлення. Можливо, відновлення ПЖРЗ при 400 °С є першим кроком у ланцюзі відновлення оксидів $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$, який завершується вже із збільшенням температури відновлення, що спостерігалось і в роботі [15]. Збільшення розміру частинок також ініціює утворення проміжних оксидних фаз під час переходу $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}$ [4], що можливо і спричиняє появу ДПІ на рентгенограмах після відновлення. Швидкість нагрівання розпиленого водою порошку розміром більше, як 25 мкм істотно впливає на температуру завершення відновлення [14, 15]. Зміна маси порошку до $\sim 99.85\%$, що відповідає його повному відновленню, досягається при температурі близько 800°C при швидкості нагрівання 10°C/хв, тоді як при швидкості нагрівання 40 °С/хв. це зниження ваги досягається лише при 1350°C. Значення $\text{ЗН}_{\text{макро}}$ і $\text{ЗН}_{\text{мікро}}$ та розмір ОКР після відновлення при 400°C та 900°C наведені в таблиці 1. Залишкові напруження у порошок ПЖРЗ зменшуються з збільшення температури відновлення, і розмір ОКР зростає, що може бути пов'язано з послідовним поетапним видаленням поверхневих та об'ємних оксидів у порошок.

Порівняння значень ОКР у відновлених порошках Р10 і ПЖРЗ показує (табл. 1), що найвищі значення ОКР відповідають більш повному відновленню Р10 порошку насипної щільності при 400°C, а ПЖРЗ порошку насипної щільності при 900°C. Найменші значення $\text{ЗН}_{\text{макро}}$ і $\text{ЗН}_{\text{мікро}}$ відповідають найбільшим значенням ОКР. Залишкові напруження впливають на утворення шийки під час спікання порошку, що відповідає за створення замкнутої пористості, впливає на повноту відновлення оксидів заліза та утворення простих і складних оксидів металевих домішок [16].

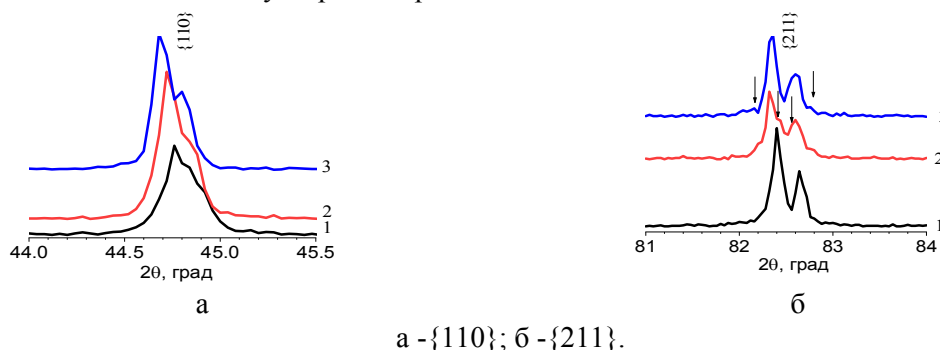
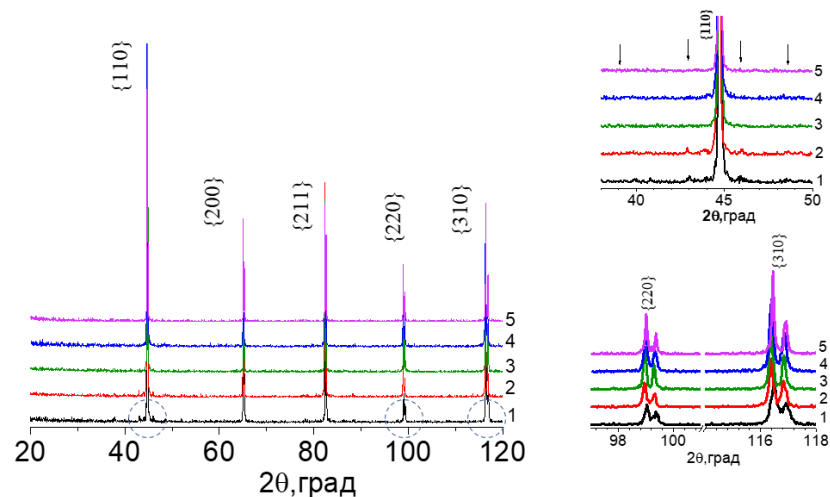


Рис. 5. Рентгенограми порошків ПЖРЗ у вихідному стані (1), після першої 400 °С (2) та другої 900 °С (3) стадій відновлення

Спікання порошків Fe різного гранулометричного складу

На рисунку 6 показані XRD-рентгенограми зразків бімодального складу, спечених при 1240°C. Інтенсивні відбиття на XRD-рентгенограмах всіх спечених порошкових матеріалів свідчать про наявність ОЦК Fe- α фази, тоді як малої інтенсивності відбиття ДПІ на кривих 1, 2, 4, 5 відображають наявність додаткових фаз у структурі зразків.

Оцінка загального об'єму додаткових фаз, проведена методом Рітвельда, дає значення $\cong 3$ мас.% для бімодальних сумішей 1 і менше $\cong 2$ мас.% для матеріалів 2, 4, 5. Склад додаткових фаз через їх малу кількість та інтенсивність відбитків не дає можливості точного компонентного визначення.



1 - 100мас.% P10; 2 - 30 мас. % ПЖРЗ + 70 мас. % P10; 3 - 50 мас. % ПЖРЗ + 50 мас. % P10; 4 - 70 мас. % ПЖРЗ + 30 мас. % P10; 5 - 100мас.% ПЖРЗ

Рис. 6. Рентгенограми порошків Fe з різним гранулометричним складом

Для зразків зі складом 50 мас. % ПЖРЗ + 50 мас. % P10 спостерігаються лише відбитки Fe- α фази на рентгенограмі (рис. 6, лінія 3). Максимуми розподілів $I_{q\parallel}$ всіх сплавів збігаються, що відповідає одному і тому ж параметру ґратки цих сплавів (рис. 6). Кутові положення максимумів $I_{q\parallel}$ розподілів відбитків $\{220\}$ та $\{310\}$ з великими кутами відбиття 2θ у зразках 1, 2, 4, 5 зміщені відносно лінії 3. Величина зсуву в рентгенограмах була використана для оцінки $ЗН_{\text{макро}}$ для спечених зразків і результати наведені на рисунку 7 разом із значеннями $ЗН_{\text{макро}}$ для двох стадій відновлення.

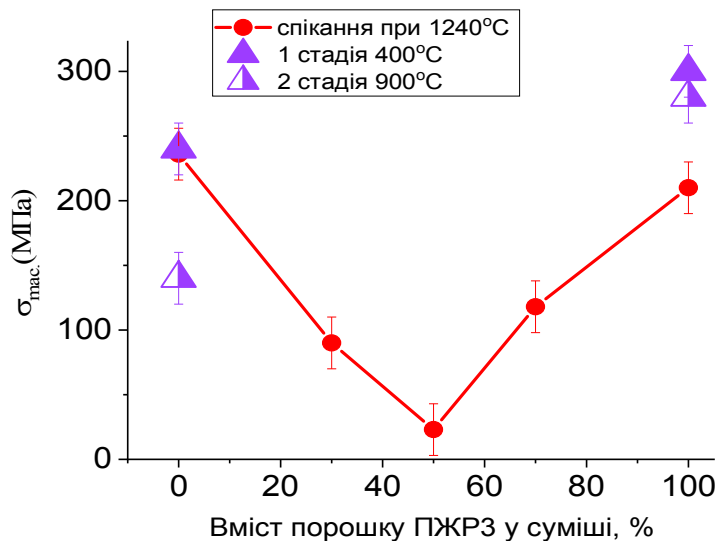


Рис. 7. Залишкові макронапруження в спечених залізних матеріалах різного гранулометричного складу

Максимум $ЗН_{\text{макро}}$ спостерігається для зразків, приготованих із порошків однакового розміру: P10 та ПЖРЗ. Найменше значення $ЗН_{\text{макро}}$ отримано на сплаві 50/50, де $ЗН_{\text{макро}}$ становлять $\sim 25\text{-}40\text{ МПа}$. Для всіх сумішей порошків відбиття незначно розширюється, що чітко проявляється розділенням дублету випромінювання $\text{CuK}\alpha_{1,2}$ на великих кутах відбиття (рис. 6) і практично означає відсутність $ЗН_{\text{мікро}}$. Розмір ОКР у сплаві 50 мас.% P10 та 50 мас.% ПЖРЗ становить $\sim 650\text{ \AA}$. В роботі [19] було досліджено додавання порошку карбонільного заліза до порошку, що розпилюється водою і показано, що це призводить до збільшення міцності на вигин матеріалу після спікання. Ми припускаємо, що тверді сферичні частинки порошку P10 створюють

каркас, який запобігає руйнуванню частинок порошку ПЖР3 і тим самим зменшує появу фізично закритих об'ємів під час пресування. Це збільшує здатність видаляти кисень з поверхні частинок і перешкоджає утворенню небажаних фазових компонентів. Спікання порошків різного гранулометричного складу відбувається в умовах збільшення кількості і характеру розвинених множинних контактів, що дає змогу зменшити залишкові напруження окремих частинок порошків.

Висновки

1. У порошку Р10 (5 мкм) насипної щільності відновлення поверхневих оксидів відбувається в межах (400⁰С -450⁰С). Пресовані порошки Р10 обов'язково повинні включати витримку на цій низькотемпературній стадії, що дозволяє зменшити поверхневі оксиди Fe. В іншому випадку при безперервному нагріванні до температури ~900 °С металеві домішки утворюють прості або складні оксиди (шпінелі), а велике значення питомої поверхневої енергії призводить до спікання частинок, утворення закритої пористості та зменшення повноти процесу відновлення. Після відновлення при 400 °С і 900⁰С залишкові макронапруження в порошку Р10 практично однакові (~300МПа) і визначаються поверхневим натягом частинок. Залишкові мікронапруження після відновлення при 400 °С у 3 рази менше, а розмір ОКР в 1,4 рази вищий, ніж після відновлення при 900 °С.

2. У розпилюваному водою порошку ПЖР3 (100 мкм) насипної щільності розвинута морфологія поверхні обмежує ефективний відтік продуктів відновлення, в результаті чого процес відбувається в кілька етапів з утворенням проміжних оксидних фаз, контролюється дифузійними процесами і закінчується при підвищеній температурі (> 900 °С). Залишкові напруження в порошку ПЖР3 зменшуються, а розмір ОКР збільшується із збільшенням температури відновлення.

3. Тверді сферичні порошки заліза Р10, додані до розпилюваних водою порошків ПЖР3, створюють каркас, запобігають руйнуванню цих частинок і зменшують утворення фізично закритих об'ємів під час пресування. Одночасно, бімодальні суміші порошків визначаються розвинутими контактами між частинками, характер яких забезпечує дифузійну рухливість атомів заліза і визначається зменшенням залишкових напружень. Залишкові напруження найефективніше зменшуються при використанні 30-70 мас.% сферичних порошків Р10.

Список використаних джерел:

1. World Steel Association, "Steel Statistical Yearbook", 2017. [Online]. Available: www.worldsteel.org. [Accessed: Oct. 2018].
2. D. Spreitzer, J. Schenk, "Reduction of Iron Oxides with Hydrogen - A Review", *Steel research int.* 1900108, pp.1-17, 2019. DOI: 10.1002/srin.201900108.
3. V. O. Kubaschewski and B. E. Hopkins, *Oxidation of metals and alloys*. London: Butterworths Scientific Publications 1953.
4. A. Lak, M. Kraken, F. Ludwig, A. Kornowski, D. Eberbeck, S. Sievers, F.J. Litterst, H. Weller, M. Schilling, "Size dependent structural and magnetic properties of FeO-Fe₃O₄ nanoparticles," *Nanoscale*, vol. 5, pp. 12286-12295, 2013. DOI: 10.1039/c3nr04562e
5. J. Wendel, S. K. Manchili, E. Hryha, L. Nyborg, "Reduction of surface oxide layers on water-atomized iron and steel powder in hydrogen: Effect of alloying elements and initial powder state," *Thermochimica Acta*, vol. 692, p. 178731, 2020. doi.org/10.1016/j.tca.2020.178731
6. F. Chen, Y. Mohassab, T. Jiang, H. Y. Sohn, "Kinetics of the Reduction of Hematite Concentrate Particles by Carbon Monoxide Relevant to a Novel Flash Ironmaking Process," *Metall. Mater. Trans. B*, vol. 46B, p. 1133, 2015. DOI:10.1007/s11663-015-0345-7.
7. M. Hrubováčková, E. Dudrová, E. Hryha, M. Kabátová, J. Harvanová, "Parameters Controlling the Oxide Reduction during Sintering of Chromium Prealloyed Steel," *Advances in Materials Science and Engineering*, Article ID 789373, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/789373>.
8. A. Davydenko, "Three-dimensional investigation of non-metallic inclusions during powder metallurgy production," M.S. thesis, Dep. of Mat. Science and Eng. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 04-2012.
9. E. Hryha, L. Nyborg, "Oxide transformation in Cr-Mn-prealloyed sintered steels: thermodynamic and kinetic aspects," *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 45 pp. 1736-1747, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11661-013-1969-3>.

10. D. Chasoglou, E. Hryha, L. Nyborg, "Effect of process parameters on surface oxides on chromium-alloyed steel powder during sintering," *Mater. Chem. Phys.* vol. 138, pp. 405–415, 2013. doi.org/10.1016/j.matchemphys.2012.11.074.
11. C. Gierl-Mayer, R. de Oro Calderon, H. Danninger, "The role of oxygen transfer in sintering of low alloy steel powder compacts: a review of the "Internal getter" effect," *JOM*, vol. 68, pp. 920-927, 2016. doi.org/10.1007/s11837-016-1819-z.
12. S. Zhang, W. E. Lee, "Spinel-Containing Refractories" in *Refractories Handbook*, C. Schacht, Eds. 2004. DOI doi.org/10.1201/9780203026328
13. E. Hryha, E. Dudrova, L. Nyborg, "On-line control of processing atmospheres for proper sintering of oxidation-sensitive PM steels," *J Mater Process Technol.*, vol. 212, pp. 977–987, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jmatp.rotec.2011.12.008>.
14. J. Wendel, S.K. Manchili, E. Hryha *et al.*, "Oxide reduction and oxygen removal in water-atomized iron powder: a kinetic study," *J Therm Anal Calorim*, vol. 142, pp. 309–320, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09724-6>
15. B. P. Pichon, O. Gerber, C. Lefevre, I. Florea, S. Fleutot, W. Baaziz, M. Pauly, M. Ohlmann, C. Ulhaq, O. Ersen, V. Pierron-Bohnes, P. Panissod, M. Drillon and S. Begin- Colin, "Microstructural and Magnetic Investigations of Wustite-Spinel Core-Shell Cubic-Shaped Nanoparticles," *Chem. Mater.*, vol. 23, n. 11, pp. 2886–2900, 2011. doi.org/10.1021/cm2003319.
16. S.T. Hong, Y. Hovanski, C. Lavender *et al.*, "Investigation of Die Stress Profiles During Powder Compaction Using Instrumented Die," *J. of Materi Eng and Perform*, vol. 17, pp. 382–386, 2008. <https://doi.org/10.1007/s11665-008-9229-1>.
17. B. AL-Mangour, "Powder metallurgy of stainless steel: state-of-the art, challenges" in: *Stainless Steel*, A. Pramanik and A. K. Basak, Eds., Nova Science Publishers Inc., 2015. ISBN: 978-1-63482-080-6.
18. H. Danninger, C. Gierl, S. Kremel, G. Leitner, K. Jaenicke-Roessler, and Y. Yu, "Degassing and deoxidation process during sintering of unalloyed and alloyed PM steels," *Powder Metall. Prog.*, 2, No. 3, pp. 125–140, 2002. www.researchgate.net/publication/200035449.
19. V.Y. Lopatin, Z.V. Ereemeeva, N.D. Nguyen, "The Influence of Carbonyl Iron Powder, Grade VK, on Compactability and Strength Properties of Sintered Atomized Iron Powder, Grade PZhRV 2.200.26," *Inorg. Mater. Appl. Res.*, vol. 11, pp. 403–407, 2020. <https://doi.org/10.1134/S2075113320020239>
20. A. Zavaliangos, J.M. Missiaen, D. Bouvard, "Deformation Anisotropy in Shrinkage During Sintering," *Science of Sintering*, vol. 38, pp. 13-25, 2006. DOI: 10.2298/SOS0601013Z.
21. H. M. Rietveld, "A profile refinement method for nuclear and magnetic structures," *J. Appl. Cryst. V.*, vol. 2, pp. 65–71, 1969. <https://doi.org/10.1107/S0021889869006558>
22. A. Taylor. X-ray metallography, J. Wiley & Sons, 1961.
23. D. Balzar, N. Audebrand, <https://journals.iucr.org/j/issues/2004/06/00/ks0213/index.html> - oide M. R. Daymond, A. Fitch, A. Hewat, J. I. Langford, A. Le Bail, D. Louër, O. Masson, C. N. McCowan, N. C. Popa, P. W. Stephens and B. H. Toby, "Size-strain line-broadening analysis of the ceria round-robin sample," *J. Appl. Cryst.*, vol. 37, Part 6, Dec., pp. 911-924. 2004, <https://doi.org/10.1107/S0021889804022551>.
24. A. Leineweber, "Anisotropic microstrain broadening in cementite, Fe₃C, caused by thermal microstress: Comparison between prediction and results from diffraction-line profile analysis," *J. Appl. Cryst.* vol.45, pp. 944-949, 2012. DOI:10.1107/S0021889812036862
25. Hooke's Law, F.P. Miller, A.F. Vandome, Mc.Brewster John. Eds., VDM Publishing, 2010. ISBN, 6132845100, 9786132845108, 92pp.
26. A. U. Seybolt, "Solubility of Oxygen in Alpha Iron," *JOM*, vol. 6 (5), pp. 641-644, 1954. Doi: [10.1007/bf03398887](https://doi.org/10.1007/bf03398887).
27. E. Hryha, L. Nyborg, "Oxide transformation in Cr-Mn-prealloyed sintered steels: thermodynamic and kinetic aspects," *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 45 pp. 1736–1747, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11661-013-1969-3>.

Рецензент:

Саввакін Д.Г., п.н.с. ІМФ ім. Г.В. Курдюмова, д.ф.-м.н.

С.М. Юхимчук, С.Ф. Юхимчук, Н.О. Толстушко, Л.М. Дацюк
Луцький національний технічний університет

ЕНЕРГЕТИКА БРАННЯ СТЕБЕЛ ЛЬОНУ БРАЛЬНИМ АПАРАТОМ З ПРЯМОЛІНІЙНИМИ ПОПЕРЕЧНИМИ РІВЧАКАМИ

У статті теоретично досліджено енергетику процесу брання стебел льону, які затискаються у прямолінійному поперечному бральному рівчаку та розташовані в різних місцях пучка; вивчено динаміку зміни складових потужності брання при переміщенні стебла льону по бральному рівчаку; визначено секундну роботу брання, та значення її складових.

Ключові слова: брання, стебла льону, бральний апарат, прямолінійний поперечний рівчак, потужність, робота.

С.Н. Юхимчук, к.т.н., С.Ф. Юхимчук, Н.А. Толстушко, Л.Н. Дацюк ЭНЕРГЕТИКА ТЕРЕБЛЕНИЯ СТЕБЛЕЙ ЛЬНА ТЕРЕБИЛЬНЫМ АППАРАТОМ С ПРЯМОЛИНЕЙНЫМИ ПОПЕРЕЧНЫМИ РУЧЬЯМИ

В статье теоретически исследованы энергетику процесса тербления стеблей льна, которые зажимаются в поперечном прямолинейном тербильном ручье и расположены в разных местах пучка; изучена динамика изменения составляющих мощности тербления при перемещении стебля льна по тербильном ручье; определены секундная работа тербления и значение ее составляющих.

Приведены графические зависимости распределения мощности тербления между загруженностью тербильного ремня и тяговым усилием машины. Расчеты подтвердили, что выбранные параметры аппарата полностью удовлетворяют требованиям процесса тербления. Работа тербления не зависит от размещения стеблей в элементарном пучке и во всех случаях равна 0,16 Дж.

Ключевые слова: тербление, стебли льна, тербильный аппарат, прямолинейный поперечный ручей, мощность, работа

S.M. Yukhymchuk, S.F. Yukhymchuk, N.O. Tolstushko, L.M. Datsyuk ENERGETICS PULLING OF THE FLAX stalks BY PULLING APPARATUS WITH RECTLINEAR TRANSVERSAL STREAMS

In the article the power of the process of pulling stems, which are clamped in a rectlinear transversal pulling stream and located in different places of the beam, is theoretically investigated. The dynamics of the changes in the power of breeding components when moving the stem of flax through the pulling stream; Definition of the second job of pulling, and the meaning of its constituents.

The graphic dependences of the power pulling distribution between the pulling cell and the traction effort of the machine are given. The calculations confirmed that the chosen parameters of the device fully satisfy the requirements of the process of pulling. The work of the pulling does not depend on the placement of the stems in the elementary bundle and in all cases is equal to 0.16 Joule.

Key words: pulling, flax stalks, pulling apparatus, rectlinear transversal stream, power, work

Постановка проблеми. Запропонована конструкція [1] (рис. 1), де за машину аналог взято льнобралку ТЛН-1,5, містить раму 1 та встановлені на ній подільники 2, бральний пас 3, який охоплює ведучий 4 і ведений 5 шківів, а замість бральних дисків встановлені бральні пластини 6, до яких при роботі притискаються стебла льону. Поверхні брального пасу 3 та бральних пластин 6 мають хвилевидну форму. Це покращує затискання стебел у бральних рівчаках, а також попереджує їх прокручування при ковзанні по бральних пластинах. Поверхня брального пасу шорстка, а бральних пластин – гладенька, тому при бранні стебла в бральних рівчаках переміщуються разом із пасом ковзаючи по бральних пластинах. Для забезпечення певного зусилля затискання стебел навпроти бральних пластин встановлені притискні механізми 7, які підтримують бральний пас і забезпечують необхідне зусилля затискання стебел льону у бральних рівчаках.

Зазори між бральними пластинами і бральним пасом виставляються за допомогою регульованих гвинтів. В кожному наступному бральному рівчаку ці зазори збільшуються з врахуванням потовщення стеблової стрічки.

Раніше нами [2] було теоретично визначено необхідну зону затискання стебел льону для повного витягування їх з ґрунту, що дало змогу обґрунтувати довжину бральної пластини та технологічні параметри льнобрального апарата.

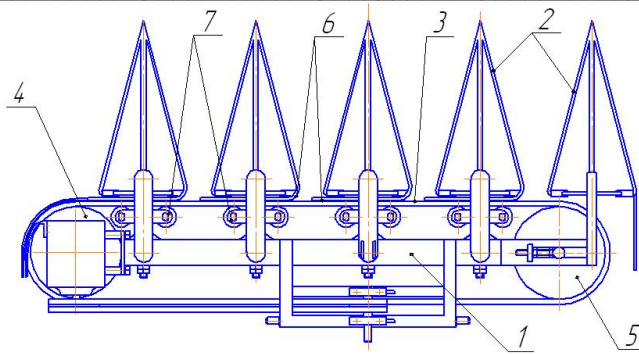


Рис. 1 - Льонобралка з поперечними бральними рівчаками: 1 – рама; 2- подільники; 3 - бральний пас; 4 - ведучий і 5- ведений шків; 6 - бральні пластини; 7 – притискні механізми

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Встановлено, що при механізованому збиранні льону загальна потужність, що йде на витягування стебел з ґрунту, складається із потужності на привод робочих органів брального апарата та потужності на переміщення машини по полю.

Летошнев М.М. [3] досліджуючи потребу в силі та потужності на брання льону вивів формулу для визначення секундної витрати енергії на брання стебел:

$$N = B v_M i T_{cp} a, \quad (1)$$

де B - ширина захвату брального апарата;

v_M - швидкість машини;

i - густота стеблестою льону;

T_{cp} - середня сила брання стебла льону з ґрунту;

a - довжина шляху дії сили брання.

Також, вчений дослідив [3] завантаження брального апарата роботою брання, яка залежить від кута нахилу стебла у бральному рівчаку. Ці дослідження стосувались тільки прямолінійних поздовжніх бральних апаратів.

За Хайлісом Г.А. [4] потужність, що витрачається на привод брального пасу машини ТЛН-1,5 з поперечними криволінійними бральними рівчаками для брання стебел, рівна:

$$N_p = v_p (S_n - S_0). \quad (2)$$

де v_p - швидкість брального пасу;

S_n - сила натягу пасу при виході з n -го рівчака;

S_0 - сила натягу веденої вітки пасу.

Під керівництвом проф. Хайліса Г.А. проведено динамометрування льонозбиральних машин. Встановлено, що тяговий опір бральних апаратів і крутний момент на валу збільшується із ростом швидкості руху машини. Продовжуючи вивчення енергетики апаратів з поздовжніми бральними рівчаками нами [5] дано теоретичні обґрунтування залежності розподілу складових потужності брання від кута нахилу стебла, що витягується з ґрунту бральними апаратами з поперечними рівчаками. Однак при цьому не вивчено динаміку зміни складових потужності брання при переміщенні стебла льону по бральному рівчаку.

Постановка завдань. Мета дослідження – провести теоретичні дослідження енергетики процесу брання стебел льону бральним апаратом з прямолінійними поперечними бральними рівчаками.

Викладення основного матеріалу. Бральний апарат взаємодіє із стеблами льону при бранні таким чином, що бральний пас здійснює лише частину роботи на витягування стебел з ґрунту. Іншу частину роботи виконує переносний поступальний рух машини.

Потужність, що використовується при бранні стебла, визначається за формулою [3]:

$$N = N_p + N_M = T V_p \cos(\bar{T}, \bar{V}_p) + T V_M \cos(\bar{T}, \bar{V}_M), \quad (3)$$

де N_p і N_M – потужності, що передаються бральному пасу та машині на витягування стебла з ґрунту;

T – сила витягування стебла льону з ґрунту;

$\bar{T} \bar{V}_p$ і $\bar{T} \bar{V}_M$ – кути між векторами сили T та швидкостей брального пасу V_p та машини V_M .

Вектор сили T напрямлений по осі стебла у бік його витягування.

© С.М. Юхимчук, С.Ф. Юхимчук, Н.О. Толстушко, Л.М. Дацюк

Сила T визначається експериментально і залежить від багатьох факторів: властивостей ґрунту, сорту льону, густини стеблестою, характеристик стебел льону. Значення сили T по мірі витягування кореня стебла із ґрунту змінюється. Однією із найхарактерніших залежностей сили T від довжини витягування стебла $\Delta\rho$ є параболічна [3], за якою сила T із збільшенням $\Delta\rho$ зростаючи, досягає максимуму ($T_{\max}$) та падає.

Формула цієї залежності:

$$T = 4T_{\max} \frac{\Delta\rho}{a} \left(1 - \frac{\Delta\rho}{a}\right), \quad (4)$$

де a – довжина шляху дії сили (це довжина, на яку потрібно витягнути стебло із ґрунту до повного відриву кореня).

За [3] $T_{\max}=5$ Н, $a = 0,05$ м. Припускаємо, що при бранні кут нахилу стебла не впливає на значення сили $T_{\max}$.

На рис. 2 дано схеми будови (а) і роботи (б) частини брального рівчака, що забезпечує брання стебел. Стебла льону затискаються між бральним пасом та бральною пластиною у зоні AB , яка характеризується довжиною S . Початок координат співпадає з проекцією точки A на площину XOY . Пунктиром вказано можливу зону розташування в ґрунті коренів стебел, які попадають у гирло брального рівчака.

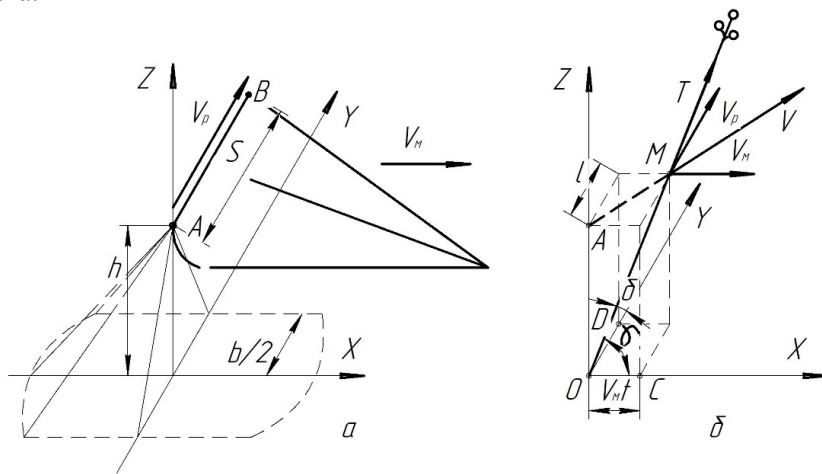


Рис.2. Схема роботи брального апарата

На рис. 2,б зображено положення точки затискання стебла M через деякий час t . За цей час бральний апарат перемістився на відстань, рівну $V_M t$, а затиснута в бральному рівчаку частина стебла під впливом брального пасу переміститься по бральній пластині на відстань $l = V_p t$. При цьому стебло льону, затиснуте у точці M з координатами $(X_n; Y_n; Z_n)$, утворює із координатними осями відповідні кути: кут γ з віссю OX та кут δ з віссю OY .

Місце розташування у ґрунті кореня стебла визначається точкою O із координатами $(X; Y)$.

З точки M виходять вектори: T, V, V_M, V_p . Тут V – вектор абсолютної швидкості переміщення точки M у просторі. Тоді: $V = V_M + V_p$.

На рис. 2,б видно, що вектори проєкцій цих швидкостей утворюють із стеблом льону ті ж самі кути, що й відповідні ним осі координат. Тому рівняння (3) набере вигляд:

$$N = N_p + N_M = TV_p \cos\delta + TV_M \cos\gamma. \quad (5)$$

Розглядаючи прямокутний трикутник OCM (рис. 2,б) видно, що $OM = \rho_n$ (відстань від точки M до точки O), а $OC = X_n - X$. Тоді:

$$\cos\gamma = \frac{OC}{OM} = \frac{X_n - X}{\rho_n}. \quad (6)$$

Аналогічно із трикутника ODM :

$$\cos\delta = \frac{OD}{OM} = \frac{Y_n - Y}{\rho_n}. \quad (7)$$

Підставляючи у рівняння (5) замість відповідних елементів вирази для їх обчислень (6) - (7) отримуємо систему рівнянь для обчислення потужностей:

$$\left. \begin{aligned} N_p &= TV_p \frac{Y_n - Y}{\rho_n}, \\ N_M &= TV_M \frac{X_n - X}{\rho_n}, \\ N &= N_p + N_M. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

За рівняннями (8), користуючись формулами (4) і (5) для знаходження їх елементів розроблена програма для ПЕОМ, для оперативного отримання результатів розрахунків за різноманітними можливими комбінаціями початкових параметрів. Це дозволяє прослідкувати зміну потужності N та розподіл її складових N_p і N_M від переміщення разом з бральним пасом точки затискання стебла по бральній пластині $l \in [0; S]$, при бранні стебел із відповідними координатами X , Y точок розташування коренів. Також враховувалось те, що брання стебла проходить при умові:

$$0 \leq \rho_n - \rho_o \leq a. \quad (9)$$

Коли $\Delta\rho > a$ відбувається повне витягування стебла льону (N , N_p і N_M стають рівними нулю).

У цій програмі була розроблена частина для знаходження роботи A , яка витрачається на брання стебла, а також показника η , який рівний відношенню частини роботи, що виконується бральним пасом, до частини роботи, що припадає на тягове зусилля трактора.

Графічно робота A , а також і її складові A_p та A_M , є площа фігури, помножена на l/V_p , що утворені відповідними кривими залежності N , а також N_p і N_M від переміщення l і віссю l при $N > 0$ (рис. 3).

Формули для обчислення A , A_p та A_M :

$$\left. \begin{aligned} A &= \int_0^l N dt = \frac{1}{V_p} \int_0^l N dl = \frac{1}{V_p} \sum_{i=0}^n (N_i \cdot \frac{l}{n}), \\ A_p &= \frac{1}{V_p} \sum_{i=0}^n (N_{pi} \cdot \frac{l}{n}), \\ A_M &= \frac{1}{V_M} \sum_{i=0}^n (N_{Mi} \cdot \frac{l}{n}). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

при $N \geq 0$,

де t – час, що відповідає переміщенню l стебла по бральній пластині довжиною S .

Досліджувалась енергетика брання стебел льону розроблюваним бральним апаратом при таких його параметрах: $S = 0,3$ м, $h = 0,2$ м, $b = 0,38$ м, $V_M = 2,01$ м/с, $V_p = 2,35$ м/с враховуючи, що для стебел льону $T_{max} = 5$ Н і $a = 0,05$ м.

Знизу рис. 3 у масштабі зображено проекцію на горизонтальній площині XOY траєкторії переміщення точки M затискання стебла у бральному рівчаку при переміщення на відстань l , з точки M показані проекції швидкостей V_p і V_M ; пунктиром вказано можливу зону розташування в ґрунті коренів стебел, які попадають у гирло брального рівчака при мінімальному куті нахилу стебел до горизонту 30° та ширині захоплення бральної секції $b = 0,38$ м.

Розглядали вибірково координати (X ; Y) стебел, у яких корені розташовані на границі та у центрі умовної зони і позначені кружечками (рис. 2, б). За результатами розрахунків для стебел a , b , $в$, $г$, $д$, $е$ побудовано графіки розподілу потужностей N_p , N_M , N в залежності від переміщення l точки затиснення стебла по бральній пластині. Брання не відбудеться тільки для стебла $е$ – випадок, коли стеблестій буде полеглий проти руху брального апарата. Це можна усунути зменшуючи поступальну швидкість машини V_M . Наприклад, при $V_M = 0,69$ м/с брання цього стебла забезпечується (випадок $е^*$ на рис. 3).

Із графіків рис. 3 видно, що в залежності від розташування у ґрунті стебел, розподіляється потужність брання між завантаженням брального паса і тяговим зусиллям машини. Можливі випадки, коли одна із складових потужності N_p приймає від'ємні значення (стебло $д$, $е$ і $е^*$). Це явище розглядалось в [5] і вказує на циркуляцію потужності. Так при бранні стебел $д$, $е$ частина потужності N_M , що не задіяна на витягування стебла, передається через бральний пас і механізм приводу назад двигуну. Для стебла $е$ деяка частина потужності N_p , що не задіяна бранням, використовується для переміщення машини, при цьому відповідно зменшується тягове зусилля агрегату.

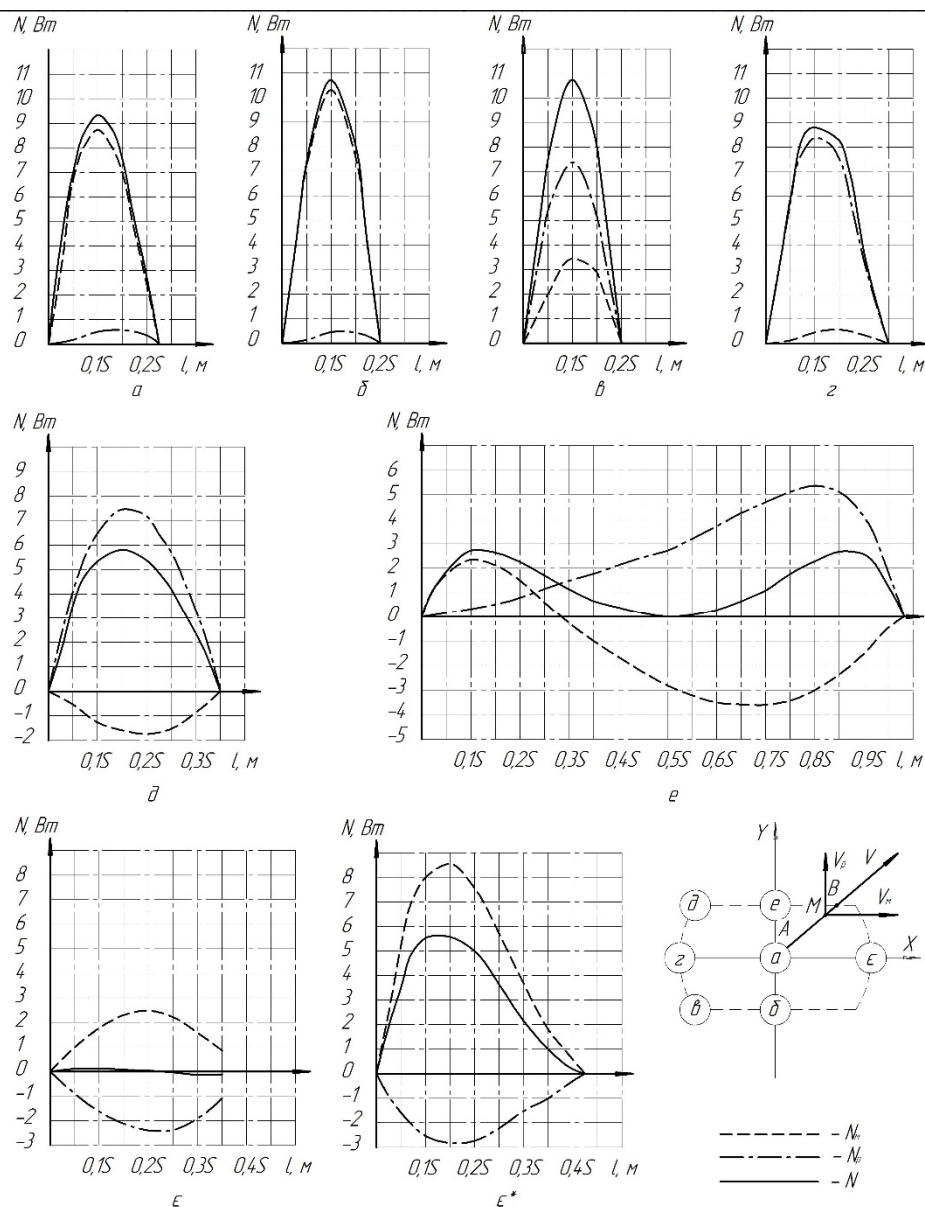


Рис. 3. Розподіл потужностей при бранні стебла

Проведені розрахунки показали, що робота брання не залежить від розміщення стебел в елементарному пучку та рівна 0,16 Дж.

Так, як при бранні прямостоячого льону, стебла, що утворюють елементарний пучок [3], знаходяться у третьому та у четвертому октантах (рис. 3), то для них побудовані графіки ще раз підтвердили, що вибрані параметри брального апарата задовольняють вимоги процесу брання.

Розглядаючи граничні стебла цього пучка, які відмічені точками на рис. 3, а точніше отримані при їх бранні значення A_p та A_M , можна взяти як розподілена енергія, яка припадає на привод брального пасу та переміщення машини при бранні прямостоячого льону.

$$\eta_{-p} = \frac{\sum_{i=1}^n A_{Pi}}{\sum_{i=1}^n A_{Mi}} \quad (11)$$

В даному випадку $\eta_{cp} = 0,219$.

За одну секунду бральним апаратом витягується кількість стебел J_c , що рівна:

$$J_c = B V_M t i, \quad (12)$$

В нашому випадку при $B = 1,5$ м, $V_M = 2,01$ м/с, $t = 1$ с, прийнявши $i = 1600$ стебел на м², отримано, що за 1 с вибирається $j_c = 4824$ стебел. Тоді секундна робота брання буде рівна:

$$A_c = A_{jc} = 0,16 \cdot 4824 = 771,84 \text{ Дж.} \quad (13)$$

Враховуючи те, що $A_c = A_{pc} + A_{mc}$ і $\eta_{cp} = A_{pc}/A_{mc}$ отримано наступні залежності:

$$A_{pc} = A_c \eta_{cp} / (1 + \eta_{cp}) \quad \text{і} \quad A_{mc} = A_c / (1 + \eta_{cp}) \quad (14)$$

з яких визначають $A_{pc} = 138,67 \text{ Дж}$; $A_{mc} = 633,17 \text{ Дж}$.

При роботі апарату на полеглому льоні в гирло бральних рівчаків попадають стебла льону, нахилені проти руху машини, тобто корені яких для розглядуваного випадку розташовані у першому та другому октантах (рис. 3). Брання цих стебел можна забезпечити як зміною поступальної швидкості машини (випадок ϵ^* рис. 3), що є недоцільним через зменшення продуктивності агрегату, так і збільшення зони затискання стебел у бральному рівчаку.

Висновки. Приведено графічні залежності розподілу потужності брання між завантаженістю брального паса і тяговим зусиллям машини. Розрахунки підтвердили, що вибрані параметри апарату повністю задовольняють вимоги процесу брання. Робота брання не залежить від розміщення стебел у елементарному пучку і у всіх випадках рівна 0,16 Дж.

Список використаних джерел

1. Пат. 10753А Україна, МКЛ А01D45/06. Льонобральний апарат / С.Ф. Юхимчук, Г.А. Хайліс (Україна) - № 95073257; Заявл. 11.07.95; Опубл. 25.12.96, Бюл. № 4.
2. Юхимчук, С.М. Обґрунтування довжини бральної пластини льонобралки / С. М. Юхимчук, М.М Толстушко., С.Ф. Юхимчук // Тези доповіді VII Міжнародної науково-технічної конференції «Крамаровські читання» з нагоди 113-ї річниці від дня народження д.т.н., професора, членакореспондента ВАСГНІЛ, віце-президента УАСГН Крамарова Володимира Савовича (1906-1987) 20-21 лют. 2020 р., м. Київ / МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Національний науковий центр «ІМЕСГ» НААН. – К.: Видавничий центр НУБіП України, 2020.
3. Хайліс, Г.А. Теория льноуборочных машин / Г.А. Хайліс - М.: «Росинформагротех», 2011. – 322 с.: ил.
4. Летошнев М.Н. Сельскохозяйственные машины // Теория, расчет, проектирование и испытание. - М.: Сельхозгиз, 1955.- 764 с., ил.
5. Хайліс Г.А., Юхимчук С.Ф. О загрузке ремней аппаратов при тереблении стеблей // Сільськогосподарські машини : Зб. наук. ст. Випуск 2. - Луцьк : ІАУ, Волинське відділення.- 1996. С.93-105.

Рецензент Ягелюк Світлана Володимирівна, професор кафедри товарознавства та експертизи в митній справі Луцького національного технічного університету, доктор технічних наук, доцент.

М.В. Дмитріюк, Д.А.Гусачук
Луцький національний технічний університет

ВСТАНОВЛЕННЯ КОРЕЛЯЦІЇ «КОЕФІЦІЄНТ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ-ІНТЕНСИВНІСТЬ ЗНОШУВАННЯ» У МІДИСТИХ ВИСОКОМІЦНИХ ЧАВУНАХ З СТРУКТУРОЮ НИЖНЬОГО БЕЙНІТУ

В статті встановлено кореляцію «коефіцієнт теплопровідності-інтенсивність зношування» у мідистих високоміцних чавунах з структурою нижнього бейніту. Показано, що з підвищенням концентрації міді коефіцієнт теплопровідності зростає, а інтенсивність зношування знижується.

Ключові слова: Коефіцієнт теплопровідності, високоміцний чавун, інтенсивність зношування

М.В. Дмитріюк, Д.А.Гусачук
УСТАНОВЛЕНИЕ КОРЕЛЯЦИИ «КОЕФИЦИЕНТ ТЕПЛОПРОВИДНОСТИ-ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗНАШИВАНИЯ» У МЕДИСТЫХ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЧУГУНАХ СО СТРУКТУРОЮ НИЖНЕГО БЕЙНИТА

В статье установлена корреляция "коэффициент теплопроводности-интенсивность изнашивания" в медистых высокопрочных чугунах со структурой нижнего бейнита и показано, что с повышением концентрации меди коэффициент теплопроводности растет, а интенсивность изнашивания снижается.

Ключевые слова: Коэффициент теплопроводности, высокопрочный чугун, интенсивность изнашивания

M.V. Dmitriyuk, D.A. Gusachuk
ESTABLISHMENT OF THE CORRELATION "THERMAL CONDUCTIVITY COEFFICIENCY - WEAR INTENSITY" IN COPPER HIGH-STRENGTH IRONS WITH STRUCTURE OF LOWER

The article establishes a correlation between "thermal conductivity coefficient and wear intensity" in high-strength copper cast irons with the structure of lower bainite. It is shown that with increasing copper concentration the thermal conductivity coefficient increases and the wear intensity decreases.

Key words: Thermal conductivity coefficient, high-copper cast iron, wear intensity

Постановка задачі. Серед залізо-вуглецевих сплавів, що широко застосовуються в промисловості, тенденцію до розширення сфер застосування зберігає лише чавун високої міцності, в якому вуглець, у значній мірі, або повністю знаходиться у вигляді кулястих включень. Такі ливарні чавуни не поступаються властивостями вуглецевим сталям, навіть після термічної обробки останніх. При цьому значення їх фізико-механічних характеристик (теплопровідність, міцність, зносостійкість) безпосередньо залежать від структури металевої основи. [1]

Легуючі елементи, можуть модифікувати не лише мікроструктуру матриці, але і морфологію графіту та механічні властивості легованого високоміцного чавуну [3]. У цьому аспекті значну увагу спеціалістів привертає клас сірих чавунів, які містять мідь у кількостях, які близькі, або переважають межу її розчинності у рідких та твердих розчинах сплавів (4...10 % мас.). Для встановлення кореляції взаємозв'язку мікроструктура – властивості цього класу чавунів доклали суттєвих зусиль такі відомі вчені як Ю.Г. Бобро, В.І. Тихонович, Е.А. Марковський, Б.А. Кірієвський та інші.

При постановці роботи передбачалося, що підвищення параметрів зносостійкості та теплопровідності може бути досягнуте за рахунок сумісного впливу ефектів збільшення кількості фаз (графіт+мідиста фаза) і особливих властивостей бейніту отриманого ізотермічним гартуванням.

Мета роботи: Вивчення кореляції коефіцієнта теплопровідності та інтенсивності зношування високоміцних чавунів з структурою нижнього бейніту залежно від концентрації міді.

Методика та методи дослідження: Для дослідження використовували серію литих мідистих високоміцних чавунів (~4...10, % Cu) з перлітною матрицею, яка містить ледебуритні колонії та рівномірно розташовані в структурі, включення високоміцної фази, розташованої навколо графітних кристалітів. Базовий високоміцний чавун складу, % мас.: С 3,15...3,3; Si 2,3...2,7; S 0,010...0,022; P 0,06...0,011; Mg 0,04...0,07; Mn 0,3...0,6. Модифікували Cu-Mg-Се легатурою і фосфористою міддю

Для отримання однакового типу мікроструктури дослідних сплавів зразки проходили попередню термічну обробку, а саме нормалізацію від температури 880±5°C та ізотермічне

гартування згідно з режимом, який вважається оптимальним для отримання верхнього бейніту у сірих чавунах [3]. Використовували наступну схему ізотермічного гартування: аустенізація при $860 \pm 5^\circ\text{C}$ впродовж 50 хв → гартування у соляній ванні при температурі аустемперінгу 350°C з витриманням впродовж 2,5 год.

Коефіцієнт теплопровідності (λ) визначали за методом Хрістіансена при температурі 200°C .

Інтенсивність зношування вивчали за схемою «вал-вкладка». Вал – сталь 40Х13 термооброблений до HRC 43-45. Вкладка- зразок дослідних плавок (10x10x15 мм). Досліди проводили при наступних параметрах: Тиск на зразок $P=2,5\text{ МПа}$, швидкість тертя ковзанням $V=1\text{ м/с}$, охолодження -вода.

Результати та їх обговорення: Мікроструктурним аналізом встановлено (Рис.1.), що при температурі аустемперінгу (350°C) у мідистих високоміцних чавунах формуються голчаста структура нижнього бейніту з його типовою «мартенситоподібною» морфологією [3].

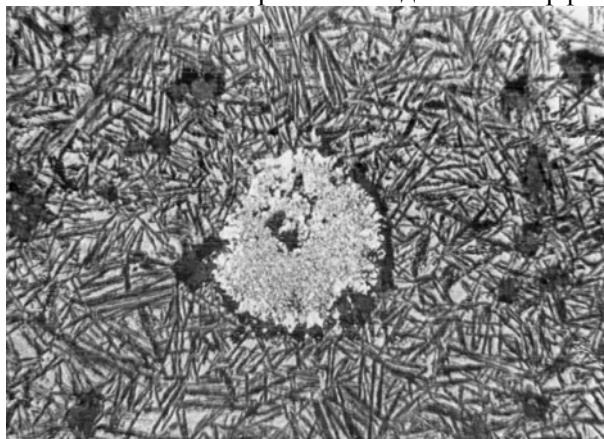


Рис. 1. Зображення мідистого включення у структурі нижнього бейніту високоміцного чавуну: а) 7,10 % мас., Cu, X 250

Результати досліджень показали, що коефіцієнт теплопровідності бейнітних мідистих (9,50% Cu) високоміцних чавунів в 1,5-2,0 рази вищий за коефіцієнт теплопровідності бейнітних сплавів, в структурі яких концентрація міді наближається до мінімуму (0,05% Cu). Протилежна закономірність спостерігається для параметра інтенсивності зношування (таблиця.).

Отримані результати досліджень показують чітку кореляцію між підвищенням коефіцієнта теплопровідності мідистих високоміцних чавунів і інтенсивністю їх зношування. Найвищі параметри коефіцієнта теплопровідності та найнижчі параметри інтенсивності зношування досягаються при вмісті міді 9.50% мас.

Можна стверджувати, що причиною високого коефіцієнта теплопровідності дослідних сплавів є позитивний вплив зростання концентрації міді в складі високоміцного чавуну .

Табл. 1

Коефіцієнт теплопровідності (λ) та зносостійкість (J) мідистих високоміцних чавунів з структурою нижнього бейніту

Вміст міді у складі чавуну, % мас.	Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·К)	Інтенсивність зношування J, $\times 10^{-3}$ г/км
0,05	38	6,8
4,22	41	5,5
6,33	52	4,7
7,10	55	4,1
8,53	59	3,5
9,50	64	3,0

Зменшення інтенсивності зношування, за нашими припущеннями, пов'язане зі формуванням специфічної субструктури приповерхневого шару мідистого високоміцного чавуну зі структурою нижнього бейніту. На поверхні тертя мідистого високоміцного чавуну формується

«граничний шар», який складається із продуктів руйнування мідистих включень та графітних кристалітів (Рис. 2).

За даними попередніх досліджень,[4, 5] формування «граничного шару» знижує коефіцієнт тертя, інтенсифікує процеси дисипації в зоні тертя, та як наслідок, знижує інтенсивність зношування мідистого високоміцного чавуну.

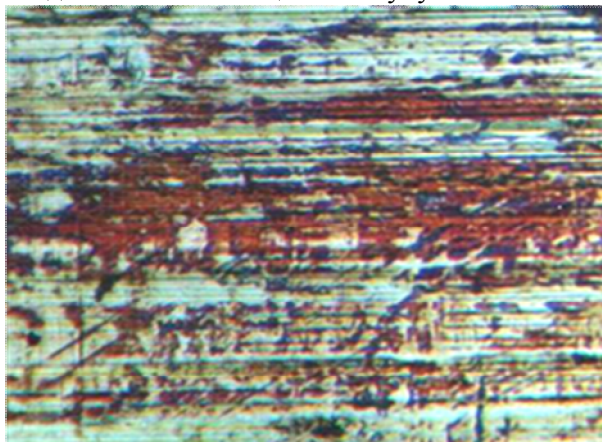


Рис. 2. Графітно-мідиста плівка (граничний шар) на поверхні тертя мідистого високоміцного чавуну. $t_{\text{т}}=350\text{ }^{\circ}\text{C}$, 9,50 % мас., Cu . X 50

Висновки: Спостерігається чітка кореляція залежності коефіцієнта теплопровідності λ і інтенсивності зношування J від вмісту міді у складі високоміцних чавунів. З підвищенням міді у складі дослідних високоміцних чавунів зростає їх теплопровідність λ і знижується інтенсивність зношування J .

Перелік джерел посилання.

- 1.Бех Н.И., Александров Н.Н., Нуралиев Ф.А. Високопрочный чугун сейчас и в будущем // Литейное производство- 2018 -№5.- С.2-5
- 2.Elliott R. Cast Iron Technology.(Manchester University) Butterworths.: London, Boston, Singapore, Sydney, Toronto, Wellington., 1988.– 244 p.],
Дмитриук Н.В. Высокомедистые чугуны с шаровидным графитом / З/Ю.Г. Бобро, Н.В. Дмитриук, Д.А. Гусачук // Литейное производство. – 1997. – №7. – С. 9–11.
3. Исследование и применение чугуна с шаровидным графитом, подвергнутого изотермической закалке / Цзэньшу Жэгули // Heat Treat. – 1991. - № 7. – С. 5-8.
4. Ю.Г. Бобро, Д.А. Гусачук, Н.В. Дмитриук Износостойкость бейнитных среднемедистых чугунов с компактным графитом/ Ю.Г. Бобро, Д.А. Гусачук, Н.В. Дмитриук// Трение и износ. – 1998. – Т. 19. – №3. – С. 386 – 390.
5. Dmytryuk, M., Husachuk, D., Parfentieva, I., Feshchuk, Y., 2020. High-Copper Cast Irons for the Products of Tribotechnical Applied. KEM 864, 292–302.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.864.292>

О.Д. Солоніченко, В.М. Поводзинський*Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"***ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТЕПЛООБМІНУ У ВИПАРНОМУ АПАРАТІ ЗА РАХУНОК ЗМІНИ ГЕОМЕТРІЇ ТРУБ У ГРІЮЧІЙ КАМЕРІ**

У ході дослідження використовується метод комп'ютерного моделювання, яке спрямоване на створення двох моделей труб різної геометрії, по яким транспортується розчин лимонної кислоти за однакових параметрів температур та швидкості з використанням градієнта температур та векторів руху для демонстрації зміни напрямку руху потоків пари в гріючій камері. Моделювання проводилось у програмі Solidworks у пакеті Flow Simulations та Simulations за умов турбулентного режиму руху.

Отримано результат, який демонструє, що оребрена труба сприяє турбулізації потоків за рахунок утворення завихрень, рівномірному та більш інтенсивному нагріву поверхні труби, ніж стандартна гладка труба.

Ключові слова: випарний апарат, оребрені труби, процес випарювання, гріюча камера, турбулізація потоків.

Е.Д. Солониченко, В.Н. Поводзинский**ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В ВЫПАРНОМ АППАРАТЕ ЗА СЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ ТРУБ В ГРЕЮЩЕЙ КАМЕРЕ**

В ходе исследования используется метод компьютерного моделирования, направленный на создание двух моделей труб разной геометрии, по которым транспортируется раствор лимонной кислоты при одинаковых параметрах температур и скорости с использованием градиента температур и векторов движения для демонстрации изменения направления движения потоков пара в греющей камере. Моделирование проводилось в программе Solidworks в пакете Flow Simulations и Simulations при турбулентном режиме движения.

Получен результат, демонстрирующий, что оребренная труба способствует турбулизации потоков за счет образования завихрений, равномерному и более интенсивному нагреву поверхности трубы, чем стандартная гладкая труба.

Ключевые слова: выпарной аппарат, оребренные трубы, процесс испарения, греющая камера, турбулизация потоков.

O. D. Solonichenko, V. M. Povodzinskiy**INVESTIGATION OF HEAT EXCHANGE INTENSIFICATION IN THE EVAPORATORY APPARATUS DUE TO CHANGE OF PIPES GEOMETRY IN THE HEATING CHAMBER**

A computer simulation method is used at the study. There is considered an evaporator with a remote heating chamber installed in a citric acid production line. Such heat exchangers are used in the pharmaceutical, biotechnological, food and chemical industries, as for example for the evaporation of crystallizing solutions and in the production of concentrated mixtures.

The aim of the graphic modeling was to create two models of pipes of different geometries, which transport a solution of citric acid at the same parameters of temperature and velocity using a temperature gradient and motion vectors to demonstrate changes in the direction of steam flow in the heating chamber. The simulation was performed in the Solidworks program in the Flow Simulations and Simulations package under conditions of turbulent motion.

The obtained results demonstrate that the finned pipe promotes turbulence of flows due to the formation of vortices, uniform and more intense heating of the pipe surface than a standard smooth pipe.

Key words: evaporator, finned pipes, evaporation process, heating chamber, turbulence of flows.

Постановка проблеми. Теплообмінні установки знаходять своє призначення у фармацевтичній, біотехнологічній, харчовій та хімічній галузях, зокрема, для випарювання розчинів, що кристалізуються, та при виробництві концентрованих сумішей. Це пов'язано з необхідністю у створенні умов кипіння та можливістю нетрудомісткого очищення трубної решітки у процесі експлуатації при роботі виробничої лінії. Вище зазначене обладнання має значні енерговитрати та металоємність, через необхідність створювати та підтримувати високі температурні значення. У дослідженні запропоновано до застосування розвинену поверхню нагріву труб у гріючій камері, яка реалізується за рахунок оребрення та подальшим порівнянням зі стандартними гладкими трубами.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Існує три основних напрямки удосконалення апаратів для випарювання. Перший реалізується за допомогою створювання розвинених поверхонь нагріву труб у гріючій камері. Наприклад, спіральне гофрування [1], однозахідне гофрування [2], утворення заглиблень на поверхні труби [3] або кільцевої накатки [4], оребрення [5]. Другий полягає у використанні протинакипного та антикорозійного оснащення. Як альтернативу застосовують антиадгезійне полімерне покриття. Це робиться для того, щоб уникнути зниження ефективності теплообміну через ймовірну можливість осадження солей з розчину, яке призводить до утворення накипу. Накип, як наслідок, зменшує переріз трубопроводів, збільшує гідравлічний опір та викликає

перерозподіл пари [6]. Третій спрямований на економію енерговитрат шляхом повторного використання вторинної пари. Це можливо тільки при випаровуванні термічно стійких розчинів, адже при цьому вторинна пара має досить великі значення температури, що дозволяє застосовувати її для обігріву власного або іншого апарату технічної лінії [7].

Постановка завдання. Метою є дослідження впливу оребреної поверхні труби на процес теплообміну в гріючій камері.

Викладення основного матеріалу дослідження. Галузі виробництва біотехнологічних та фармацевтичних продуктів використовують процес випарювання з метою збільшення концентрації або розділення певних розчинів, емульсій, суспензій.

Збільшення концентрації у випарному апараті здійснюється за рахунок часткового видалення розчинника, застосовуючи процес кипіння розчину. В лінії виробництва лимонної кислоти за технологією розташовуються два корпуси випарної установки з винесеною гріючою камерою для поступового підвищення рівня концентрації [8].

Вибір конкретної конструкції випарного апарату потребує наявності відповідності щодо вимог до кінцевого продукту (якість, концентрація, структура), а також раціональності щодо енергетичних та експлуатаційних затрат.

Використовуючи програму SolidWorks були побудовані дві моделі труб з гріючої камери. З метою зменшення часу на розрахунок а також для локальної демонстрації процесів вирішено розглядати частину всього габариту труби, що складає 1 метр. Діаметри залишаються стандартними (рис. 1).

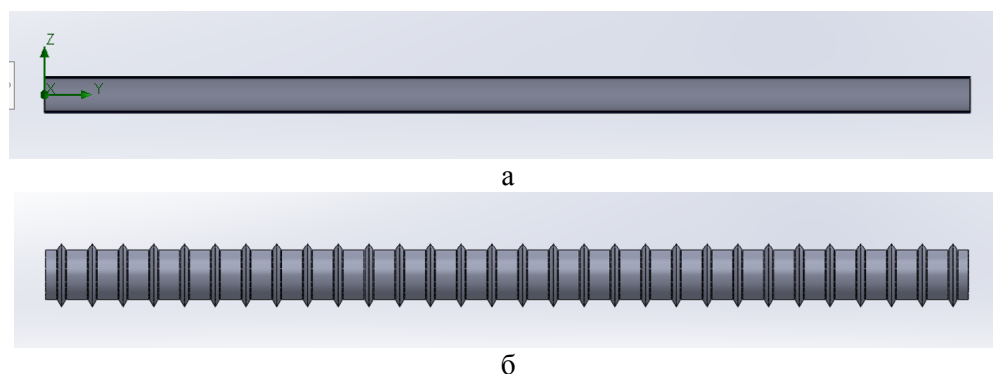


Рис. 1. Конструкція труб : а – гладка; б – оребрена

Моделювання проводилось за умов турбулентного режиму руху. Гарячий теплоносій являє собою пару з температурою 127 °С та поступає в середовище пучка труб зі швидкістю 15 м/с. Розчин лимонної кислоти всередині труб надходить з температурою 80 °С та швидкістю 2 м/с. Матеріал труби – нержавіюча сталь 12Х18Н10Т, товщина стінки – 3 мм, коефіцієнт теплопровідності становить 16 Вт/ м·°С [9]. Висота ребер відносно вісі – 5 мм, шаг – 25 мм. Задача є зовнішньою, тому детальними даними щодо розчину можна знехтувати. Час випробування – 10 с.

Для візуалізації напряму потоків пари в пакеті Flow Simulation застосовувалась функція додавання векторів, а інтенсивність теплообміну передає градієнт температур.

Одержані результати демонструють наявну інтенсифікацію процесу теплообміну. На першому етапі розглянемо гладку трубу. Максимальна температура поверхні – 121 °С, мінімальна – 116 °С. Візуально встановлюємо нерівномірність нагріву площі поверхні, що сповільнює передачу тепла до розчину (рис. 2).

При збільшенні зображення перерізу профілю труби, відмічаємо різницю температур зовнішньої та внутрішньої поверхні, яка становить 4 °С (рис. 3).

Окремо відзначаємо вектори руху гарячого теплоносія, які оминають поверхню труби не створюючи завихрень, тому на обігрів поверхні буде відводитися значно більше часу, що, в свою чергу є економічно невідповідним (рис. 4).

На другому етапі розглядаємо інтенсифікацію теплопередачі оребреної труби (рис. 5). Візуально можна відмітити, що по всій поверхні перерізу відносно сталий показник, який становить 127 °С (рис. 6). Можна зробити твердження про рівномірний розподіл теплоти на зовнішній поверхні. Так як перепад температур зовнішньої та внутрішньої стінки буде менше 4 °С, час на загальний нагрів розчину відповідно зменшується, в порівнянні з гладкою трубою.

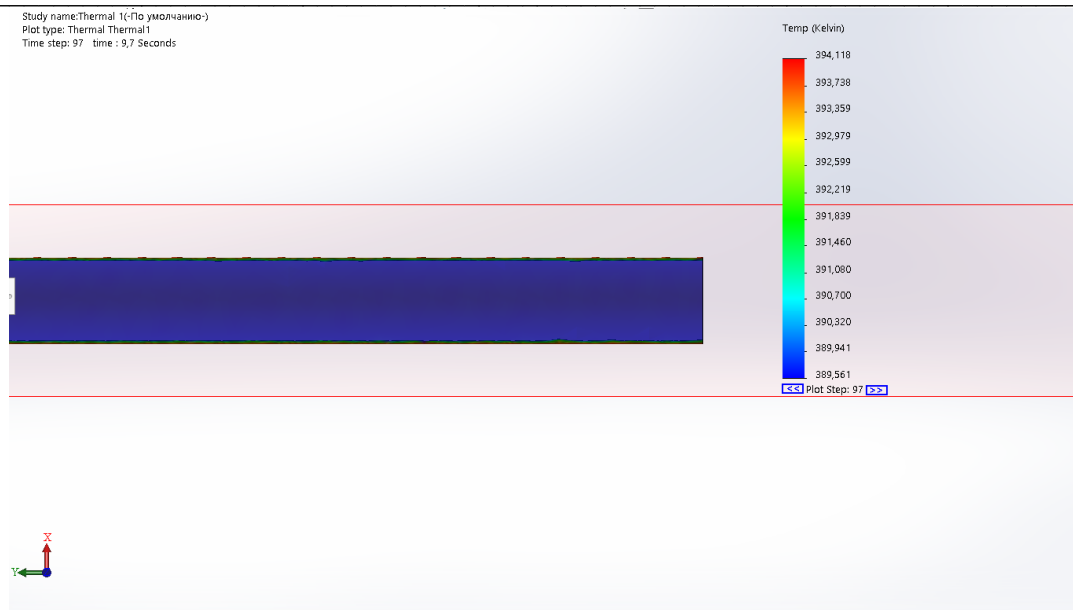


Рис. 2. Градієнт температур гладкої труби, отриманий у пакеті доповнення SolidWorks Simulations

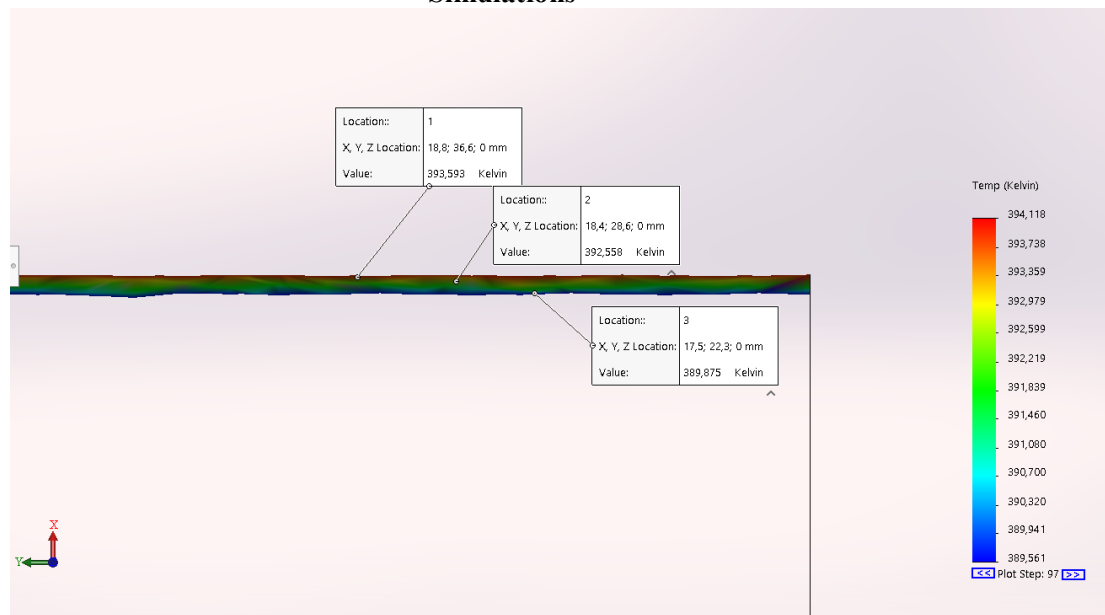


Рис. 3. Градієнт температур гладкої труби, отриманий у пакеті доповнення SolidWorks Simulations

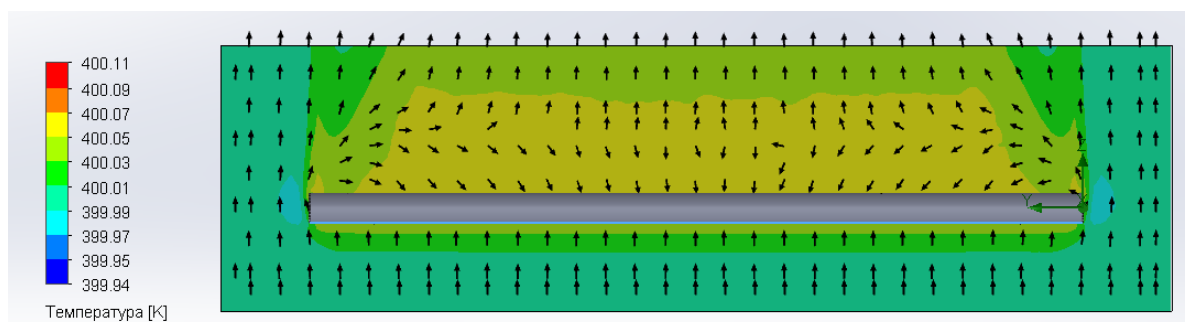


Рис. 4. Вектори руху гарячого теплоносія ззовні поверхні гладкої труби, отриманий у пакеті доповнення SolidWorks Flow Simulations

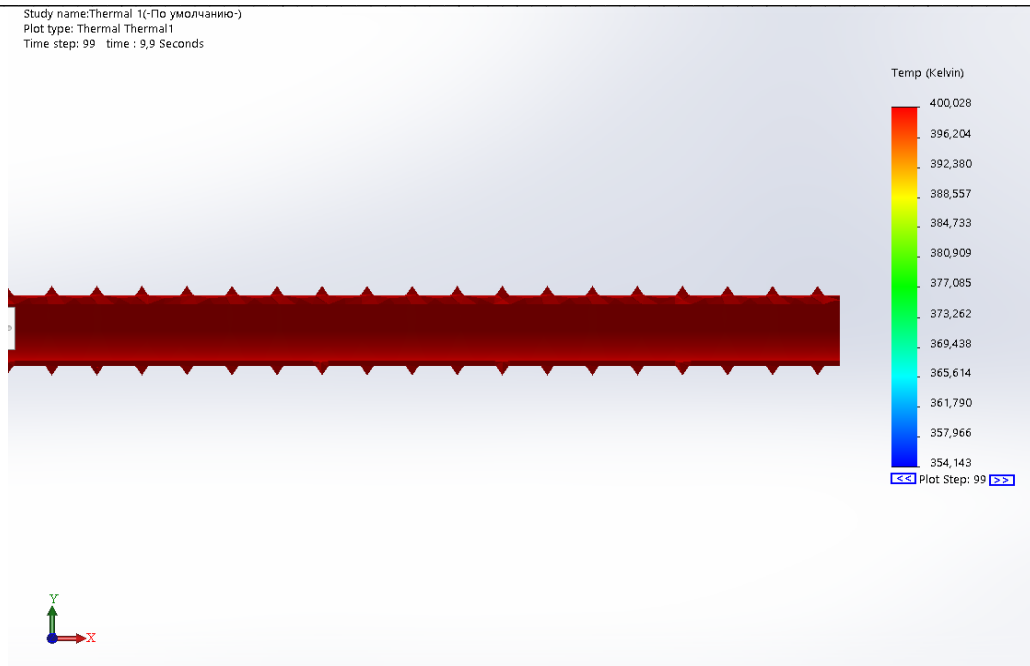


Рис. 5. Градієнт температур оребреної труби, отриманий у пакеті доповнення SolidWorks Simulations

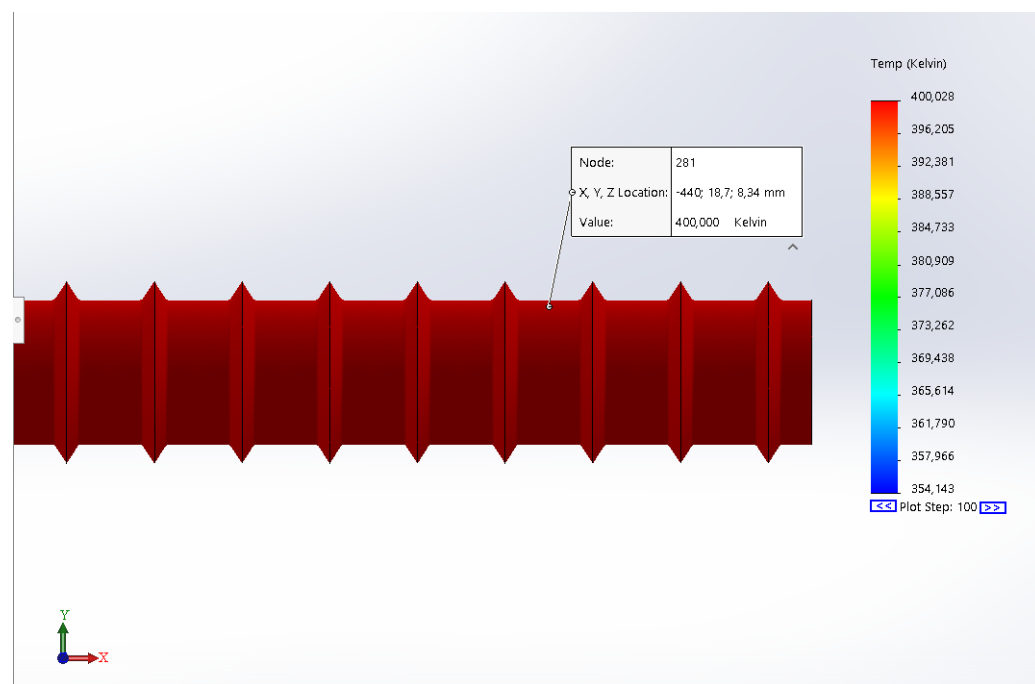


Рис. 6. Градієнт температур оребреної труби, отриманий у пакеті доповнення SolidWorks Simulations

Аналізуючі отримане зображення руху теплоносія ззовні поверхні труби, можна підтвердити, що за рахунок оребрення потоки пара утворюють завихрення в зоні поблизу поверхні труби, що, в свою чергу, приводить до покращення передачі тепла (рис. 7) [10]. Як наслідок, маємо значно менший затрачений на загальний обігрів площі поверхні, а отже, економію ресурсів на обігрів.

В порівнянні з гладкою трубою, де температура всередині досягала 116 °С, в оребреній фіксується стає значення 127 °С. Різниця складає 11 °С, що підтверджує ефективність останньої.

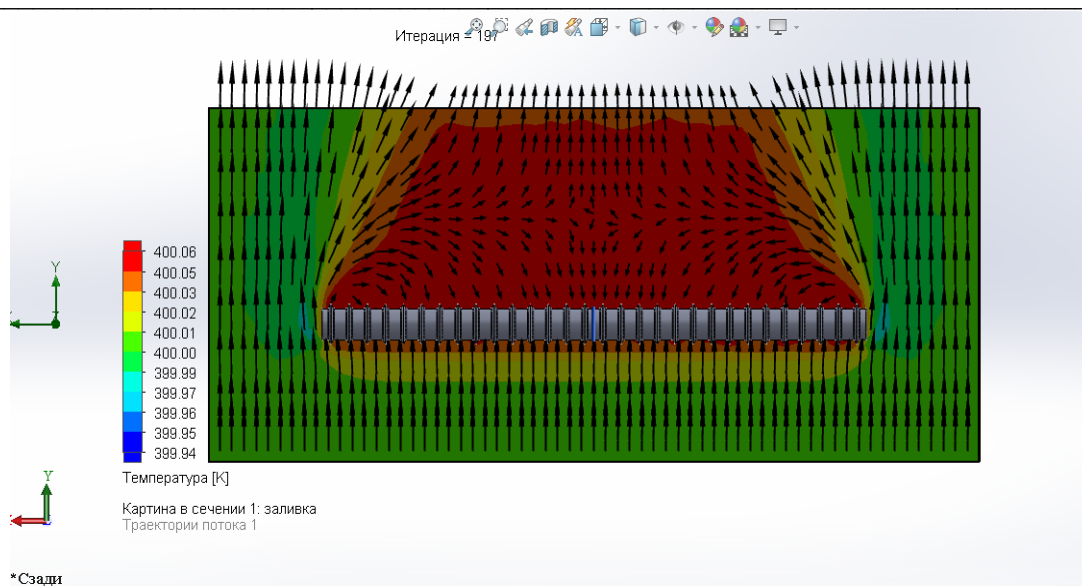


Рис. 7. Вектори руху гарячого теплоносія ззовні поверхні оребреної труби, отриманий у пакеті доповнення SolidWorks Flow Simulations

Висновки. Отримано результат, який демонструє, що оребрена труба сприяє турбулізації потоків за рахунок утворення завихрень, рівномірному та більш інтенсивному нагріву поверхні труби, ніж стандартна гладка труба. Методика, що використовувалась в дослідженні, може бути застосована при розробці подальших конструкцій випарних апаратів.

Список використаних джерел

1. Zaid S., Mohd Jaafar M. N., Tholudin M. Lazim, Shahrir A., Ammar F. Abdul Wahid Heat transfer enhancement in two-start spirally corrugated tube. Олександрійський інженерний журнал, 2015. Вип. 54, 415-422 с.
2. Vicente P. G., Garc A., Viedma A. Experimental investigation on heat transfer and frictional characteristics of spirally corrugated tubes in turbulent flow at different Prandtl numbers. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004. Vol. 47, 671–681 p.
3. Rainieri S., Bozzoli F., Cattani L. Passive techniques for the enhancement of convective heat transfer in single phase duct flow. Journal of Physics: Conference Series Italia, 2014. 1–10 p.
4. Махди Я. Ю., Бокарев Е. И., Бараков А. В. Экспериментальное исследование конвективного теплообмена и гидравлического сопротивления в криволинейном канале с кольцевыми турбулизаторами. Вестник Воронежского государственного технического университета, 2013. Том 1, №9, 138-140 с.
5. Письменный Е. Н., Рогачев В. А., Баранюк А. В., Семеняко А. В., Вознюк М. М. CFD-моделирование омыwania поверхности труб удобообтекаемой формы с неполным поперечным оребрением. Международный научно-исследовательский журнал, 2014. №2 (21), 76 – 80 с.
6. Перцев Л. П., Ковалев Е. М., Фокин В. С. Трубчатые испарительные аппараты для кристаллизующих растворов, Пособие по проектированию М., 1982. – 70 с.
7. Плановський А. Н., Ніколаєв П. Н. Процеси і апарати хімічної і нафтохімічної технології: Навч. для вузів. - 3-йє изд., перераб. я доп. – М.: хімія, 1987. - 496 с.
8. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию/ Под ред. Ю. И. Дытнерского. – М.: Химия, 1983. – 272 с.
9. ГОСТ 5632-2014. Сталі висококолігвані і сплави коррозійностійкі, жаростійкі і жаропрочні // Маркі.
10. Константинов С. М. Теплообмін [Текст] : підруч. для студентів вищ. техн. навч. закл. / Під ред. С. М. Константинов. – Політехніка : Інрес, 2005. 303 с.

Рецензент Шибєцький Владислав Юрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри біотехніки та інженерії НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського”.

УДК 621.891

DOI 10.36910/775.24153966.2021.72.24

С.П. Шимчук, М.С. Півницький, Н.П. Зайчук
Луцький національний технічний університет

ВИКОРИСТАННЯ ЛАНЦЮГОВИХ ПЕРЕДАЧ В РІЗНИХ ГАЛУЗЯХ СУЧАСНОГО МАШИНОБУДУВАННЯ

В статті розглядаються конструктивні особливості та область використання ланцюгових передач в різних галузях сучасного машинобудування. Пропонуються нові конструктивні рішення виготовлення малоланкових швидкокорозбірних ланцюгів.

Ключові слова: ланцюгова передача, ланцюг, швидкість, навантаження, коефіцієнт корисної дії

С.П. Шимчук, Н.С. Пивницкий, Н.П. Зайчук ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦЕПНЫХ ПЕРЕДАЧ В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ СОВРЕМЕННОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

В статье рассматриваются конструктивные особенности и область использования цепных передач в разных отраслях современного машиностроения. Предлагаются новые конструктивные решения изготовления малозвенных быстроразборных цепей.

Ключевые слова: цепная передача, цепь, скорость, нагрузка, коэффициент полезного действия

S.P. Shymchuk, N.S. Pivnytskyi, N.P. Zaychuk USE OF CHAIN TRANSMISSIONS IN VARIOUS INDUSTRIES OF MODERN MECHANICAL ENGINEERING

The article discusses the design features and applications of chain drives in various industries. The prospects for the use of such transmissions are due to their technological capabilities and economic efficiency. Chain drives can operate at high speeds and transfer significant loads, while still being highly efficient. These transmissions are relatively simple and have good durability. However, in modern mechanical engineering, there are more stringent requirements for manufacturing accuracy, design simplicity, interchangeability, and reducing costs and resources for the manufacture of appropriate products. Therefore, as a result of research, the authors propose new design solutions for the manufacture of quick-detachable chains with a low connection.

Keywords: chain transmission, chain, speed, load, efficiency

Вступ. Ланцюгові передачі (ЛП) дуже широко використовуються в різних машинах: сільськогосподарських та обладнанні для лісопереробної галузі, автомобілях, завантажувально-розвантажувальних пристроях, машинах легкої промисловості, нафтодобувному обладнанні та різного роду транспортерах і конвеєрах. ЛП – це так звані передачі з гнучким зв'язком, які передають рух за допомогою ланцюга, що рухається по зубчатих колесах (зірочках) [1, 2]. Ці передачі можуть працювати при високих швидкостях та передавати значні навантаження (швидкість руху ланцюга у передачі досягає до 35м/с), маючи при цьому високий ККД.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідження ланцюгів ланцюгових передач виконуються в частині розрахунку таких передач та їх елементів (в тому числі і з використанням систем автоматизованого розрахунку) [1 – 5], модернізації чи розробці нових конструкцій ланцюгів для відповідних машин [6], дослідження кінематики та динаміки роботи таких передач [7, 8], використання різного роду традиційних та полімерних матеріалів [2, 9], розробки та удосконалення відповідних технологій [10].

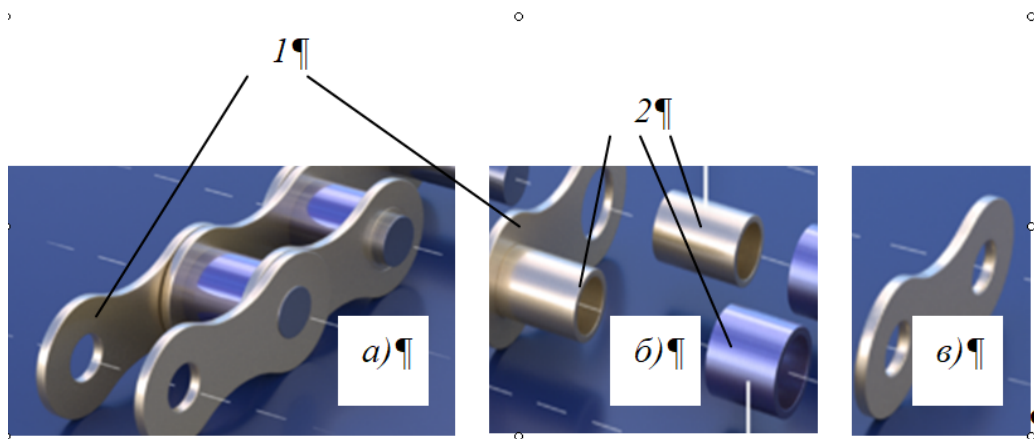
При проектуванні та виконанні відповідних розрахунків ланцюгових передач існуючі методи та методики розрахунку не завжди дають достатню точність, а тому, зазвичай, в таку продукцію закладається підвищений запас міцності, що звичайно призводить до збільшення матеріалоемності і, відповідно, до перевитрати ресурсів та підвищення собівартості. Варто зауважити, що на сьогодні роликові ланцюги виготовляються як з традиційних металічних матеріалів так і з полімерних. Такий підхід дозволяє покращити ряд експлуатаційних властивостей, зокрема і трибологічні, та здешевити виготовлення ланцюгів.

Постановка завдань. На основі літературного пошуку та аналізу ланцюгів ланцюгових передач запропонувати модель економічно-ефективної спрощеної конструкції ланцюга, що володітиме покращеними експлуатаційними властивостями та матиме широке використання в області галузевого машинобудування.

Виклад основного матеріалу. Ланцюгові передачі поділяють на передачі з:

- втулковими ланцюгами;
- роликовими ланцюгами (рис. 1);

- фасонними ланцюгами.



**Рис. 1. Складові елементи роликового ланцюга:
1 – пластини; 2 – ролики.**

За конструктивними особливостями та умовами експлуатації розрізняють відкриті й закриті ЛП, що працюють за умови сухого тертя та зі змащенням. Міжосьова відстань в ланцюгових передачах може бути постійною та регульованою (з періодичним та неперервним регулюванням натягу). Ланцюгові передачі мають ряд переваг порівняно з іншими механічними передачами. Зокрема:

- можливість використання при значних міжосьових відстанях;
- високий ККД;
- можливість передачі руху одним ланцюгом кільком валам.

Недоліки таких передач пов'язані зі складністю виготовлення ланцюгів, збільшення довжини ланцюга при експлуатації, зношення робочих поверхонь ланок ланцюгів, динамічні явища, що пов'язані з нерівномірністю руху ланцюга (додаткові шуми), низька кінематична точність при реверсивному русі, потреба в додаткових пристроях для регулювання натягу [3].

Так розглянуті вище та зображені на рис.1 роликові ланцюги складаються з багатьох конструктивних елементів, а тому для забезпечення необхідної точності, довговічності, зносостійкості, інших експлуатаційних характеристик (залежно від області використання таких ланцюгів та машин в яких вони експлуатуються) потрібно враховувати ряд параметрів та вирішувати відповідні задачі [2, 3].

Особливий інтерес для сільськогосподарського машинобудування, конвеєрів та підйомних пристроїв гірничодобувної промисловості становлять ланцюгові передачі з фасонними ланцюгами. Зазвичай ці ланцюги працюють за порівняно невеликих швидкостей руху та при значних навантаженнях. Ланки таких ланцюгів виготовляються зварюванням, що потребує додаткових технологічних операцій як при виготовленні так і при можливому ремонті. Тому актуальною науково-прикладною задачею є створення ланцюгів простої конструкції без використання операцій зварювання, що і є об'єктом наших досліджень. Модель суцільної, «беззварної» ланки такого ланцюга зображено на рис. 2. Переваги запропонованої конструкції ланки є очевидні:

- зменшення технологічних операцій при виготовленні;
- підвищення міцності;
- при такій конструкції можна швидко замінити ланку без додаткового обладнання, оскільки ланцюг складається з набору пластин (які кріпляться між собою конструктивно за допомогою натягу), тобто підвищується ремонтпридатність такого ланцюга.

При попередній побудові технологічного процесу виготовлення досліджуваної ЛП планується виготовляти зірочки зі сталі 45, як такої що має необхідну зносостійкість при заданих умовах тертя, а ланки ланцюга зі сталі 35 чи взаємозамінних сталей шляхом штампування. Використання таких матеріалів є економічно обґрунтовано, а запропонована «беззварна» конструкція ланок є технологічною та надійною, порівняно з іншими конструкціями ланцюгів.

Для ланки ланцюга запропоновано використовувати сталь 35, яка належить до конструкційних вуглецевих сталей, а деталі з неї підлягають ГОСТу 1050 або ДСТУ 7809. Завдяки невисокій вартості

та високим експлуатаційним характеристикам вона використовується для деталей машинобудування та сільськогосподарської техніки, більшість з яких виготовляють прокатуванням.



Рис.2. Запропонована модель «беззварної» ланки ланцюга

Існує велика кількість закордонних аналогів (американські, німецькі, японські, французькі, італійські, англійські, італійські, іспанські, китайські, польські та інші), що надає можливість легкої заміни матеріалу за виникнення необхідності. Серед вітчизняних марок у якості заміника використовують Ст 30, Ст 40, 35Г.

Сталь 35 погано зварюється, а вироби можна отримувати шляхом гарячого штампування чи прокатуванням. Недоліком сталі є те, що вона має низьку корозійну стійкість. Проведенням термічної обробки можна покращити та врегулювати експлуатаційні характеристики сталі (готових виробів). Залежно від особливостей експлуатації проводять термічну обробку гартування та відпуск. Режимми термічної обробки обирають в залежності від габаритів деталей та їх призначення. Охолодження після гартування в більшості проводять у маслі, що сприяє уникненню дефектів гартування. Великою перевагою даної сталі є те, що після відпуску не має можливості отримати відпускну крихкість, тобто отримувана структура не схильна до відпускну крихкості.

Межа міцності σ_b сталі 35 коливається від 390 до 930 МПа, залежно від сортаменту та термічної обробки матеріалу, а межа текучості $\sigma_{0.2}$ до 315 МПа, максимальне відносне видовження сталі становить 45%.

Температури гарячого деформування маловуглецевих сталей зазвичай знаходяться в межах 1150-900 °С. Початкова температура становить 1300°С, однак зі збільшенням вмісту вуглецю вона знижується з кожним відсотком. На практиці температуру деформування обирають на 100-150°С нижче лінії солідусу згідно діаграми стану залізо-вуглець.

За механічними властивостями сталь 35 задовільняє вирішення поставлених задач дослідження, оскільки належить до групи сталей, що використовують для деталей невисокої міцності, які зазнають невеликих навантажень. Згідно розрахунку робочих навантажень вона може використовуватись для фасонних ланцюгів, що зазнають незначних динамічних навантажень.

Висновки.

Як результат виконаних теретичних досліджень, авторами пропонуються нові конструктивні рішення щодо виготовлення малоелементних швидкорозбірних ланцюгів, а в майбутньому заплановано:

- проводити подальші дослідження «беззварних» ланок фасонних ланцюгів ЛП з урахуванням їх динаміки та можливостей покращення міцнісних, трибологічних та інших експлуатаційних властивостей;
- розробляти нові та використовувати діючі автоматизовані методи розрахунку ланцюгових передач;
- використовувати розглянуті конструкційні матеріали та їх закордонні аналоги, методи та режими обробки для розробки відповідних технологій виготовлення ланок фасонних ланцюгів «беззварної» конструкції.

Література

1. Павлице В. Основы конструирования та розрахунок деталей машин: Підручник. Львів: Афіша, 2003. — 560 с.
2. Коновалюк Д.М., Ковальчук Р.М. Деталі машин: Підручник. — Вид. 2-ге. — К.: Кондор, 2004. — 584 с.
3. Романовский Б.В. Уточненный расчет на усталостную прочность пластин роликовых цепей / В сб. Механические передачи, НИИМАШ, М.: 1971.
4. Д.Н. Решетов. Расчет деталей машин на ЭВМ. Под ред. Д.Н. Решетова и С.А. Шувалова. — М.: Высшая школа, 1985, 370 с.
5. Пилипенко О.І., Полуян А.В. 3D-моделювання кінематики ланцюгової передачі за допомогою програмного комплексу SolidWorks. — Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції «АВІА-2013» 21-23 травня 2013 року, м. Київ. — Том 1, С. 3.10 – 3.13.
6. С. Півницький, В. Гайдучок, М. Півницький, М. Петров. Механізація внесення твердих добрив // Вісник Львівського національного аграрного університету. — Львів, 2008. — № 12. — Т. 1. — с. 494 – 500.
7. Пилипенко О. І., Полуян А. В. Побудова моделей і порівняльний аналіз кінематики ланцюгових передач в металевому та полімерному виконанні //Наукові нотатки. — 2013. — №. 41 (2). — С. 96-102.
8. Рябов Г.К. Определение приведённого числа звеньев цепи, соударяющихся с зубьями звёздочек. Вестник машиностроения №8, 1968.
9. Композиционные материалы. Справочник / Под ред. Д.М. Карпиноса. К.:Наукова думка, 1985, 592 с.
10. Пилипенко О.І., Степенко А.П., Козар І.Ф. Вплив похибок виготовлення ланцюгів на контактну взаємодію елементів ланцюгових передач з різних матеріалів. Вісник Чернігівського технологічного інституту №3. Машинобудування. Електроніка. Чернігів, 1997. — С.75-84.

УДК: 621.6; 006.6

DOI 10.36910/775.24153966.2021.72.25

Т.М. Павлиго*Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича НАН України***ЗНАЧЕННЯ СТАНДАРТИЗАЦІЇ У ІННОВАЦІЙНИХ ПРОЦЕСАХ***Проаналізовано вплив стандартизації на інноваційні процеси та визначено загальні механізми такого впливу.**Ключові слова: стандартизація, інноваційні процеси.***Т.М.Павлыго****ЗНАЧЕНИЕ СТАНДАРТИЗАЦИИ В ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЦЕССАХ***Проанализировано влияние стандартизации на инновационные процессы и определены общие механизмы такого влияния.**Ключевые слова: стандартизация, инновационные процессы.***T.M.Pavlyho****THE IMPORTANCE OF STANDARDIZATION IN INNOVATION PROCESSES***The impact of standardization on innovation processes is analyzed and general mechanisms of such impact are determined.**Keywords: standardization, innovative processes*

Постановка проблеми. У наш час економічний прогрес не може існувати без розробки та впровадження інноваційних підходів до виробництва та управління, забезпечення екологічної безпеки та гармонійних соціальних відносин.

Стандартизація є інструментом, який забезпечує сумісність, взаємозамінність, уніфікацію, єдність властивостей та характеристик продукції, робіт та послуг.

Тож стандартизація набуває все більшого значення, бо вона пов'язує технічні рішення та надає можливість забезпечити міжгалузеву кооперацію діяльності та ефективно впровадження наукомістких технологій у промисловість. Стандарти задають рівень, на який повинні орієнтуватись виробники товарів та послуг.

Мета статті – аналіз впливу стандартизації на інноваційні процеси та визначення загальних механізмів такого впливу.

Викладення основного матеріалу. Багато виробів та комплектуючих проектують, виготовляють, збирають та упаковують по всьому світу, тому багаточисленні нормативні вимоги до продукції, методи контролю та випробовування матеріалів повинні стандартизуватись на початкових етапах створення продукції.

Сучасний стан ринку характеризується постійною зміною зовнішнього середовища, мінливістю купівельного попиту, наявністю великої кількості підприємств різних форм власності, підвищенням невизначеності та ризику. Для того, щоб вижити, підприємствам необхідно постійно відстежувати і реагувати на всі зміни, що відбуваються в їх конкурентному середовищі з метою збереження своїх позицій на ринку і забезпечення конкурентних переваг. Тому кожному підприємству особливо важливо правильно оцінювати ринкову обстановку, з тим, щоб запропонувати ефективні засоби конкуренції, які, з одного боку, відповідали б ринковій ситуації, що склалася, та тенденціям її розвитку, з іншої боку – специфіці діяльності підприємства.

Останнім часом спостерігається перехід від статичних та динамічних конкурентних переваг до інноваційних, досягнення яких передусім пов'язане з переходом країн на інноваційний шлях з метою здобуття якісно нового рівня соціально-економічного розвитку [1-3]. Місце країни в міжнародному співтоваристві окреслюється станом освіти, розмірами застосовування наукових та технічних досягнень, ефективністю інтеграції факторів виробництва, капіталу, інформаційних та інтелектуальних ресурсів.

Малі підприємства, через свою специфіку діяльності, повинні бути активними та гнучкими на ринку, адже саме вони найчастіше за все впроваджують нові продукти та технології у різних галузях промисловості. Кошти, які підприємці отримують від реалізації інноваційного продукту, покривають витрати зі створення і впровадження інновацій, що є стимулом до появи нових ідей і джерелом фінансування нового інноваційного процесу. Тому стандартизувати ідеї потрібно якнайшвидше, і це дозволить виробнику довести, що його інноваційна продукція дійсно має високу якість.

В одних випадках стандарти можуть передувати інновації, встановлюючи критерії для проектування і експлуатаційні характеристики, які будуть відповідати вимогам споживачів. В інших випадках впроваджена інноваційна ідея може стати основою для нового стандарту. Виробники, які беруть активну участь в розробці і використовують національні та міжнародні стандарти, отримують значну перевагу перед конкурентами, так як їх продукт, завдяки застосуванню нових технологій і методів контролю, має більш високу якість і відповідає сучасним вимогам ринку.

Сучасний ринок характеризується короткостроковістю життєвого циклу продукції та послуг. Стандартизований продукт має перевагу перед нестандартизованим за рахунок можливості перенесення його виробництва в менш розвинені країни. Це сприяє зниженню собівартості продукції, поліпшенню економічних відносин між державами і розвитку країн з низьким економічним рівнем виробництва. Крім того, стандартизація відкриває споживачам доступ до інформації про характеристики і методи випробування продукції та послуг.

Можна відмітити такі механізми впливу стандартизації на інновації:

- стандарти знижують інформаційну суперечливість. Застандартизований продукт споживач готовий платити більше. А це, в свою чергу, збільшує ймовірність появи нових інновацій;
- знаходячись у відкритому доступі стандарти, допомагають вийти на ринки нових учасників, які можуть вкладатися в нові інновації;
- створення міжнародних словників дозволяє вченим усього світу легко знайти спільну мову при розробці спільних проектів;
- стандарти дозволяють новаторам диференціювати свою продукцію і послуги на ринку, тобто економити час і кошти на реальні інновації;
- стандарти сприяють уніфікації продукції, що зазвичай призводить до економії коштів, які можуть вкладатись в нові інновації.;
- інформація про технології та методи випробувань, яку містять стандарти, може використовуватися для створення нових ідей. Доступність стандартів сприяє ефективному поширенню технологій, допомагає не витрачати зусилля на розробку вже застандартизованих продуктів;
- стандарти безпеки та охорони навколишнього середовища сприяють підвищенню безпеки продукції, допомагають не допускати попадання на ринок небезпечної продукції та контролювати стан навколишнього середовища, тобто захищають інтереси споживачів;
- стандарти на сумісність необхідні для доповнення та вдосконалення вже існуючої продукції, послуг і методів контролю. Вони сприяють доступу на міжнародні ринки нової продукції;
- стандарти на методи випробування і загальні технічні вимоги дозволяють поліпшувати технології і демонструвати свою продукцію з вигідного боку;
- стандарти на продукцію, послугу чи процес допомагають довести, що продукт дійсно має характеристики і якість, що відповідає світовому рівню;
- стандарти на терміни та визначення уніфікують позначення та терміни, допомагають диференціювати виробникам нову продукцію і послуги на ринку, а споживачеві робити правильний вибір;
- стандарти сприяють поліпшенню роботи підприємств, завдяки розробці сучасних схем виробництва і створенню нової продукції та послуг.

Досить часто стандартизація та інновації розглядаються як суперечливі процеси. Інновації - це новизна і ексклюзивність, стандартизація - передбачуваність і уніфікація. Проте стандартизація вносить важливий внесок в інновації і є основним помічником для підтвердження відповідності характеристик продукції, використання і впровадження нових технологій і розширення ринків збуту.

Це відбувається в тому випадку, якщо стандарти є результатом роботи кращих фахівців у своїй галузі і містять не тільки загальні знання, а й "ноу-хау". Стандарти, які не відповідають сучасним вимогам, перешкоджають інноваціям. Регулярний перегляд та перевидання стандартів гарантує розширення номенклатури продукції та дозволяє враховувати останні досягнення в технологіях і матеріалах.

У 2013 році у Міжнародній організації зі стандартизації (ISO) було створено технічний комітет ISO/TC 279 Innovation management. Його діяльність пов'язана зі створенням термінології та методів взаємодії між відповідними сторонами для впровадження інновацій. Голова технічного

комітету ISO/TC 279 Аліса де Касанове зазначила, що стандарт є одним із результатів науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт, його застосування сприяє успішному переходу від ідеї до нового продукту або технології. Інновація - це не просто яскрава ідея. Інновації являють собою важливий фактор успіху організації, збільшуючи її здатність пристосовуватися до зміни світу. Новаторські ідеї дають початок кращим способам роботи, а також новим рішенням для отримання доходу і підвищення стійкості. Інновації тісно пов'язані з забезпеченням життєстійкості організації, оскільки допомагають їй орієнтуватися і адаптуватися до складних умов і реагувати на них, використовуючи можливості, які можуть сприяти розвитку творчого потенціалу [4].

Зрештою великі ідеї і нові винаходи часто є результатом довгої серії незначних дій.

Відповідний механізм управління інноваціями забезпечує системний підхід до інтеграції на всіх рівнях організації з метою використання та створення можливостей для розробки нових рішень, систем, продуктів та послуг. У 2019 році ISO опублікував перший міжнародний стандарт на дані системи управління.

ISO 56002:2019 Innovation management — Innovation management system — Guidance (Управління інноваціями. Система управління інноваціями. Керівництво) [5]. Цей стандарт включає всі аспекти управління інноваціями, починаючи з того, як генерувати ідеї, аж до реалізації нової продукції на ринку. Стандарт містить контекст, в якому працює організація, культуру, стратегію, процеси і вплив. Він також охоплює багато видів діяльності, включаючи продукти і послуги, бізнес-моделі, організаційні інновації та багато іншого, його також застосовують до всіх типів організацій, незалежно від розміру і типу.

Кожна організація, яка хоче керувати своїм майбутнім, повинна слідувати новим аспектам управління інноваціями. Тобто вони повинні розвиватися і адаптуватися, щоб йти в ногу з ринковими і соціальними тенденціями. Стандарт надає рекомендації про те, як найкращим чином викладати свої ідеї, ефективно тестувати їх і управляти пов'язаними з ними ризиками і можливостями. Стандарт ISO 56002 допоможе організаціям створювати нові цінні пропозиції і максимально використовувати свій потенціал в структурованому вигляді; також може допомогти з формуванням культури інновацій в організації, тим самим використовувати творчий потенціал і мотивацію кожного члена організації і в кінцевому підсумку покращити взаємодію, комунікацію і продуктивність компанії.

Стандарт ISO 56002 доповнюють два інших стандарти даної серії, які були нещодавно опубліковані: ISO 56003:2019 Innovation management — Tools and methods for innovation partnership — Guidance (Інноваційний менеджмент. Засоби і методи інноваційного партнерства. Керівництво) [6] та ISO/TR 56004:2019 Innovation Management Assessment — Guidance (Оцінка інноваційного менеджменту. Керівництво) [7].

Наступні доповнення з серії включають:

ISO 56000:2020 Innovation management — Fundamentals and vocabulary (Інноваційний менеджмент. Основи і словник) [8].

ISO 56005:2020 Innovation management — Tools and methods for intellectual property management — Guidance (Інноваційний менеджмент. Інструменти і методи управління інтелектуальною власністю. Керівництво) [9].

Розроблюються та чекають виходу:

ISO/DIS 56006 Innovation management — Tools and methods for strategic intelligence management — Guidance (Інноваційний менеджмент. Стратегічне управління розвідувальними даними. Керівництво) [10].

ISO/AWI 56007 Innovation management — Tools and methods for idea management — Guidance (Інноваційний менеджмент. Управління ідеями) [11].

В Україні, на жаль, ще не створено дзеркального технічного комітету, який би займався створенням національних та впровадженням міжнародних стандартів з питань інноваційного менеджменту.

Технічний комітет стандартизації «Порошкова металургія» (ТК 54), що діє при Інституті проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича НАН України продовжує роботу з впровадження національних стандартів, гармонізованих з міжнародними та європейськими стандартами.

Впровадження нових національних стандартів відкриває для України можливість переходу на світові стандарти раціонального та розумного споживання енергії, освоєння ресурсів природного середовища, підвищення рівня технологій, юридичного захисту інтелектуальної власності. Кінцевою метою є створення прогресивної конкурентноспроможної на світових ринках інноваційної продукції.

У таблиці 1 подано національні стандарти, якими прийнято відповідні міжнародні та європейські стандарти, що набули чинності в Україні за період 2009-2020 р.р. в галузі порошкової металургії та твердих сплавів.

Табл. 1.

Міжнародні стандарти в галузі порошкової металургії та твердих сплавів, що набули чинності в Україні за період 2009-2020 р.р.

№ з/п	Позначення стандарту	Назва	Позначення міжнародного стандарту
1	2	3	4
1	ДСТУ ISO 4491-3:2009	Металеві порошки. Визначення вмісту кисню методами відновлювання. Розділ 3. Кисень, екстрагований воднем	ISO 4491-3:1997
2	ДСТУ ISO 7625:2009	Матеріали металеві спечені та порошки, крім твердих сплавів. Підготовка проб і хімічний аналіз для визначення вмісту вуглецю	ISO 7625:2006
3	ДСТУ ISO 4492:2009	Порошки металеві, крім порошків твердих сплавів. Визначення розмірних змін після пресування та спікання	ISO 4492:85
4	ДСТУ ISO 2738:2009	Матеріали металеві спечені, крім твердих сплавів. Матеріали проникні металеві спечені. Визначення щільності, вмісту мастила та відкритої пористості	ISO 2738:1999
5	ДСТУ ISO 3927:2009	Порошки металеві, крім порошків для твердих сплавів. Метод визначення пресованості за одновісного пресування	ISO 3927:2001
6	ДСТУ ISO 2739:2010	Спечені металеві втулки. Визначення міцності на радіальне стиснення	ISO 2739:2006
7	ДСТУ ISO 4003:2010	Проникні спечені металеві матеріали. Визначення розміру пор методом виходу бульбашки	ISO 4003:1977
8	ДСТУ ISO 3252:2014	Металургія порошкова. Словник термінів	ISO 3252:1999
9	ДСТУ EN ISO 3928:2014	Матеріали металеві спечені, крім твердих сплавів. Зразки для визначення міцності від утоми	EN ISO 3928:2006
10	ДСТУ EN ISO 3907:2014	Сплави тверді. Визначення загального вмісту вуглецю. Гравіметричний метод	ENISO 3907:2009
11	ДСТУ ISO 13947:2014	Порошки металеві. Метод визначення неметалевих включень у металевих порошках, що використовуються у штампованих зразках	ISO 13947:2011
12	ДСТУ ISO 10070:2014	Порошки металеві. Визначення питомої поверхні методом вимірювання проникності повітря через шар порошку в умовах стаціонарного потоку	ISO 10070:1991
13	ДСТУ ISO 10076:2014	Порошки металеві. Визначення розподілу частинок за розмірами методом гравітаційної седиментації у рідині	ISO 10076:1991
14	ДСТУ EN ISO 3928:2014	Матеріали металеві спечені, крім твердих сплавів. Зразки для визначення міцності від утоми	EN ISO 3928:2006
15	ДСТУ EN ISO 4498:2014	Матеріали металеві спечені, крім твердих сплавів. Визначення уявної твердості і мікротвердості	EN ISO 4498:2010
16	ДСТУ EN ISO 3369:2014	Матеріали спечені непроникні та сплави тверді. Визначення щільності	EN ISO 3369:2010
17	ДСТУ ISO 3312:2014	Матеріали металеві спечені та сплави тверді. Визначення модуля Юнга;	ISO 3312:1987

18	ДСТУ EN ISO 3327:2014	Сплави тверді. Визначення опору поперечному розриванню	EN ISO 3327:2009
19	ДСТУ EN ISO 13944:2014	Пластифіковані суміші металевих порошків. Визначення вмісту пластифікатора. Модифікований метод екстракції за Сокслетом	EN ISO 13944:2012
20	ДСТУ ISO 4490:2016	Порошки металеві. Визначення плинності за допомогою каліброваної лійки (приладу Холла)	ISO 4490:2014
21	ДСТУ ISO 4491-1:2016	Порошки металеві. Методи визначення вмісту кисню відновлюванням. Частина 1. Загальні настанови	ISO 4491-1:1989
22	ДСТУ ISO 4491-2:2016	Порошки металеві. Методи визначення вмісту кисню відновлюванням. Частина 2. Втрати маси під час відновлювання воднем (водневі втрати)	ISO 4491-2:1997
23	ДСТУ ISO 4491-4:2016	Порошки металеві. Методи визначення вмісту кисню відновлюванням. Частина 4. Загальний вміст кисню під час визначення методом відновного екстрагування	ISO 4491-4:2013
24	ДСТУ ISO 3923-1:2016	Порошки металеві. Визначення насипної щільності. Частина 1. Метод з використанням лійки	ISO 3923-1:2008
25	ДСТУ ISO 3923-2:2016	Порошки металеві. Визначення насипної щільності. Частина 2. Метод волюмометра Скотта	ISO 3923-2:1981
26	ДСТУ ISO 3953:2016	Порошки металеві. Визначення щільності утрусання	ISO 3953:2011
27	ДСТУ ISO 3954:2016	Порошки, які використовуються в порошковій металургії. Відбирання проб	ISO 3954:2007
28	ДСТУ EN ISO 3325:2017	Матеріали металеві спечені, крім твердих сплавів. Визначення границі міцності під час поперечного згинання	EN ISO 3325:1999
29	ДСТУ EN ISO 3325/Зміна 1:2017	Матеріали металеві спечені, крім твердих сплавів. Визначення границі міцності під час поперечного згинання. Зміна 1	EN ISO 3325/A1:2002
30	ДСТУ ISO 18549-1:2017	Порошки металеві. Визначення щільності й плинності за підвищених температур. Частина 1. Визначення щільності за підвищених температур	ISO 18549-1:2009
31	ДСТУ ISO 18549-2:2017	Порошки металеві. Визначення щільності й плинності за підвищених температур. Частина 2. Визначення плинності за підвищених температур	ISO 18549-2:2009
32	ДСТУ ISO 28279:2017	Матеріали металеві спечені. Визначення рівня чистоти порошкових деталей	ISO 28279:2010
33	ДСТУ ISO 4507:2018	Матеріали на основі заліза спечені, цементовані або ціановані. Визначення та підтвердження глибини поверхневого зміцнення випробуванням на мікротвердість	ISO 4507:2000
34	ДСТУ ISO 5755:2018	Спечені металеві матеріали. Технічні умови	ISO 5755:2012
35	ДСТУ ISO 4506:2019	Матеріали на основі заліза спечені, цементовані або ціановані. Визначення та підтвердження глибини поверхневого зміцнення випробуванням на мікротвердість	ISO 4506:2018

Висновок. В умовах глобалізації та постійного загострення конкуренції фундаментом конкурентоспроможності є інновації, які дають можливість країнам, що володіють інноваційними конкурентними перевагами, займати належне місце в світовому співтоваристві. Стандарти є основними помічниками для підтвердження відповідності характеристик продукції, використання і впровадження нових технологій і розширення ринків збуту.

Список використаних джерел:

1. Бірюков О. В. Управління інноваціями в управлінні проектами: метрика стандартів [Електронний ресурс] / О. В. Бірюков // Управління проектами та розвиток виробництва. - 2012. - № 4. - С. 52-59. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Uprv_2012_4_9.
2. Землянкін А. І. Механізми управління інноваціями в Україні: стан і перспективи вдосконалення [Електронний ресурс] / А. І. Землянкін, І. Ю. Підоричева // Стратегічні пріоритети. - 2014. - № 2. - С. 43-48. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/spa_2014_2_8.
3. Коновал Ю. В. Економічна сутність поняття "інновація" [Електронний ресурс] / Ю. В. Коновал // Теоретичні і практичні аспекти економіки та інтелектуальної власності. - 2014. - Вип. 1(1). - С. 336-341. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Tpaiv_2014_1\(1\)_57](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Tpaiv_2014_1(1)_57).
4. International Organization for Standardization. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://isotc.iso.org/livelink/livelink/fetch/2000/2122/687806/customview.html?func=ll&objId=687806&objAction=browse&sort=name>.
5. ISO 56002:2019 Innovation management — Innovation management system — Guidance. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/68221.html>.
6. ISO 56003:2019 Innovation management — Tools and methods for innovation partnership — Guidance. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/68929.html>.
7. ISO/TR 56004:2019 Innovation Management Assessment — Guidance. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/69921.html>.
8. ISO 56000:2020 Innovation management — Fundamentals and vocabulary. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/69315.html>.
9. ISO 56005:2020 Innovation management — Tools and methods for intellectual property management — Guidance. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/72761.html>.
10. ISO/DIS 56006 Innovation management — Tools and methods for strategic intelligence management — Guidance. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/72621.html>.
11. ISO/AWI 56007 Innovation management — Tools and methods for idea management — Guidance. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/75068.html>.

Рецензенти:

Баглюк Г.А., заступник директора Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича НАН України, член-кор. НАН України, доктор технічних наук, професор.

Рудь В.Д., доктор технічних наук, професор Луцького національного технічного університету.

УДК 004.896 (075.8) : 621.391.175

DOI 10.36910/775.24153966.2021.72.26

Б.О. Пальчевський

Луцький національний технічний університет

АНАЛІЗ ВЗАЄМОДІЇ РОБОЧОГО І ІНФОРМАЦІЙНОГО ПРОЦЕСІВ В КІБЕР-ФІЗИЧНІЙ ВИРОБНИЧІЙ СИСТЕМІ

В роботі описано деякі проблемні питання, що стосуються аналізу взаємодії робочого і інформаційного процесів в технологічній машині, яка розглядається як кібер-фізична система. Показані можливі шляхи взаємодії цих процесів для підвищення досконалості технологічної машини на базі використання останніх досягнень в розвитку мехатроніки і цифрового моделювання. Метою роботи є удосконалення методів досягнення заданого рівня якості технологічного обладнання та формування принципу прогнозування якості машин по параметру керованості.

Ключові слова: кібер-фізична виробнича система, діагностика, інтелектуальна система керування, цифрова модель, датчик, інформаційний процес, робочий процес, ситуаційна система керування

Б.А.Пальчевский**АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧЕГО И ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОЦЕССОВ В КИБЕР-ФИЗИЧЕСКОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЕ**

В работе описаны некоторые проблемные вопросы, касающиеся анализа взаимодействия рабочего и информационного процессов в технологической машине, рассматриваемой как кибер-физическая система. Показаны возможные пути взаимодействия этих процессов для повышения совершенства технологической машины на основе использования последних достижений в развитии мехатроники и цифрового моделирования. Целью работы является усовершенствование методов достижения заданного уровня качества технологического оборудования и формирование принципа прогнозирования качества машин по параметру управляемости.

Ключевые слова: кибер-физическая производственная система, диагностика, интеллектуальная система управления, цифровая модель, датчик, информационный процесс, рабочий процесс, ситуационная система управления

B. Palchevskyi**ANALYSIS OF THE INTERACTION OF WORK AND INFORMATION PROCESSES IN CYBER-PHYSICAL PRODUCTION SYSTEMS**

The article describes some problematic issues related to the analysis of the interaction of the working and information process in technological machines, which are considered as cyber-physical systems. Possible ways of interaction of these processes for increase of perfection of technological machines on the basis of use of the last achievements in development of mechatronics and digital modeling are shown. The purpose of the work is to improve the methods of achieving a given level of quality of technological equipment and the formation of a new principle of forecasting the quality of machines on the parameter of controllability.

Keywords: cyber-physical production system, diagnostics, intelligent control system, digital model, sensor, information process, working process, situational control system.

Постановка проблеми. В зв'язку з ускладненням завдань, розв'язуваних технологічним обладнанням, багаторазово зростають і вимоги до їх систем автоматичного керування (САК), а також до вивчення взаємодії фізичних і кібернетичних процесів в машинах.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Впродовж останніх десятиріч відзначається постійне зростання складності технологічного обладнання і виконуваних ним функцій [4, 5, 11, 13]. Відомо, що одним з недоліків процесу створення нового обладнання є традиційно прийнята послідовність, коли спочатку конструюється механічна частина, потім для розробленої механіки підбирається система керування, яка забезпечує необхідні закони переміщення і технологічні режими обробки [5, 6]. При цьому отримуємо технологічну систему, у якій все ніби оптимально, але роздільно проєктовані частини не завжди виявляються оптимальними в цілому для всієї системи. На сьогоднішній день найкращих результатів в глобальній міжнародній конкуренції досягли машини, що розглядаються як кібер-фізичні системи, а принципи їх створення базуються на ідеях інтелектуального виробництва, які на основі системного підходу об'єднують принципи і методологію цифрового моделювання, штучного інтелекту, мехатроніки [1, 2, 3, 10, 13]. Для цього технологічну машину необхідно розглядати як єдину систему, що включає зв'язані між собою ще на етапі проєктування механічну частину, робочий процес і безпосередньо систему керування [6, 7, 9]. Спостерігається постійне зростання питомої ваги інформаційних процесів при функціонуванні кожного наступного покоління технологічного обладнання. Аналіз літературних джерел показав, що вивчення взаємодії робочих і інформаційних процесів при функціонуванні обладнання спеціально не проводилось, не кажучи вже про використання результатів такого

вивчення для створення нових технологічних кібер-фізичних систем і для прогнозування їх розвитку [6, 11, 12].

Постановка завдань. Першочерговим завданням постає необхідність вивчення проблемних питань будови технологічного обладнання нових поколінь, в складі якого використовується сучасна обчислювальна техніка, що має високу швидкість, дозволяє по-новому підійти до експлуатації технологічної машини. Система керування на базі такої техніки спільно з датчиками інформації здатна виправляти "недоліки" механічної частини технологічної машини. Метою роботи є здійснення аналізу взаємодії робочого і інформаційних потоків в технологічній машині для створення нових підходів, які забезпечать при проектуванні нового технологічного обладнання єдність механіки і керування.

Викладення основного матеріалу. Для здійснення подібного аналізу і створення прогресивних методів проектування представимо технологічне обладнання як кібер-фізичну систему, функціонування якої здійснюється взаємоузгодженою роботою двох його взаємодіючих частин, а саме виконавчої (робочої або фізичної) частини, в якій виконується робочий процес, і керуючої (кібернетичної або інформаційної) частини, яка видає команди для виконавчої частини.

Якщо в традиційній техніці керування циклом обробки розглядається як основна функція САК, то в сучасних інтелектуальних технологічних системах на перший план висуваються вимоги оптимального керування і забезпечення довготривалої роботи технологічного обладнання без відхилень від побудованих математичних і комп'ютерних моделей їх функціонування. Фізичний процес технологічної машини-автомату визначається технологією виготовлення виробу, що задана технологічною картою, в той же час як інформаційні процеси створюють не тільки команди керування цим фізичним процесом, але і сприймають сигнали звітування в залежності від результатів проходження цих процесів відповідно до вказівок, заданих на вході процесу керування, а також забезпечують обробку інформації, необхідної для довготривалого функціонування машини. Останні функції інформаційних процесів викликані тим, що при роботі технологічного обладнання відбуваються як зміни зовнішніх умов, так і зміни стану обладнання, тобто виникає необхідність моніторингу стану обладнання для наступної зміни робочого процесу шляхом його коректування та переналагодження.

В основу аналізу робочого і інформаційних процесів в технологічному обладнанні покладемо такі положення:

1. Технологічне обладнання розділяється на виконавчу підсистему і підсистему керування. Підсистема керування задає виконавчій підсистемі алгоритм функціонування.

2. Алгоритм функціонування технологічного обладнання задає послідовність і умови реалізації функцій робочого процесу в його виконавчій підсистемі.

3. Зміна алгоритму функціонування технологічного обладнання відбувається при його переналагодженні на інший виріб, при зміні зовнішніх умов, або при зміні стану технологічного обладнання за результатами її поточного діагностування.

Щоб здійснити цей технологічний прорив, потрібні зміни у всіх складових елементах виробничої системи з тим. Щоби вона стала інтелектуальною. Очевидно, що умовами реалізації такого виробництва є наявність у його компонентів наступних специфічних характеристик:

1. **Робоча підсистема** – наявність гнучкості технологічного і допоміжного обладнання (універсальність і мобільність).

2. **Інформаційна підсистема** – наявність блоків діагностики зовнішніх умов роботи і стану обладнання, блоку аналізу протікання робочого процесу і цифрової моделі робочого процесу, які дозволяють у взаємодії здійснювати оптимізацію функціонування виробничої системи.

Робоча підсистема технологічних машин нового покоління створюється на основі мехатронних функціональних модулів, які не тільки автоматично виконують переходи технологічної операції, але і здійснюють контроль їх протікання, діагностування стану компонентів машини, а також, при потребі, подають інформацію для зміни алгоритму функціонування машини.

Мехатронні модулі із розвиненою структурою мають власний привід, систему керування і систему діагностики (рис.1).



Рис. 1. Структура розвинуеного мехатронного модуля технологічної машини

Організація інформаційних процесів в інтелектуальних технологічних машинах передбачає відслідковування робочого процесу, діагностування стану мехатронних модулів і їх адаптацію до зміни умов роботи машини в процесі її функціонування. Суть відслідковування робочого процесу діагностування стану мехатронних модулів зводиться до порівняння досягнутих показників з необхідними. Очевидно, що ідеальними показниками технологічного обладнання є:

- необхідна якість кінцевого продукту,
- коефіцієнт ефективності використання, що наближається до одиниці,
- повна (100%) безаварійність роботи.

Оскільки при формуванні програми керування необхідно враховувати можливі виробничі ситуації, результати аналізу протікання робочого процесу і стану мехатронних модулів, то інтелектуальні САК повинні забезпечувати компенсацію їх відхилень від заданих шляхом внесення певних змін в алгоритм керування машиною. Для реалізації таких можливостей інтелектуальна САК повинна бути забезпеченою моделлю, що описує виробничу ситуацію в задані моменти часу, так званою «цифровою моделлю», тобто цифровим двійником її правильного функціонування. Цифрова модель машини дозволяє швидко отримувати правильні рішення при діагностуванні поточного стану машини в різних умовах виробництва, а також знайти приховані закономірності в функціонуванні машини та виявити її критичні елементи.

Інтелектуальний пристрій вимірювання та управління бере на себе завдання керування робочим процесом машини та визначення її технологічних, експлуатаційних та виробничих параметрів. З цією метою можуть використовуватися промислові персональні комп'ютери, які налаштовуються переважно як контролери реального часу за допомогою відповідного програмного забезпечення [10, 11].

Технологічні параметри - параметри, пов'язані з реалізацією технологічних режимів, наприклад, температура в робочій зоні, тиск, швидкість переміщення механізмів тощо.

Експлуатаційні параметри – це параметри, пов'язані з швидкозношуваними деталями машини. Відповідно, засобом визначення експлуатаційних параметрів може бути будь-який датчик, здатний визначати зношування відповідного компонента, причому відсоток або ступінь зносу перетворюються на електронний сигнал, який приймається пристроєм вимірювання та управління. Наприклад, оптичний датчик може контролювати зношування критичної частини підшипника, але також і подача мастила або гідравлічний тиск у приводі, що вимірюється, наприклад, п'єзоелектричним датчиком, можуть відноситися до категорії експлуатаційних параметрів.

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.

Встановивши з'єднання між інтелектуальним пристроєм і пристроєм дротового або бездротового зв'язку, програмний додаток, встановлений на інтелектуальному пристрої, може відобразити технологічні, експлуатаційні та виробничі параметри машини.

Завдяки періодичному або безперервному моніторингу параметрів машини можуть виявлятися відхилення технологічних режимів від заданих для здійснення відповідних коректувань.

Завдяки періодичному або безперервному моніторингу експлуатаційних параметрів машини можуть виявлятися зламані або зношені деталі або компоненти машини. Крім того, стає можливим забезпечити такі умови обслуговування, щоб запасна частина прибувала в той самий момент, коли відповідна деталь машини, що експлуатується, виходить з ладу. Таким чином міг би бути мінімізований час простою машини і зменшено розмір складських приміщень.

Завдяки періодичному або безперервному моніторингу виробничих параметрів машини можуть виявлятися необхідні замовлення на витратні матеріали, що залежать від постачання. Під час виробництва виробів датчики 1 призначені для визначення технологічних параметрів машини (рис.2). Датчики 2 призначені для визначення виробничих параметрів, а датчики 3 - для визначення експлуатаційних параметрів.

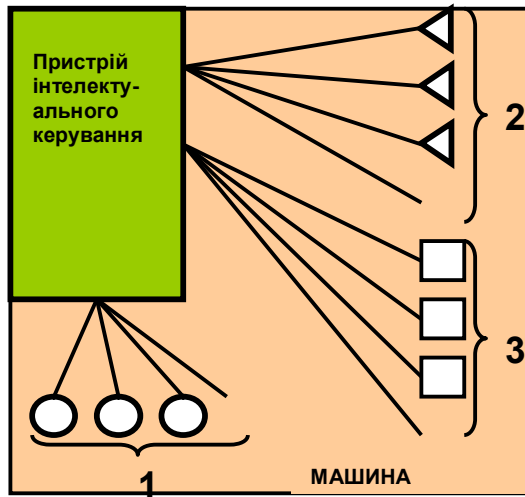


Рис. 2. Елементи системи керування

Визначені технологічні, експлуатаційні та виробничі параметри передаються у пристрій інтелектуального керування, який керує етапами робочого процесу машини. Пристрій інтелектуального керування зберігає певні параметри у своїй кеш пам'яті або внутрішній пам'яті, в якій також можуть зберігатися всі задані або попередньо відібрані параметри. Датчики 1,2,3 можуть бути зв'язаними з пристроєм інтелектуального керування дротовим або бездротовим зв'язками. Машина має також пристрій інтерфейсу користувача і сенсорний екран, який відображає контрольовані елементи та їх значення. Крім того, пристрій інтерфейсу користувача і відображення розрахований на взаємодію з користувачем, тобто являє собою засіб введення даних користувача.

Технологічні машини сучасного покоління орієнтуються на систему ситуаційного керування. При ситуаційному керуванні рішення і створення керуючих впливів ґрунтуються на аналізі варіантів з врахуванням:

- поточного стану технологічного обладнання і умов середовища,
- наявних варіантів поведінки технологічного обладнання (наприклад: підвищити, знизити, або не змінювати продуктивність),
- прогнозу наслідків роботи (наприклад, запас напівфабрикатів закінчиться швидше, ніж надійде нова партія, або будуть створюватися надлишкові його запаси напівфабрикатів або готової продукції).

Системи ситуаційного керування мають пристрій для корекції керуючого сигналу. Ситуаційні системи керування повинні компенсувати зміну зовнішніх умов за допомогою внесення певних змін в керування окремими характеристиками технологічної машини для досягнення оптимальних характеристик системи. Оптимізація в системах, що реалізують оптимальне ситуаційне керування, полягає в тому, щоб найкращим чином в сенсі заданого критерію досягти поставленої мети при реальних умовах і обмеженнях.

Для цього ці системи керування повинні оцінити зовнішні умови для того, щоби ввести необхідні зміни в власні характеристики. Ситуаційна система керування реалізує три функції керування.

1.Ідентифікація системи полягає в отриманні оцінки миттєвої якості процесу чи функціонування машини за допомогою визначення деякого показника якості, як правило, за даними зворотного зв'язку. Складна функція ідентифікації передбачає вираховування показника якості системи на основі даних діагностування і вимірювання параметрів процесу, який може порівнюватися із його заданим значенням.

2.Прийняття рішення полягає в пошуку напрямку зміни програми керування для підвищення якості процесу. Така процедура реалізується за допомогою закладеного в програмі блоку логічних команд, який дозволяє змінити в бажаному напрямі значення одного або декількох керуючих впливів процесу.

3.Настроювання виконує реалізацію прийнятого рішення. Якщо функція прийняття рішення є логічною функцією, то функція настроювання передбачає фізичну або механічну зміну в керуванні машиною.

Функціональна схема системи ситуаційного керування наведена на рис.3. На технологічний процес впливають зовнішні умови Z , V , що змінюються. Система керування

визначає біжучі значення вхідних X і вихідних Y параметрів системи і визначає якість процесу u' . Приймається рішення про зміни в налагодженні u , які є необхідними для підвищення якості функціонування технологічної машини. При зміні стану керованого об'єкту така система буде адаптуватися, міняти дисципліну керування з урахуванням мінливих конкретних умов, тобто пристрій керування буде виробляти додаткові інструкції керування до існуючої програми. В програмі формується мета керування, до якої повинна прагнути система керування.

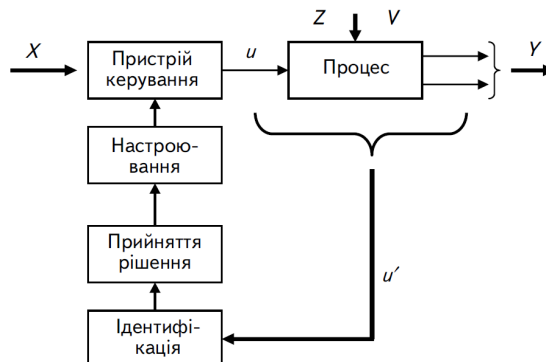


Рис. 3. Ситуаційна система керування

Використання інтелектуальних систем керування дозволяє «прораховувати» віддалені, зовсім не очевидні наслідки прийнятих рішень, а також керувати тенденціями до того, як вони «наберуть чинності». Інтелектуальні технологічні машини мають самоорганізовуваний принцип керування, коли під час роботи змінюються не тільки алгоритм роботи як послідовність дій керування, але і їх структура.

Узагальнюючи міркування багатьох дослідників [9,10, 11], можна стверджувати, що виробнича система стає інтелектуальною, якщо при вирішенні завдань виробництва, вона діє, не маючи точного алгоритму вирішення проблеми, а тільки мету функціонування. Вона адаптується для роботи в зовнішніх умовах, що змінюються з часом, опираючись на відповідну базу знань, які дозволяють створити алгоритм адаптації. На відміну від традиційної програми керування технологічною машиною, коли алгоритм досягнення мети задано спочатку, то в інтелектуальній програмі керування – він будується по ходу досягнення мети з урахуванням ситуації, що складається.

Висновок. У інтелектуальних САК, при зміні зовнішніх умов або характеристик об'єкта керування, відбувається автоматична (заздалегідь не задана програмою) зміна параметрів керуючого пристрою або структури її елементів. Таким чином, забезпечуються стійка робота системи на заданому оптимальному рівні. Такі САК повинні не тільки пристосовуватися до всіх змін зовнішніх умов і характеристик об'єкта, а й функціонувати нормально навіть при наявності несправностей або відмов окремих елементів, створюючи нові ланцюги замість порушених. Інтелектуальні САК можна змусити самовдосконалюватися, «здобувати досвід» шляхом швидкого випробування декількох варіантів, відбору і «запам'ятовування» кращого з них. Розумні машини організують міст між інформаційними технологіями і операційними технологіями, роблячи доступними виробничі дані, які можна використовувати в плануванні виробництва (наприклад, контроль запасу напівфабрикатів і виробів, складання графіків для операторів з технічного обслуговування машин, управління енергопостачанням і заміщення продукту тощо). Використання інтелектуальних САК дозволяє «прораховувати» віддалені, зовсім не очевидні наслідки прийнятих рішень, а також керувати тенденціями змін до того, як вони «наберуть чинності». Однак такі САК, за невеликим винятком, ще не реалізовані для керування технологічним обладнанням.

Список використаних джерел

1. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение. – Москва «Машиностроение», 2007. – 256 с.
2. Тимченко А. А. Основы системного проектирования та системного аналізу складних об'єктів. – Київ: «Либідь», 2003. – 270 с.

3. 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.
4. 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.
5. Groover M.P., Zimmers E.W., CAD/CAM: computer-aided design and manufacturing. New Jersey: Prentice-Hall, 1984. – 528 p.
6. Intelligent Systems for Manufacturing -Multi-agent systems and virtual organizations / L.M. Camarinha-Matos, H. Afsarmanesh, V. Marik - Editores. - Kluwver Academic Publishers, 1998. - IFIP Vol. 130. - P. 137-140.
7. Palchevsky B., Swic A., Krestianpol H., Computer integrated designing of flexible manufacturing systems, Lublin University of Technology, Lublin 2015.-376 p.
8. Palchevskiy B., Swic A., Krestyanpol H. INCREASING EFFICIENCY OF FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEMS BASED ON COMPUTER PRODUCT GROUPING // Advances in Science and Technology Research Journal, Volume 12, Issue 2, June 2018, pages 6–10 - DOI: 10.12913/22998624/92093
9. 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>.
10. 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.
11. Romero David, Johan Stahre, Thorsten Wuest, Ovidiu Noran, Peter Bernus, Åsa Fast-Berglund and Dominic Gorecky, Towards an Operator 4.0 Typology: A HumanCentric Perspective on the Fourth Industrial Revolution Technologies, International Conference on Computers and Industrial Engineering (CIE46) Proceedings, October 2016, Tianjin, China
12. Schwaninger M., Intelligent Organizations. Powerful Models for Systemic Management, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
13. Tolio T. (red.), Design of Flexible Production Systems. Methodologies and Tools, Springer-Verlag, Berling-Heidelberg 2009.

О. В. Верешко¹, Св.Св. Гомон², Св.Ст. Гомон², Т.О. Довбенко²*Луцький національний технічний університет¹**Національний університет водного господарства та природокористування²***ДЕФОРМІВНІ ПОКАЗНИКИ ДЕРЕВИНИ СОСНИ ТА БЕРЕЗИ ПІД ДІЄЮ КИСЛОТНИХ СЕРЕДОВИЩ**

В статті наведено методику експериментальних досліджень деревини берези та сосни осьовим стиском уздовж волокон короткочасним навантаженням за жорсткого режиму випробувань під дією різних кислотних середовищ. Побудовано повні діаграми деформування «напруження-деформації» досліджуваних призм. Експериментальним шляхом встановлено деформівні показники зразків під дією оцтової, соляної та молочної кислот за різного терміну просочення. Проведено порівняння таких показників із призмами випробуваними за стандартної вологості 12%. Встановлено, що кислотне агресивне середовище збільшує деформівність досліджуваних зразків.

Ключові слова: Деревина, деформівність, діаграма «напруження-деформації», кислотне середовище, критичні деформації, залишкові деформації.

О. В. Верешко¹, Св.Св. Гомон², Св.Ст. Гомон², Т.А. Довбенко²**ДЕФОРМАТИВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ И БЕРЕЗЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КИСЛОТНЫХ СРЕД**

В статье приведена методика экспериментальных исследований древесины березы и сосны осевым сжатием вдоль волокон кратковременной нагрузкой при жестком режиме испытаний под действием различных кислотных сред. Построены полные диаграммы деформирования "напряжения-деформации" исследуемых призм. Экспериментальным путем установлены деформируемые показатели образцов под действием уксусной, соляной и молочной кислот при разном сроке пропитки. Проведено сравнение таких показателей с призмами испытываемыми при стандартной влажности 12%. Установлено, что кислотная агрессивная среда увеличивает деформируемость изучаемых образцов.

Ключевые слова: Древесина, деформативность, диаграмма «напряжение-деформации», кислотная среда, критические деформации, остаточные деформации.

O. V. Vereshko, S.S. Homon, S.S. Gomon, T.O. Dovbenko**DEFORMABLE INDICATORS OF PINE AND BIRCH WOOD UNDER THE ACTION OF ACIDIC ENVIRONMENTS**

The paper analyzes the publications on the work of wood in various aggressive environments. The article presents the method of experimental studies of birch and pine wood by axial compression along the fibers by short-term loading under a rigid test regime under the action of different acidic media. The terms of impregnation of the studied wood species with hydrochloric, acetic and lactic acids are given. Complete diagrams of "stress-strain" deformation of the studied prisms are constructed. Deformable parameters of samples under the action of acetic, hydrochloric and lactic acids at different impregnation terms were experimentally established. A comparison of such indicators with prisms tested at a standard humidity of 12%. It was found that the acidic aggressive environment increases the deformability of the studied samples.

It was found that the critical deformations σ_c , ϵ_c , d_c , Δ of the studied wood species for 30 days of impregnation with different types of aggressive media increased compared to samples tested at a standard humidity of 12%, a maximum of 18.5%

It was found that the residual deformations of u_{fin} , Δ_{fin} of the studied wood species during 30 days of impregnation with different types of aggressive media increased compared to the samples tested at a standard humidity of 12%, by a maximum of 24.8%.

Key words: Timber, deformability, stress-strain diagram, acidic environment, critical deformations, residual deformations.

Постановка проблеми. В останні роки значно збільшилось споживання деревини різними секторами світової економіки. Деревина використовується в будівництві, суднобудуванні, машинобудуванні, мостобудуванні, деревообробній, меблевій, хімічній, гірничовидобувній промисловостях та в багатьох інших галузях. В багатьох випадках вона зазнає впливу агресивного середовища (водного, лужного, кислотного). Дуже важливо вивчити такий вплив на механічні властивості листяних та хвойних порід деревини експериментальним шляхом та в подальшому враховувати при проектуванні деталей, матеріалів, виробів, елементів, конструкцій за їх роботи в таких середовищах.

Аналіз останніх досліджень. Дослідженню основних механічних властивостей суцільної деревини, як за стандартної 12%, так і за підвищеної вологості (більше 12%) присвячено велику кількість експериментальних та теоретичних досліджень [1, 2, 3, 4]. Як правило, вони стосувалися міцнісних показників. Такі експериментальні дослідження в основному проводилися на застарілих

випробувальних машинах, що не дозволяло встановити істинну роботу деревини від початку завантаження до повного руйнування матеріалу.

В останні роки з'явилися нові випробувальні машини, що дають змогу будувати повні діаграми деформування матеріалу за стиску, розтягу, згину за різних видів навантаження (за приростом переміщень). За таких умов були випробувані зразки з деревини та отримані дійсні діаграми роботи матеріалу на стиск уздовж волокон за стандартної вологості [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]. Нами було досліджено роботу призм листяних та хвойних порід за різної вологості, а також встановлено основні механічні властивості [12, 13, 14, 15].

В літературі знаходимо досить обмежену кількість досліджень впливу інших агресивних середовищ, зокрема, кислотного та лужного, на поведінку деревини. Тільки в роботах Гринкруг Н.В. [16], Ванина С.И. [17], Сашина М.А. [18] знаходимо такі дослідження, і то лише міцнісних показників.

Тому залишається актуальними дослідження впливу кислотного середовища на деформівні характеристики листяних та хвойних порід деревини за жорсткого режиму випробувань.

Постановка завдання. Мета даної статті є експериментальні дослідження впливу кислотного середовища (соляної, оцтової та молочної кислоти) на основні деформівні властивості суцільної деревини берези та сосни осьовим стиском вздовж волокон за жорсткого режиму випробувань.

Методика експериментальних досліджень. Для проведення експериментальних досліджень було виготовлено зразки у вигляді призм перерізом 30х30х120 мм 1 сорту суцільної деревини різних порід [19]. 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 [20,21].

Після зрізу вибраних дерев стовбури транспортувались до столярних цехів та розрізались на бруси, з яких виготовлялись зразки для досліджень.

Деревина, яка піддавалась випробуванню 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: соляною (15%), молочною (40%), оцтовою (9%). Деревину просочували природним шляхом без додаткової стимуляції відповідно на протязі 7, 14 та 30 днів.

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 призм.

Об'єм експериментальних досліджень та маркування зразків наведено в [19].

Загальна кількість випробуваних призм склала 78 шт.

Експериментальні дослідження проводилися на сервогідролінійній випробувальній машині СТМ-100 з автоматизованою системою керування і запису даних [19, 22] за жорсткого режиму прикладення навантажень.

Швидкість деформування призм складало 1,5 мм/хв. Експериментальні дослідження проводилися одноразовим короткочасним навантаженням на стиск уздовж волокон за температури 18-20⁰С. Випробування проводились з контролем приросту переміщення плити випробувальної машини. До випробувань допускались призми перерізом 30х30х120 мм ± 1 мм та без видимих дефектів. Якщо виготовлені зразки не відповідали даним параметрам за розмірами чи структурою деревини, то вони вибраковувались.

Результати досліджень та їх обговорення. На основі проведеного експерименту були побудовані дійсні діаграми деформування «напруження σ – поздовжня деформація ϵ_z » деревини берези та сосни під дією соляної, оцтової та молочної кислот (рис.1) різного терміну просочення від початку навантаження і до повного руйнування матеріалу.

На даних діаграмах завжди спостерігаємо дві ділянки: висхідну та спадну. Це свідчить про те, що деревина під дією агресивних середовищ працює не тільки до точки максимального напруження, а і має певну залишкову (закритичну) міцність після проходження цієї точки.

За результатами проведеного експерименту було встановлено критичні (табл.1) та залишкові (табл.2) деформації деревини берези та сосни під впливом агресивного середовища (соляної, оцтової та молочної кислот).

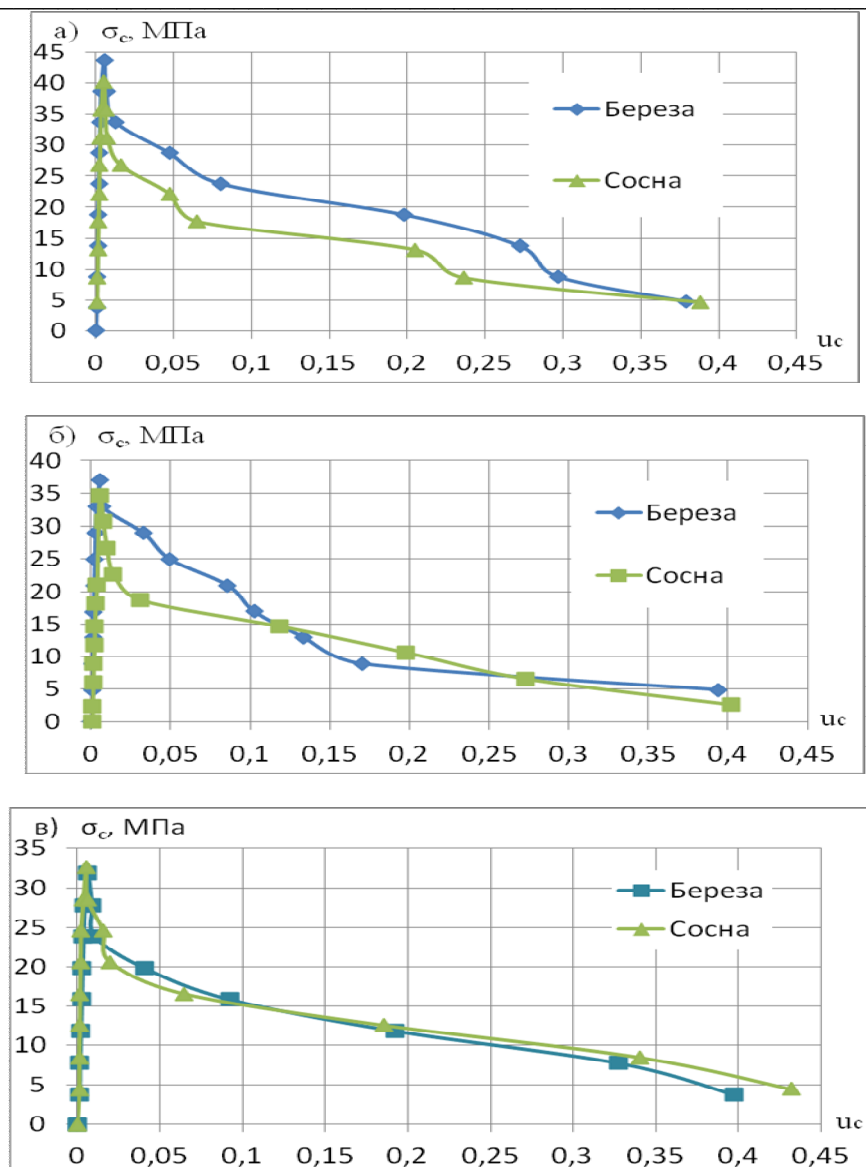


Рис. 1. Дійсні діаграми деформування «напруження σ_c – деформації u_c » деревини берези та сосни під дією молочної кислоти (40%) з різним терміном просочення: а) 7 днів; б) 14 днів; в) 30 днів

Табл. 1

Критичні деформації деревини $u_{c,0,d,agr}$ під впливом кислотного середовища

№ з/п	Порода деревини	Критичні деформації $u_{c,0,d,agr}$ під впливом кислотного середовища			
		Просочення, дні			
		Непросочена	7	14	30
Соляна кислота HCl (15%)					
1	Сосна	0,00491	0,0054	0,00561	0,00574
2	Береза	0,00525	0,005511	0,00569	0,00581
Оцтова кислота CH ₃ COOH (9%)					
1	Сосна	0,00491	0,00559	0,00578	0,00582
2	Береза	0,00525	0,005676	0,00589	0,00597
Молочна кислота C ₃ H ₆ O ₃ (40%)					
1	Сосна	0,00491	0,00493	0,00531	0,00558
2	Береза	0,00525	0,00572	0,00584	0,00611

Табл. 2

Залишкові деформації деревини $u_{c,fin,agr}$ під впливом кислотного середовища

№ з/п	Порода деревини	Залишкові деформації $u_{c,fin,agr}$			
		Просочення, дні			
		Непросочена	7	14	30
Соляна кислота HCl (15%)					
1	Сосна	0,3526	0,387	0,402	0,4325
2	Береза	0,3349	0,39	0,391	0,406
Оцтова кислота CH ₃ COOH (9%)					
1	Сосна	0,3526	0,368	0,37	0,386
2	Береза	0,3349	0,404	0,414	0,418
Молочна кислота C ₃ H6O ₃ (40%)					
1	Сосна	0,3526	0,388	0,402	0,432
2	Береза	0,3349	0,379	0,0394	0,397

Аналізуючи табл.1 та табл.2 приходимо до висновку, що вплив кислотного середовища значно збільшує деформівні показники деревини берези та сосни. Зокрема, внаслідок впливу соляної кислоти (15%) за 30 днів просочення критичні деформації деревини берези збільшуються на 10,7 % в порівнянні з критичними деформаціями, які визначені за стандартної вологості, а сосни – на 16,9%; оцтової (9%) – берези на 13,7%, а сосни – на 18,5% ; молочної (40%) – берези на 16,4%, а сосни - на 13,6 %.

Залишкові деформації також збільшуються (табл.2): внаслідок впливу соляної кислоти – берези на 22,7%, а сосни на 21,2%; оцтової – берези на 9,5%, а сосни – на 24,8%; молочної – берези на 18,5%, а сосни на 22,5%.

Висновки. 1. Розроблено методику експериментальних досліджень суцільної деревини берези та сосни під впливом агресивного середовища на стиск уздовж волокон за короткочасного навантаження за жорсткого режиму випробувань.

2. Вперше проведено експериментальні дослідження суцільної деревини берези та сосни під впливом різних кислотних середовищ на стиск уздовж волокон за короткочасного навантаження за жорсткого режиму випробувань.

3. Отримано нові експериментальні дані про зміну деформівності суцільної деревини сосни та берези під впливом кислотних середовищ (соляної, оцтової та молочної кислот).

4. Встановлено, що деформівні показники суцільної деревини сосни та берези збільшуються в залежності від терміну просочення різними агресивними середовищами.

5. Виявлено, що критичні деформації $u_{c,0,d,agr}$ досліджуваних порід деревини за 30 днів просочення різними видами агресивного середовища збільшились в порівнянні зі зразками, які випробувані за стандартної вологості 12%:

- від соляної кислоти (15%) – для деревини берези на 10,7%, сосни – 16,9% ;
- від оцтової кислоти (9%) – для деревини берези на 13,7%, сосни – 18,5%;
- від молочної кислоти (40%) – для деревини берези на 16,4%, сосни – 13,6% .

6. Встановлено, що залишкові деформації $u_{fin,agr}$ досліджуваних порід деревини за 30 днів просочення різними видами агресивного середовища збільшились порівнянні зі зразками, які випробувані за стандартної вологості 12%:

- від соляної кислоти (15%) – для деревини берези на 21,2%, сосни – 22,7% ;
- від оцтової кислоти (9%) – для деревини берези на 24,8%, сосни – 9,5%;
- від молочної кислоти (40%) – для деревини берези на 18,5%, сосни – 22,5% .

Список використаних джерел:

1. Madsen B. Recommended moisture adjustment factor for lumber stresses. Can. J. Civil Engineering. 1982. Vol. 9. №4. P. 602–610.
2. 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.
3. Бойко М.Д. Влияние температурно-влажностного состояния древесины на ее прочность. М.: Гос. изд-во литературы по строительству и архитектуре, 1952. 96 с.
4. Боровиков А.М. Влияние температуры и влажности на упругость, вязкость и пластичность древесины: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.05. Воронеж, 1970. 310 с.

5. Тутурин С.В. Механическая прочность древесины: дис. ... докт. техн. наук: 01.02.04. – Москва, 2005. 318с.
6. Вареник К. А. Расчет центрально-сжатых деревянных элементов с учетом ползучести: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Новгород Великий: НГУ им. Ярослава Мудрого, 2015. 167 с.
7. Da Silva A, Kyriakides S. Compressive response and failure of balsa wood. *International Journal of Solids and Structures*. Volume 44. Issues 25–26. P. 8685–8717.
8. Zhou A., Bian Y., Shen Y., Huang D., Zhou M. Inelastic bending performances of laminated bamboo beams: experimental investigation and analytical study. *Bio Resources*, 2018. 13(1). P. 131–146.
9. Гомон С.С., Гомон П.С. Побудова дійсних діаграм механічного стану деревини « σ - ϵ » суцільного перерізу ялини та берези за жорсткого режиму випробувань. Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. 36. наук. праць. Рівне: НУВГП, 2020. Вип 38. С. 321–330.
10. Гомон С., Гомон П., Караван В. Експериментальні дослідження хвойних та листяних порід деревини одноразовим короткочасним навантаженням на стиск уздовж волокон за жорсткого режиму випробувань. Вісник Львівського національного аграрного університету. Архітектура та сільськогосподарське будівництво. Львів: ЛНАУ, 2020. №21. С. 34–40.
11. Yasnii P., Homon S., Gomon P. On approximation of mechanical condition diagrams of coniferous and deciduous wood species on compression along the fibers. *Scientific Journal of Ternopil National Technical University*. Ternopil: TNTU, 2020. Vol 97. No 1. P. 57–64.
12. Ясний 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.
13. 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/>.
14. Ясний 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.
15. Ясний П.В., Гомон Св.Св. Динаміка зміни критичних деформацій деревини з різним показником вологості. Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Рівне: НУВГП, 2021. Вип 40. С. 234–241.
16. Гринкруг Н.В. Моделирование и расчет элементов деревянных конструкций при химических агрессивных воздействиях: дисс. канд. техн. наук, 05.23.01. Владивосток, 2004. 202 с.
17. Ванин С.И., Прикот Н.Г. Влияние кислот и щелочей на физико-механические свойства древесины. *Труды ЛТА*. Ленинград, 1947. Вып. 61. С. 55–90.
18. 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.
19. 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. Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Рівне: НУВГП, 2021. Вип. 39. С. 57–62.
20. ДСТУ 3129:2015. Деревина. Методи відбору зразків і загальні вимоги до фізико-механічних випробувань невеликих бездефектних зразків. Київ: Мінрегіон України, 2016. 9 с.
21. ДСТУ EN 380-2008. Лісоматеріали конструкційні. Загальні настанови щодо методів випробування на статичне навантаження. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 8с.
22. Homon Sv.Sv., Savchuk V.O., Melnyk Yu.A., Vereshko O.V. Modern testing machines for investigation of wood and timber-based composite materials. *Modern technologies and calculation methods in construction*. Lutsk, 2020. Vol.14. С. 73–80.

УДК 539.3

DOI 10.36910/775.24153966.2021.72.28

Б.С.Окрепкий¹, І.Я.Новосад¹, Т.Б.Пиндус², Б.Г.Шелестовський²*Західноукраїнський національний університет¹**Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя²***КОНТАКТНА ВЗАЄМОДІЯ ГАРЯЧОГО ЦИЛІНДРИЧНОГО ШТАМПА З ПРУЖНИМ ШАРОМ ПРИ НЕІДЕАЛЬНОМУ ТЕПЛОВОМУ КОНТАКТІ**

В статті розглянуто розв'язок задачі про контактну взаємодію циліндричного штампа з пружним шаром з врахуванням температури на вільному торці штампа. Тепловий контакт між штампом і шаром неідеальний і здійснюється через тонкий проміжковий шар. Побудовано метод знаходження температури у штампі та шарі та визначення контактних напружень внаслідок дії сили і температурного поля. Температура і нормальні напруження отримано у вигляді ряду по функціях Чебишева, коефіцієнти якого визначаються як розв'язок системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Побудовано графіки температури та контактних напружень у шарі.

Ключові слова: штамп, шар, температура, неідеальний тепловий контакт, коефіцієнти теплопровідності, контактні напруження.

Б.С.Окрепкий¹, И.Я.Новосад¹, Т.Б.Пиндус², Б.Г.Шелестовский²**КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГОРЯЧЕГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ШТАМПА С ПРУЖНЫМ СЛОЕМ ПРИ НЕИДЕАЛЬНОМ ТЕПЛОВОМ КОНТАКТЕ**

В статье рассмотрено решение задачи о контактом взаимодействии цилиндрического штампа с упругим слоем с учетом температуры на свободном торце штампа. Тепловой контакт между штампом и слоем неидеален и осуществляется через тонкий промежуточный слой. Построен метод нахождения температуры в штампе и слое и определение контактных напряжений в результате действия силы и температурного поля. Температура и нормальные напряжения получены в виде ряда по функциям Чебишева, коэффициенты которого определяются как решение системы линейных алгебраических уравнений. Построены графики температуры и контактных напряжений в слое.

Ключевые слова: штамп, слой, температура, неидеальный тепловой контакт, коэффициенты теплопроводности, контактные напряжения.

B. Okrepkyi¹, I. Novosad¹, T. Pyndus², B. Shelestovs'kyi²**CONTACT INTERACTION OF A HOT CYLINDRICAL PUNCH WITH A SPRING BALL WITH AN INCIDENTAL THERMAL CONTACT**

The article considers the solution of the problem of contact interaction of a cylindrical punch with an elastic layer taking into account the temperature at the free end of the punch. Thermal contact between the punch and the layer is not ideal and is carried out through a thin intermediate layer. The method of finding the temperature in the punch and layer and determining the contact stresses due to force and temperature field is constructed. Temperature and normal stresses are obtained as a series of Chebyshev functions, the coefficients of which are defined as the solution of a system of linear algebraic equations. Graphs of temperature and contact stresses in the layer are constructed.

Key words: punch, layer, temperature, imperfect thermal contact, thermal conductivity coefficients, contact stresses.

Постановка проблеми. Визначення напружено-деформівного стану при контактній взаємодії елементів конструкцій та деталей механізмів і машин необхідне для розрахунку їх міцності і несучої здатності. Актуальним є дослідження впливу температурних полів на розподіл контактних напружень при взаємодії тіл.

Аналіз останніх досліджень. У працях [1-6] досліджено вплив температурних факторів на характер контактних напружень. Зокрема в статтях [2-3] побудовано розв'язки задач про контактну взаємодію гарячого пружного штампа з ізотропним півпростором. Визначення температурних полів у півпросторі та шарі досліджується у працях [4,5]. Тиск гарячого штамп на півпростір із урахуванням неідеального теплового контакту через тонкий проміжний шар досліджено в [6]. Задача про тиск гарячого штамп на пружний шар ще не розглядалась.

Мета роботи. Розвинути метод знаходження контактних напружень і деформацій при взаємодії нагрітого кругового циліндра з плоскою основою із шаром при неідеальному тепловому контакті через тонкий проміжковий шар та знайти формули для визначення температури і нормальних контактних напружень. Дослідити вплив коефіцієнтів теплопровідності проміжкового шару на контактні напруження в шарі.

Постановка задачі. Розглянемо пружний круговий циліндр скінченної довжини L і радіусом R з плоскою основою, який втискується силою P в пружний шар скінченної товщини H . Матеріали тіл вважаємо ізотропними. Усі точки торця циліндра під дією зовнішнього

навантаження зміщуються на однакове значення ε . Зовні штамп на поверхні шару зовнішні зусилля не діють. В шарі під штампом дотичні напруження $\tau_{rz} = 0$. На верхньому торці циліндра підтримується стала температура T_0 . Тепловий контакт між тілами здійснюється через тонкий проміжковий шар [7,8]. Бічні поверхні циліндра теплоізовані. Теплообмін із зовнішнім середовищем на поверхнях вільного шару відбувається згідно закону Ньютона. Необхідно розробити аналітико-числовий метод визначення температури і контактних напружень.

Скористаємось циліндричною системою координат r, θ, z , центр якої знаходиться на границі шару, а вісь Oz напрямлена вздовж осі циліндра. Температура, напруження і деформації, які позначені верхнім індексом "1", відносяться до шару, без індексів – до циліндра.

Граничні умови задачі мають вигляд:

$$T = T_c, \quad (z = L, \quad 0 \leq r \leq R). \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad (r = R, \quad 0 \leq z \leq L). \quad (2)$$

$$\lambda_0^* \Delta(T^1 + T) + 2 \left(\lambda_z^1 \frac{\partial T^1}{\partial z} - \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0, \quad (z = 0; \quad 0 \leq r < R). \quad (3)$$

$$\lambda_0^* \Delta(T^1 - T) - 6 \left(\lambda_z^1 \frac{\partial T^1}{\partial z} + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) - 12h_0(T^1 - T) = 0, \quad (4)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial(T^1 + T)}{\partial r} + \frac{\alpha_0^*}{\lambda_0^*} \left(\frac{T^1 + T}{2} - T_c \right) = 0, \quad (z = 0; \quad r = R).$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial(T^1 - T)}{\partial r} + \frac{\alpha_0^*}{\lambda_0^*} \left(\frac{T^1 - T}{2} - T_c^* \right) = 0, \quad (z = 0; \quad r = R).$$

$$\frac{\partial T^1}{\partial z} + H_2^1 T^1 = 0, \quad (R \leq r < \infty; z = 0). \quad (5)$$

$$\frac{\partial T^1}{\partial z} - H_1^1 T^1 = 0, \quad (0 \leq r \leq \infty; z = -H). \quad (6)$$

$$u_z^1 = -\varepsilon, \quad \tau_{rz}^{(1)} = 0, \quad (z = 0; \quad 0 \leq r \leq R). \quad (7)$$

$$\sigma_z^1 = 0, \quad \tau_{rz}^{(1)} = 0, \quad (z = 0; \quad R \leq r < \infty). \quad (8)$$

$$u_z^1 =, \quad \tau_{rz}^{(1)} = 0, \quad (z = -H; \quad 0 \leq r < \infty). \quad (9)$$

тут λ_z, λ_z^1 – коефіцієнти теплопровідності;

H_1^1, H_2^1 – коефіцієнти теплообміну;

$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}$ – оператор Лапласа;

$T_c = \frac{1}{2\delta} \int_{-\delta}^{\delta} T_c^0 d\gamma, \quad T_c^* = \frac{3}{2\delta^2} \int_{-\delta}^{\delta} \gamma T_c^0 d\gamma, \quad 2\delta$ товщина проміжкового шару;

$\lambda_0^* = 2\lambda_0 \delta, \quad h_0 = \frac{\lambda_0}{2\delta}, \quad \alpha_0^* = 2\alpha_0 \delta, \quad \lambda_0^*, \alpha_0^*$ – коефіцієнти теплопровідності й теплообміну проміжкового шару; h_0 – контактна провідність; T_c^0 – температура зовнішнього середовища; ε – величина вертикального переміщення штамп.

Розв'язок крайових задач для рівнянь теплопровідності і термопружності. Відомо [9], що термопружний потенціал та температура задовольняють рівняння:

$$\nabla^2 \varphi = \alpha_T \frac{1+\sigma}{1-\sigma} T, \quad \nabla^2 T = 0, \quad (10)$$

а температурні напруження і переміщення знаходять за формулами:

$$u_z^{(r)} = \frac{\partial \varphi}{\partial z}, \quad \sigma_z^{(r)} = -2\mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} \right), \quad \tau_{rz}^{(r)} = 2\mu \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r \partial z}, \quad (11)$$

де α_T – коефіцієнт лінійного температурного розширення; μ, σ – модуль зсуву і коефіцієнт Пуассона.

Введемо трансформанту Ганкеля функції $T^1(r, z)$ нульового порядку

$$\overline{T^1(\xi, z)} = \int_0^\infty r T^1(r, z) J_0(\xi, z) dr. \quad (12)$$

Застосувавши до другого рівняння (10) інтегральне перетворення Ганкеля і використовуючи його властивості, визначимо $T^1(r, z)$ через довільні функції $\varphi_1(\eta)$ і $\varphi_2(\eta)$:

$$T^1(\rho, \zeta) = \int_0^\infty [\varphi_1(\eta) e^{\lambda \zeta} + \varphi_2(\eta) e^{-\lambda \zeta}] J_0(\eta \rho) d\eta, \quad (13)$$

де $J_0(\eta \rho)$ – функція Бесселя дійсного аргументу першого роду; $\rho = \frac{r}{R}$; $\zeta = \frac{z}{R}$; $\eta = \xi R$.

Застосовуючи метод відокремлення змінних, температуру в шарі подамо у вигляді:

$$T(r, z) = A_0 z + B_0 + D_0(r^2 - 2z^2) + \sum_{k=1}^\infty J_0(\beta_k r) (A_k \operatorname{sh} \beta_k z + B_k \operatorname{ch} \beta_k z) + \sum_{k=1}^\infty I_0(\gamma_k r) (C_k \operatorname{sn} \gamma_k z + D_k \operatorname{cos} \gamma_k z) \quad (14)$$

де A_k, B_k, C_k, D_k , ($k = 0, \infty$) – довільні постійні; $I_0(\gamma_k r)$ – функція Бесселя I-го роду уявного аргументу; β_k, γ_k – власні значення, які визначаються із граничних умов.

Термопружний потенціал φ визначається із першого рівняння (10) у вигляді:

$$\varphi(\rho, \zeta) = \frac{1+\sigma}{2(1-\sigma)} \alpha_T \zeta \int_0^\infty \frac{1}{\eta} [\varphi_1(\eta) e^{\lambda \zeta} + \varphi_2(\eta) e^{-\lambda \zeta}] J_0(\eta \rho) d\eta \quad (15)$$

Компоненти температурних напружень і переміщень обчислюються за формулами (11). Отримані температурні напруження і переміщення дають можливість задовольнити всі граничні умови задачі. Для цього до температурних напружень і переміщень (11) додамо компоненти напружень і переміщень від бігармонічного потенціалу [1].

Таким чином отримаємо співвідношення для визначення переміщень і напружень в ізотропному шарі:

$$\begin{aligned} u_z^{(1)} = & - \int \frac{1}{\eta} \left\{ \left[\frac{1}{b_1^1 R} \eta F_1(\eta) + \left(2 + \frac{1}{b_1^1 R} \eta \zeta \right) F_2(\eta) \right] e^{-\eta \zeta} + \right. \\ & \left. + \left[\frac{1}{b_1^1 R} \eta F_3(\eta) + \left(-2 + \frac{1}{b_1^1 R} \eta \zeta \right) F_4(\eta) \right] \right\} J_0(\eta \rho) d\eta + \\ & + \frac{1+\sigma^1}{2(1-\sigma^1)} \alpha_T \zeta \int_0^\infty \frac{1}{\eta} [\varphi_1(\eta) (1 + \eta \zeta) e^{\eta \zeta} - \varphi_2(\eta) (1 - \eta \zeta) e^{-\eta \zeta}] J_0(\eta \zeta) d\eta \\ \sigma_z^{(1)} = & \frac{2b_3^1}{R} \int_0^\infty \left\{ \left[\frac{\eta}{R} F_1(\eta) + (b_1^1 + \eta \zeta) F_2(\eta) \right] e^{-\eta \zeta} + \left[-\frac{\eta}{R} F_3(\eta) + (b_1^1 - \eta \zeta) F_4(\eta) \right] e^{\eta \zeta} \right\} \times \\ & \times J_0(\eta \rho) d\eta + \mu^1 \frac{1+\sigma^1}{1-\sigma^1} \alpha_T \zeta \int_0^\infty \eta [\varphi_1(\eta) e^{\eta \zeta} - \varphi_2(\eta) e^{-\eta \zeta}] J_0(\eta \rho) d\eta \\ \tau_{rz}^{(1)} = & 2b_3^1 \int_0^\infty \left\{ [F_1(\eta) + (-b_2^1 + \eta \zeta) F_2(\eta)] e^{-\eta \zeta} + \left[\frac{\eta}{R} F_3(\eta) + (b_2^1 + \eta \zeta) F_4(\eta) \right] e^{\eta \zeta} \right\} \times \\ & \times J_1(\eta \rho) d\eta - \mu^1 \frac{1+\sigma^1}{1-\sigma^1} \alpha_T \zeta \int_0^\infty [\varphi_1(\eta) (1 + \eta \zeta) e^{\eta \zeta} - \varphi_2(\eta) (1 - \eta \zeta) e^{-\eta \zeta}] J_1(\eta \rho) d\eta \end{aligned} \quad (16)$$

тут $b_1^1 = \frac{\mu^1}{\lambda^1 + \mu^1}$, $b_2^1 = \frac{\lambda^1}{\lambda^1 + \mu^1}$, $b_3^1 = \lambda^1 + \mu^1$; λ^1, μ^1 – коефіцієнти Ламе; $u_z^1, \sigma_z^1, \tau_{rz}^1$ – компоненти вектора переміщень і тензора напружень у пружному шарі; $F_i(\eta)$ ($i = \overline{1,4}$) – довільні функції.

Розв'язок задачі теплопровідності приведений у праці [5].

Температурне поле в зоні контакту двох тіл знаходиться за формулами:

а) для циліндричної області:

$$T(\rho, 0) = T_0 - A_0 R l - \sum_{k=1}^{\infty} J_0(\mu_{k\rho}) th \mu_k l \cdot A_k \quad (\rho < 1) \quad (17)$$

б) для шару:

$$T^1(\rho, 0) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k \beta_k(\rho) \quad (\rho < 1)$$

де $a_k = X_k T_0$ ($k = \overline{0, N}$); Y_0, Y_1 знаходяться із системи лінійних алгебраїчних рівнянь [5].

$$A_0 R = \left(l + \frac{1}{3h_0^1} \right)^{-1} T_0 \left[1 - 2 \sum_{k=0}^{\infty} \varepsilon_{0,k}^{(1)} X_k - \frac{2}{b_1} I_1(b_1) Y_0 \right];$$

$$A_n R = - \frac{2T_0}{J_0^2(\mu_n)} \frac{1}{\Delta^2(\mu_1, b_1)} \left[\sum_{k=0}^N \varepsilon_{n,k}^{(1)} X_k + \frac{b_1 J_0(\mu_n) I_1(b_1)}{\mu_n^2 + b_1^2} Y_0 \right];$$

$$\sum_{k=0}^N A_{n,k}^{(1)} X_k + B_{n,0}^{(1)} Y_0 + B_{n,1}^{(1)} Y_1 = D_n^{(1)} \quad (n = \overline{0, N}) \quad (19)$$

$$\sum_{k=0}^N A_{n,k}^{(2)} X_k + B_{n,0}^{(2)} Y_0 = D_n^{(2)} \quad (n = \overline{0, N})$$

$A_{n,k}^{(1)}, A_{n,k}^{(2)}, B_{n,0}^{(1)}, B_{n,1}^{(1)}, B_{n,0}^{(2)}, D_n^{(1)}, D_n^{(2)}$ – відомі величини.

Задовольнивши граничну умову (9), для напруження $\sigma_z^{(1)}(\rho, 0)$ і переміщення $u_z^{(1)}(\rho, 0)$ на поверхні шару маємо формули:

$$u_z^{(1)}(\rho, 0) = \frac{1 + b_1^1}{b_1^1} R \int [1 - G(2\eta h)] \Phi(\eta) J_0(\eta \rho) d\eta - \alpha_{T^1} R \delta \int_0^{\infty} \frac{1}{\eta} \frac{Q_2(\eta) \varphi(\eta)}{Q(\eta) Q_1(\eta)} J_0(\eta \rho) d\eta, \quad (20)$$

$$\sigma_z^{(1)}(\rho, 0) = 2b_3^1 \int_0^{\infty} \eta \Phi(\eta) J_0(\eta \rho) d\eta,$$

$$\eta \Phi(\eta) = \frac{\eta}{R} F_1(\eta) + b_1^1 F_2(\eta) - \frac{\eta}{R} F_3(\eta) + b_1^1 F_4(\eta)$$

$$Q_1(\eta) = sh 2\eta h + 2\eta h, \quad Q_2(\eta) = -(\eta sh \eta h ch \eta h + K_1^1 sh^2 \eta h + \eta^2 h) sh \eta h,$$

$$G(2\eta h) = \frac{1 + 2\eta h - e^{-2\eta h}}{Q_1(\eta)}, \quad \delta = \frac{1 + \sigma^1}{1 - \sigma^1} (1 + b_1^1)$$

$$\text{де } h = \frac{H}{R}; \quad K_1^1 = H_1^1 R; \quad K_2^1 = H_2^1 R; \quad h_0^1 = h_0 \frac{R}{\lambda_z}; \quad l_z = \frac{\lambda_z R}{\lambda_0^1}; \quad l_z^1 = \frac{\lambda_z^1}{\lambda_0^1};$$

$$\varphi_1(\eta) = \frac{1}{2} (\eta + K_1^1) e^{\eta h} \frac{\varphi(\eta)}{Q(\eta)}, \quad \varphi_2(\eta) = \frac{1}{2} (\eta - K_1^1) e^{-\eta h} \frac{\varphi(\eta)}{Q(\eta)};$$

$$Q(\eta) = (\eta^2 + K_1^1 K_2^1) sh \eta h + \eta (K_1^1 + K_2^1) ch \eta h.$$

Вимагаючи виконання граничних умов (7), (8) прийдемо до системи інтегральних рівнянь відносно функцій $\Phi(\eta)$ і $\varphi_1(\eta)$:

$$\int_0^{\infty} \Phi(\eta) J_0(\eta \rho) d\eta = -\frac{\varepsilon}{R} + \int_0^{\infty} G(2\eta h \Phi(\eta) J_0(\eta \rho)) d\eta - \alpha_{T^1} \delta \int_0^{\infty} \frac{1}{\eta} \frac{Q_2(\eta)}{Q(\eta) Q_1(\eta)} J_0(\eta \rho) d\eta$$

$$(0 \leq \rho < 1) \quad (21)$$

$$\int_0^{\infty} \eta \Phi(\eta) J_0(\eta \rho) d\eta = 0$$

$$(\rho > 1) \quad (22)$$

Якщо ввести функцію $f(t)$ співвідношенням:

$$\Phi(\eta) = \frac{b_1^1}{1+b_1^1} \int_0^1 f(t) \cos \eta t dt, \quad (23)$$

то рівняння (22) задовольняється тотожно, а рівняння (21) зводиться до інтегрального рівняння Абеля.

$$\int_0^{\rho} \frac{f(x) dx}{\sqrt{\rho^2 - x^2}} = g(\rho), \quad (24)$$

розв'язок якого згідно [10] визначається формулою

$$f(t) = \frac{2}{\pi} \frac{d}{dt} \int_0^1 \frac{\rho g(\rho)}{\sqrt{t^2 - \rho^2}} d\rho, \quad (25)$$

де

$$g(\rho) = -\frac{\varepsilon}{R} + \int_0^{\infty} G(2\eta h) \Phi(\eta) J_0(\eta \rho) d\eta + \alpha_{T^1} \delta \int_0^{\infty} \frac{1}{\eta} \frac{Q_2(\eta) \varphi(\eta)}{Q_1(\eta) Q(\eta)} J_0(\eta \rho) d\eta. \quad (26)$$

Підставивши вираз (26) у формулу (25), враховуючи при цьому (23), одержимо функцію $f(t)$:

$$f(t) = -\frac{2\varepsilon}{\pi R} + \frac{2}{\pi} \int_0^1 f(x) dx \int_0^{\infty} G(2\eta h) \cos \eta x \cos \eta t d\eta + \frac{2}{\pi} \delta \alpha_{T^1} \int_0^{\infty} \frac{1}{\eta} \frac{Q_2(\eta) \varphi(\eta)}{Q_1(\eta) Q(\eta)} \cos \eta t d\eta. \quad (27)$$

Використовуючи умову рівноваги штампу $P = -2\pi R^2 \int_0^1 \rho \sigma_z^{(1)}(\rho) d\rho$ і формули (20), (23), рівняння (27) приводиться до вигляду:

$$f(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^1 f(x) dx \int_0^{\infty} G(2\eta h) \cos \eta x \left(\cos \eta t - \frac{\sin \eta}{\eta} \right) d\eta + \frac{2}{\pi} \delta \alpha_{T^1} \times$$

$$\times \int_0^{\infty} \frac{1}{\eta} \frac{Q_2(\eta) \varphi(\eta)}{Q_1(\eta) Q(\eta)} \left(\cos \eta t - \frac{\sin \eta}{\eta} \right) d\eta = -\frac{P}{2\pi R^2 x_0}, \quad (28)$$

$$x_0 = \frac{2b_1^1 b_2^1}{1+b_1^1}$$

Представимо функцію $f(t)$ співвідношенням:

$$f(t) = -\frac{P}{2\pi R x_0} \sum_{k=0}^{N_1} (2k+1) P_k(1-2t^2) y_k^{(1)} + \alpha_{T^1} T_0 \sum_{k=0}^{N_1} (2k+1) P_k(1-2t^2) y_k^{(2)}, \quad (29)$$

де

$y_k^{(1)} (k = \overline{0, N_1})$ – невідомі коефіцієнти;

$P_k(1-2t^2)$ – функція Лежандра.

Підставивши функцію $f(t)$ з (29) і $\varphi(\eta) = X_0 J_1(\eta) + \eta^2 J_1(\eta) \sum_{k=1}^N \frac{J_0(\mu_k)}{\eta^2 - \mu_k^2} X_k$ в рівняння (28), з врахуванням умов ортогональності функцій Лежандра $P_k(1-2t^2)$ на інтервал (0,1),

одержимо систему лінійних алгебраїчних рівнянь для знаходження постійних $y_k^{(1)}, y_k^{(2)}$ ($k = \overline{0, N_1}$):

$$\begin{aligned} \sum_{\kappa=0}^{N_1} A_{n,\kappa} y_{\kappa}^{(1)} &= P_n \quad (n = \overline{0, N_1}) \\ \sum_{\kappa=0}^{N_1} A_{n,\kappa} y_{\kappa}^{(2)} &= t_n \quad (n = \overline{0, N_1}) \end{aligned} \quad (30)$$

де

$$\begin{aligned} P_0 &= 1; \quad P_n = 0 \quad (n = \overline{0, N_1}); \\ t_n &= \frac{4}{\pi} \delta \sum_{\kappa=0}^N X_{\kappa} t_{n,\kappa} \quad (n = \overline{0, N_1}); \\ A_{0,0} &= 1 - \frac{4}{\pi} \int_0^{\infty} G(2\eta h) \tau_0(\eta) \frac{\sin \eta}{\eta} d\eta, \\ A_{0,\kappa} &= 2(-1)^{\kappa+1} \left(2\kappa + 1 \int_0^{\infty} G(2\eta h) \tau_0(\eta) J_{\kappa+\frac{1}{2}}\left(\frac{\eta}{2}\right) J_{-\kappa-\frac{1}{2}}\left(\frac{\eta}{2}\right) d\eta \right), \\ A_{n,0} &= -\frac{4}{\pi} \int_0^{\infty} G(2\eta h) \tau_n(\eta) \frac{\sin \eta}{\eta} d\eta, \\ A_{n,\kappa} &= \begin{cases} A_{n,\kappa}^{(1)}, & \kappa \neq n \\ 1 + A_{n,\kappa}^{(1)}, & \kappa = n \end{cases}, \\ A_{n,\kappa}^{(1)} &= 2(-1)^{\kappa+1} \int_0^{\infty} G(2\eta h) \tau_n(\eta) J_{\kappa+\frac{1}{2}}\left(\frac{\eta}{2}\right) J_{-\kappa-\frac{1}{2}}\left(\frac{\eta}{2}\right) d\eta, \\ t_{n,0} &= \int_0^{\infty} \frac{J_1(\eta) Q_2(\eta) \tau_n(\eta)}{\eta Q(\eta) Q_1(\eta)} d\eta \quad (n = \overline{0, N_1}) \\ t_{n,\kappa} &= J_0(\mu_{\kappa}) \int_0^{\infty} \frac{\eta J_1(\eta) Q_2(\eta) \tau_n(\eta)}{(\eta^2 - \mu_{\kappa}^2) Q(\eta) Q_1(\eta)} d\eta \quad (n = \overline{0, N_1}; \kappa = \overline{0, N_1}) \\ \tau_0(\eta) &= \frac{1}{\eta} \left(\frac{\cos \eta}{\eta} - \frac{1}{\eta} + \frac{1}{2} \sin \eta \right), \\ \tau_n(\eta) &= \frac{1}{4} \eta \gamma_n \left(\frac{\eta}{2} \right) \left[\gamma_{n-1} \left(\frac{\eta}{2} \right) - \gamma_{n+1} \left(\frac{\eta}{2} \right) \right] - \frac{(-1)^n \sin \eta}{\Gamma(1+\eta) \Gamma(1-\eta) \eta}, \quad (n = \overline{1, N_1}). \end{aligned} \quad (31)$$

$\gamma_n(x)$ – сферичні функції.

Для визначення контактних напружень під штапом, з урахуванням формул (20), (23), (29), отримано наступні вирази:

$$\sigma_z^{(1)}(\rho, 0) = \sigma_z^{(p)}(\rho, 0) + \sigma_z^{(r)}(\rho, 0), \quad (32)$$

$$\sigma_z^{(p)}(\rho, 0) = -\frac{P}{2\pi R^2} \frac{1}{\sqrt{1-\rho^2}} \left[Y_0^{(1)} + \frac{1}{\rho} \sum_{\kappa=1}^{N_1} (2\kappa+1)(-1)^{\kappa} T_{2\kappa+1}(\rho) y_{\kappa}^{(1)} \right], \quad (33)$$

$(\rho < 1)$

$$\sigma_z^{(r)}(\rho, 0) = \alpha_T T_0 \frac{x_0}{\sqrt{1-\rho^2}} \left[Y_0^{(2)} + \frac{1}{\rho} \sum_{\kappa=1}^{N_1} (-1)^{\kappa} (2\kappa+1) T_{2\kappa+1}(\rho) y_{\kappa}^{(2)} \right], \quad (\rho < 1) \quad (34)$$

де $T_{2k+1}(\rho)$ – функція Чебишева; $\sigma_z^{(p)}(\rho, 0)$ – силова складова напружень; $\sigma_z^{(\Gamma^1)}(\rho, 0)$ – температурна складова напружень в півпросторі.

Аналіз розв'язку. Температурна задача зводиться до системи алгебраїчних рівнянь відносно коефіцієнтів $X_k (k = \overline{0, N})$, Y_0, Y_1 , які входять у формули для температури в циліндрі і шарі.

Розглянуто числовий приклад, в якому знайдено температуру і температурну складову контактної напруження при:

$$l = 1; h = 2; \alpha_0^* = 0, T_0^* = 0, K_1^1 = H_1^1 R = 0,5; K_2^1 = H_2^1 R = \infty; \sigma = 0,3.$$

На рисунку 1 і 2 наведено графіки безрозмірної температурної складової нормального напруження $\bar{\sigma}_z = \frac{\sigma_z^T(\rho, 0)}{\alpha_{T_1} T_0}$ в зоні контакту при різних значеннях коефіцієнтів теплопровідності та величини контактної провідності.

Висновки. Задача теплопровідності в шарі розв'язується застосуванням інтегрального перетворення Ганкеля, а в циліндрі методом Фур'є. Формули для температури і напружень отримано у вигляді рядів по функціях Чебишева з коефіцієнтами, які знаходяться із системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Дослідження показують, що нульова температура на бічній поверхні проміжкового шару призводить до зменшення температури в зоні контакту. Це пояснюється тим, що частина тепла виходить через бічну поверхню проміжкового шару. В результаті цього температурна складова нормального напруження значно зменшується. На рисунках 1, 2 показано вплив коефіцієнтів теплопровідності, теплообміну та контактної провідності на температурну складову контактних напружень. Збільшення коефіцієнтів теплопровідності та величини контактної провідності приводить до збільшення контактних напружень.

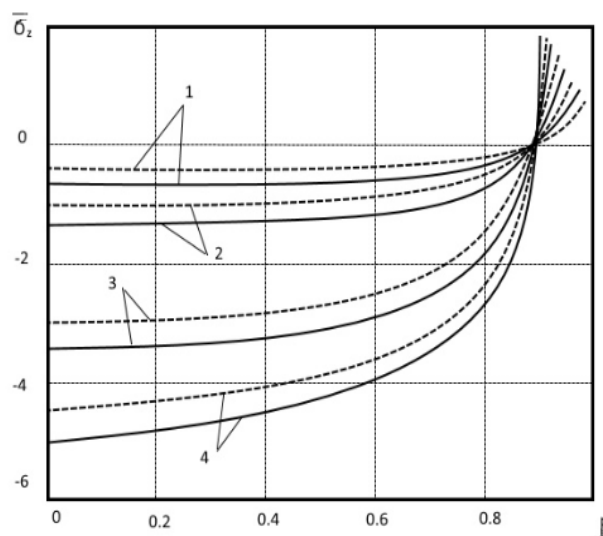


Рис. 1. Розподіл температурної складової контактних напружень для $l_z = l_z^1$ (пунктирні лінії для півпростору) і (суцільні лінії для шару): крива 1 – $h_0^1 = 0,1$; 2 – $h_0^1 = 2$;

$$3 - h_0^1 = 5; 4 - h_0^1 = \infty.$$

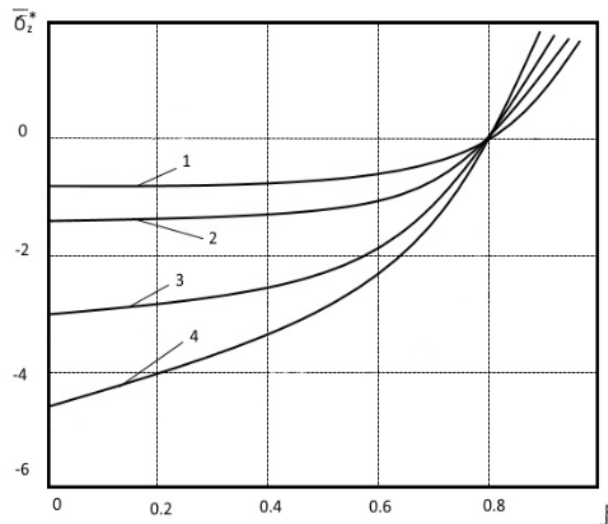


Рис.2. Розподіл температурної складової контактних напружень при:

$h_0^I = 1, l_z = l_z^I$ крива 1 – $l_z = 0,1$; 2 – $l_z = 0,5$; 3 – $l_z = 1$; 4 – $l_z = 5$

Список використаної джерел:

1. Грилицкий Д.В., Кизима Я.А. Осесимметричные контактные задачи теории упругости и термоупругости. Львов:Выща школа. Изд.-во Львовського університета, 1981, 135 ст.
2. Окрепкий Б.С., Шелестовська М.Я. Осесимметрична контактна задача термопружності про тиск пружного циліндра на пружний півпростір з урахуванням неідеального теплового контакту. Вісник ТДТУ, 2014, №2. С-65-76.
3. Окрепкий Б.С., Шелестовський Б.Г. Осесимметрична контактна задача термопружності про тиск пружного циліндра на пружний шар з урахуванням неідеального теплового контакту. Вісник ТНТУ, 2019, №1, с.19-31.
4. Окрепкий Б.С., Шелестовська М.Я. Визначення температурного поля в системі циліндр-півпростір при неідеальному тепловому контакті через проміжковий шар. Вісник ТДТУ, 2013, №1, с.253-252.
5. Окрепкий Б.С., Шелестовський Б.Г. Визначення температурного поля в системі тіл циліндр-шар. Вісник ТНТУ, 2015, №1, с.288-299.
6. Окрепкий Б.С., Пиндус Т., Шелестовський Б.Г. Тиск гарячого штампа на пружний півпростір з урахуванням неідеального теплового контакту через тонкий проміжковий шар. Вісник ТНТУ, 2019, №4, с.13-22.
7. Подстригач Я.С. Условия теплового контакта твёрдых тел. ДАН УССР, серия А, 1963, №7, с.188-192.
8. Подстригач Я.С. Температурное поле в системе твердых тел, соприкасаемых с помощью тонкого промежуточного слоя. ИФЖ, 1963, т.6, №10, с.129-136.
9. Коваленко А.Д. Основы термоупругости. Киев:Наук.думка, 1970, 304с.
10. Уиттекер Э.Т. Курс современного анализа. М:Физ.мат.; 1963, с.343.

Рецензент: Доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформатики та прикладної математики Рівненського державного гуманітарного університету А.О.Сяський

Абгарян Юра Серьожайович,*спеціаліст кафедри транспортних технологій, Запорізького
національного технічного університету, розробник програмного забезпечення SoftServe
ORCID iD 0000-0001-8519-2539*

ЩОДО ПИТАННЯ ПОБУДОВИ АРХІТЕКТУРИ СУЧАСНИХ КОРПОРАТИВНИХ ДОДАТКІВ НА NODE.JS

У статті розкрито питання побудови архітектури сучасних корпоративних додатків на Node.js. Визначено, що Node.js - це надзвичайно потужна платформа на основі JavaScript, побудована із застосуванням Google Chrome JavaScript V8 Engine, яка використовується для розробки веб-додатків з інтенсивним введенням-виводом. Наголошено, що програму, яка запускається на сервері та обробляється клієнтським браузером, використовуючи Інтернет для доступу до всіх ресурсів цієї програми, зазвичай легко розбити на три частини: клієнт, це коли користувач взаємодіє з інтерфейсною частиною веб-програми; сервер, який відповідає за прийом клієнтських запитів, виконання необхідних завдань та надсилання відповідей клієнтам та база даних у якій зберігаються дані для веб-програми. Наголошено, що Node.js використовує архітектуру «однопотокового циклу подій» для обробки кількох одночасних клієнтів. Модель обробки Node.js заснована на моделі подій JavaScript разом із механізмом зворотного виклику JavaScript. Зазначається, що частини архітектури Node.js складаються із запитів, які можуть бути блокуючими (складними) або неблокуючими (простими) залежно від завдань, які користувач хоче виконати у веб-застосунку; серверу Node.js, який є серверною платформою, яка приймає запити від користувачів, обробляє їх та повертає відповіді відповідним користувачам; черги подій, яка зберігає вхідні запити клієнтів і передає їх один за одним у цикл подій; пулу потоків, що складається з усіх потоків, доступних для виконання деяких завдань, які можуть знадобитися для виконання запитів клієнта; циклу подій, що необмежено приймає запити та обробляє їх, а потім повертає відповіді відповідним клієнтам та зовнішніх ресурсів, які необхідні для блокування запитів клієнтів. Архітектура сучасних корпоративних додатків на Node.js ґрунтується на застосуванні двох окремих напрямків: «зверху вниз» за відповідними ролями, що допомагає розробникам об'єднувати та роз'єднувати модулі, а також напрямком «розділяй і володарюй» у відповідності до виконуваних завдань, що допомагає розробникам розділити завдання на простіші модулі, одночасно дозволяючи розробляти декілька модулів. Розроблена архітектура покликана ефективно структурувати дизайн додатків для кращої ремонтпридатності та розширюваності з часом.

Ключові слова: корпоративний додаток, розробка, архітектура, фреймворк, програмна платформа.

Абгарян Юра Сергеяевич

ПО ВОПРОСУ СТРОЙКИ АРХИТЕКТУРЫ СОВРЕМЕННЫХ КОРПОРАТИВНЫХ ДОПОЛНИТЕЛЕЙ НА NODE.JS

В статье раскрыты вопросы построения архитектуры современных корпоративных приложений на Node.js. Определено, что Node.js – это очень мощная платформа на основе JavaScript, построенная с применением Google Chrome JavaScript V8 Engine, которая используется для разработки веб-приложений с интенсивным вводом-выводом. Отмечено, что программа, запускаемая на сервере и обрабатываемая клиентским браузером, использует Интернет для доступа ко всем ресурсам этого приложения, обычно легко разбить на три части: клиент, это когда пользователь взаимодействует с интерфейсной частью веб-приложения; сервер, отвечающий за прием клиентских запросов, выполнение необходимых задач и отправку ответов клиентам и база данных, в которой хранятся данные для веб-приложения. Отмечено, что Node.js использует архитектуру «однопоточного цикла событий» для обработки нескольких клиентов. Модель обработки Node.js основана на модели событий JavaScript вместе с механизмом обратного вызова JavaScript. Отмечается, что части архитектуры Node.js состоят из запросов, которые могут быть блокирующими (сложными) или неблокирующими (простыми) в зависимости от задач, которые пользователь хочет выполнить в веб-приложении; серверу Node.js, который является серверной платформой, принимающей запросы от пользователей, обрабатывает их и возвращает ответы соответствующим пользователям; очереди событий, сохраняющая входящие запросы клиентов и передающая их один за другим в цикл событий; пулу потоков, состоящий из всех потоков, доступных для выполнения некоторых задач, которые могут потребоваться для выполнения запросов клиента; цикла событий, что неограниченно принимает запросы и обрабатывает их, а затем возвращает ответы соответствующим клиентам и внешним ресурсам, которые необходимы для блокирования запросов клиентов. Архитектура современных корпоративных приложений на Node.js основывается на применении двух отдельных направлений: «сверху вниз» по соответствующим ролям, что помогает разработчикам объединять и разъединять модули, а также направление «разделяй и властвуй» в соответствии с выполняемыми задачами, что помогает разработчикам разделить задачи на более простые модули, одновременно разрешая разрабатывать несколько модулей. Разработанная архитектура призвана эффективно структурировать дизайн приложений для лучшей ремонтпригодности и расширяемости с течением времени.

Ключевые слова: корпоративное приложение, разработка, архитектура, фреймворк, программная платформа.

Abharian Yura

ON THE ISSUE OF BUILDING THE ARCHITECTURE OF MODERN ENTERPRISE APPLICATIONS ON NODE.JS

Abstract. The article reveals the issue of building the architecture of modern enterprise applications on Node.js. Node.js has been identified as an extremely powerful JavaScript-based platform built with the Google Chrome JavaScript V8 Engine, which is used to develop web applications with intensive I/O. It is emphasized that a program that runs on a server and is processed by a client browser using the Internet to access all resources of this program is usually easily divided into three parts: client, when a user interacts with the interface part of a web program; a server that is responsible for receiving client requests, performing necessary tasks and sending responses to clients, and a database that stores data for a web application. It is noted that Node.js uses a "single-threaded event loop" architecture to handle multiple concurrent clients. The Node.js processing model is based on the JavaScript event model along with the JavaScript callback mechanism. It is noted that parts of the Node.js architecture consist of queries that can be blocking (complex) or non-blocking (simple) depending on the tasks that the user wants to perform in the web application; Node.js server, which is a server platform that receives requests from users, processes them and returns responses to the appropriate users; an event queue that stores incoming customer requests and passes them one by one to the event loop; a thread pool consisting of all threads available to perform some tasks that may be required to execute client requests; an event loop that receives and processes requests indefinitely and then returns responses to the appropriate clients and the external resources needed to block client requests. Architecture of modern corporate applications on Node.js is based on the use of two separate areas: "top-down" for the respective roles, which helps developers to combine and disconnect modules, and the direction of "divide and conquer" in accordance with the tasks performed, which helps developers to divide tasks into simpler modules, allowing to develop several modules at the same time. The developed architecture is designed to effectively structure the design of applications for better maintainability and extensibility over time.

Key words: corporate application, development, architecture, framework, software platform.

Постановка проблеми. В умовах зростаючого ринку інформаційних додатків інтерес викликають різноманітні програми Інтернету речей (IoT), даний факт призводить до створення різних точок даних, зібраних з ряду різноманітних пристроїв, які збираються в єдине сховище для розробки додатків. Розподілений характер цих систем дозволив дослідникам перейти до хмарної інфраструктури для реалізації нових дизайнів додатків за підтримки інтегрованої обробки даних та ефективного управління ресурсами [1].

Однак, незважаючи на свою привабливість, впровадження таких хмарних програм не є тривіальним. Розробка ефективного хмарного додатка вимагає від програміста знання різних технічних областей від роботи сервера, локальних мов і мов веб-додатків до протоколів передачі даних. Наприклад, для ефективної веб-розробки розробникам зазвичай потрібно знання до п'яти різних мов програмування, таких як JavaScript, HTML, CSS, мови сервера, таких як PHP і SQL [2].

У якості фундаментальної основи для подолання цих проблем представлена програмна платформа Node.js [3] отримала значну популярність у спільнотах розробників з моменту її впровадження у 2009 році. Зокрема, Node.js – це масштабоване однопотокове середовище JavaScript на стороні сервера, реалізовано на C і C++ [4]. Незважаючи на останні розробки, підхід Node.js до розробки веб-додатків зробив його привабливою альтернативою більш традиційним платформам, таким як сервери Apache+PHP і Nginx.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні роки з'являється все більше робіт, в яких описуються принципи побудови архітектури сучасних корпоративних додатків.

А. В. Єрукаєв, О. С. Копча та Д. С. Лукенів [5] розглянули сучасний стан розробки веб-додатків за допомогою фреймворків, у тому числі Node.js. Авторами розглядається які можливості додає Node.js до базової мови JavaScript, особливості які цей фреймворк додає, такі як можливість використання файлового менеджера npm, що дає можливість зручно працювати зі встановленням файлів та фреймворків.

Механізми впровадження Node.js у розробку мобільного застосування детально розглянуто у роботі «Розробка мобільного застосування з автоматичним налаштуванням функцій клієнтської частини» [6] авторами якої Л. Є. Кузьмиченко та О. О. Арсірієм визначено основні принципи застосування та особливості розробки.

В. О. Кривенька, О. С. Городецька та Л. А. Савицька [7] запропонували використання технології віртуальних інтерфейсів для зменшення завантаженості кластеру баз даних.

У [8] М. Бартков розглянув GraalVM, За словами автора, це програмне забезпечення, яке забезпечує значне поліпшення продуктивності та ефективності програм, що ідеально підходить для створення ІТ-продуктів. Науковець стверджує, що GraalVM розроблений для програм, написаних на мовах Java, JavaScript, LLVM, таких як C і C++ та інших динамічних мовах. Це

усуває ізоляцію між мовами програмування та забезпечує сумісність у загальному середовищі виконання.

Питання впливу засобів розробки програмних продуктів на кінцевий результат дослідили О. М. Шинкарук, О. М. Яшина та О. Г. Онишко [9]. Основними результатами дослідження є обґрунтування вибору фреймворків для розробки програмного забезпечення. Потрібно відмітити, що не зважаючи на велику кількість фреймворків, структурований аналіз здійснений досить незначною кількістю дослідників, що і обумовлює наукову новизну даного питання. Практична значущість полягає у можливості застосування тих чи інших фреймворків відповідно до потреб замовника та розробника для досягнення певних результатів при розробці програмного забезпечення

Із зарубіжних робіт варто відзначити такі наукові праці як: Schreck, Hanna-Reetta [10], Panetta, Daniele & Steppert, Michael & Ross, Tobias & Szidat, Sönke & Cutler, Cathy & Del Guerra, A. & Düllmann, Christoph & Eberhardt, Klaus & Edelstein, Norman & Gaeggeler, Heinz & Langrock, Gert & Moenius, Thomas & Morss, Lester & Rösch, Frank & Ruehm, Werner & Trautmann, Norbert & Walther, Clemens & Wendt, Klaus & Zeh, Peter [11], Gonzalez-Morón, Dolores & Kauffman, Marcelo [12], Zverovich, Vadim [13], Beaumont, Perry [14], Sutanto, Sutanto & Gunawan, Waliadi & Faeshal, Faeshal [15], Bhardwaj, Harsh [16], Shcherbakov, E. & Shcherbakova, M [17], Mardan, Azat [18] та інші.

Проте, враховуючи описані наукові набутки, за темою, питання розкриття питання побудови архітектури сучасних корпоративних додатків на Node.js залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

Постановка завдання. Розкрити питання побудови архітектури сучасних корпоративних додатків на Node.js.

Викладення основного матеріалу дослідження. Побудова сучасних корпоративних додатків, має на увазі, формування єдиної системи, робота якої направлена на поєднання певної кількості модулів взаємодії чи окремих підсистем. Кількість та склад модулів залежить від кінцевої мети розробки та переліку функцій покладених на корпоративну систему. При значній кількості модулів інтеграція між ними безпосередньо вимагає підтримки багатьох зовнішніх інтерфейсів. В результаті з'являються інтеграційні платформи, які закладаються в основу корпоративної інфраструктури додатків.

Node.js виступає платформою з'єднання повного переліку модулів та підсистем, яка надає можливість JavaScript взаємодіяти з пристроями вводу-виводу через свій API, мовою написання якого є C++, підключати інші зовнішні бібліотеки, написані різними мовами, забезпечуючи виклики до них із JavaScript-коду.

Однією з багатьох переваг Node.js є його архітектура, яка дозволяє легко використовувати його як виразну, функціональну мову для програмування на стороні сервера [17]. Хоча розробка на Node.js може бути тривіальною, коли розробник повністю осягає мову, для початківців, щоб ефективно використовувати Node.js, існує багато перешкод перед тим, як вони зможуть реалізувати реальні хмарні програми. Розробнику варто обов'язково враховувати, що Node.js застосовується переважно на сервері, виконуючи роль веб-сервера, але є можливість розробляти на Node.js та десктопні віконні програми (за допомогою NW.js, AppJS або Electron для Linux, Windows та macOS) і навіть програмувати мікроконтролери (наприклад, tessel, low.js та espruino).

Node.js, як функціональну одиницю, розроблено знизу вгору, щоб обробляти асинхронний запит на введення-вивід, оскільки він побудований за допомогою JavaScript, а JavaScript розроблений як цикл подій. У клієнтському JavaScript подія натискання кнопки є циклом подій. Хоча інші середовища пропонують цю функцію, вона виконується за допомогою сторонніх бібліотек або не розробляється з нуля для тієї ж мети, що й Node.js, тому вона часто працює повільно або відстає і не належить до стандартної функції. Деякі приклади включають Event Machine, який був створений для Ruby, Twisted, та був представлений для Python і доступний з Python 2 і далі, і Apache MINA, який також відомий як «Бібліотека мережесетів» і є ще одним прикладом надання подій, керований та асинхронний, обмежений лише API. Таким же чином Apache AsyncWeb створюється за допомогою Apache MINA та Perl Any Event. Аналогічно, однією з переваг Node.js перед іншими буде його здатність обробляти багато запитів, одночасно діючи як клієнт сторонніх служб, керуючи лише одним потоком. Інші мови, у цьому сенсі, припиняють обробку, доки віддалений сервер не відповість на їхній початковий запит, що вимагатиме багатопотокової обробки для виконання. Для порівняння, все, що буде використано у

Node, є асинхронним, тому що писати в ньому неасинхронний код буде складно. Крім того, Node.js ніколи не вимагатиме буферизації даних перед їх виведенням, тоді як інші, такі як Event Machine, вимагатимуть обов'язкової буферизації враховуючи масштабість обставин.

Будучи на стороні сервера JavaScript, ще одна помітна перевага Node.js перед іншими полягає в тому, що від розробника потрібно мати знання та досвід лише однієї мови, а саме JavaScript, незалежно від того, чи створює він сценарії на стороні клієнта чи на стороні сервера. Розробник не зобов'язаний перемикаати свій мозковий цикл з однієї мови на стороні клієнта на іншу мову на стороні сервера. Крім того, оскільки Node.js молодий, він має перевагу, що уникає помилок, які робили інші мови в минулому, такі як помилка зворотної сумісності. Згідно зі статистикою, близько 47 % онлайн-серферів очікують, що сторінка завантажиться протягом 2 секунд, а затримка в 3 секунди знижує задоволеність споживачів на 16 %. Тут лідирує Node.js, оскільки його інтерпретатор менший і швидший, ніж в інших мовах, таких як PHP. На відміну від інших мов, де кожен запуск програми буде виконувати цикли, що потребують таких процесів, як налаштування завантаження, після чого підключення до бази даних, отримання важливої інформації і, нарешті, відтворення мови розмітки, тут програми на стороні сервера завжди підтримуються увімкненими. Node.js, з іншого боку, мінімізує ці кроки, залишаючи програму завжди увімкненою.

Аналізуючи сучасні дослідження [11, 14, 15], варто наголосити, що платформі в цілому бракує стандартів якості коду, і аргументація через файл, який був відредагований різними розробниками, може бути складною. Більше того, оскільки фреймворк є відносно молодим, а програмне забезпечення все ще досягає зрілості, порівняно з традиційними фреймворками, розробники стикаються з відсутністю підтримки документації і можуть зіткнутися з проблемами при отриманні підтримки від спільноти розробників, що дійсно є проблемою. Оскільки він використовує парадигму, керовану подіями/зворотним викликом, код Node.js швидко розвивається, а також його важко налагоджувати. Відсутність готового хостингу для середовищ Node.js наразі є серйозним недоліком. Складні теми в мові JavaScript, такі як успадкування прототипів, анонімні функції та зворотні виклики, ускладнюють вивчення мови, і, як наслідок, її краще вивчати після оволодіння іншою простою мовою. Node.js все ще молода мова, і, як наслідок, професійні програмісти не можуть приєднатися. Інша проблема полягає в тому, що оскільки система є однопоточною, інші запити припиняються, якщо центральний процесор зайнятий навіть на частку секунди. В результаті розробники також змушені мислити в асинхронних термінах, до яких важко адаптуватися.

На сьогодні, ще не існує єдиного стандарту, щодо архітектури програмного забезпечення Node.js чи керівництва щодо впровадження, за яким розробники мали б впливати на створення добре структурованих додатків. Проте, беззаперечним фактом є те, що організація дизайну програми з чіткими межами має вирішальне значення для успішного розгортання в реальному світі. Розробка неструктурованої моделі спричинить логічну складність і труднощі в підтримці й оновленні програми з часом. Більше того, без затверджених інструкцій для налаштування базового середовища розробки додатків потрібен значний час і зайві зусилля при розробці.

Підхід до розробки архітектури сучасного корпоративного додатку на Node.js ґрунтується на застосуванні двох окремих напрямків. Перший напрямок, це «зверху вниз» за відповідними ролями, допомагає розробникам об'єднувати та роз'єднувати модулі, дана структурна організація сформована у чіткому ієрархічному порядку. Це дозволяє розробникам спостерігати за перебігом програми від основного модуля, який відіграє роль основного класу в Java, до інших підмодулів зверху вниз. По суті, це розбивка сучасного корпоративного додатку, щоб отримати уявлення про його композиційні підмодулі. З іншого боку, підхід «розділяй і володарюй» у відповідності до виконуваних завдань, допомагає розробникам розділити завдання на простіші модулі, одночасно дозволяючи розробляти декілька модулів. Початковим підходом до розробки сучасного корпоративного додатку на Node.js є підхід «зверху вниз», а потім підхід «розділяй і володарюй» на наступному кроці, так що на початку визначаються ролі між модулями, перш ніж завдання призначаються кожній ролі, як показано на рисунку 1.

Існують різні типи хмарних додатків, які можуть скористатися перевагами запропонованої архітектури сучасного корпоративного додатку на Node.js та рекомендацій щодо впровадження. Приклади включають програми, які просто реєструють інформацію в хмарі через Інтернет, обмінюються медичною інформацією або інформацією про медичне обслуговування за допомогою мобільного додатка, а також виконують дії фізичних компонентів у локальній мережі ad-hoc.

Загалом, запропонована розробка може бути застосована до програмування та формування хмарних додатків, які вимагають основи встановлення фундаментальних вимог. Ці вимоги включають надсилання та отримання даних, наявність бази даних для зберігання інформації, виклик зовнішніх виконуваних файлів для алгоритмів машинного навчання та забезпечення простору для розширення програми.

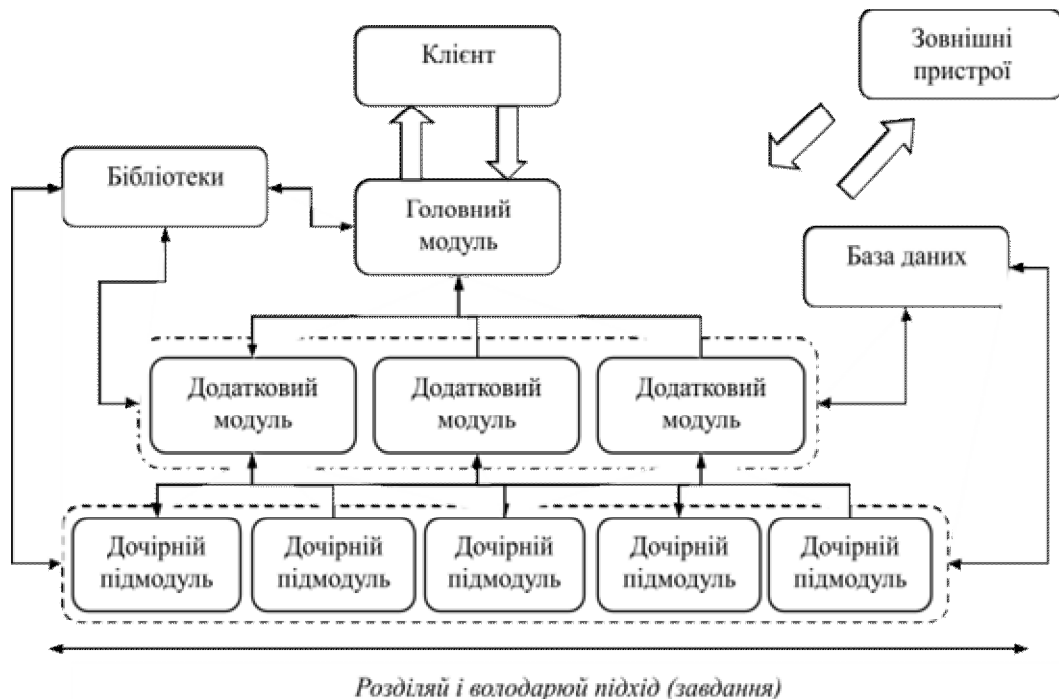


Рис. 1. Огляд архітектури сучасного корпоративного додатку на Node.js

Наукове підґрунтя даної роботи полягає у:

1) Архітектура сучасного корпоративного додатку на Node.js, яка вирішує проблеми підтримки та оновлення хмарних додатків, розроблених за допомогою Node.js. Цей макет дизайну підтримує отриману програму, щоб вона складалася з чітко визначених незалежних компонентів, які покращують ремонтпридатність. Крім того, нові можливості можуть бути додані до програми без серйозних змін в базовій архітектурі.

2) Інструкція з впровадження, яка містить чіткі, але прості інструкції для розробки прототипу Node.js загального призначення. На базі архітектури вказується, як: створювати прототипи за допомогою обмеженого набору API;

- ↑ розділяти модулі та організовувати функції;
- ↑ дозволяти клієнту спілкуватися з сервером;
- ↑ використовувати базу даних хмарних додатків;
- ↑ обробляти завантаженні файли.

3) Сформована архітектура програмного забезпечення та рекомендації з впровадження можуть бути основою для розробки різноманітних хмарних додатків.

Висновки і перспективи подальших досліджень. У роботі розкрито питання побудови архітектури сучасних корпоративних додатків на Node.js. Запропоновано архітектуру програмного забезпечення та рекомендації щодо впровадження для розробки хмарних додатків Node.js. Розроблена архітектура сучасних корпоративних додатків на Node.js використовує підходи «зверху-вниз», «розділай і володарюй», щоб ефективно структурувати дизайн додатків для кращої ремонтпридатності та розширюваності з часом. З іншого боку, описані принципи та особливості впровадження, які розкривають процедури встановлення та використання. Також представлено практичні сценарії того, як розробники можуть використовувати запропоновану архітектуру сучасних корпоративних додатків та рекомендації щодо впровадження для різних типів додатків.

Перспективи подальших досліджень базуються на розширенні сфери дій пропонованої архітектури до різних типів додатків, щоб показати ефективність розробки.

Література:

1. Козак Є. Б. Програмні методи організації транспортних потоків у рамках концепції Internet of Vehicles. Науковий журнал «Комп'ютерно-інтегрована технологія: освіта, наука, виробництво», 2021. № 44. С. 94-100. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2021-44-15>.
2. Науменко Д. HTML, CSS, PHP, JavaScript, SQL – что и зачем?. – Режим доступу. – <http://codeharmony.ru/materials/125>
3. About Node.js, and why you should add Node.js to your skill set? – Режим доступу. – <http://blog.training.com/2016/09/about-nodejs-and-why-you-should-add.html>
4. Todd Veldhuizen «Techniques for scientific C++» – Режим доступу. – <https://web.archive.org/web/20061013134847/http://osl.iu.edu/~tveldhui/papers/techniques/>
5. Порівняння фреймворків express та react на платформі Node.js / А. В. Єрукаєв, О. С. Копча, Д. С. Лукенів // Тези доповідей восьмої міжнародної науково-практичної конференції «Управління розвитком технологій». Тема: Інформаційні технології розвитку змісту освіти. // Відповідальна за випуск завідувач кафедри ІТ С.В. Цюцюра, – К. : КНУБА, 2021. С. 25-26.
6. Розробка мобільного застосування з автоматичним налаштуванням функцій клієнтської частини / Л. Є. Кузьмиченко, О. О. Арсірій // Матеріали Десятої Міжнародної наукової конференції студентів та молодих вчених «Сучасні інформаційні технології – 2020» «Modern Information Technology - 2020» (14-15 травня 2020 р., м.Одеса) / МОН України; Одес. Нац. політех. ун-т ; Ін-т комп'ют. систем. – Одеса : Наука і техніка, 2020. С. 154-155.
7. Використання технології віртуальних інтерфейсів для підтримки онлайн гри / В. О. Кривенька, О. С. Городецька, Л. А. Савицька // Науково-технічна конференція факультету інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії. ВНТУ – 2021. –
8. <https://conferences.vntu.edu.ua>.
9. Maxim Bartkov (2021). GRAAL AS A MULTILINGUAL PLATFORM. New York. TK Meganom LLC. Innovative Solutions in Modern Science. 3(47). doi: 10.26886/2414-634X.3(47)2021.9
10. Управління якістю програмних веб-систем засобами розробки / Шинкарук, О.М., Яшина, О.М., Онишко, О.Г. // Вісник Хмельницького національного університету, №6, 2020 (291). С. 39-44.
11. Schreck, Hanna-Reetta. (2021). Modern Corporeality. 10.4324/9780367823672-10.
12. Panetta, Daniele & Steppert, Michael & Ross, Tobias & Szidat, Sönke & Cutler, Cathy & Del Guerra, A. & Düllmann, Christoph & Eberhardt, Klaus & Edelstein, Norman & Gaeggeler, Heinz & Langrock, Gert & Moenius, Thomas & Morss, Lester & Rösch, Frank & Ruehm, Werner & Trautmann, Norbert & Walther, Clemens & Wendt, Klaus & Zeh, Peter. (2016). Modern Applications. 10.1515/9783110221862.
13. Gonzalez-Morón, Dolores & Kauffman, Marcelo. (2020). Modern applications of neurogenetics. 10.1016/B978-0-12-819178-1.00013-7.
14. Zverovich, Vadim. (2021). Modern Applications of Graph Theory. 10.1093/oso/9780198856740.001.0001.
15. Beaumont, Perry. (2019). Theoretical foundations and modern applications. 10.4324/9780429053047-4.
16. Sutanto, Sutanto & Gunawan, Waliadi & Faeshal, Faeshal. (2021). ARSITEKTUR CONTAINER DOCKER PADA APLIKASI EXPERT ASSIST DENGAN TEKNOLOGI NODE.JS, EXPRESS FRAMEWORK & CLOUD DATABASE NoSQL MONGODB ATLAS. Jurnal Sistem Informasi dan Informatika (Simika). 4. 73-89. 10.47080/simika.v4i1.1189.
17. Bhardwaj, Harsh. (2021). Challenges with Implementation of Node.js. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology. 9. 1086-1090. 10.22214/ijraset.2021.37464.
18. Shcherbakov, E. & Shcherbakova, M.. (2021). Event dispatching algorithms in Node.js. Scientific news of Dahl university. 10.33216/2222-3428-2021-20-14.
19. Mardan, Azat. (2018). Intro to Node.js: Learn Backbone.js, Node.js, and MongoDB. 10.1007/978-1-4842-3718-2_6.

УДК 53.082.36:531.755

DOI 10.36910/775.24153966.2021.72.30

Ганзюк А.Я.¹, Стремецький О.І.¹, Шелестюк О.П.², Міщук О.М.²Хмельницький національний університет¹,Хмельницький науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України²**ОТРИМАННЯ ТА ТЕСТУВАННЯ ГЛУКОНІТОВОГО ГРАНУЛЯТУ**

Досліджено структурні особливості та хімічний склад глауконітової глини за допомогою скануючого електронного мікроскопа та рентгенофлуорисцентного аналізу (РФА). Отримано гранулят на основі глауконітової глини з різним часом та температурою спікання та досліджено вплив процесу гранулювання на сорбційні властивості гранульованих алюмосилікатів. Хімічна та термічна стабільність глауконітів, а також іонообмінні властивості, відкривають можливості для створення пористих матеріалів на основі природних мінералів з контрольованими властивостями, що здатні замінити синтетичні аналоги, отримання яких пов'язане з високими технологічними витратами.

Ключові слова: гранулят, вуглеводнева суміш, глауконіт, термічна активація, октанове число за дослідницьким та моторним методами.

Ганзюк А.Я., Стремецький А.И., Шелестюк А.П., Мищук А.Н.

ПОЛУЧЕНИЕ И ТЕСТИРОВАНИЕ ГЛАУКОНИТОВОГО ГРАНУЛЯТА

Исследованы структурные особенности и химический состав глауконитовой глины с помощью сканирующего электронного микроскопа и рентгенофлуорисцентного анализа (РФА). Получено гранулят на основе глауконитовых глин с разным временем и температурой спекания и исследовано влияние процесса гранулирования на сорбционные свойства гранулированных алюмосиликатов. Химическая и термическая стабильность глауконита, а также ионообменные свойства, открывают возможности для создания пористых материалов на основе природных минералов с контролируемыми свойствами, способными заменить синтетические аналоги, получение которых связано с высокими технологическими затратами.

Ключевые слова: гранулят, углеводородная смесь, глауконит, термическая активация, октановое число за исследовательским и моторным методами.

A. Hanzhuk, O. Stremetskyi, O. Shelestiuk, O. Mishchuk

GLAUCONITE GRANULATE OBTAINING AND TESTING

The structural features and chemical composition of glauconite clay were studied using a scanning electron microscope and X-ray fluorescence analysis (X-ray diffraction). A granulate based on glauconite clay with different sintering time and temperature was obtained and the effect of the granulation process on the sorption properties of granular aluminosilicates was studied. Chemical and thermal stability of glauconite, as well as ion exchange properties, open opportunities for the creation of porous materials based on natural minerals with controlled properties that can replace synthetic analogues, the production of which is associated with high technological costs.

Keywords: granulate, hydrocarbon mixture, glauconite, thermal activation, octane number by research and motor methods.

Постановка проблеми. За останні роки питання якості і використання автомобільних бензинів набули нового значення і стали в ряд з важливими проблемами, від вирішення яких залежить технічний прогрес і розвиток економіки. В наш час вимоги до якості автомобільних бензинів досить високі, а для сучасних двигунів приходиться розробляти нові види палив з покращеними експлуатаційними характеристиками. Розробка нових сортів бензинів і покращення існуючих повинна здійснюватись з урахуванням та співпрацею з автомобільною і нафтопереробною галузями. Від того, наскільки вдало підібраний бензин, залежить довговічність двигуна, його надійність і екологічність експлуатації. З іншої сторони, вибір бензину визначає напрям розвитку нафтопереробної галузі. Завищення вимог до якості бензинів ведуть до невиправданих витрат на освоєння нових процесів отримання таких палив, а відповідно, до підвищення їх вартості. Зниження вимог зменшує термін служби двигуна, довговічність і надійність його роботи, ускладнює обслуговування.

Використання природних глин у промисловості і у заходах по охороні навколишнього середовища обумовлене їх мінеральним складом і фізико-хімічними властивостями, які, в свою чергу, визначаються будовою глинистої частини та її розмірами. Це доцільно з точки зору екології, оскільки глинисті мінерали практично не містять речовин, які забруднюють акваторії і є природним компонентом даних відкладів. Дослідницьких робіт, в яких розглядаються питання поглинання неполярних вуглеводнів глинами є недостатньо. Вивчення механізму їх поглинання має як теоретичне, так і прикладне значення. Все вище сказане спонукало нас провести дослідження у цьому напрямку.

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 бензену,

© Ганзюк А.Я., Стремецький О.І., Шелестюк О.П., Міщук О.М.

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 [1-3].

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. 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 утрудненим.

Мета роботи: провести теоретичний аналіз перспектив використання глауконіту для очищення вуглеводневих сумішей; оцінити фізико-хімічні показники вуглеводневих сумішей, очищених глауконітом, провести детальний вуглеводневий аналіз нафтопродуктів; дослідити ефективність застосування природних, термоактивованих та збагачених глауконітових глин для адсорбції нафтопродуктів; дослідити структуру глауконіту за допомогою скануючої електронної мікроскопії; дослідити сорбційну здатність отриманого грануляту в статичному та динамічному режимах.

Предмет дослідження: глауконіт природний, збагачений та термічно активований.

Об'єкт дослідження: процеси очищення вуглеводневих сумішей за допомогою глауконітової глини.

Матеріали та методи. Глауконіт (англ. Glauconite) - складний калієвмісний водний алюмосилікат, мінерал з групи гідрослюд підкласу шаруватих силікатів непостійної і складної будови, що виражається усередненою формулою, яка має склад $(K, Ca, Na)<1(Al, Fe^{3+}, Fe^{2+}, Mn)_2[(OH)_2 | A_{10}, 35Si_3, 65O_{10}]$. Містить (%): SiO_2 - 44-56; Al_2O_3 - 3-22; Fe_2O_3 - 0-27; FeO - 0-8; MgO - 0-10; K_2O до 10%, H_2O - 4-10%. Відомі також домішки Li і B [5-6].

Як самостійний мінеральний вид відомий з 1828 р. у роботі Керферштейна, що дав йому назву (від грец. Glaukos - блакитно-зелений). Різновид з переважанням у складі калію носить назву селадон. Характерний для всіх геологічних систем у пісках, пісковиках, глинах, мергелях та вапняках усіх геологічних систем, забарвлюючи ці породи в зеленуватий колір (рисунок 1.) [7].

Є одним з основних мінералів, що використовуються для визначення віку осадових гірських порід (K-Ag-методом). Застосовується для виготовлення мінеральних масел та фарб, відбілювачів, як сорбент, а також для виробництва декоративного бетону, цементу та добрива. В Україні є на Поділлі та на Волині [8-9]. Широко поширений в осадових породах, мілководного морського походження і в сучасних морських покладах. Глауконіт містять: батіальний зелений мул, глауконітовий піщаник, зеленуватий глауконітовий ордовіський вапняк і багато інших порід [10]. Але не утворює в природі великих мономінеральних скупчень, а зустрічається виключно у вигляді суміші з іншими мінералами глинистих або піщаних товщ, його вміст в породі рідко перевищує 50%.

Для розвитку промисловості та сільського господарства мають велике значення розповсюджені на території Хмельниччини поклади карбонатних порід (для потреб цукрової та цементної промисловості, вапнування кислих ґрунтів), каоліну, мінеральних і прісних підземних вод тощо [9-10].

В області є родовища глауконіту, графіту, кременю, оніксу, бромних та радонових вод. В перспективі області – розробка Варварівського родовища сапонітових глин, що знаходиться у

Славутському районі та торфу в Ізяславському районі. Видобування торфу та використання його як альтернативного виду місцевого палива є актуальним і перспективним. Це сприятиме забезпеченню торфом жителів північно-західної частини області, газифікація населених пунктів якої економічно не вигідна. З метою розширення сировинної бази Хмельницькою областю передбачається проведення пошукових та розвідувальних робіт із вивчення покладів апатитових руд, зернистих фосфоритів, золота, радонових вод, тощо.

Глауконіти сформовані в помірно глибоких морях приблизно сотні мільйонів років тому. Узбережжя Pas de Calais регіону Франції, поблизу міста Wissant.



Емпірична формула глауконіту:
 $K_{0.6}Na_{0.02}Fe^{2+}_{1.33}Mg_{0.4}Fe^{3+}_{0.2}Al_{0.3}Si_{1.8}O_{10}(OH)_2$

Source: <http://throughthesandglass.typepad.com>

Рис. 1. Глауконіти узбережжя Pas de Calais (Франція)

З метою освоєння мінерально-сировинних ресурсів області розробляються інвестиційні проекти та ведеться пошуки потенційних інвесторів. Нещодавно прийнято Закон України «Про затвердження Загальнодержавної програми розвитку мінерально – сировинної бази України на період до 2030 року». Важливим природним адсорбентом серед інших є звичайний глауконіт як супутній компонент фосфоритових руд, а також у родовищах глауконіту. Кварц-глауконітові піски є комплексною агрономічною рудою. Іншим напрямом застосування глауконіту, значним за обсягом, може бути екологічний – рекультивация забруднених радіонуклідами ґрунтів. Розвіданих родовищ глауконіту в Україні немає, але в ряді регіонів поширені кварц-глауконітові піски із вмістом глауконіту до 40 – 60%. Основним завданням цього напряму є проведення геологорозвідувальних робіт щодо глауконіту у межах Середнього та Лівобережного Придністров'я, Криму та Луганської області. Глауконіт – глинистий мінерал групи алюмосилікатів з пошаровою структурою, характеризується чудовими сорбційними властивостями, переважанням окислювальних процесів, багатий мікрокомпонентним складом. Цілющий ефект глини визначається високим вмістом кремнію. На півдні області на території Вінківського району знайдені і попередньо розвідані Адамівське і Карачієвецьке комплексні родовища глауконіт-кварцових пісків запаси яких складають 12,6 млн. т. Мінеральний сорбент глауконіт Адамівської групи родовищ Хмельницької області - це природні піски, що містять 50-70% мінералу глауконіту. Глауконітові мікроконкреції мають ефективну питому поверхню, високу ємкість катіонного обміну та ємкість моношару [8-9].

Фізико-хімічні характеристики глауконіту Адамівської групи родовищ Хмельницької області такі: твердість – $1.7 \div 1.8$; густина – $2200 \div 2900 \text{ кг/м}^3$; ефективна питома поверхня природного глауконіту – 112 мг/г; ємкість катіонного обміну природного глауконіту – 15 мг-екв; ємкість моношару глауконіту природного – 1,73 ммоль/1г. Глауконіт є перспективною корисною копалиною багатопрофільного застосування. Виявлено чотири форми знаходження його в палеогенових відкладеннях п'ять тіпоморфних і три генетичні різновиди. Завдяки особливостям кристалічної структури, які зумовлюють його здатність до катіонного обміну, глауконіт здавна використовувався для пом'якшення води, а пізніше і для її очищення. Встановлено високу ефективність глауконіту при очищенні води від солей важких металів, ряду органічних і неорганічних сполук, радіонуклідів. Активованій глауконіт при фільтрації через нього забруднених вод практично повністю затримує залізо і аміак, майже на порядок знижує вміст у воді нафтопродуктів, в 25-50 разів знижує вміст радіоактивних ізотопів цезію-137 і стронцію-90 [10-12]. Високі адсорбційні і катіонообмінні властивості глауконіту можуть використовуватися не тільки в якості адсорбенту важких металів, нафтошламів, що забруднюють водні об'єкти і ґрунт, а також для ліквідації забруднень, що знаходяться в опадах очисних споруд і промислових стоків, в ґрунтах і водних об'єктах, за допомогою майданного внесення і створення геохімічних бар'єрів [12-13]. Глауконіт застосовується при реабілітації територій, уражених радіонуклідами, що мають

високе техногенне навантаження в результаті діяльності промислових підприємств. Завдяки досить високому вмісту двоокису калію (6-7%), і фосфор(V) оксиду (до 3%), глауконіт може використовуватися для отримання калійних добрив, або як природне добриво без переробки. Зокрема, внесення в ґрунт глауконітового борошна підвищує врожайність ряду зернових культур і картоплі на 10-20%, суттєво підвищує врожайність плодових дерев. Ведуться роботи по створенню нового природного органо-калійно-фосфорного добрива на основі глауконіту. Виявлено стимулюючий вплив глауконіту на розвиток корисної мікрофлори ґрунтів, що визначають їх родючість. Причиною цьому перш за все є високий вміст в глауконіті оксиду калію (від 5,0 до 9,5%), здатність його швидко руйнуватися в ґрунті з вивільненням калію у вигляді легко засвоюваних сполук. Реакційну здатність глауконіту можна істотно підвищити за допомогою термоактивації (нагрівання до температури 450°C і вище). Важливою обставиною є те, що в глауконітах нерідко в значних кількостях присутні мікроелементи (Mn, Cu, Co, Ni, B та ін.), А багато покладів глауконітових порід містять домішки P_2O_5 . Все це дає підставу розглядати глауконіти як природне мінеральне добриво, що дозволяє не тільки збагачувати ґрунт калієм, а й покращувати його структуру, зберігати вологу, стимулювати зростання і знижувати захворюваність рослин. Доведено високу здатність глауконіту до поглинання (сорбції) стронцію, цезію, плутонію, важких металів при очищенні ґрунтів і водойм. Висока поглинальна здатність глауконіту може бути використана для вирішення завдань інженерної геоecології щодо захисту навколишнього середовища від впливу різних екотоксикантів, здатних інтенсивно мігрувати в гідро- і геосфері і тим самим порушувати нормальний хід біохімічних процесів. Завдяки насиченому і стійкому зеленому забарвленню глауконіт використовується як природний пігмент (в станкового та олійного живопису і для виробництва зелених фарб в промислових цілях). Розроблено технологію отримання сухих фасадних фарб з глауконіту. Встановлено ефективність використання глауконіту в якості мінеральної підгодівлі в птахівництві і тваринництві. При вирощуванні біомаси хлорели, вирощуванні екологічно чистої продукції на забруднених, в тому числі радіонуклідами, ґрунтах і для ряду інших цілей. На рис. 2 зображено галузі застосування природного адсорбенту.



Рис. 2. Застосування глауконіту

Дослідження, проведені Українською академією сільськогосподарських наук показують, що використання добрив на базі глауконіту дозволяє збільшити урожайність зернових культур на 24 – 44%, овочів – на 25 – 40%. При цьому вирощується екологічно чиста продукція високої якості, зменшується захворюваність рослин, поліпшується стан ґрунтів.

Відповідно до сформульованих завдань, була розроблена програма досліджень (рис. 3.), яка складається з послідовних етапів, що спрямовані на реалізацію сформульованої задачі. Кожен етап включає ряд ключових заходів та методів аналізу, здійснення яких забезпечить ефективність реалізації програми та вирішення ключових завдань дослідження.

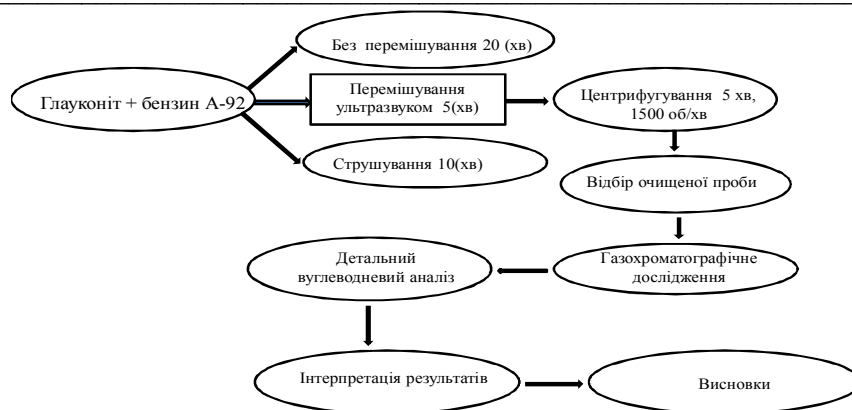


Рис. 3. Схема очищення вуглеводневих сумішей за допомогою природних сорбційних матеріалів на основі глауконіту

РФА (рентгенофлуоресцентний аналіз) - метод фізичного аналізу, який безпосередньо визначає практично всі хімічні елементи в порошкоподібних, рідких і твердих матеріалах. Метод дозволяє визначати дуже малі концентрації, на рівні ppm. Великі, до 100% проби, також піддаються дослідженням. У таблиці 1 наведено відсотковий вміст оксидів у глауконітовій породі, а в таблиці 2 - вміст мікроелементів

Табл. 1.

Відсотковий вміст оксидів у глауконітовій породі

Вид оксидів	Вміст у %
SiO ₂	80,68
TiO ₂	0,300
Al ₂ O ₃	4,78
Fe ₂ O ₃	2,79
FeO	1,30
MnO	<0,02
MgO	1,10
CaO	0,67
Na ₂ O	0,32
K ₂ O	2,99
P ₂ O ₅	0,07
H ₂ O ⁻	1,55
Сума	99,57

На електронно-мікроскопічних знімках (Рис.4) зображено характерну морфологію для даного глинистого мінералу, яка представлена шаруватою структурою у вигляді ізометричних тонко дисперсних плитчастих частинок. Для зразка природного глауконіту характерна структура більш аморфно-желеподібної маси. На СЕМ мікрофотографіях представлена характерна морфологія зразків глауконіту у вигляді безформених купчастих агрегатів, складених із дрібно дисперсних лускоподібних глинистих частинок [9]. Розміри глинистих агрегатів становлять від 2 до 10 мкм. В менших агрегатах глинисті кристаліти глауконіту проявляють еластичність.

Табл. 2.

Вміст мікроелементів у пробах глауконіту

Елемент	Au	Ag	As	Ba	Be	Bi	Br	Cd	Co	Cr
Вміст елементу, мкг/кг	<5	1,5	17	24	7	2	<1	0,9	19	206
Елемент	Sb	Sc	Se	Sr	Ta	Th	U	V	W	Y
Вміст елементу, мкг/кг	1,9	7,9	<3	23	<1	1,8	<0.5	148	<3	4
Елемент	Cs	Cu	Hf	Hg	Mo	Ni	Pb	Rb	S	Zn
Вміст елементу, мкг/кг	4	17	1,5	<1	<5	55	19	250	0,005	79
Елемент	Zr	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu	-
Вміст елементу, мкг/кг	55	1,7	6	<5	0,5	<0,1	<0,5	0,4	0,07	-

Для очищення нафтопродуктів у промисловості застосовують хімічні, фізико-хімічні і каталітичні методи [19-20]. У роботі використано природний, збагачений і термічно активований глауконіти Карачієвецького родовища (Вінковоцький р-н, Хмельницької області). Так, як пускові характеристики моторів у автомобілях залежать від якості палива, то важливим є їх очищення від небажаних компонентів [22-24]. Для експериментальних досліджень використано бензин неетильований А-92 (Укрнафта) [20].

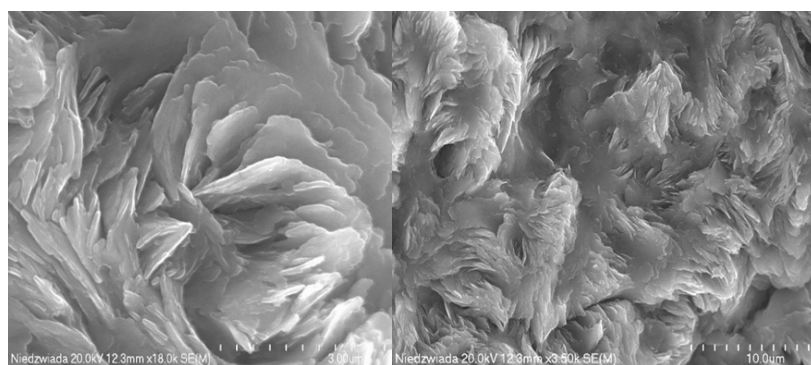


Рис.4. Мікрофотографії СЕМ зразка природного глауконіту (збільшення у 100000 разів)

Згідно ДСТУ 4839.2007, взято до уваги технічні умови, які полягають в наступному:

- 1) октанове число за дослідницьким методом (RON) -92,5
- 2) октанове число за моторним методом (MON)– 80,6
- 3) густина при 15°C – 0,743 кг/м³
- 4) тиск насичених парів: а) в літній період від 45,0 до 60,0 кПа; б) в зимовий період від 65,0 до 95,0 кПа.

Досліджуваний неетилований бензин марки А-92 досліджували з використанням газової хроматографії високого ступеня роздільності («Кристал 5000.2»), де у якості газу-носія використовували азот. Отримані результати обробляли у програмі «GAZOLIN». Результати хроматографічного дослідження бензину марки А-92 наведено на рисунку 5 у вигляді стовпчикової діаграми

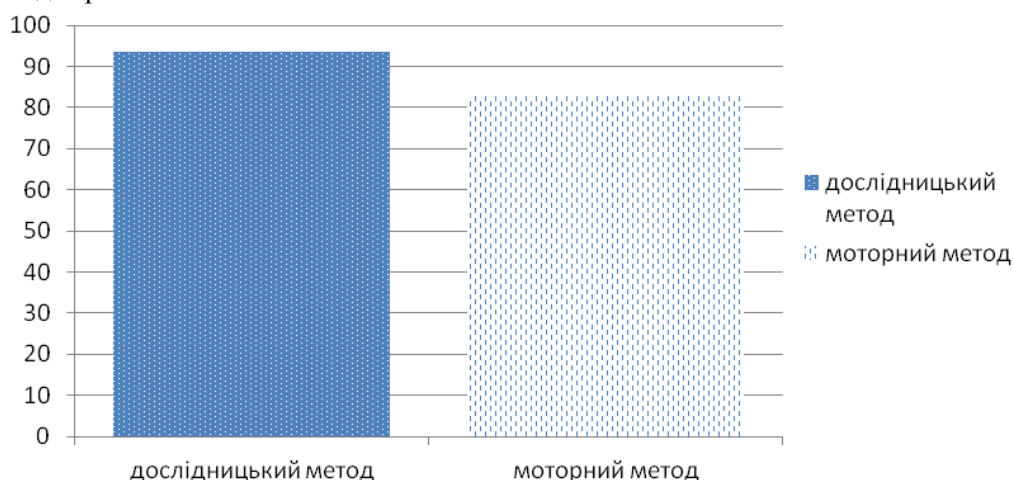


Рис. 5. Показники октанового числа за дослідницьким та моторним методами бензину марки А-92

Детальний вуглеводневий склад (у %) зразка бензину, що досліджений хроматографічно наведено на круговій діаграмі рисунку 6 :

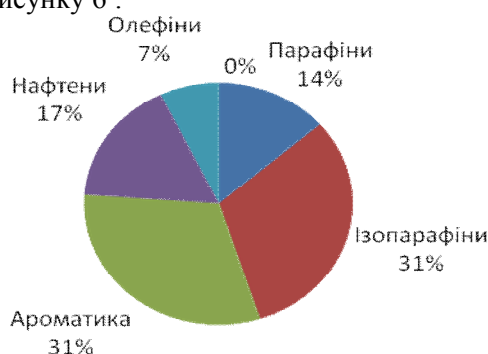


Рис. 6. Мольний вміст вуглеводнів у пробі досліджуваної вуглеводневої суміші

Середні показники молекулярної маси, відносної густини та тиску насиченої пари становлять відповідно 102,821 г/моль, 0,761 та 65,114 кПа. Залежність відгонки (у %) від температури представлена графічною залежністю на рисунку 6

Схема отримання мінерального сорбційного матеріалу на основі глауконітової породи включає такі послідовні операції: попередня сушіння матеріалу та подрібнення до порошкоподібного стану, фракціонування, термічна активація або збагачення за допомогою магнітної сепарації, сепарація твердої фази від розчину, промивання у декілька етапів теплою водою, охолодження обробленого матеріалу до кімнатної температури, термообробка протягом однієї або двох годин, гранулювання на грануляторі, спікання гранул, охолодження при кімнатній температурі.

Оптимальна температура термообробки складає 100 °С, оскільки за даними термогравіметричного аналізу, при цій температурі відбувається процес дегідратації глинистого матеріалу, під час якого видаляється фізично зв'язана вода. Оптимальна температура спікання становить 600 °С протягом двох годин. Цієї температури та часу обробки глинистого матеріалу достатньо, щоб спечені гранули тривалий час тримали форму у розчинах без руйнування, при менших температурах гранули розпадаються при тривалому контакті з розчином. За даними термогравіметричного аналізу, при температурі вище 600 °С починається процес дегідроксилації та руйнування структури глинистого мінералу. Сорбційні властивості гранульованого глауконіту вивчали в динамічних умовах у режимі твердофазової екстракції. За допомогою перистальтичного

насоса НП-1М вуглеводневу суміш пропустили з певною швидкістю через концентрувальний патрон, наповнений отриманим гранульованим сорбційним матеріалом. Відібрали гранули природного глауконіту діаметром від 0,200 до 0,400 мм, та масою наважки в межах від 1,0 до 1,5 г, які після цього помістили в концентрувальний патрон. Далі через нього пропустили вуглеводневу суміш з різною швидкістю від 5 до 8 мл/хв. Проскок нафтопродуктів визначали газохроматографічно. При цьому фіксували максимальне значення октанового числа за дослідницьким та моторним методами, що упродовж наступних змін швидкості подачі досліджуваного зразка нафтопродукту через концентрувальний патрон, не змінювалось.

Табл. 3.

Мольний вміст вуглеводнів у пробі досліджуваного бензину марки А-92

№ групи	Парафіни	Ізопарафіни	Ароматика	Нафтени	Олефіни	Всього
3	0,044	0,000	0,000	0,000	0,000	0,044
4	3,733	0,000	0,000	0,000	1,815	5,548
5	6,918	11,714	0,000	6,544	1,699	26,876
6	1,454	6,903	0,989	1,542	1,676	12,564
7	1,381	4,548	10,043	0,495	0,715	17,182
8	0,744	2,567	8,152	2,180	1,214	14,856
9	0,313	0,770	4,244	2,932	0,085	8,345
10	0,040	0,904	1,021	0,812	0,050	2,828
11	0,000	1,095	0,278	0,061	0,000	1,433
12	0,013	0,000	0,000	0,000	0,000	0,013
Всього	14,641	28,501	24,726	14,567	7,254	89,689

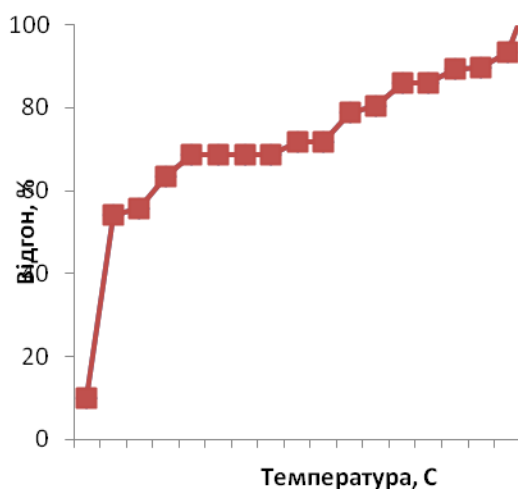


Рис. 7. Залежність відгонки (у %) від температури

Для дослідження стійкості глауконітового грануляту у зразках вуглеводневих сумішей використано два види зразків гранульованого природного глауконіту з різним часом та температурою спікання, а саме: гранульований природний глауконіт ($\tau=2$ год, $T=500$ °С), та ($\tau=1$ год, $T=400$ °С). Пробу гранульованого сорбційного матеріалу масою 1 г, помістили у вуглеводневу суміш. Далі органолептично спостерігали за зміною гранул сорбенту. Дослідження проводили в різному проміжку часу: перший протягом 10 діб та другий протягом 6 місяців.

Проаналізувавши результати хроматографічного дослідження бензину А-92 та порівнявши їх з ДСТУ 4839.2007 можна констатувати, що основні показники вуглеводневої суміші знаходяться в межах норми, що свідчить про добросовісність виробника нафтопродукту «Укрнафта».

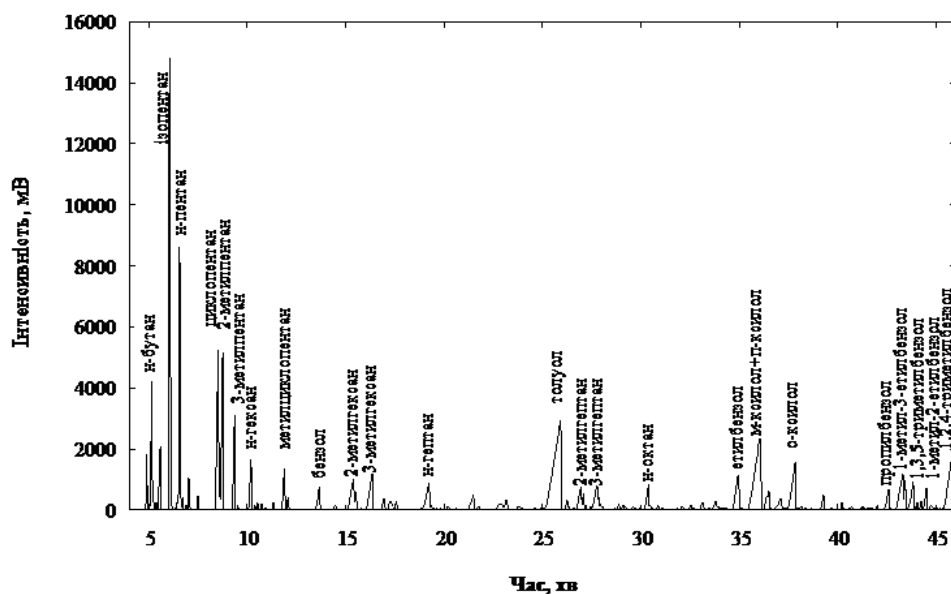


Рис.8. Фрагмент хроматограми бензину марки А-92

Висновки. За результатами, отриманими при проведенні досліджень, встановлено фракційний та елементний склад мінеральної сировини. Морфологія вихідних зразків глауконіту, представлена шаруватою структурою у вигляді ізометричних дрібно дисперсних плитчастих частинок. Зразки термічно активованого глауконіту відрізняються диспергованістю глинистих агрегатів та істотним збільшенням дрібних еластичних агрегатів кристалітів. При термічній активації глауконіту спостерігається зворотно-пропорційна залежність впливу температури на ефективність очищення вуглеводневих сумішей, а відповідно, як на показники ОЧ за дослідницьким та моторним методами, так і на тиск насиченої пари. Оптимальна температура обробки природного глауконіту становить 400°C, час обробки - 1 год. Доведено, що мінеральний сорбційний матеріал на основі глауконітової глини не змінює основних експлуатаційних характеристик палива, а використання бензинів, очищених за допомогою глини вирішить проблему зниження токсичних викидів автотранспорту в атмосферу. Отримані результати досліджень структурних, фізико-хімічних властивостей природних мінералів дозволяють розробити теоретичні та практичні основи цільової зміни комплексу специфічних властивостей, що задовольняють основні вимоги, які висуваються до сорбційних матеріалів.

Список використаних джерел:

1. Тарасевич Ю. И. Строение и химия поверхности слоистых силикатов / Ю. И. Тарасевич - К.: Наукова думка, 1988.- 248 с.
2. Тарасевич Ю. И. Природные сорбенты в процессах очистки воды / Ю. И. Тарасевич. – Киев : Наукова думка, 1981. – 208 с.
3. Сивий М. Я. Географія мінеральних ресурсів України : монографія / М. Я. Сивий, І. С. Паранько, Є. А. Іванов. – Львів : Простір М, 2013. – 683 с.
4. Грим Р. Э. Минералогия глин. / Р.Э. Грим // М.: Мир, 1977. – 358 с.
5. Грим Р. Э. Минералогия и практическое использование глин. / Р. Э. Грим // – М.: Мир, 1978. – 423 с.
6. Быков В. Т. Изменение структуры природных сорбентов под влиянием температурных и химических факторов. / В.Т. Быков, В. К. Матюхина // В сб. "Природные сорбенты Дальнего Востока". – М.: АН СССР, 1970. – 340 с.
7. Кулик М. Традиційні та нетрадиційні мінерали у тваринництві / М. Кулик, І. Величко, Т. Засуха. – Київ : Сільгоспосвіта, 1995. – 248 с.
8. Андронов С.А. Глауконит – минерал будущего / С.А. Андронов, В.И. Быков // Мат. первой Международ. конф. "Значение промышленных минералов в мировой экономике: месторождения, технология, экономическая оценка". – М.: ГЕОС, 2006, с. 79-83.
9. Дистанов У. Г. Глаукониты / Природные сорбенты СССР. – М., 1990, с. 132-146.
10. Канцельсон Ю. Я. Глауконит содержащие микроконкреции как поглотители

- радионуклидов / Ю. Я. Канцельсон, О. М. Алексаньян, А. М. Волошина // Минералогия и геохимия глауконита. – Новосибирск, 1981, с. 80-89.
11. Левченко М.Л. Глаукониты Центрального месторождения: типоморфные особенности, результаты минералого-технологических исследований / 12. М.Л. Левченко, Н. Г. Патык-Кара, Е. А. Андрианова. – М.: МИСиС: Сб. тезисов VI конгресса обогатителей стран СНГ. – 2007, т. 2, с. 77-79.
12. Миловский А.В. Минералогия и петрография. / М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр, 1958, с. 83-88.
13. Сухарев И. Ю., Черногорова А. Е., Кувыкина Е. А. Особенности структуры и сорбционно-обменные свойства глауконита Багарякского месторождения. / Известия Челябинского научного центра УрО РАН, 1999, №3, с. 64-69
14. Ахназарова С. Л. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. – Москва : Высшая школа, 1978. – 319 с.
15. Пилипенко А. Ионнообменное концентрирование и атомно-абсорбционное определение микроэлементов / А. Пилипенко // Украинский химический журнал. – 1979. – № 45. – С. 995.
16. Дриц В. А. Проблемы определения реальной структуры глауконитов и родственных тонкодисперсных силикатов. - М.: "Наука", 1993
17. Градус Л. Я. Руководство по дисперсионному анализу методом микроскопии / Л. Я. Градус. – Москва : Химия, 1979. – 232 с.
18. Степова К.В. Хемосорбція гідрогенсульфіду модифікованими природними сорбентами: автореф. на здобуття наук.ступеня канд. 300 техн. наук : спец. 05.17.08 – «Процеси та обладнання хімічної технології» / К.В. Степова. - Львів.: 2011.– 20с.
19. Пат. 2055637 Российская Федерация, МПК В 01 J 20/16, С 02 F 1/28. Способ получения гидрофобного адсорбента для извлечения нефтепродуктов из водных сред / Ю. И. Тарасевич, С. В. Бондаренко, А. В. Назаренко, Л. К. Патюк, К. А. Забела ; заявитель и патентообладатель Институт коллоидной химии и химии воды им. А. В. Думанского АН Украины. – № 4919467/26 ; заявл. 18.03.91 ; опубл. 10.03.96.
20. Пат. № 2247935 Российская Федерация, МПК С 02 F 1/28, В 01 J 20/30. Способ получения гидрофобного адсорбента для очистки природных и сточных вод от нефтепродуктов / Л. А. Николаева, М. А. Голубчиков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет». – № 2010144232/05 ; заявл. 28.10.2010 ; опубл. 20.04.12.
21. Structural, Mineral and elemental composition features of iron-rich saponite clay from Tashkiv deposit (Ukraine) / Н. Sokol, М. Sprynskyu, А. Ganzjuk та ін. // Colloids and Interfaces. – 2019. – №3. – Р. 10.
22. 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.
23. Сокол Г. М. Структурна модифікація сапонітових глин кислотною обробкою / Г. М. Сокол // Наукові нотатки. – 2017. – Вип. 56. – С. 149-153.
24. 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), А. Ganzjuk, Ch. Ganzjuk // Abstracts: Workshop with Nobel Prize Winner Professor Erwin Neher. Progress in biomedicine and neuromedicine. Poland, Cracow, 21–23 June. – 2015. – Р. 115-116.86-191.

УДК 539.2: 536.421.1

DOI 10.36910/775.24153966.2021.72.31

Ж.Р. Олексин¹, Л.І. Никируй¹, Р.С. Яворський¹, І.В. Малярська¹, О.М. Матківський¹,
О.В. Замуруєва², С.А. Федосов²

¹Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника

²Волинський національний університет імені Лесі Українки

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ БУФЕРНОГО ШАРУ НА ВЛАСТИВОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ КОМІРКИ

У статті теоретично продемонстровано високоефективні сонячні батареї на основі телуриду кадмію (CdTe) з подвійним гетеропереходом (DHSC) з додаванням, окремо, шару заднього контакту (BSF) селеніду кадмію (CdSe) і селеніду сурми (Sb₂Se₃), за допомогою програмного забезпечення SCAPS 3.3.09. Детально досліджено вплив вихідних параметрів на фотоелектричні характеристики проектованої гетероструктури. Встановлено, що ефективність перетворення енергії (PCE) сонячної батареї CdTe значно підвищується за рахунок використання шарів BSF CdSe та Sb₂Se₃. Коефіцієнт корисної дії сонячного елемента CdTe збільшується з 14,57%, для чистих SC, до 24,13% при значеннях $V_{oc}=1,03$ В, $J_{sc}=28,26$ мА/см² і $FF=82,97\%$, завдяки використанню шару BSF CdSe. З іншого боку, ефективність сонячного елемента CdTe підвищується до 25,16% при $V_{oc}=1,06$ В, $J_{sc}=28,25$ мА/см² і $FF=83,26\%$, відповідно при використанні шару BSF Sb₂Se₃. Ці результати показують, що і CdSe, і Sb₂Se₃ є перспективними BSF для виготовлення економічно ефективних сонячних елементів з подвійним гетеропереходом на основі CdTe.

Ключові слова: сонячні батареї, SCAPS, тонкі плівки, гетероструктури, телурид кадмію, селенід кадмію, селенід сурми.

Ж.Р. Олексин, Л.И. Никируй, Р.С. Яворский, И.В. Малярска, О.М. Матковский,
О.В. Замуруева, С.А. Федосов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ БУФЕРНОГО СЛОЯ НА СВОЙСТВА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ

В статье теоретически продемонстрированы высокоэффективные солнечные батареи на основе теллурида кадмия (CdTe) с двойным гетеропереходом (DHSC) с добавлением отдельно слоя заднего контакта (BSF) селенида кадмия (CdSe) и селенида сурьмы (Sb₂Se₃), с помощью программного обеспечения SCAPS 3.3.09. Подробно исследовано влияние выходных параметров на фотоэлектрические характеристики проектируемой гетероструктуры. Установлено, что эффективность преобразования энергии (PCE) солнечной батареи CdTe значительно повышается за счет использования слоев BSF CdSe и Sb₂Se₃. Коэффициент полезного действия солнечного элемента CdTe увеличивается с 14,57%, для чистых SC, до 24,13% при значениях $V_{oc}=1,03$ В, $J_{sc}=28,26$ мА/см² и $FF=82,97\%$, благодаря использованию шара BSF CdSe. С другой стороны, эффективность солнечного элемента CdTe повышается до 25,16% при $V_{oc}=1,06$ В, $J_{sc}=28,25$ мА/см² и $FF=83,26\%$ соответственно при использовании слоя BSF Sb₂Se₃. Эти результаты показывают, что и CdSe, и Sb₂Se₃ перспективны BSF для изготовления экономически эффективных солнечных элементов с двойным гетеропереходом на основе CdTe.

Ключевые слова: солнечные батареи, SCAPS, тонкие пленки, гетероструктуры, теллурид кадмия, селенид кадмия, селенид сурьмы.

Z. Oleksyn, L. Nykyruy, R. Yavorskyi, I. Malyars'ka, O. Matkivskiy, O. Zamurujeva, S. Fedosov

SIMULATION OF INFLUENCE OF BUFFER LAYER PARAMETERS ON PHOTOELECTRIC CELL PROPERTIES

The article theoretically demonstrates high-performance solar cells based on cadmium telluride (CdTe) with double heterojunction (DHSC) with the addition of a separate back contact layer (BSF) of cadmium selenide (CdSe) and antimony selenide (Sb₂Se₃), using software SCAPS 3.3.09. The influence of initial parameters on the photoelectric characteristics of the designed heterostructure is investigated in detail. It is established that the energy conversion efficiency (PCE) of the CdTe solar battery is significantly increased due to the use of BSF CdSe and Sb₂Se₃ layers. The efficiency of the solar cell CdTe increases from 14.57%, for pure SC, to 24.13% at $V_{oc}=1.03$ V, $J_{sc}=28.26$ mA/cm² and $FF=82.97\%$, due to the use of the BSF CdSe layer. On the other hand, the efficiency of the solar cell CdTe increases to 25.16% at $V_{oc}=1.06$ V, $J_{sc}=28.25$ mA/cm² and $FF=83.26\%$, respectively, when using the BSF layer Sb₂Se₃. These results show that both CdSe and Sb₂Se₃ are promising BSFs for the fabrication of cost-effective solar cells with a double heterojunction based on CdTe.

Keywords: solar panels, SCAPS, thin films, heterostructures, cadmium telluride, cadmium selenide, antimony selenide.

Вступ. Глобальна енергетична криза та стрімкий ріст використання електричної енергії у повсякденному житті є серйозними проблемами, які спричинили підвищений інтерес науковців до вивчення альтернативних джерел енергії [1-2]. За останні кілька десятиліть стрімко почала розвиватись сонячна енергетика, яка має більше перспектив аніж інші відновлювальні джерела енергії. На даний час, фотоелектричне перетворення сонячної енергії дає значний внесок у виробництво електроенергії в багатьох країнах, причому понад 90% світового ринку

© Ж.Р. Олексин, Л.И. Никируй, Р.С. Яворський, І.В. Малярська, О.М. Матківський, О.В. Замуруєва,
С.А. Федосов

фотоелектричної енергії покладається на, кремнієві сонячні батареї першого покоління, оскільки це стабільний, нетоксичний і добре відомий матеріал [3-5]. Сучасний стан лабораторних досліджень спрямований на здешевлення технології, а відповідно і кінцевої вартості продукції при підвищенні ефективності фотоелектричних модулів [6-7]. Найкращі значення ефективності кремнієвих сонячних елементів на теперішній час становлять 26,7%. [8-9]. Однак кремній є непрямозонним напівпровідником з відносно слабким коефіцієнтом поглинання світла, його запаси є вичерпними. Близько 40% вартості кінцевої панелі обходиться шліфування і підготовка кремнію, а впродовж 10 років використання, ефективність такого модуля падає вдвічі [10]. Для здешевлення технології виробництва стрімко почали розвиватись тонкоплівкові сонячні елементи. Такі модулі на їх основі показали конкурентноспроможні властивості в порівнянні із кремнієвими, при значно менших товщинах матеріалу [11]. Структура тонкоплівкового сонячного елемента другого покоління (2G), заснована на CdTe і CIGS (Copper Indium Gallium Selenide), показує високі значення коефіцієнта поглинання у видимому діапазоні спектру.

Межа, до якої може наблизитися ефективність сонячної комірки, залежить від властивостей матеріалу (ширина забороненої зони) та ряду факторів, як наприклад, геометрія, кут падіння сонячного випромінювання, коефіцієнт поглинання сонячної енергії та ін. Серед важливих чинників потрібно вказати на врахування частки рекомбінації між дірками та електронами, що призводить до випромінювання. Випромінювальна рекомбінація встановлює верхню межу часу життя неосновних носіїв, який розраховують із використанням принципу детальної рівноваги. Відповідно до такої постановки задачі, у [12] показано, що ліміт ефективності фотоелектричної комірки на основі абсолютно чорного тіла може становити у межах 30 %. Такі ж значення показують і інші роботи [13]. Використання нанодротів у якості тонкоплівкових сонячних елементів дозволяє розширити цю межу до 40%, однак, у таких структурах вже технологічно реалізовано методику концентрації випромінювання [14].

Ефективність сонячного перетворювача, за допомогою систем концентраторів чи відбивачів, в принципі можна довести навіть до термодинамічної межі (Th-Tc)/Tc [15]. Планарний сонячний елемент без концентраторів випромінювання не може наблизитися до таких значень. Тому повідомлення про високі значення ефективності деколи можуть викликати певні сумніви [16]. Однак, без сумніву, використання гетероструктур з різними матеріалами за структурою та значенням ширини забороненої зони є перспективним для розвитку фотоелектричних систем 2-ої генерації та спонукає шукати нові композиції.

У цій статті досліджено високоефективний сонячний елемент із подвійним гетеропереходом на основі абсорбційного шару CdTe шляхом імітаційного підходу, щоб відповідати критеріям проектування сонячних елементів з використанням професійного апарату комп'ютерного моделювання SCAPS-1D (Solar Cell Capacitance Simulator). На сьогодні CdTe є одним з найбільш перспективних матеріалів, на основі яких можна отримати високоефективні тонкоплівкові фотоелементи [8]. Ефективність фотоперетворення, яка спостерігалася для нього становить $\eta \geq 21,0\%$ з напругою розімкнутого кола >1 В [17, 18]. Сонячні елементи на основі CdTe досягли світового ринку фотоелектричної енергії з часткою $\sim 5,1\%$, і він вважається другим економічно ефективним матеріалом після кремнію [8, 19]. Є дослідження, які вказують, що модуль сонячних елементів CdTe має ефективність 18% із використанням $\text{Mg}_{\text{x}}\text{Zn}_{1-\text{x}}\text{O}$ (MZO) як віконного шару замість CdS [20]. У [21] було передбачено, що ефективність сонячних елементів на основі CdTe може бути додатково підвищена до 28,04% за допомогою дірково-транспортного шару оксиду нікелю NiO.

Високопровідну тонку плівку CdSe та Sb_2Se_3 представляємо у дослідженні окремо як буферний шар (BSF) для підвищення ефективності сонячних елементів із гетеропереходом CdS/CdTe. CdSe є напівпровідником II-VI n-типу з прямою забороненою зоною 1,7 eV [22]. Він широко використовується у світловипромінюючих діодах, сонячних елементах, а також фотоелектрохімічних елементах [203]. Тонкі плівки CdSe можна осаджувати різними методами: фізичне осадження з парової фази, напилення, піролізне розпилення, електроосадження тощо [24-27]. Фізичне осадження з парової фази для цього матеріалу часто використовується, оскільки воно дає багато можливостей для модифікації параметрів осадження та отримання плівок із визначеною структурою та властивостями. Теплове випаровування під вакуумом за допомогою техніки квазізамкнутого об'єму є одним з найбільш вигідних методів отримання однорідних плівок CdSe. На даний час CdSe в основному використовувався в якості віконного шару, як альтернатива CdS, в

сонячних елементах CdTe [22]. Проте майже немає інформації про високолегований р-тип CdSe як шар BSF в сонячних елементах CdTe.

Селенід сурми (Sb_2Se_3) є неорганічним напівпровідником р-типу з ромбічною фазою [28]. Для нього характерні прямі оптичні переходи у забороненій зоні в діапазонах 1,0–1,5 eV [29] і 1,2–1,9 eV [30] залежно від методу осадження та умов легування. Він має рухливість дірок до $42 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ і високий коефіцієнт поглинання ($>10^5 \text{ cm}^{-1}$) [31]. Ці фізичні параметри зробили Sb_2Se_3 придатним поглинаючим шаром для застосування у фотовольтаїці. Концентрацію носіїв р-типу Sb_2Se_3 можна збільшити шляхом легування S, Sn, Cu тощо [32]. Найвищий ККД виготовлених сонячних елементів з Sb_2Se_3 як поглинаючого шару показує ефективність 9,2% [33]. Проте існує дуже мало повідомлень про використання матеріалу Sb_2Se_3 як шару BSF.

У цій роботі теоретично показано вплив різних фізичних параметрів шарів CdS, CdTe, CdSe та Sb_2Se_3 на фотоелектричні параметри змодельованих сонячних елементів ITO/CdS/CdTe/CdSe (або ITO/CdS/CdTe/ Sb_2Se_3). Це дослідження показує, що включення буферних шарів CdSe та Sb_2Se_3 є перспективним для високоефективних сонячних елементів із подвійним гетеропереходом CdS/CdTe.

Методологія досліджень. Сонячні елементи з гетеропереходом CdS/CdTe були змодельовані за допомогою програмного забезпечення SCAPS 3.3.09 з урахуванням змінних параметрів, як описано в інших джерелах [10, 33]. Симуляційний пакет SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator) створений для модельних розрахунків тонкоплівкових сонячних елементів [34, 35]. Програмне середовище використовує метод дрейфу-дифузії, який працює на основі математичного розв'язку рівняння Пуассона та рівнянь неперервності для вільних електронів і вільних дірок [36]. Тому він може враховувати вплив зміщення смуги, рухливості носіїв, концентрації легування та ширину забороненої зони. Для проведення моделювання спроектованої структури сонячного елемента в середовищі SCAPS використовували світловий спектр AM 1,5 та потужність випромінювання 1000 Вт/м^2 при температурі 300 К. ITO та Mo були використані як передній та задній контакти.

Оптична ширина забороненої зони, коефіцієнт поглинання, концентрація носіїв та інші вхідні параметри, які використані при моделюванні структури сонячного елемента, брали з дослідницьких робіт [37, 38, 39], або обчислені експериментально. Властивості матеріалу для кожного шару сонячного елемента з гетеропереходом CdS/CdTe наведені в таблицях 1 та 2. З таблиць також видно, що при моделюванні враховано значну кількість дефектів інтерфейсу, щоб мати більш реалістичний пристрій.

Табл. 1.

Параметри моделювання використані для сонячних елементів з подвійним гетеропереходом n-CdS/p-CdTe/p⁺-CdSe або n-CdS/p-CdTe/p⁺- Sb_2Se_3 при 300 К

Параметри	ITO	n-CdS	p-CdTe	CdSe	Sb_2Se_3
Товщина, нм	50	100*	1500*	100*	100*
Ширина забороненої зони, eV	3,6	2,42	1,5	1,7	1,53
Спорідненість до електрона, eV	4,5	4,3	4,28	3,93	4,04
Діелектрична проникність (відн.)	8,9	9,35	10,3	9,5	18,0
Ефективна густина станів зони провідності, cm^{-3}	$2,2 \cdot 10^{18}$	$2,2 \cdot 10^{18}$	$9,2 \cdot 10^{17}$	$2,8 \cdot 10^{18}$	$2,2 \cdot 10^{18}$
Ефективна густина станів валентної зони, cm^{-3}	$1,8 \cdot 10^{19}$	$1,8 \cdot 10^{19}$	$5,2 \cdot 10^{18}$	$1,2 \cdot 10^{19}$	$1,8 \cdot 10^{19}$
Теплова швидкість електронів (см/с)	$1,0 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^7$
Теплова швидкість дірок (см/с)	$1,0 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^7$
Рухливість електронів, $\text{cm}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	$5,0 \cdot 10^1$	$1,0 \cdot 10^2$	$3,2 \cdot 10^2$	$0,593 \cdot 10^1$	$1,5 \cdot 10^1$
Рухливість дірок, $\text{cm}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	$1,0 \cdot 10^1$	$2,5 \cdot 10^1$	$4,0 \cdot 10^1$	$2,5 \cdot 10^1$	$5,1 \cdot 10^0$
N_D , cm^{-3}	$1,0 \cdot 10^{21}$	$1,15 \cdot 10^{17*}$	0	$1,0 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^7$
N_A , cm^{-3}	0	0	$1,0 \cdot 10^{16*}$	$1,0 \cdot 10^{19*}$	$1,0 \cdot 10^{19*}$
Коефіцієнт радіаційної рекомбінації ($\text{cm}^3/\text{с}$)	$2,3 \cdot 10^{-11}$	$2,3 \cdot 10^{-9}$	$2,3 \cdot 10^{-9}$	$2,3 \cdot 10^{-9}$	$2,3 \cdot 10^{-9}$

Табл. 2.

Параметрів дефектів на інтерфейсі, що використовуються при моделюванні

Параметри	Інтерфейс CdS/CdTe	CdTe/ CdSe або інтерфейс Sb ₂ Se ₃
Тип дефекту	Нейтральний	Нейтральний
Поперечний переріз захоплення електронів (см ²)	$1 \cdot 10^{-19}$	$1 \cdot 10^{-19}$
Поперечний переріз захоплення дірок (см ²)	$1 \cdot 10^{-19}$	$1 \cdot 10^{-19}$
Енергетичне положення дефекту E _t	Вище найвищого E _v	Вище найвищого E _v
Рівень енергії щодо еталонного (eV)	0,250	0,250
Загальна густина (см ⁻²)	$1,0 \cdot 10^{14}$	$1,0 \cdot 10^{14}$

«*» позначає змінні параметри.

Обговорення результатів.

1. Вплив поглинального та віконного шару на PV параметри CdS/CdTe сонячного елемента без шару BSF

1.1. Вплив товщини та концентрації носіїв поглинаючого шару CdTe

На першому етапі проведено дослідження впливу товщини шару поглинач CdTe та концентрації носіїв на продуктивність сонячних елементів CdS/CdTe. На рис. 1 показані залежності фотоелектричних характеристик сонячного елемента CdS/CdTe від товщини шару поглинач при сталій концентрації носіїв 10^{16} см^{-3} . Оптимальна товщина шару CdS складала 100 нм і залишалась незмінною впродовж зміни параметрів моделювання, а товщину шару CdTe змінювали у діапазоні 250 – 2000 нм. На рис. 1 добре видно, що фотоелектричні параметри: напруга розімкнутого кола (V_{oc}), густина струму (J_{sc}) і коефіцієнт заповнення (FF) зростають із збільшенням товщини шару CdTe від 250 нм до 1500 нм, отже, і ефективність фотоперетворення η зростає з $\sim 5,75\%$ до $\sim 14,57\%$. При подальшому збільшенні товщини поглинаючого шару від 1500 нм до 2000 нм параметри комірки J_{sc} , V_{oc} та FF мають тенденцію залишатися практично постійними при незначній зміні значення ефективності в межах $\sim 1\%$. Спостерігається, що чим вище значення товщини шару CdTe, тим вище значення η . Але завданням даного дослідження є мінімізувати об'єми кінцевого пристрою, тому максимально допустиме значення товщини шару CdTe було встановлено 1500 нм з $\eta = 14,57\%$.

На рис. 2 показано вплив концентрації носіїв шару поглинач CdTe в діапазоні від 10^{12} до 10^{17} см^{-3} для дослідження продуктивності комірки з сталою товщиною шару 1500 нм. На рисунку добре видно, що із збільшенням концентрації носіїв CdTe, значення V_{oc} і FF, а отже, ефективність перетворення енергії (power conversion efficiency (PCE)) гетеропереходу CdS/CdTe збільшується до $\sim 15,45\%$ і потім має тенденцію бути постійним, де J_{sc} незначно зменшується. Це пов'язано зі збільшенням рекомбінації серед численних носіїв по всій плівці зі збільшенням концентрації носіїв понад 10^{14} см^{-3} . При більших концентраціях носіїв у шарі поглинач CdTe розсіювання домішок і швидкість рекомбінації носіїв збільшуються. Таким чином, транспортування дірок пригнічується на шарі поглинач CdTe до буферного шару CdSe або Sb₂Se₃. Враховуючи ці ефекти, було враховано граничний рівень концентрації носіїв шару поглинач CdTe, який становив 10^{16} см^{-3} . З іншого боку, дефекти дислокацій та меж зерен, діють як центр захоплення носіїв, що зменшує час життя носіїв. Отже, густина розподілу дефектів є одним із критичних параметрів для проектування фотоелементів.

На рис. 3, представлена крива квантової ефективності (QE) з відповідною товщиною, виявляється цей подібний наслідок для товщини CdTe 250–2000 нм. Тому для подальшого дослідження шару BSF CdSe і Sb₂Se₃ було обрано оптимальну товщину CdTe $\sim 1500 \text{ нм}$ з $\eta \sim 21\%$.

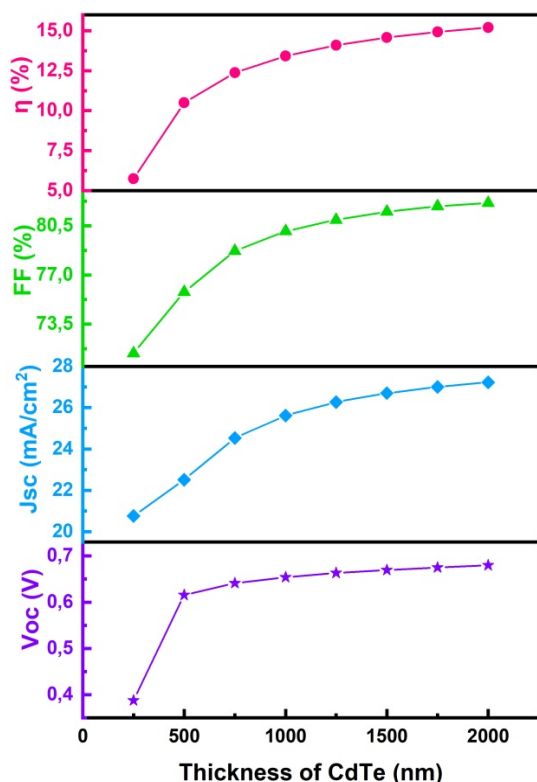


Рис. 1. Зміна вихідних параметрів V_{oc} , J_{sc} , FF та η для гетеропереходу CdS/CdTe як функції товщини поглинаючого шару CdTe ($d_{CdTe} = 250-2000$ nm)

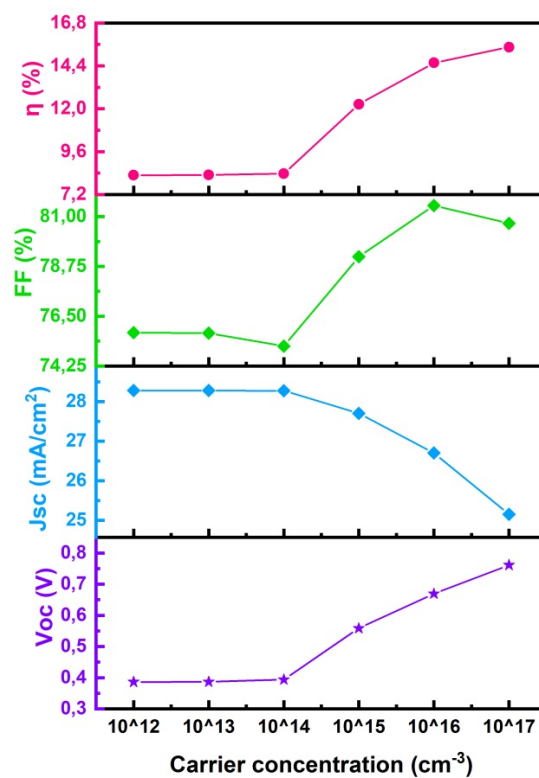


Рис. 2. Зміна вихідних параметрів V_{oc} , J_{sc} , FF та η для гетеропереходу CdS/CdTe як функції концентрації носіїв поглинаючого шару CdTe

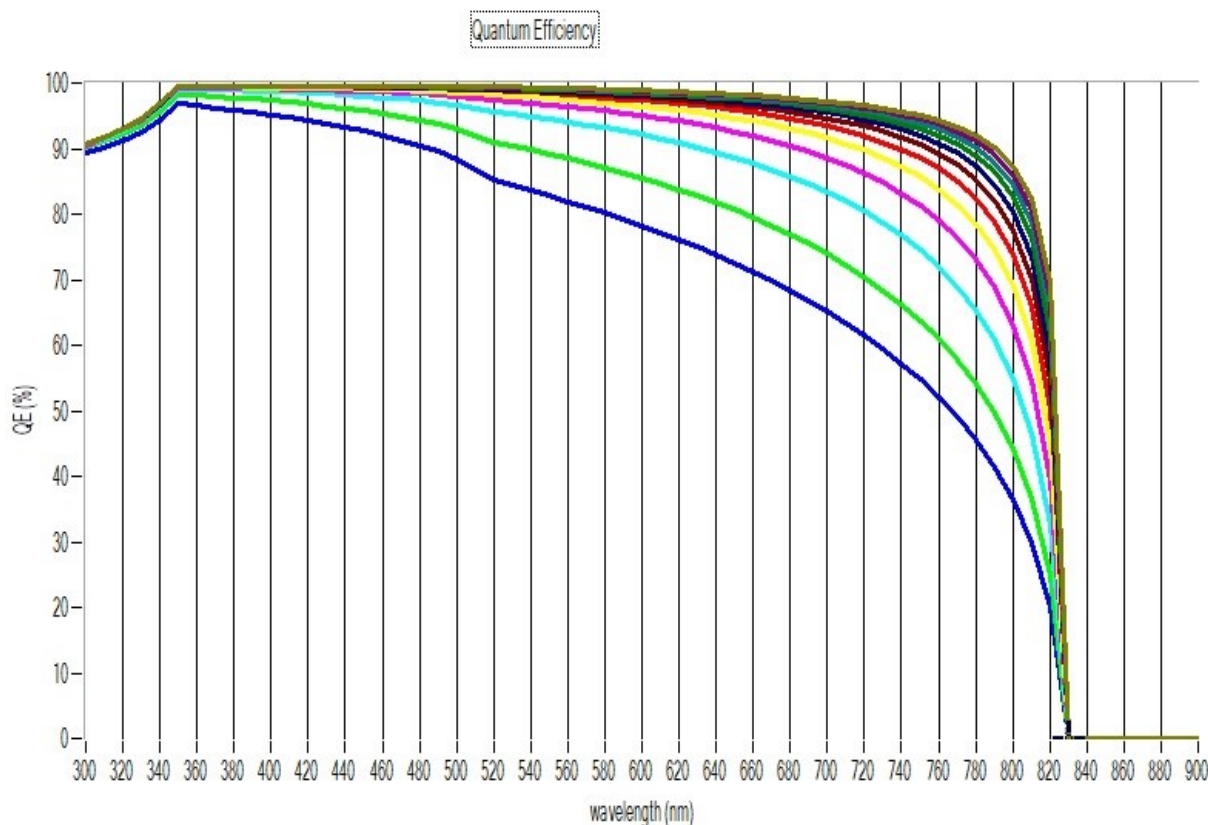


Рис. 3. Залежність квантової ефективності від товщини абсорбційного шару

1.2. Вплив товщини та концентрації носіїв віконного шару CdS.

На рис. 4 і 5 показано вплив товщини та концентрації носіїв віконного шару CdS на фотоелектричні характеристики сонячних елементів CdS/CdTe відповідно. Товщина шару CdS варіювалася від 50 до 350 нм. З рис. 4 видно, що J_{sc} зменшується з $\sim 26,71$ до $\sim 26,06$ mA/cm^2 зі збільшенням товщини віконного шару від 50 до 350 нм. Ефективність η зменшується з 14,57 до 14,33% зі збільшенням товщини віконного шару з 50 до 350 нм. У цьому дослідженні було обрано оптимальну товщину шару вікна CdS 100 нм.

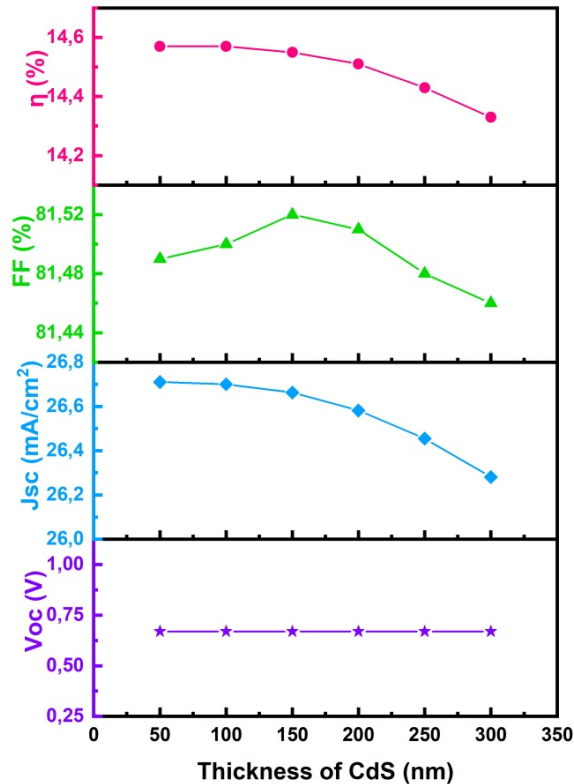


Рис. 4. Зміна вихідних параметрів V_{oc} , J_{sc} , FF та η для гетеропереходу CdS/CdTe як функції товщини віконного шару CdS ($d_{CdS} = 50\text{-}300$ nm)

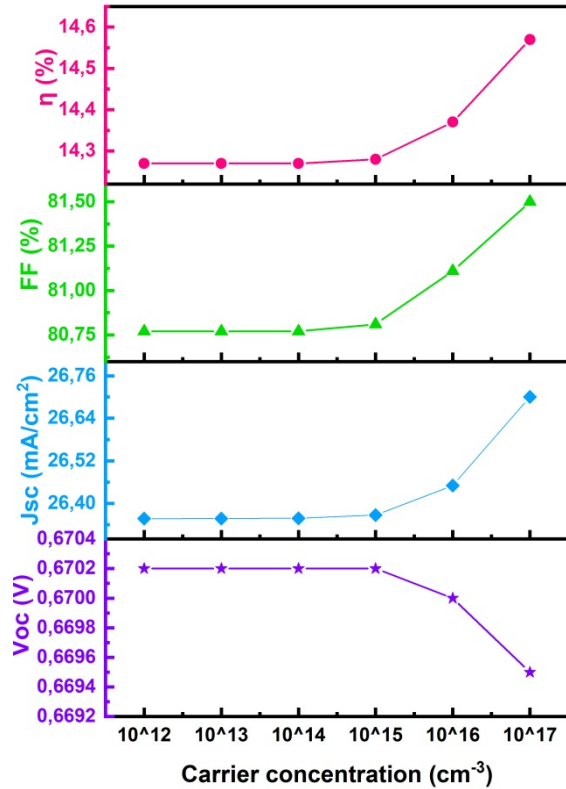


Рис. 5. Зміна вихідних параметрів V_{oc} , J_{sc} , FF та η для гетеропереходу CdS/CdTe як функції концентрації носіїв віконного шару CdS

1.3. Вплив BSF шару CdSe на продуктивність сонячного елемента

Для вивчення впливу додавання шару CdSe було досліджено роботу комірки при різних товщині та концентрації носіїв CdSe на CdS/CdTe/CdSe подвійного гетероперехідного сонячного елемента (dual-heterojunction solar cells (DHJSC)). На рис. 6 при збільшенні товщини шару CdSe від 50 нм до 300 нм V_{oc} показує постійну величину. Як показано на рис. 6, J_{sc} незначно змінюється від 28,261 до 28,262 mA/cm^2 із збільшенням товщини від 50 до 200 нм, а потім має тенденцію бути постійною величиною до 300 нм. З рис. 7 встановлено, що найвищий ККД CdS/CdTe сонячних елементів становить 24,13 % з $V_{oc}=1,03$ В, $J_{sc}=28,26$ mA/cm^2 і $FF=82,97\%$ з концентрацією носіїв 10^{19} cm^{-3} .

1.4. Вплив BSF шару Sb_2Se_3 на продуктивність сонячного елемента

Розглянуто моделювання впливу товщини та концентрації носіїв буферного шару Sb_2Se_3 на фотоелектричні параметри сонячного елемента CdS/CdTe. Відповідні залежності наведено на рис. 8 та 9. На рис. 8 товщину шару Sb_2Se_3 змінювали від 50 нм до 300 нм, напруга холостого ходу V_{oc} , густина струму короткого замикання J_{sc} при значеннях товщини шару більше 100 нм залишалися незмінними. Ефективність досягає свого максимального значення при $d_{CdSe} = 100$ нм і далі при збільшенні товщини шару змінюється несуттєво, одночасно значення фактору заповнення має тенденцію до спадання.

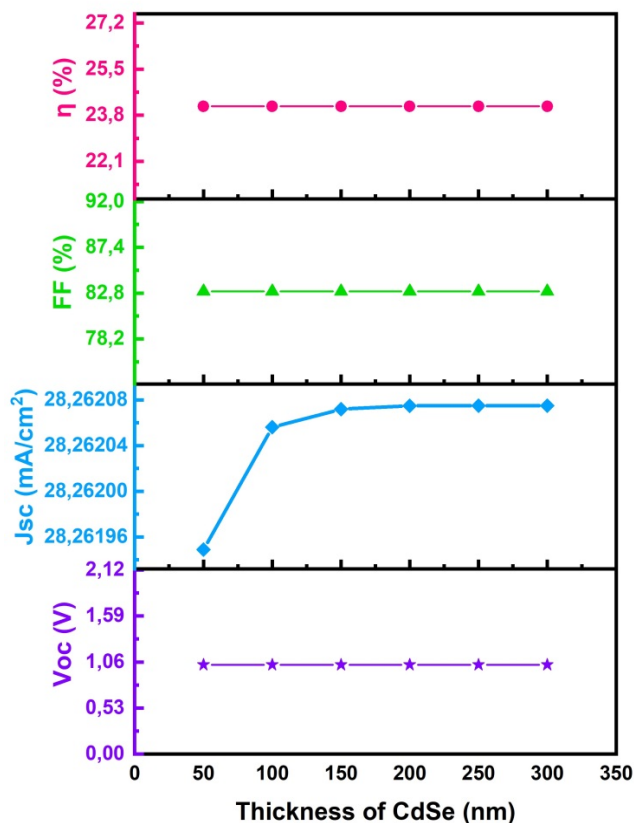


Рис. 6. Зміна вихідних параметрів V_{oc} , J_{sc} , FF та η сонячних елементів CdS/CdTe залежно від товщини BSF шару CdSe ($d_{CdSe} = 50-350$ нм)

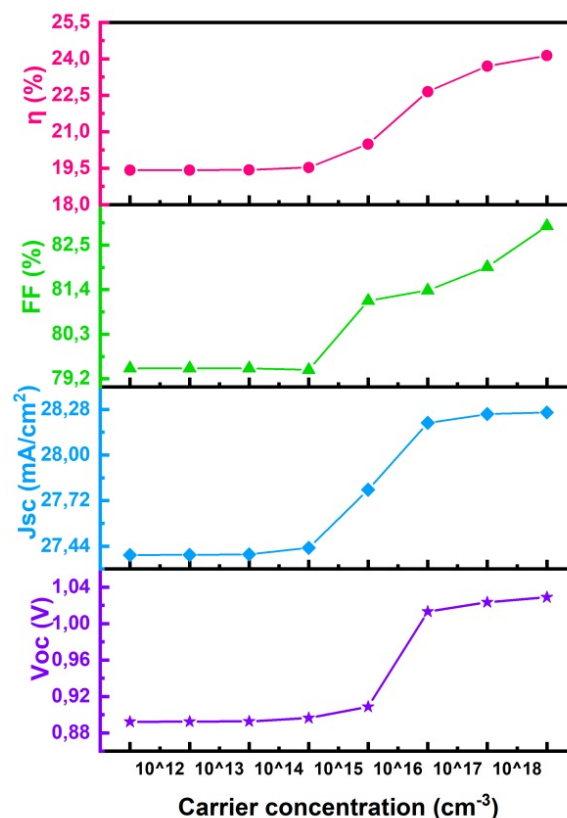


Рис. 7. Зміна вихідних параметрів V_{oc} , J_{sc} , FF та η сонячних елементів CdS/CdTe залежно від концентрації носіїв BSF шару CdSe

Як видно з рис.9, концентрацію носіїв шару Sb_2Se_3 змінюють від 10^{12} до 10^{19} cm^{-3} . Густина струму короткого замикання J_{sc} та напруга холостого ходу V_{oc} збільшуються із збільшенням концентрації носіїв шару $Sb_2Se_3 > 10^{15}$ cm^{-3} і майже не змінюється для товщини шару BSF ≥ 150 нм. Таке різке поліпшення фотоструму пов'язане з поглинанням фотонів більшої довжини хвилі і, отже, створенням більшої кількості пар електрон-дірка. Як добре видно з рис. 8, коли концентрація носіїв Sb_2Se_3 становить $\sim 10^{16}$ cm^{-3} , навіть товщина шару Sb_2Se_3 близько 50 нм забезпечує різке підвищення густини струму насичення фотоелемента до 28,2460 mA/cm^2 , V_{oc} 1,0674 В і FF 83,413.

1.5. Вплив концентрації дефектів на інтерфейсі на продуктивність фотоелектричної елемента

Інженерія інтерфейсу одна з найважливіших частин фотоелектричної технології. На рис. 10, 11 та 12 показані характеристики сонячних батарей для відповідної концентрації дефектів на інтерфейсі від 10^{11} – 10^{17} cm^{-2} для різних поверхонь CdS/CdTe, CdTe/CdSe та CdTe/ Sb_2Se_3 у відповідних сонячних елементах. Зазвичай дефект, який існує на межі розділу, збільшує ймовірність захоплення носіїв і послідовний опір комірки. Спостерігається несуттєвий вплив густини розподілу дефектів на межі розділу двох шарів до значення 10^{14} cm^{-2} , тоді як більша концентрація дефектів помітно впливає на вихідні параметри. На рис. 10 показано вплив концентрації дефектів на інтерфейсі CdS/CdTe для сонячної батареї ITO/CdS/CdTe, тобто структури без будь-якого BSF шару.

На рис. 11 зображено залежність вихідних параметрів сонячного гетероперехідного елемента ITO/CdS/CdTe/CdSe від величини концентрації дефектів на межі розділу CdTe/CdSe (а) та CdS/CdTe (б) окремо. Як видно на рис. 11(а), FF зменшується з 83,0% до 80,0%, а V_{oc} зменшується з 1,03 до 0,98 В, тому ефективність падає з 24,14% до 21,63%, хоча зниження J_{sc} несуттєве з 28,26 до 27,65 mA/cm^2 зі зміною концентрації дефектів на інтерфейсі CdSe/CdTe від 10^{11} до 10^{17} cm^{-2} . Це пов'язано зі збільшенням швидкості рекомбінації носіїв і послідовним опором.

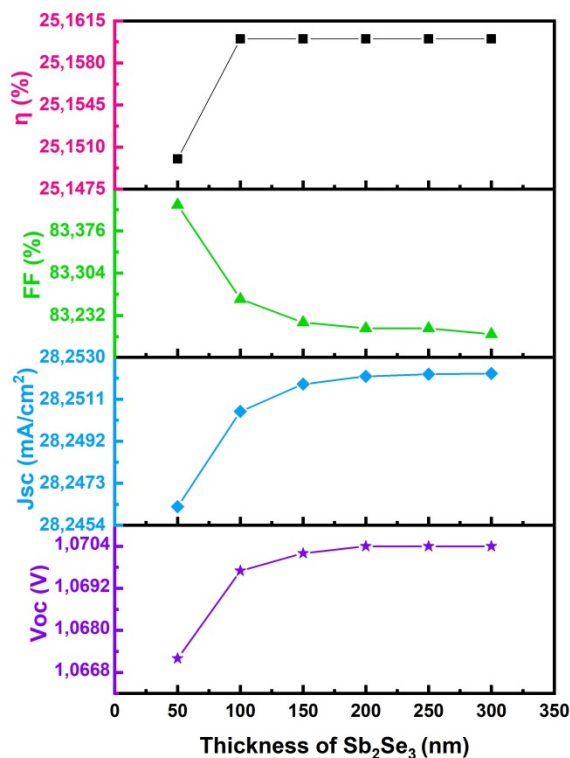


Рис. 8. Зміна вихідних параметрів V_{oc} , J_{sc} , FF та η сонячних елементів CdS/CdTe залежно від товщини BSF шару Sb_2Se_3 ($d_{Sb_2Se_3} = 50-350$ нм)

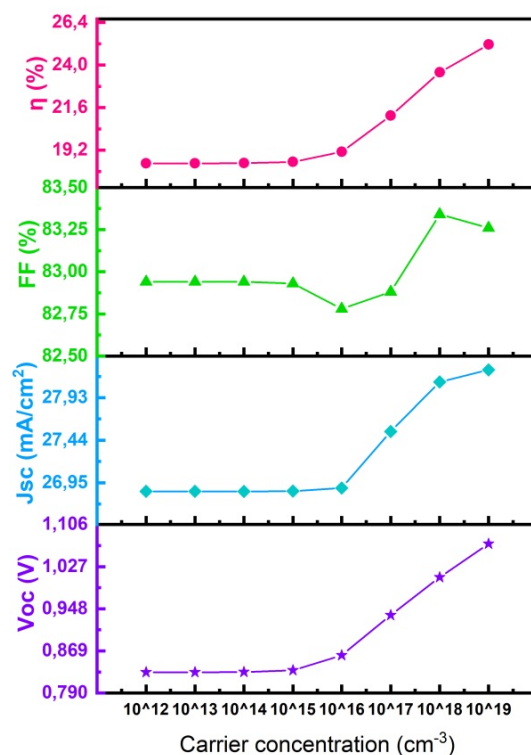


Рис. 9. Зміна вихідних параметрів V_{oc} , J_{sc} , FF та η сонячних елементів CdS/CdTe залежно від концентрації носіїв BSF шару Sb_2Se_3

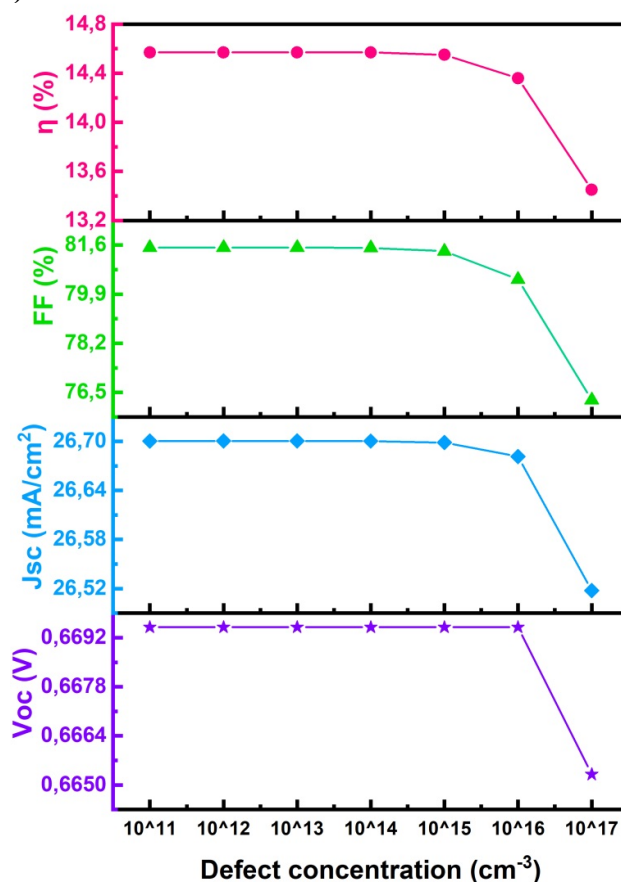
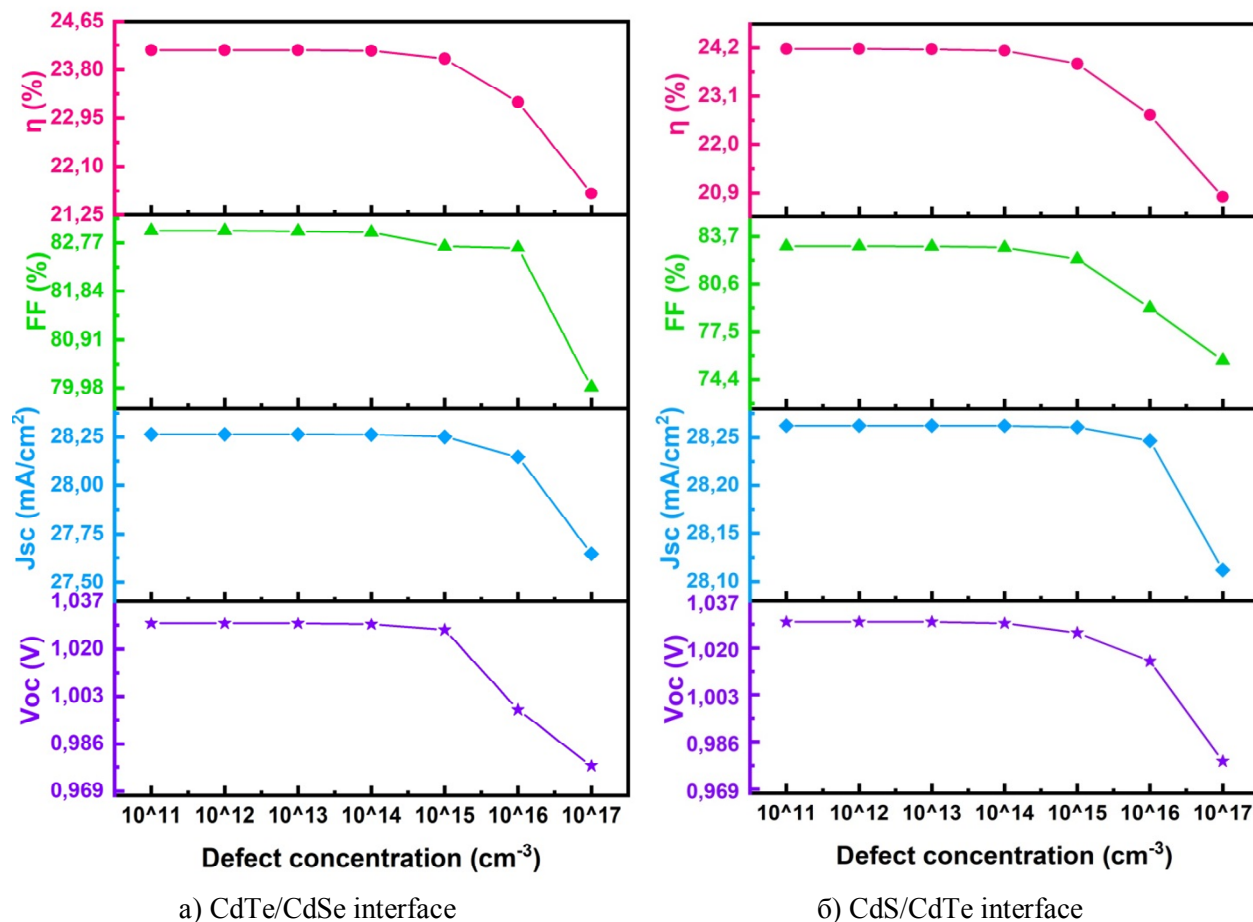


Рис. 10. Зміна вихідних параметрів V_{oc} , J_{sc} , FF та η залежно від концентрації дефектів на інтерфейсі: CdS/CdTe сонячного елемента ІТО/CdS/CdTe без BSF шару

Вплив концентрації дефектів інтерфейсу CdS/CdTe на продуктивність комірки з подвійним гетеропереходом CdTe із BSF шаром CdSe показано на рис. 11(б). Ефективність η зменшується з 24,17 до 20,87% зі зниженням V_{oc} з 1,03 до 0,98 В, FF з 83,06% до 75,63% і J_{sc} з 28,26 до 27,65 mA/cm^2 зі зміною концентрації дефектів від 10^{11} до 10^{17} cm^{-3} на інтерфейсі CdS/CdTe. Подібно до інтерфейсу CdTe/CdSe, концентрація дефектів нижче 10^{14} cm^{-3} не помітна, але при $> 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, зменшує ефективність кінцевої структури.



а) CdTe/CdSe interface
 б) CdS/CdTe interface
 Рис. 11. Зміна вихідних параметрів V_{oc} , J_{sc} , FF та η залежно від концентрації дефектів на інтерфейсі: (а) інтерфейс CdTe/CdSe та (б) інтерфейс CdS/CdTe сонячного елемента ІТО/CdS/CdTe/CdSe на основі подвійного гетеропереходу

На рис. 12(а) показано вплив концентрації дефектів на вихідні параметри для інтерфейсу CdTe/Sb₂Se₃ сонячного елемента ІТО/CdS/CdTe/Sb₂Se₃. Збільшення густини розподілу дефектів від 10^{11} до 10^{17} cm^{-3} на межі розділу CdTe/Sb₂Se₃ спричиняє до зниження V_{oc} з 1,08 до 0,99 В, FF з 82,65 до 80,52% і J_{sc} від 28,27 до 27,09 mA/cm^2 , тому ККД помітно падає з 25,36 до 21,74% (рис. 12, б). Дослідження концентрації дефектів на поверхні інтерфейсів свідчить про те, що концентрація дефектів має вагомий вплив на продуктивність сонячних елементів на основі CdTe із подвійним гетеропереходом. Міжфазні дефекти викликані дефектами структури двох відповідних матеріалів, а дифузія катіонів металу через шар поглиначи під час виготовлення комірки є ключовими джерелами дефектів на межі розділу [40-41]. Використовуючи ефективну техніку осадження та високу концентрацію під час виготовлення комірки, можна мінімізувати вплив дефектів на інтерфейсах.

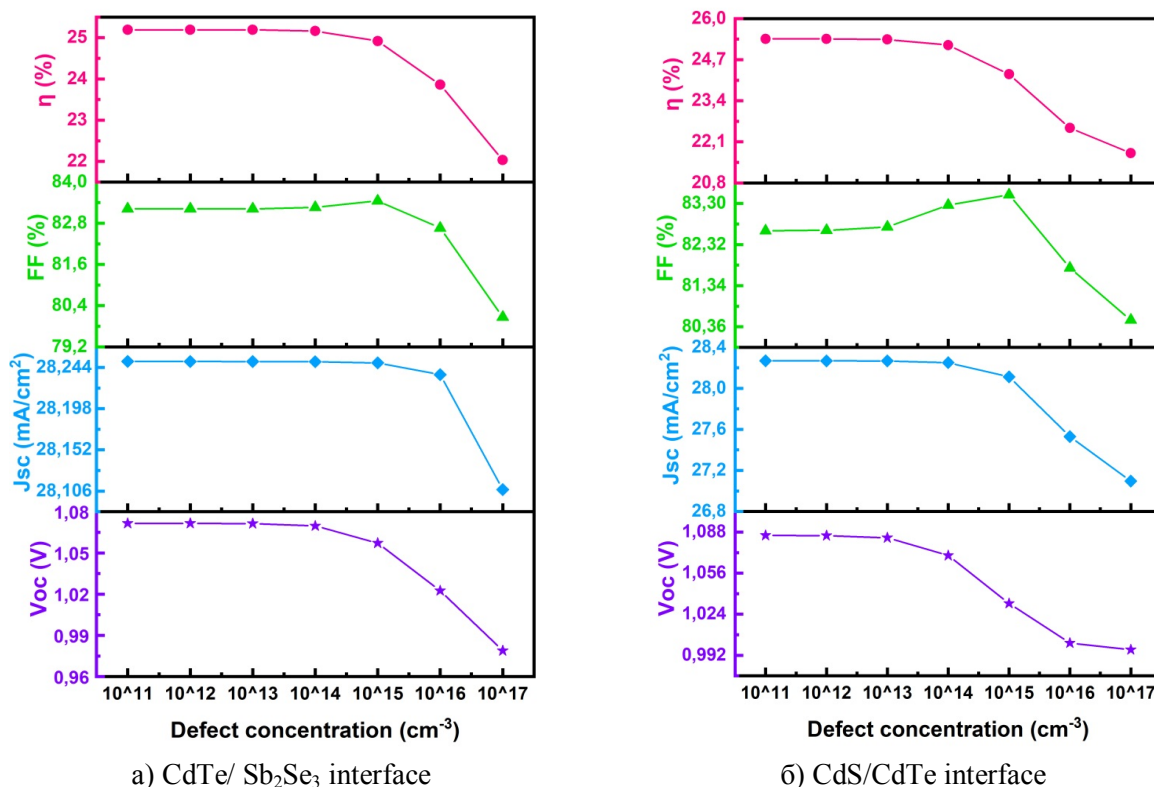


Рис. 12. Зміна вихідних параметрів V_{oc} , J_{sc} , FF та η залежно від концентрації дефектів на інтерфейсі: (а) інтерфейс CdTe/ Sb₂Se₃ та (б) інтерфейс CdS/CdTe сонячного елемента ITO/CdS/CdTe/ Sb₂Se₃ на основі подвійного гетеропереходу

3.9. Вплив роботи виходу заднього металевого контакту на сонячний елемент CdS/CdTe

Робота виходу визначається як мінімальна кількість енергії або фотонів, необхідних для викиду електрона з поверхні металу [42]. На рис. 13 показано вплив роботи виходу заднього контактного шару на продуктивність сонячних елементів із подвійним гетеропереходом на основі CdTe з додаванням CdSe або Sb₂Se₃ як шар BSF (back surface field) в діапазоні 4,6–5,7 еВ. На рис. 13 (а) та 13 (б) відповідно показані залежності густини струму короткого замикання J_{sc} , напруги холостого ходу V_{oc} , фактору заповнення FF та ефективності η сонячних елементів ITO/n-CdS/p-CdTe/CdSe та ITO/n-CdS/p-CdTe/Sb₂Se₃ від значення роботи виходу (MWF) для різних металів. Моделювання проводили із використанням таких металів: молібдену (Mo), золота (Au), срібла (Ag), платини (Pt), заліза (Fe), міді (Cu), нікелю (Ni) та ніобію (Nb). Усі параметри для контактних матеріалів, що використовуються для моделювання, базуються на літературі [42-43]. У таблицях 3 та 4 відповідно, показано вплив роботи виходу на ефективність сонячних елементів та значення фактору заповнення ITO/n-CdS/p-CdTe/CdSe та ITO/n-CdS/p-CdTe/Sb₂Se₃.

Табл. 3.

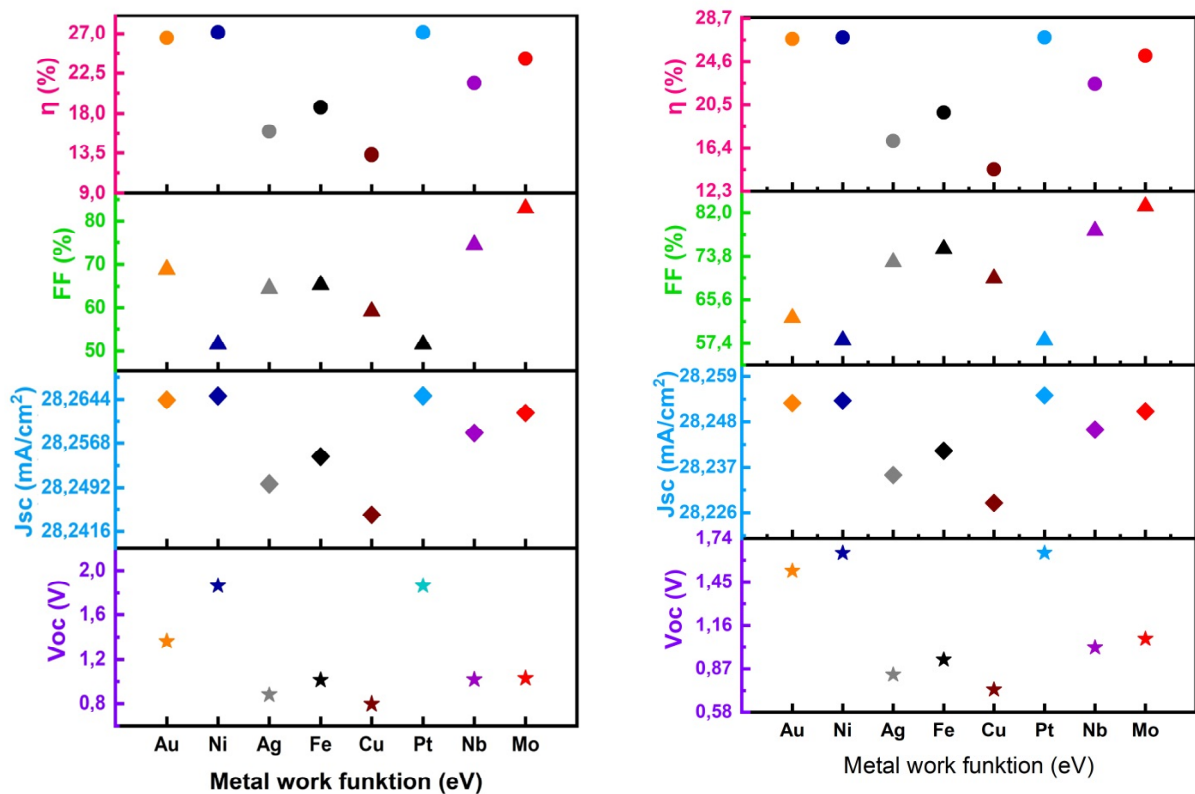
Вплив роботи виходу металу на кінцеву ефективність сонячного елемента ITO/n-CdS/p-CdTe/CdSe

Матеріал заднього контакту	Au	Ni	Ag	Fe	Cu	Mo	Pt	Nb
Робота виходу металу (MWF, eV)	5.1	5.5	4.7	4.8	4.6	5.0	5.7	4.9
Ефективність (η , %)	26.50	27.13	15.98	18.69	13.29	24.13	27.13	21.41
Фактор заповнення (FF, %)	68.88	51.53	64.54	65.35	59.19	82.97	51.53	74.50

Табл. 4.

Вплив роботи виходу металу на кінцеву ефективність сонячного елемента ITO/n-CdS/p-CdTe/Sb₂Se₃

Матеріал заднього контакту	Au	Ni	Ag	Fe	Cu	Mo	Pt	Nb
Робота виходу металу (MWF, eV)	5.1	5.5	4.7	4.8	4.6	5.0	5.7	4.9
Ефективність (η , %)	26.75	26.90	17.06	19.77	14.37	26.15	26.90	22.49
Фактор заповнення (FF, %)	62.18	57.97	72.71	75.21	69.65	83.26	57.94	78.66



а) ITO/CdS/CdTe/CdSe

б) ITO/CdS/CdTe/Sb₂Se₃

Рис. 13. Залежність J_{sc} , V_{oc} , FF та η сонячних елементів ITO/n-CdS/p-CdTe/CdSe (а) та ITO/n-CdS/p-CdTe/Sb₂Se₃ (б) від значення роботи виходу (MWF) для різних металів при освітленості світленості сонячним спектром з падаючою потужністю випромінювання $P = 1000 \text{ Вт/м}^2$ при $T=300 \text{ К}$

Вибір відповідного металевого контакту має важливий вплив на ефективність η сонячного елемента з гетеропереходом. Молибденові електроди демонструють найвищу ефективність сонячних елементів з роботою виходу 5,0 eV та значенням фактору заповнення $>80\%$. Це пов'язано з високою функцією роботи виходу металу та більшим опором, що вплинуло на транспорт електронів. Для вищих значень роботи виходу висота бар'єру для більшості носіїв зменшилася, що вказує на те, що контакт стає більш омичним. Таким чином, зі збільшенням роботи виходу металу, V_{oc} і η також збільшуються. У цьому дослідженні отримали найкращі значення.

Висновки.

Досліджено роботу високоефективних сонячних елементів із подвійним гетеропереходом на основі CdTe із шарами BSF CdSe та Sb₂Se₃ за допомогою програмного середовища SCAPS 3.3.09. Результати моделювання показують, що введення шару CdSe та Sb₂Se₃ як BSF значно покращує вихідні параметри, а отже, і продуктивність сонячних елементів. Ефективність перетворення енергії (PCE) сонячного елемента CdS/CdTe без шару BSF становить приблизно 14,57%. Отримано значення фотоелектричної ефективності для гетероструктурних тонкоплівкових сонячних елементів ITO/CdS/CdTe/CdSe та ITO/CdS/CdTe/Sb₂Se₃ 24,13% та 25,16%, відповідно. Теоретичний аналіз показує, що шари CdSe та Sb₂Se₃ BSF, які можна осадити недорогими методами, створюють великий потенціал для практичного виготовлення високоефективних сонячних елементів із подвійним гетеропереходом на основі CdTe для використання сонячної енергії. Показано вплив роботи виходу заднього контактного шару на продуктивність сонячних елементів із подвійним гетеропереходом на основі CdTe з додаванням BSF-шарів.

Список використаних джерел:

1. Wisz, G., Nykyruy, L., Yakubiv, V., Hryhoruk, I., & Yavorskyi, R. Impact of Advanced Research on Development of Renewable Energy Policy: Case of Ukraine. International Journal of Renewable Energy Research (IJRER), 2018, 8(4), 2367-2384.

© Ж.Р. Олексин, Л.І. Никируй, Р.С. Яворський, І.В. Малярська, О.М. Матківський, О.В. Замуруєва, С.А. Федосов

2. Yavorskyi R. Features of optical properties of high stable CdTe photovoltaic absorber layer. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2020. Vol. 21, No. 2. P. 243–253.
3. Bhattacharya S., Sajeev J. Beyond 30% conversion efficiency in silicon solar cells: a numerical demonstration. *Scientific reports*. 2019. Vol.9, №1. P. 1-15. (<https://doi.org/10.1038/s41598-019-48981-w>).
4. IRENA. Global energy transformation: A roadmap to 2050 (2019 edition), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. 2019. P. 1-52. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Apr/IRENA_Global_Energy_Transformation_2019.pdf.
5. Zhang C., Zhang J., Ma X., Feng Q. CdTe Solar Cells. *Semiconductor Photovoltaic Cells*. Springer, Singapore. 2021. P. 293-324. (DOI: 10.1007/978-981-15-9480-9_7)
6. Nykyruy L. I., Yavorskyi R. S., Zapukhlyak Z. R., Wisz G., Potera P. Evaluation of CdS/CdTe thin film solar cells: SCAPS thickness simulation and analysis of optical properties. *Optical Materials*. 2019. Vol. 92. P. 319-329.
7. Rahman M. F., Hossain J., Kuddus A., Tabassum S., Rubel M. H., Shirai H., Ismail A. B. A novel synthesis and characterization of transparent CdS thin films for CdTe/CdS solar cells. *Applied Physics A*. 2020. Vol. 126, No. 2. P. 145.
8. Green M. A., Dunlop E. D., Hohl-Ebinger J., Yoshita M., Kopidakis N., Hao X. Solar cell efficiency tables (version 56). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2020. Vol.28, №7. P. 629-638. <https://doi.org/10.1002/pip.3303>
9. Yoshikawa K., Kawasaki H., Yoshida W., Irie T., Konishi K., Nakano K., Yamamoto K. Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%. *Nature energy*. 2017. Vol. 2, № 5, P.1-8.
10. Zapukhlyak Z. R., Nykyruy L. I., Wisz G., Rubish V. M., Prokopiv V. V., Halushchak M. O., Yavorskyi R. S. SCAPS modelling of ZnO/CdS/CdTe/CuO photovoltaic heterosystem. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2020. Vol. 21, № 4. P. 660–668.
11. Petrus R. Y., Ilchuk H. A., Kashuba A. I., Semkiv I. V., Zmiiovskaya E. O., Lys R. M. Optical Properties of Materials for Solar Energy Based on Cadmium Chalcogenides Thin Films. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2019. Vol. 20, No. 4. P. 367–371.
12. Shockley, W., & Queisser, H. J. (1961). Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. *Journal of applied physics*, 32(3), 510-519.
13. Mathers, C. D. (1977). Upper limit of efficiency for photovoltaic solar cells. *Journal of Applied Physics*, 48(7), 3181-3182
14. Xu, Y., Gong, T., & Munday, J. N. (2015). The generalized Shockley-Queisser limit for nanostructured solar cells. *Scientific reports*, 5(1), 1-9
15. Müser, H. A. (1957). Thermodynamische behandlung von elektronenprozessen in halbleiter-randschichten. *Zeitschrift für Physik*, 148(3), 380-390
16. Kuddus, A., Ismail, A. B. M., & Hossain, J. (2021). Design of a highly efficient CdTe-based dual-heterojunction solar cell with 44% predicted efficiency. *Solar Energy*, 221, 488-501
17. Moon M. M. A., Rahman M.F., Kamruzzaman M.d., Hossain J., Ismail A.B.M. Unveiling the prospect of a novel chemical route for synthesizing solution-processed CdS /CdTe thin-film solar cells Unveiling the prospect of a novel chemical route for synthesizing solution-processed CdS/CdTe thin-film solar cells. *Energy Rep*. 2021. №7. P.1742–1756. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.03.031>.
18. Clover I. First Solar Raises Bar for CdTe with 21.5% Efficiency Record. 6 February 2015. http://www.pv-magazine.com/2015/02/06/firstsolar-raises-bar-for-cdte-with-21-5-efficiency-record_100018069, 2015 (access, 15.11. 2020).
19. Rahman M. F., Hossain J., Kuddus A., Tabassum S., Rubel M. H., Shirai H., Ismail A. B. A novel synthesis and characterization of transparent CdS thin films for CdTe/CdS solar cells. *Applied Physics A*. 2020. Vol. 126, No. 2. P. 145.
20. Ahmed S., Aktar A., Rahman M.F., Hossain J., Ismail A.B.M. A numerical simulation of high efficiency CdS/CdTe based solar cells using NiO HTL and ZnO TCO. *Optik (Stuttg)*. 2020b. Vol.223. P.165625. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.165625>.
21. Romeo A. CdTe and CuInGaSe₂ Thin-Film Solar Cells. In *Solar Cells and Modules*. Springer, Cham. 2020. P. 197-217.

22. Yang X., Bao Z., Luo R., Liu B., Tang P., Li B., Zhang J., Li W., Wu L., Feng L. Preparation and characterization of pulsed laser deposited CdS/CdSe bi-layer films for CdTe solar cell application. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2016. Vol. 48. P. 27–32.
23. Shenouda A. Y., El Sayed M. Electrodeposition, characterization and photo electrochemical properties of CdSe and CdTe. *Ain Shams Engineering Journal*. 2015. Vol.6, №1. P.341–346. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2014.07.010>.
24. K. L. Chopra, S. R. Das, *Thin Film Solar Cells* (Plenum Press, New York-London, 1983), 143–150.
25. C. M. Rouleau, D. H. Lowndes, *Appl. Surf. Sci.* 127–129, 418 (1998).
26. M. Ohishi, M. Yoneta, H. Saito, H. Sawada, S. Mori, *J. Cryst. Growth* 184/185, 57 (1998).
27. H. Cachet, R. Cortes, M. Froment, A. Etcheberry, *Thin Solid Films* 361–362, 84 (2000).
28. Ilchuk, H., Petrus, R., Kashuba, A., Semkiv, I., & Zmiiivska, E. (2020). Optical-energy properties of CdSe thin film. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 699(1), 1–8.
29. Luo, M., Leng, M., Liu, X., Chen, J., Chen, C., Qin, S., & Tang, J. (2014). Thermal evaporation and characterization of superstrate CdS/Sb₂Se₃ solar cells. *Applied Physics Letters*, 104(17), 173904.
30. Kosek F., Tulka J., Štourač L. Optical, photoelectric and electric properties of single-crystalline Sb₂Se₃. *Czechoslovak Journal of Physics B*. 1978. Vol.28, №3. P.325–330.
31. Zhang, J., Kondrotas, R., Lu, S., Wang, C., Chen, C., & Tang, J. (2019). Alternative back contacts for Sb₂Se₃ solar cells. *Solar Energy*, 182, 96–101.
32. Leng, M., Luo, M., Chen, C., Qin, S., Chen, J., Zhong, J., & Tang, J. (2014). Selenization of Sb₂Se₃ absorber layer: an efficient step to improve device performance of CdS/Sb₂Se₃ solar cells. *Applied Physics Letters*, 105(8), 083905.
33. Burgelman M., Verschraegen J., Degraeve S., Nollet P. Modeling thin-film PV devices. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2004. Vol. 12, № 2–3. P.143–153. (<https://doi.org/10.1002/pip.524>)
34. Verschraegen J., Burgelman M. Numerical modeling of intra-band tunneling for heterojunction solar cells in SCAPS. *Thin Solid Films*. 2007. Vol. 515, No. 15. P. 6276–6279
35. Degraeve S., Burgelman M., Nollet P. Modelling of polycrystalline thin film solar cells: new features in scaps version 2.3. *Proc. Of 3rd World Conf. on Photovolt. Energy Convers.* 2003. Vol. 1. P. 487–490.
36. Khosroabadi S., Keshmiri S. H. Design of a high efficiency ultrathin CdS/CdTe solar cell using back surface field and backside distributed Bragg reflector. *Opt. Expr.* 2014. Vol. 22, No. 103. P. A921–A929.
37. Burgelman M., Nollet P., Degraeve S. Modelling polycrystalline semiconductor solar cells. *Thin Solid Films*. 2000. Vol. 361. P. 527–532.
38. Dumitrache C., Olariu N., Lakatos E. St., Mantescu G., Olteanu L., Badea M. Some New Features of SCAPS 2902 Used for Optimisation of CdS–CdTe Thin-Film Photovoltaic Cell Structure. *Electrotehnica Electronica Automatica*. 2013. Vol. 61, No. 1. P. 25.
39. Ahmmed, S., Aktar, A., Hossain, J., Ismail, A.B.M., 2020a. Enhancing the open circuit voltage of the SnS based heterojunction solar cell using NiO HTL. *Sol. Energy* 207, 693–702. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.07.003>;
40. Kumar, S. Girish, Rao, K.S.R. Koteswara, 2014. Physics and chemistry of CdTe/CdS thin film heterojunction photovoltaic devices: Fundamental and critical aspects. *Energy Environ. Sci.* 7 (1), 45–102. <https://doi.org/10.1039/C3EE41981A>.
41. Anwar F, Sarwar Satter S, Mahbub R, Mahmud Ullah S, Afrin S. Simulation and Performance Study of Nanowire CdS/CdTe Solar Cell. *International journal of renewable energy research*. 2017; doi: 10.13140/RG.2.2.25657.98400.].
42. Derry GN, Kern ME, Worth EH. Recommended values of clean metal surface work functions. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*. 2015; doi: 10.1116/1.4934685.

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 (297х210 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 обобщин 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 № 5 від 29 грудня 2021 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

© Луцький національний технічний університет, 2021 р.