

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 76

Луцьк 2023

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 10.36910/6775.24153966.2023.75

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 28 грудня 2023 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, 2023 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 Геннадій Анатолієвич д.т.н., проф., заступник директора Інституту проблем матеріалознавства ім. І. францевича НАН України;

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ЗМІСТ

Зміст	5
Гао Сінмін Методика порівняльних експериментальних досліджень лещат різних конструкцій.....	9
І.Є. Анохін, Д.М. Рамазанов Дослідження матричних металевих коліматорів для просторово-фракціонованої променевої терапії. вольфрамові, танталові та залізні коліматори.....	12
Т.М. Павлиго Стандарти для адитивного виробництва (огляд).....	16
Ю.О. Григор'єв Екстремальна задача у згортках з двома ядрами.....	29
О.І. Проватар, О.П. Ількун Про удосконалення методу нечіткого логічного виведення в системах заснованих на знаннях	35
А.В. Кузьмов Теоретичні засади мікромеханічного осереднення лінійно-в'язкої течії пористого матеріалу з капілярними напруженнями на поверхні пор.....	42
С.Ю. Тесля, М.Я. Втерковський, Т.О. Соловійова, П.І. Лобода, Є.В. Солодкий, Б.А. Котелюх, О.С. Мовчан, О.С. Кучер, В.І. Шеремет Закономірності отримання порошків сплавів магнію розпиленням розплаву.....	49
Д.А. Гусачук, М.Д. Мельничук, І.О. Парфентьєва, Т.В. Фурс, І.В. Боярська, М.М. Карпюк Прототипування та стратегія реверс інжинірингу на прикладі інженерних задач адитивного виробництва.....	58
Н.В. Тарельник, М.М. Майфат Захист деталей з високоміцного чавуну від гідроабразивного зносу комбінованими екологічно безпечними методами.....	66
О.В. Калюжний, В.Л. Калюжний, С.В. Ситник, К.М. Шульга, М.В. Готра Збільшення пропрацювання пластичною деформацією стінок і донної частини порожнистого напівфабрикату при гарячому зворотному видавлюванні.....	72
С.О.Руденький, М.Я. Втерковський Особливості отримання високопористого нанокompозиту $Al_2O_3-SiO_2$ з використанням різних типів пороутворювачів.....	80
Т.В. Іванишин, Б.П. Поберейко, О.А. Валюх Система масового обслуговування як модель для формалізації показників ефективності функціонування автоматизованих ліній з жорстким агрегуванням двох машин.....	86
Р.В. Пузік, В.Ю.. Кондусь Створення нового покоління енергоефективних вільновихрових насосів у контексті стратегії підвищення їх конкурентоздатності	91
М.В. Ямковой Математичне моделювання мережевих логістичних процесів.....	100
В.В. Калініченко, М.С. Мельник Дилатансійно чутлива модель пластичності пористих матеріалів отримана аналітичними методами мікромеханіки.....	108
І.Я. Долінська, О.О. Свірчевський Розрахункова модель поширення тріщини високотемпературної повзучості за нейтронного опромінення.....	118
А.В. Рудь Перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування.....	124
В. О. Файчук Дослідження моделей анонімної маршрутизації	129
А.О. Поліщук Експериментальне дослідження подрібнених полімерних відходів, що використовуються в якості вихідної сировини для шнекового екструдера 3D-принтера	134
А.С. Кушнірчук, В.П. Ткачук, В.О. Харжевський Дослідження міцнісних характеристик деталей отриманих за допомогою FDM друку ІЗ ABS та CoPet пластику	147
М.П. Ярошевич, В.С. Пуць, В.Л. Мартинюк, П.П. Мелесь Особливості динаміки незрівноваженого ротора з вібруючою віссю	153
А. П. Томашко Організація моделі логістичної мережі з використанням програмних та нейромережевих алгоритмів.....	159

Ченьцянь Донг, С.П. Роботько, Цзяньцзюнь Ванг, О.М. Сусак, А.М. Топалов, В.В. Коломієць Особливості людино-машинної взаємодії в системі безпроводного управління мобільним роботом.....	166
О.С. Приходько, В.М. Матвійчук Використання нейронної мережі для підвищенні курсової стабільності БПЛА за відсутності GNSS.....	173
Ю.П. Шипелик, В.І. Базилюк, О.Є. Крупінський, Л.В. Яцинський, С.А. Федосов Іонізація мінералу і фізичні властивості аерозолі NaCl.....	177
М.С. Півницький, С.П. Шимчук Розробка конструкції швидкозбірного ланцюга для роботи за невеликих швидкостей обертання.....	183
С.А. Федосов, О.В. Замуруєва, Л.І. Никируй, В.С. Федосов, А.В. Трофімчук Інноваційні технології в автомобільному транспорті.....	187
Ю.В. Коваль, С.А. Федосов, Д.А. Захарчук, Л.В. Яцинський, Л.І. Панасюк Температурні залежності рівня Фермі в монокристалах антимоніду кадмію з глибокими енергетичними рівнями	192
С.Л. Куцик, О.А. Мікуліч Основні концепції та підходи до створення метаматеріалів.....	196
В.О. Шейченко, С.П. Коропченко, І.А. Дудніков, В.В. Шевчук, М.М. Толстушко, Ю.Б. Скоряк, Д.В. Шейченко Основні напрямки розвитку технологій збирання конопель.....	202
А. П. Чиркова Методика числового моделювання аеродинаміки і теплообміну при поперечному обтіканні круглого циліндра.....	210

CONTENTS

<i>Contents</i>	7
<i>Gao Xinmin</i> Method of comparative experimental research of vices of different constructions.....	9
<i>I. Anokhin, D. Ramazanov</i> Matrix metal collimators studies for the spatially fractionated radiation therapy. Tungsten, tantalum and iron collimators.....	12
<i>T.M. Pavlyho</i> The standards for additive manufacturing (review).....	16
<i>Yu.A. Hryhoriev</i> An extreme problem in convolutions with two kernels	29
<i>O.I. Provota, O.P. Ilkun</i> On the improvement of the method of fuzzy inference in knowledge-based systems	35
<i>S. Kuzmov</i> Theoretical principles of micromechanical averaging of linear viscous flow of a porous material with capillary stresses on the pore surface.....	42
<i>S. Teslia, M. Vterkovskiy, T. Soloviova, P. Loboda, I. Solodkyi, B. Koteliukh, O. Movchan, O. Kucher, V. Sheremet</i> The reliability of the gears of the pressure blooming mechanism.....	49
<i>D. Husachuk, M. Melnychuk, I. Parfentjeva, T. Furs, I. Boiarska, M. Karpyuk</i> Modeling of traffic flows in the study of traffic at controlled intersections.....	58
<i>N.V. Tarellyk, M.M. Maifat</i> Protecting of high-strength cast iron parts from hydro abrasive wear thereof by combined environmentally safe methods	66
<i>O. Kaliuzhnyi, V. Kaliuzhnyi, S. Sytnyk, K. Shulga, M. Hotra</i> Increase of plastic deformation workout of walls and bottom part of hollow semi-finished product during hot reverse extraction.....	57
<i>S. Rudenkyi, M. Vterkovskiy</i> features Of obtaining high-porosity nanocomposite $Al_2O_3-SiO_2$ using different types of poor-formers	80
<i>T. Ivanyshyn, B. Pobereyko, O. Valyukh</i> Mass service system as a model for formalizing performance indicators of automated lines with rigid aggregation of two machines.....	86
<i>R. Puzik, V. Kondus</i> Creation of a new generation of energy-efficient torque flow pumps in the context of the strategy of increase in their competitiveness	91
<i>M. Yamkovoï</i> Mathematical modeling of network logistics processes	100
<i>V.V. Kalinichenko, M.S. Melnyk</i> Micromechanics based dilatancy-sensitive plasticity model of porous materials in closed-form analytical solutions.....	108
<i>I.Ya. Dolinska, O.O. Svirchevskiy</i> Calculated model of high-temperature creep crack propagation under neutron irradiation.....	118
<i>A. Rud</i> Prospects for the development of agricultural machinery.....	124
<i>V. Faychuk</i> Researching anonymous routing models.....	129
<i>A.O. Polishchuk</i> Experimental study of crushed polymer waste used as initial raw material for the screw extruder of a 3D printer.....	134
<i>S. Kushnirchuk, V. Tkachuk, V. Kharzhevsky</i> Study of strength characteristics of parts obtained by FDM printing from ABS and CoPet plastic.....	147
<i>M.P. Yaroshevich, V.S. Puts, V.L. Martyniuk, P.P. Meles</i> Features of the dynamics of an unbalanced rotor with a vibrating axis.....	153
<i>A. P. Tomashko</i> Organization of a logistic network model using software and neural network algorithms.....	159
<i>Chenjian Dong, Jianjun Wang, S.P. Robotko, O.M. Susak, A.M. Topalov, V.V. Kolomiets</i> Influence the method of nickel bonding on the structure and properties of tungsten-based alloys.....	166
<i>O.S. Prykhodko, V.M. Matviychuk</i> Using a neural network to improve the course stability of uav in the GNSS denied environment.....	173

Yu. Shypelik, V. Bazyliuk, O. Krupinskiy, L. Yashchynskyy, S. Fedosov Ionization of the mineral and physical properties of NaCl aerosol.....	177
N.S. Pivnytskyi, S.P. Shymchuk Development of a quick-release chain design for operation at low rotational speeds	183
S. Fedosov, O. Zamurujeva, L. Nykyruy, V. Fedosov. A. Trofymchuk Innovative technologies in motor vehicles.....	187
Yu.V. Koval, S.A. Fedosov, D.A. Zakharchuk, L.V. Yashchynskyy, L.I. Panasyuk Temperature dependencies of fermi level in syngle crystals of cadmium antimonide with deep energy levels.....	192
S.L. Kutsyk, O.A. Mikulich Basic concepts and approaches to the creation of metamaterials.....	196
V. Sheichenko, S. Koropchenko, I. Dudnikov, V. Shevchuk, M. Tolstushko, Y. Skoriak, D. Sheichenko Main directions of development of hemp harvesting technologies.....	202
A. Chyrkova Method of numerical modeling of aerodynamics and heat exchange in transverse flow over a round cylinder.....	210

УДК 621.7.07 : 621.914

DOI 10.36910/775.24153966.2023.75.1

Гао Сінмін

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МЕТОДИКА ПОРІВНЯЛЬНИХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЛЕЩАТ РІЗНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Виконаний аналіз відомих методик і стендів для експериментальних досліджень затискних механізмів. Запропонована методика і оснащення для експериментальних досліджень силових і жорсткісних характеристик лещат різного конструктивного виконання. Наведена методика статистичної обробки результатів експериментальних досліджень.

Ключові слова: лещата, динамометрична рукоятка, динамометр, сила затиску, жорсткість, методика

Gao Xinmin

METHOD OF COMPARATIVE EXPERIMENTAL RESEARCH OF VICES OF DIFFERENT CONSTRUCTIONS

The analysis of known methods and stands for experimental research of clamping mechanisms was carried out. The proposed technique and equipment for experimental studies of the strength and stiffness characteristics of vices of various designs. The method of statistical processing of the results of experimental studies is presented.

Key words: vise, dynamometric handle, dynamometer, clamping force, rigidity, technique

Formulation of the problem. In mechanical assembly production and repair work, vices of various manufacturers are used to clamp parts of simple and complex shapes. Among them, the main attention is drawn to those vices that allow you to clamp objects with a complex profile without difficulty. Such vices include original designs that have not yet been researched and require experimental testing for operability. Setting tasks. The purpose of this work is to develop a methodology, special equipment for performing experimental studies of vices of various designs and recommendations for statistical processing of the results. Teaching the main material. The analysis of literary sources [1-6] shows that there are various methods and stands for experimental research of clamping mechanisms. Information is provided in [7], in which a technique was developed to confirm theoretical studies of the strength and stiffness characteristics of machine vices produced by the Baranovichi Machine Tool Plant (Belarus) type MTV 140 (UP-616-2), according to which experiments were carried out on a milling machine (Fig. 1, 2). Due to the rotation of the upper part of the vise relative to the longitudinal feed, experiments were carried out under a load at an angle of 45° (Fig. 2). The results of the measurements confirmed the difference in prints in different directions of load with force P (on a moving and stationary sponge).

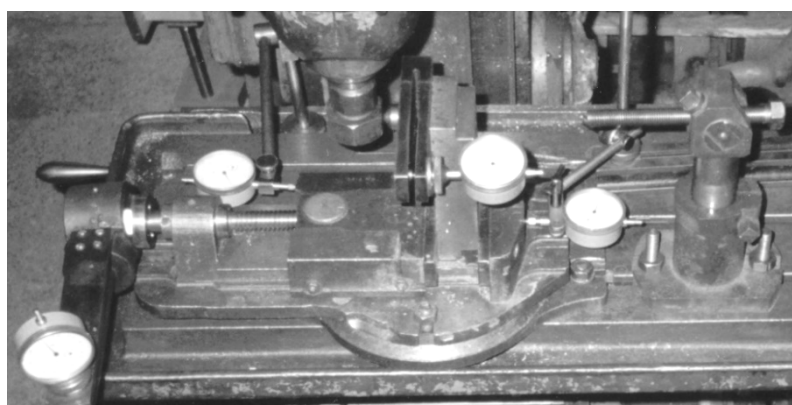


Fig. 1. The working area of a milling machine with a vise under the load of force P on the moving (a) and stationary (b) jaws with two overhangs H: a – small (30 mm); b – large (100 mm)

In order to increase the accuracy of measurements and the possibility of directly recording readings on a computer, it is advisable to use Chinese-made electronic torque dynamometers (Fig. 3).

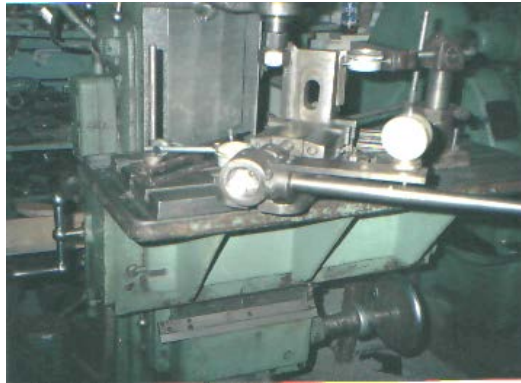


Fig. 2. General view of the working area of a milling machine with a vice when loaded at an angle to the direction of the longitudinal feed of the table



Fig. 3. Chinese-made electronic torque dynamometer

In addition, a technique for processing experimental data and checking the adequacy of theoretical models was developed. Pre-processing of experimental data is performed by screening out gross errors, or "misses", resulting from malfunctioning measuring devices, or mistakes in the experiment made due to inattention. For this purpose, the values of the characteristics of the vices measured during the experiment are entered into the table, which also includes the values of the calculated (derivative) values obtained on their basis. Gross errors ("misses") when fixing the value of experimental data are anomalous or those that are strongly distinguished by the value in the variation series of homogeneous data. In order to detect "misses" in the array of experimental data, the analysis of the measurement results is carried out, paying attention to the "unnatural" values of the measured value, which are sharply different from the others. For the correct processing of experimental data, it is necessary to take into account their spread (dispersion of points). The presence of such a scatter and the approximation of the obtained data is explained by the fact that the result of any measurement during the experiment by its nature contains an error, therefore the values obtained during the experiment are called the approximate (to some extent random) value of the quantity being studied. This is explained by the presence of factors that affect the result of the experiment, but were not taken into account during the experiment. Examples of such factors include a change in the course of the experiment under the influence of vibrations of the state of the nodes of the test stand (disassembly, change of clearances, etc.), a change in the parameters of the research object under the influence of the external environment, measurement errors or actions on the object, etc. d. Graphs are the most visual display of experimental data. They provide a visual representation of the relationship between quantities, which is important for the interpretation of the obtained data. In connection with the existence of randomness in the character of the magnitude of responses, in order to obtain an approximate experimental dependence and its graph, the processing of experimental data is carried out on the basis of the mathematical apparatus of mathematical statistics. The statistical method makes it possible to detect the dependence of the average

value of some value (characteristics of the vice) on the variation of another and to describe the relationship between them in the form of a polynomial - a segment of the Taylor series, which decomposes the unknown equation of the relationship of factor (factor) and result (feedback) features, which is called the regression equation. The regression equation does not provide an exact relationship between responses and factors, and only its statistical evaluation in the form of an empirical equation is based on the results of the analysis of experimental data. The correlation-regression method is one of the main methods of modern mathematical statistics for identifying implicit relationships between observation data (statistical data). This method allows you to quantitatively measure the strength (absent, weak, moderate, strong) and direction (direct or inverse) of a statistical relationship - correlation analysis, as well as to establish an analytical expression and form of dependence (linear, parabolic, hyperbolic, power, etc. .) – regression analysis. The practice of processing experimental data shows that in most cases, the results of the experiment are sufficiently approximated by a complete cubic polynomial (regression equation of the third degree). Often the third degree of the polynomial is not only sufficient, but also excessive, so the degree and number of terms of the polynomial can be reduced (to simplify calculations) without significant loss of accuracy. The choice of the right type (form) of the regression equation also depends on the knowledge of the problem and experience, therefore, based on the evaluation of the graphical representation of the experimental points (scatter diagram), we choose the regression equation of the second degree to describe the experimental dependence. To assess the quality of the description of the obtained experimental dependence (the completeness of the set of explanatory factors), the coefficient of determination R^2 is used by the regression equation, which is the value of the reliability of the approximation, or the level of reliability. The coefficient of determination shows how much of the variation in the strength and stiffness characteristics of the vice (resultant characteristic) is taken into account in the regression equation and is due to the influence of an independent factor characteristic on it, which gives a quantitative estimate of the degree of the analyzed relationship. The closer R^2 is to 1, the more (completely) the regression equation explains the relationship between the outcome and factor characteristics. In the absence of a relationship $R^2=0$, if $R^2=0.9$, then it can be assumed that 90% of the changes (variations) in the response (characteristics of vices) are due to the variation of the factor taken into account in the regression equation and only 10% - due to the influence of other unaccounted factors. For the correct interpretation of the results obtained at the "output" of the correlation-regression analysis, it is necessary to take into account the specifics of obtaining these data and take into account the problems associated with their interpretation. Processing of experimental data by the method of correlation-regression analysis is carried out using the Microsoft Excel program, which includes a set of data analysis tools (the so-called analysis package), designed.

Conclusion: The proposed methods of experimental research of vices and statistical processing of experimental results can be successfully applied to other technological equipment and clamping mechanisms.

References

1. Aggregate and modular technological equipment: In 3 parts. Under the editorship Yu.M. Kuznetsova /author V.A. Kryzhanivskiy, Yu.M. Kuznetsov, A.M. Kirichenko. and other. Kirovohrad, 2003. — part 1 — 422 p. — part 2 — 286 p. — part 3 — 507 p.
2. Kuznetsov Yu.M., Radchenko S.G., Khamuyela T.O. Experimental studies of the influence of various factors on the elastic characteristics of machine vices // Bulletin of KPI, series of mechanical engineering, No. 50, 2007. - P.94-104.
3. Kuznetsov Yu.M. Stand for the study of clamping mechanisms of lathes at high rotation frequencies / Kuznetsov Yu.M., Redko R.G., Prydalnyi B.I. // Bulletin of Mykhailo Ostrogradsky KDPU. – 2007. – Issue. 6, Part 1. - pp. 72–77.
4. Kuznetsov Yu.M., Prydalnyi B.I., Gao Xinmin Technological equipment of milling machines: design, theory, practice: Monograph-Lutsk: Vezha-Druk, 2023.-292 p. ISBN 978-966-940-449- 7
5. Kuznetsov Yu.M., Prydalnyi B.I., Gao Xinmin New views and approaches to the creation of automated universal vices for clamping complex-profile objects Section in col. Monographs. Sherman Oaks, California (USA), 2023.-S.239-332 doi: 10.51587/9798-9866-95921-2023-011
6. Self-adjusting clamping mechanisms: Reference book (Y.N. Kuznetsov, A.A. Vachev, S.P. Syarov, A.Y. Tsarvenkov; under the editorship of Y.N. Kuznetsova. - K.: "Technology"; Sofia : State publishing house "Technique", 1988. - 221 p.
7. Khamuyela T. O. Experimental studies of elastic-strength characteristics of machine vices for metal-cutting machines // Bulletin of NTUU "KPI", mechanical engineering series, No. 49, 2007. - pp. 22-25.

UDC 539.352.315

DOI 10.36910/775.24153966.2023.75.2

I. Anokhin¹, D. Ramazanov²

¹Senior researcher Employee of the Department of Theoretical Physics Department of Theoretical Physics, Kyiv institute for nuclear research

²Master, Junior researcher, High energy physics department, Kyiv institute for nuclear research

MATRIX METAL COLLIMATORS STUDIES FOR THE SPATIALLY FRACTIONATED RADIATION THERAPY. TUNGSTEN, TANTALUM AND IRON COLLIMATORS

Radiation therapy has long been a cornerstone in cancer treatment, but its effectiveness is often limited by the need to spare healthy tissues while targeting tumors. Spatially fractionated radiation therapy, a novel approach, addresses this challenge by dividing the primary radiation beam into multiple minibeam, thereby increasing the peak-to-valley dose ratio (PVDR) and potentially enhancing therapeutic outcomes. In this study, we explore the optimization of minibeam generation using mechanical collimators composed of Tungsten, Tantalum, and Iron, three high-density materials well-suited for radiation therapy applications. The primary objective of this research is to improve the efficiency of spatial dose fractionation, a critical factor in reducing radiation-induced damage to normal tissues. The PVDR is a key parameter in fractionation, with a PVDR of 8 or higher considered optimal. Minimizing the valley dose is equally crucial to preserve healthy tissue architecture and support tissue repair. To achieve efficient spatial fractionation, we present a new type of metal matrix collimator with modular design features, including 2.5 mm thick plates made of Tungsten, Tantalum, or Iron. These materials are chosen for their hardness, facilitating mechanical processing, and reducing the need for post-processing. Central plates incorporate 1 mm wide slits, creating channels for beam fractionation. A 5x5 hole matrix with 1 mm diameter and 2.5 mm pitch covers an area of 11x11 mm², providing flexibility in collimator size and geometry. Specialized collimator modules ensure alignment when stacked.

This work introduces a novel metal matrix collimator design and presents promising results for improving spatial dose fractionation in radiation therapy. Monte Carlo simulations provide insights into optimizing collimator features for maximum efficiency. These findings support further biological studies to evaluate the impact of fractionation on both normal and tumor tissues, paving the way for the practical implementation of collimation in clinical practice. Spatially fractionated radiation therapy holds great promise as an alternative approach for treating complex cases in cancer therapy, potentially enhancing patient outcomes and reducing radiation-induced side effects.

Keywords: radiation therapy, spatial fractionation, collimators, Geant4 simulations, dose fractionization, X-ray beams.

I. С. Анохін, Д. М. Рамазанов

ДОСЛІДЖЕННЯ МАТРИЧНИХ МЕТАЛЕВИХ КОЛІМАТОРІВ ДЛЯ ПРОСТОРООВО-ФРАКЦІОНОВАНОЇ ПРОМЕНЕВОЇ ТЕРАПІЇ. ВОЛЬФРАМОВІ, ТАНТАЛОВІ ТА ЗАЛІЗНІ КОЛІМАТОРИ

Променева терапія вже давно є одним із основних інструментів у лікуванні раку, але її ефективність часто обмежується дозовим навантаженням на здорові тканини які лежать на шляху до пухлини. Просторово фракціонована променева терапія, новий підхід, вирішує цю проблему, розділяючи первинний пучок випромінювання на кілька міні-променів, таким чином знижуючи дозу опромінення здорових тканин і потенційно покращуючи терапевтичні результати. Мета даного дослідження це оптимізація генерації міні-пучків за допомогою металевих матричних коліматорів, що будуть виготовлені з вольфраму, танталу та заліза, трьох матеріалів високої щільності, які добре підходять для застосування в променевій терапії. Основна мета цього дослідження полягає в тому, щоб підвищити ефективність просторового фракціонування дози, що є критичним фактором у зменшенні спричиненого радіацією пошкодження нормальних тканин. PVDR є ключовим параметром у фракціонуванні, при цьому PVDR 8 або вище вважається оптимальним. Для досягнення ефективного просторового фракціонування ми представляємо новий тип металевого матричного коліматора з модульними конструктивними особливостями, включаючи пластини товщиною 2,5 мм із вольфраму, танталу або заліза. Ці матеріали вибрано через їхню відносну простоту механічної обробки. Центральні пластини містять щілини шириною 1 мм, які створюють канали для фракціонування пучка. Матриця отворів 5x5 з діаметром 1 мм і кроком 2,5 мм займає площу 11x11 мм². Спеціально розроблена геометрія коліматора забезпечує вирівнювання при складанні. Ця робота представляє нову конструкцію коліматора з металевою матрицею та представляє багатобіляючі результати для покращення просторового фракціонування дози в променевій терапії. Моделювання методом Монте-Карло дає змогу покращити геометрію коліматора для досягнення максимальної ефективності фракціонування. Результати цієї роботи будуть використані для подальших досліджень для оцінки впливу фракціонування як на нормальні, так і на пухлинні тканини, відкриваючи шлях для практичного впровадження колімації в клінічній практиці. Просторово фракціонована променева терапія має великі перспективи як альтернативний підхід до лікування складних випадків раку, потенційно покращуючи результати лікування пацієнтів і зменшуючи побічні ефекти, спричинені радіацією.

Ключові слова: променева терапія, просторове фракціонування, коліматори, моделювання Geant4, фракціонування дози, рентгенівські пучки.

Introduction. Dose tolerance of normal tissues is the main problem the radiation therapy. To decrease radiation impact on the healthy cells there was offer to use a new conception, based on splitting main beam on many minibeam. This is a new technique that is mainly being researched in tandem with proton therapy. But proton therapy is much less common than classical radiation therapy, which uses gamma quanta and electrons with energies up to 25 MeV. The previous studies [1] showed effective fractionation and potential for the next research. Main aim of this work is optimization of generated minibeam by mechanical collimators. The main parameter of fractionation is peak-to-valley-dose-ratio (PVDR). The minimum dose in the central region between two beams is named valley dose and the dose in the center of the beam is the peak dose. The ratio between peak and valley doses is called peak-to-valley dose ratio and plays a pivotal role in biological response. High-quality fractionation is considered with the parameter PVDR 8 and higher. In addition, it is essential that the valley dose is kept to a minimum to ensure the preservation of normal tissue architecture and survival of sufficient cells needed for healthy tissue repair. It was hypothesized that the microscopic lesions in the micro/mini-beams paths are repaired by the minimally irradiated cells contiguous to the irradiated tissue slices [2]. This reparation effect was observed in experiments with high energy (MV) photons. Spatially fractionating is very important techniques for the x-ray or electron radiation therapy that are more spread in most part of countries and cheaper than hardon therapy.

Methods. The present paper demonstrates the next research stage of the metal matrix collimators for minibeam radiation therapy. We discover efficiency collimators made out of Tungsten, Tantalum and Iron. Also there have been made modification of collimator geometry. Collimators are made out of 2,5 mm thickness plates. This decision has several advantages. Tungsten and Tantalum are very hard metals for mechanical processing, in this case, thick plates are the best choice. Collimators are designed so, that the plates require minimal post processing. Such modular system provides to variate collimator size and geometry. It allows to tune it for different beam energies and types. Central plates have special 1mm width slits. These slits create channels for the beam fractionization when collimator block is assembled. The collimator design presented on the Fig.1 will be made of tungsten or tantalum plates. Beam splitting provides by hole matrix 5×5, 1 mm diameter and 2.5 mm pitch, area covering 11×11mm². Collimator modules have specific form for the mounting one on top of the other to avoid displacement (see Fig.2).

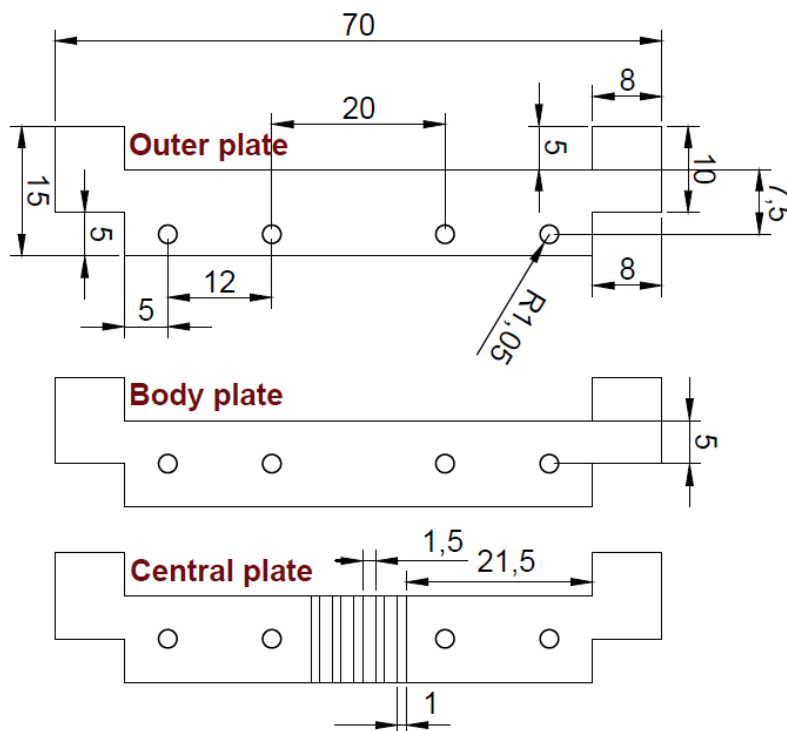


Fig. 1. Drafts of the collimator plates. Outer plates have shifted mounting holes. It provides precise assembling of the blocks

For experimental studies of collimator efficiency there will be used TimePix detector. This is pixel semiconductor with 16x16mm and 256x256 pixels sensor area. The detector allows to get 2-dimension picture of the beam profile in real time [3].

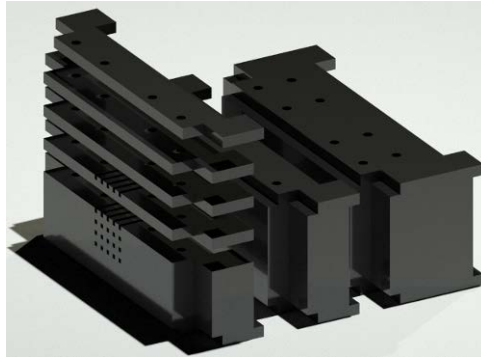


Fig. 2. 3D model of the tungsten collimator.

Results. The Monte Carlo simulation application Geant4 version 10.6 and Fluka version 4-1.1 were used for the modeling. For Geant4 the physics list and parameters recommended by the Geant4 collaboration for radiation therapy applications were used. In particular, QGSP_BERT_HP physics list and range cut of 100 μm was considered for all the particles.

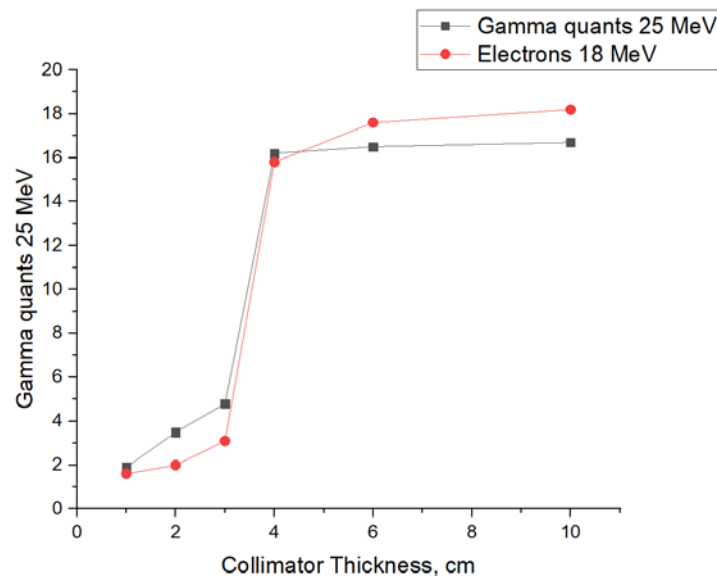


Fig. 3. PVDR for different thickness tungsten collimator for gamma quanta 25MeV and electrons 18MeV

Results of simulation show possibility for high-rate ionization radiation fractionization. Several types and geometries of collimators were investigated to assess the possible gain in tissue sparing with respect to seamless irradiation. Detailed results of simulation for new one will be presented in the full paper.

Discussions. The modular design of our collimators, with its adaptable size and geometry, provides an essential advantage. It allows for tailoring the collimation to specific beam energies and types, thus accommodating diverse clinical scenarios. The incorporation of central slits effectively generates minibeam, optimizing the peak-to-valley dose ratio (PVDR) and ensuring minimal valley dose, both of which are critical for achieving therapeutic success.

While our study primarily focuses on the technical aspects of collimator design and simulation, the ultimate goal of spatially fractionated radiation therapy is to benefit patients. Future biological studies are warranted to assess the clinical impact of fractionation on both normal and tumoral tissues. Understanding how this approach affects tissue repair mechanisms and overall treatment outcomes is crucial for its practical implementation.

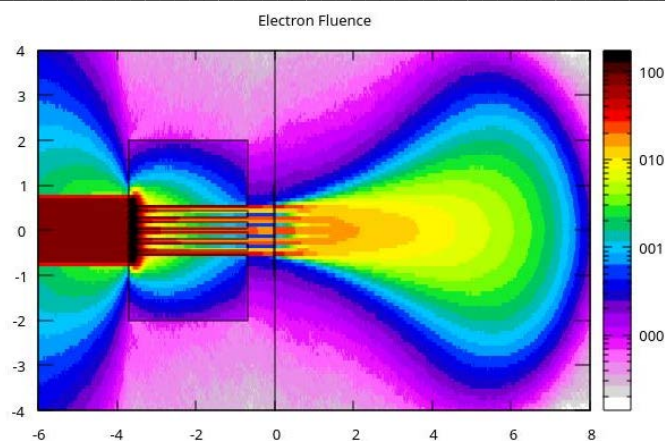


Fig. 3. Beam distribution in the tungsten collimator (3 cm width) for electron beam 18MeV. After passing the collimator, the minibeam penetrate into PMMA at $x=0$.

The successful implementation of spatially fractionated radiation therapy with metal matrix collimators requires careful consideration of clinical workflows and patient-specific treatment planning. Future research should focus on translating these findings into clinical practice, addressing practical challenges, and ensuring safe and effective treatment delivery.

Conclusions

In the present work, a new type of matrix collimator made out of Tungsten, Tantalum and Iron for the shaping mini beams has been simulated and tested to improve the efficiency of the spatial dose fractionation for different types of ionizing radiation.

The Monte Carlo simulation code has been developed to optimize the features (material, thickness, etc.) of collimating systems (multi slits or matrix) to produce optimal multi-beam structures for maximum efficiency of spatially fractionated radiation therapy. It has been shown that the high levels of delivery dose fractionization can be achieved for x-rays and electrons.

The general conclusion is that fractionation seems to offer a promising alternative to treat delicate cases.

Following this results, biological studies are warranted to assess the effects of fractionation on both normal and tumoral tissues, for which the practical implementation of collimation seems justified.

References

1. Igor E. Anokhin, Valery M. Pugatch, Dmytro M. Ramazanov, Dmytro V. Storozhyk, Matrix metal collimators studies for the spatially fractionated radiation therapy // 2020 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Conference theses NSS-11
2. Y. Prezado and G.R. Fois, "Proton-minibeam radiation therapy: A proof of concept", Medical Physics, Vol. 40, No. 3
3. V. Pugatch et al., "Metal micro-detector TimePix imaging synchrotron radiation beams at the ESRF Bio-Medical Beamline ID17", Nucl. Instr. Meth., Vol. A682, 2012, p. 8-11

УДК: 621.762; 006.32

DOI 10.36910/775.24153966.2023.75.3

Т.М. Павлиго*Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича НАН України***СТАНДАРТИ ДЛЯ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА (ОГЛЯД)**

У міру того, як індустрія адитивного виробництва рухається до промислового виробництва, потреба у стандартах, що охоплюють всі аспекти технології, стає все більш актуальною. У статті проведено огляд міжнародних стандартів для адитивного виробництва.

Ключові слова: стандартизація, адитивне виробництво.

T.M. Pavlyho**THE STANDARDS FOR ADDITIVE MANUFACTURING (REVIEW)**

As the additive manufacturing industry moves toward industrial production, the need for standards that cover all aspects of the technology becomes more pressing. The article reviews international standards for additive manufacturing.

Keywords: standardization, additive manufacturing.

Постановка проблеми. Адитивне виробництво (АМ) – це узагальнена назва технологій, які передбачають виготовлення виробу за даними тривимірної цифрової моделі методом пошарового додавання. У порівнянні з традиційними методами, коли деталі відливаються в задані форми або вирізаються з масивного блоку, АМ засновано на принципі нашарування рідин, порошків, підкладок та плівок для створення тривимірних структур без використання форми. Перспективність технології визначається тим, що питома витрата матеріалів на виробництво деталей при використанні адитивних методів зменшується майже у 10 разів, та у середньому у 5 разів знижуються трудовитрати. Характерною тенденцією останніх років є постійний ріст асортименту та кількості деталей, що виготовляються за адитивними технологіями. І особливо важливим є прогрес у найбільш важкому та інноваційному секторі АМ-технологій – «вирощуванні» виробів із металу. Наявність міжнародних стандартів вкрай потрібна для сприяння широкому використанню процесу та регулюванню оцінки існуючих виробів.

Мета статті – огляд міжнародних стандартів для адитивного виробництва.

Викладення основного матеріалу. Технологія адитивного виробництва пропонує безліч новаторських можливостей для різних компаній по всьому світу. Більшість великих компаній, які використовують АМ для виробництва деталей почали створювати свій власний внутрішній набір матеріалів та інструкцій через відсутність стандартів. Тому знання про процеси адитивного виробництва та створення загальних технічних стандартів для цієї галузі є дуже важливим питанням сьогодення.

Стандартизація — це трудомістке завдання, яке вирішують зацікавлені сторони через участь у різних комітетах зі стандартизації по всьому світу. Зрештою, всі сторони, від виробників адитивних машин та порошків до виробників деталей та кінцевих користувачів, виграють від цих стандартів, оскільки вони є запорукою надійності та довіри до технології.

У 2009 році ASTM International створила комітет F42 [1] з адитивних технологій виробництва. У тому ж році розпочалася національна діяльність у Німеччині та Великій Британії. ISO (Міжнародна організація зі стандартизації) розпочала свою діяльність у рамках TC 261 [2] у 2011 році, а в липні 2013 року обидві організації, ASTM та ISO розробили спільний план розробки стандартів. Метою цієї угоди є усунення дублювання зусиль при максимальному розподілі ресурсів у галузі адитивного виробництва.

Тож на сьогодні є дві основні міжнародні установи, що готують, розробляють та публікують стандарти, щодо адитивного виробництва – це ISO та ASTM International. Європейський комітет зі стандартизації (CEN) [3] також сформував комітети зі стандартизації АМ на регіональному рівні. Крім того, існує низка національних комітетів, пов'язаних зі стандартизацією. До них відносяться BSI (Британський інститут стандартів) [4] та французька AFNOR [5]. У Німеччині національний орган стандартизації DIN (Deutsches Institut für Normung) [6] публікує стандарти, щодо АМ, у співпраці з VDMA (Verband deutscher Maschinen-und Anlagenbauer) [7] та VDI (Verein Deutscher Ingenieure) [8].

У 2020 році ISO/TC 261 у свою чергу уклав додаткові офіційні угоди про співпрацю із 30 комітетами та організаціями.

Гармонізація різних підходів для досягнення загального набору загальноприйнятих стандартів в усьому світі є величезною проблемою. На сьогоднішній день опубліковано стандарти, що охоплюють такі галузі адитивного виробництва:

- термінологія, номенклатура та формати даних;
- матеріали;
- випробування.

У таблиці 1 наведено опубліковані стандарти для адитивного виробництва.

Табл. 1.

Опубліковані міжнародні стандарти в галузі адитивного виробництва [9]

з/п	Позначення та назва стандарту	
	2	3
	ISO 17295:2023	Additive manufacturing. General principles. Part positioning, coordinates and orientation (Адитивне виробництво. Загальні принципи. Позичування деталей, координати та орієнтація)
	ISO 17296-2:2015	Additive manufacturing. General principles. Part 2: Overview of process categories and feedstock (Адитивне виробництво. Загальні принципи. Частина 2: Огляд категорій процесів і вихідної сировини)
	ISO 17296-3:2014	Additive manufacturing. General principles. Part 3: Main characteristics and corresponding test methods (Адитивне виробництво. Загальні принципи. Частина 3: Основні характеристики та відповідні методи випробувань)
	ISO/ASTM 52900:2021	Additive manufacturing. General principles. Fundamentals and vocabulary (Адитивне виробництво. Загальні принципи. Основи виробництва та словник термінів)
	ISO/ASTM 52901:2017	Additive manufacturing. General principles. Requirements for purchased AM parts (Адитивне виробництво. Загальні принципи. Вимоги до придбаних запчастин AM)
	ISO/ASTM 52902:2019	Additive manufacturing. Test artifacts. Geometric capability assessment of additive manufacturing systems (Адитивне виробництво. Випробні артефакти. Оцінка геометричних можливостей систем адитивного виробництва)
	ISO/ASTM 52903-1:2020	Additive manufacturing. Material extrusion-based additive manufacturing of plastic materials. Part 1: Feedstock materials (Адитивне виробництво. Адитивне виробництво пластичних матеріалів на основі екструзії матеріалів. Частина 1: Вихідні матеріали)
	ISO/ASTM 52903-2:2020	Additive manufacturing. Material extrusion-based additive manufacturing of plastic materials. Part 2: Process equipment (Адитивне виробництво. Адитивне виробництво пластичних матеріалів на основі екструзії матеріалів. Частина 2: Технологічне обладнання)
	ISO/ASTM 52904:2019	Additive manufacturing. Process characteristics and performance. Practice for metal powder bed fusion process to meet critical applications (Адитивне виробництво. Характеристики процесу та продуктивність. Практика процесу плавлення шару металевих порошків для критичних застосувань)
0	ISO/ASTM 52906:2022	TR Additive manufacturing. Non-destructive testing. Intentionally seeding flaws in metallic parts (Адитивне виробництво. Неруйнівний контроль. Навмисне виявлення дефектів у металевих частинах)
1	ISO/ASTM 52907:2019	Additive manufacturing. Feedstock materials. Methods to characterize metal powders (Адитивне виробництво. Вихідні матеріали. Методи характеристики металевих порошків)

2	ISO/ASTM 52909:2022	Additive manufacturing of metals. Finished part properties. Orientation and location dependence of mechanical properties for metal powder bed fusion (Адитивне виробництво металів. Властивості готової частини. Орієнтація та залежність розташування механічних властивостей для розплавленого шару металевих порошків)
3	ISO/ASTM 52910:2018	Additive manufacturing. Design. Requirements, guidelines and recommendations (Адитивне виробництво. Проектування. Вимоги, вказівки та рекомендації)
4	ISO/ASTM 52911-1:2019	Additive manufacturing. Design. Part 1: Laser-based powder bed fusion of metals (Адитивне виробництво. Проектування. Частина 1: Розплавлення металів у порошковому шарі за допомогою лазера)
5	ISO/ASTM 52911-2:2019	Additive manufacturing. Design. Part 2: Laser-based powder bed fusion of polymers (Адитивне виробництво. Проектування. Частина 2: Лазерне сплавлення полімерів у порошковому шарі)
6	ISO/ASTM 52911-3:2023	Additive manufacturing. Design. Part 3: PBF-EB of metallic materials (Адитивне виробництво. Проектування. Частина 3: PBF-EB металевих матеріалів)
7	ISO/ASTM 52912:2020	TR Additive manufacturing. Design. Functionally graded additive manufacturing (Адитивне виробництво. Проектування. Функціонально ґрадуйоване адитивне виробництво)
8	ISO/ASTM 52915:2020	Specification for additive manufacturing file format (AMF) Version 1.2 (Специфікація формату файлу адитивного виробництва (AMF) Версія 1.2)
9	ISO/ASTM 52916:2022	TR Additive manufacturing for medical. Data. Optimized medical image data (Адитивне виробництво для медицини. Дані. Оптимізовані дані медичних зображень)
0	ISO/ASTM 52917:2022	TR Additive manufacturing. Round robin testing. General guidelines (Адитивне виробництво. Циклічне тестування. Загальні вказівки)
1	ISO/ASTM 52925:2022	Additive manufacturing of polymers. Feedstock materials. Qualification of materials for laser-based powder bed fusion of parts (Адитивне виробництво полімерів. Вихідні матеріали. Атестація матеріалів для лазерного порошкового зварювання деталей)
2	ISO/ASTM 52930:2021	TS Additive manufacturing. Qualification principles. Installation, operation and performance (IQ/OQ/PQ) of PBF-LB equipment (Адитивне виробництво. Принципи відповідності. Монтаж, експлуатація та продуктивність (IQ/OQ/PQ) обладнання PBF-LB)
3	ISO/ASTM 52931:2023	Additive manufacturing of metals. Environment, health and safety. General principles for use of metallic materials (Адитивне виробництво металів. Навколишнє середовище, здоров'я та безпека. Загальні принципи використання металевих матеріалів)
4	ISO/ASTM 52936-1:2023	Additive manufacturing of polymers. Qualification principles. Part 1: General principles and preparation of test specimens for PBF-LB (Адитивне виробництво полімерів. Принципи оцінки. Частина 1: Загальні принципи та підготовка випробувальних зразків для PBF-LB)
5	ISO/ASTM 52941:2020	Additive manufacturing. System performance and reliability. Acceptance tests for laser metal powder-bed fusion machines for metallic materials for aerospace application (Адитивне виробництво. Продуктивність і надійність системи. Приймальні випробування лазерних машин для плавлення металевих порошкових шарів у металевих матеріалах для аерокосмічного застосування)

6	ISO/ASTM 52942:2020	Additive manufacturing. Qualification principles. Qualifying machine operators of laser metal powder bed fusion machines and equipment used in aerospace applications (Адитивне виробництво. Принципи кваліфікації. Кваліфіковані оператори машин для лазерного плавлення металевих порошкових шарів та обладнання, що використовується в аерокосмічній галузі)
7	ISO/ASTM 52950:2021	Additive manufacturing. General principles. Overview of data processing (Адитивне виробництво. Загальні принципи. Огляд обробки даних)

Перші з опублікованих стандартів стосувались термінології, бо існувало дуже багато різних термінів та аббревіатур для технології АМ. Загальним терміном для всієї галузі адитивного виробництва є 3D-друк, що в основному пов'язане з ажіотажем навколо недорогих домашніх принтерів. Адитивне виробництво передбачає більш точне виробництво кінцевої деталі і складніші процеси виготовлення металевих компонентів.

Машини, які за адитивними технологіями створюють деталі з металу можна вважати верхом інженерного мистецтва, адже в них сконцентровано найпередовіші знання з металургії, лазерної техніки, оптики, електроніки, систем управління, вимірювальних пристроїв, механіки, вакуумної техніки та інших.

Розглянемо стандарти щодо загальних принципів адитивного виробництва та виробництва виробів із металевих порошків.

ISO/ASTM 52900:2021 Additive manufacturing. General principles. Fundamentals and vocabulary (Адитивне виробництво. Загальні принципи. Основи виробництва та словник термінів) [10].

У цьому документі встановлюють та визначають терміни, які використовують в технології адитивного виробництва (АМ), із застосуванням принципу адитивного формування та створення фізичних тривимірних (3D) геометрій шляхом послідовного додавання матеріалу. Терміни класифіковано за сферами застосування.

ISO 17296-3:2014 Additive manufacturing. General principles. Part 3: Main characteristics and corresponding test methods (Адитивне виробництво. Загальні принципи. Частина 3: Основні характеристики та відповідні методи випробувань) [11].

Цей документ охоплює основні вимоги до випробувань деталей, виготовлених за допомогою процесів адитивного виробництва. Він визначає основні характеристики якості деталей, визначає відповідні процедури випробувань та рекомендує обсяг та зміст випробувань та договорів на поставку. Він призначений для виробників машин, постачальників сировини, користувачів машин, постачальників запчастин та клієнтів, щоб полегшити спілкування за основними характеристиками якості. Він застосовується скрізь, де застосовують процеси адитивного виробництва.

ISO/ASTM 52950:2021 Additive manufacturing. General principles. Overview of data processing (Адитивне виробництво. Загальні принципи. Огляд обробки даних) [12].

Цей документ охоплює основні аспекти обміну даними для адитивного виробництва. Він уточнює терміни та визначення, які дозволяють обмінюватися інформацією з описом геометрії або деталей, щоб їх можна було виготовляти адитивними методами. У методі обміну даними вказують тип файлу, форматування даних і те, для чого їх можна використати. Також цей документ дозволяє вказати відповідний формат для обміну даними, описує існуючі розробки для адитивного виробництва 3D геометрій, описує існуючі формати файлів, що використовуються як частина існуючих розробок, і дозволяє зрозуміти необхідні функції для обміну даними для тих, хто приймає цей документ. Він призначений для користувачів і виробників процесів адитивного виробництва та відповідних програмних систем. Застосовують його виробники систем і обладнання адитивного виробництва, включаючи програмне забезпечення; інженери-програмісти, що займаються системами CAD/CAE; розробники систем зворотного проектування; випробувальні лабораторії, що порівнюють задану та фактичну геометрії.

ISO 17295:2023 Additive manufacturing. General principles. Part positioning, coordinates and orientation (Адитивне виробництво. Загальні принципи. Позичування деталей, координати та орієнтація) [13].

Цей документ надає специфікації та ілюстрації для позиціонування та орієнтації деталей щодо систем координат і методології тестування для технологій адитивного виробництва (АМ) з метою

стандартизації методу представлення, який використовують користувачі АМ, виробники, дослідники, освітяни, преса/ засоби масової інформації та інші, особливо під час звітування про результати тестування деталей, виготовлених на системах АМ. Подані у стандарті специфікації стосуються систем координат, розташування та орієнтації частин. Він відповідає принципам ISO 841 і пояснює конкретну адаптацію цих принципів для адитивного виробництва.

ISO 17296-2:2015 Additive manufacturing. General principles. Part 2: Overview of process categories and feedstock (Адитивне виробництво. Загальні принципи. Частина 2: Огляд категорій процесів і вихідної сировини) [14].

Цей документ описує основи процесу адитивного виробництва (АМ). У ньому подають огляд існуючих категорій процесів, які є невичерпними через розвиток нових технологій. Стандарт пояснює, як різні категорії процесів використовують різні типи матеріалів для формування геометрії виробу. Він також описує, який тип матеріалу використовують в різних категоріях процесу. Специфікації вихідного матеріалу та вимоги до частин, виготовлених шляхом поєднання різних процесів і вихідного матеріалу, будуть надані в наступних частинах цього стандарту.

ISO/ASTM 52901:2017 Additive manufacturing. General principles. Requirements for purchased AM parts (Адитивне виробництво. Загальні принципи. Вимоги до придбаних запчастин АМ) [15].

Цей документ визначає та конкретизує вимоги до придбаних деталей, виготовлених шляхом адитивного виробництва. У стандарті є вказівки щодо елементів, якими необхідно обмінюватися між замовником і постачальником деталей під час замовлення, включаючи інформацію про замовлення клієнта, дані визначення деталей, вимоги до сировини, кінцеві характеристики та властивості деталей, вимоги до перевірки та методи приймання деталей. Цей стандарт є основою для отримання деталей, виготовлених шляхом адитивного виробництва, які відповідають мінімальним вимогам прийнятності. Більш суворі вимоги до деталей можна вказати шляхом додавання однієї або кількох додаткових вимог під час замовлення.

ISO/ASTM 52902:2019 Additive manufacturing. Test artifacts. Geometric capability assessment of additive manufacturing systems (Адитивне виробництво. Випробні артефакти. Оцінка геометричних можливостей систем адитивного виробництва) [16].

Цей документ охоплює загальний опис геометрії зразків для порівняльного аналізу, а також кількісні та якісні вимірювання, які необхідно провести на зразках для порівняльного аналізу для оцінки ефективності систем адитивного виробництва їх можливостей та калібрування.

Зразок(и) для порівняльного аналізу в основному використовують для кількісної оцінки геометричних характеристик системи АМ. У цьому документі описано набір тестових геометрій, кожна з яких призначена для дослідження одного або кількох конкретних показників ефективності та кілька прикладів конфігурацій цих геометрій у тестових зразках. Він визначає кількість і якість тестових геометрій, що підлягають вимірюванню, але не диктує конкретні методи вимірювання. Різні програми користувача можуть вимагати різного рівня продуктивності. У цьому документі обговорюють приклади конфігурацій функцій, а також вимоги до невизначеності вимірювань, щоб продемонструвати перевірку низького та високого класу та продуктивності. У цьому документі не розглядають конкретні процедури чи параметри машини для виготовлення випробувального зразка, які охоплюють ASTM F 2971 та іншими відповідними специфікаціями процесу.

ISO/ASTM 52904:2019 Additive manufacturing. Process characteristics and performance. Practice for metal powder bed fusion process to meet critical applications (Адитивне виробництво. Характеристики процесу та продуктивність. Практика процесу плавлення шару металевого порошку для критичних застосувань) [17].

Цей документ описує роботу та контроль виробництва машин і процесів для плавлення металевого порошку (PBF) для критичних застосувань, таких як комерційні аерокосмічні компоненти та медичні імпланти. Вимоги, що містяться в цьому документі, застосовують до виробничих компонентів і зразків для механічних випробувань з використанням плавлення порошкового шару (PBF) як лазерними, так і електронними променями.

ISO/ASTM TR 52906:2022 Additive manufacturing. Non-destructive testing. Intentionally seeding flaws in metallic parts (Адитивне виробництво. Неруйнівний контроль. Навмисне виявлення дефектів у металевих частинах) [18].

Цей документ слугує найкращою практикою для ідентифікації дефектів у металевих сплавах, які можна виявити неруйнівним методом, у процесах PBF та DED. Описано три категорії дефектів: недоліки процесу через проектування САПР; маніпулювання параметрами побудови; субтрактивне виробництво.

До них належать дефекти, що наявні в матеріалах, які піддавали термічному обробленню або гарячому ізостатичному пресуванню, а також ті дефекти, які можна виявити завдяки операціям заключної обробки.

Стандартизація вихідних матеріалів для адитивного виробництва є важливим питанням для досягнення надійних властивостей компонентів та процесів. Металеві порошки, як сировина вимагають чіткої технології виготовлення та обробки, і найменші відхилення у властивостях порошку можуть мати величезний вплив на технологічність та властивості компонентів. Для порошків визначають ряд важливих характеристики таких як, розмір частинок, текучість або сипкість, густина, кут природного укусу, вологість.

ISO/ASTM 52907:2019 Additive manufacturing. Feedstock materials. Methods to characterize metal powders (Адитивне виробництво. Вихідні матеріали. Методи характеристики металевих порошків) [19].

Цей документ містить технічні специфікації для металевих порошків, призначених для використання в адитивному виробництві, і охоплює такі аспекти: документування та простежуваність; відбір проб; гранулометричний склад; хімічний склад; характерні густини; морфологія; сипучість; забруднення; пакування та зберігання. Крім того, цей документ містить спеціальні вимоги до металевих порошків, що використовуються у адитивному виробництві.

ISO/ASTM 52909:2022 Additive manufacturing of metals. Finished part properties. Orientation and location dependence of mechanical properties for metal powder bed fusion (Адитивне виробництво металів. Властивості готової частини. Орієнтація та залежність розташування механічних властивостей для розплавленого шару металевого порошку) [20].

Цей документ охоплює додаткові вказівки щодо оцінки механічних властивостей, включаючи статичні/квазістатичні та динамічні випробування металів, виготовлених за допомогою адитивного виробництва (AM), а також вказівки щодо звітності.

У цьому документі є посилання на вже існуючі стандарти. Наведені вказівки щодо вимірювання механічних властивостей та звітності для металевих зразків, а також для зразків, вирізаних із частин. Цей документ розширює номенклатуру ISO/ASTM 52900 і принципи ISO/ASTM 52921 і поширює їх на адитивне виробництво із металів.

ISO/ASTM 52910:2018 Additive manufacturing. Design. Requirements, guidelines and recommendations (Адитивне виробництво. Проектування. Вимоги, вказівки та рекомендації) [21].

У цьому документі містяться вимоги, вказівки та рекомендації щодо використання адитивного виробництва (AM) у проектуванні виробів. Його застосовують під час проектування всіх типів виробів, пристроїв, систем, компонентів або частин, які виготовляють будь-яким методом AM.

ISO/ASTM 52911-1:2019 Additive manufacturing. Design. Part 1: Laser-based powder bed fusion of metals (Адитивне виробництво. Проектування. Частина 1: Розплавлення металів у порошковому шарі за допомогою лазера) [22].

У цьому документі описано особливості лазерного плавлення металів у порошковому шарі (PBF-LB/M) і надано детальні рекомендації щодо проектування. Він містить сучасний огляд інструкцій щодо проектування і розширює сферу застосування ISO/ASTM 52910.

ISO/ASTM 52911-3:2023 Additive manufacturing. Design. Part 3: PBF-EB of metallic materials (Адитивне виробництво. Проектування. Частина 3: PBF-EB металевих матеріалів) [23].

У цьому документі описано особливості електронно-променевого порошкового плавлення металів (PBF-EB/M) і надано детальні рекомендації щодо проектування. Він містить сучасний огляд інструкцій щодо проектування і розширює сферу застосування ISO/ASTM 52910.

ISO/ASTM TR 52912:2020 Additive manufacturing. Design. Functionally graded additive manufacturing (Адитивне виробництво. Проектування. Функціонально градуйоване адитивне виробництво) [24].

Використання адитивного виробництва (AM) дозволяє виготовляти геометрично складні компоненти шляхом точного осадження матеріалів у контрольований спосіб. Технологічний прогрес у апаратному забезпеченні, програмному забезпеченні AM, а також відкриття нових ринків вимагають більшої гнучкості та більшої ефективності сучасних продуктів, заохочуючи дослідження нових матеріалів із функціональними градаціями та високопродуктивними можливостями. Це було названо функціонально градієнтним адитивним виробництвом (FGAM), пошаровою технікою виготовлення, яка передбачає поступове змінення співвідношення організації матеріалу в компоненті для виконання призначеної функції. Оскільки дослідження в цій галузі викликають інтерес у всьому світі,

інтерпретації концепції FGAM потребують більшого роз'яснення. Цей документ надає концептуальне розуміння FGAM. У ньому розглянуто сучасний рівень техніки та можливості технології FGAM разом із її складними технологічними перешкодами та обмеженнями; оцінено формати обміну даними та представлено деякі нещодавні програми, а також дані рекомендації щодо можливих стратегій подолання бар'єрів і майбутніх напрямків розвитку FGAM.

ISO/ASTM 52915:2020 Specification for additive manufacturing file format (AMF) Version 1.2 (Специфікація формату файлу адитивного виробництва (AMF) Версія 1.2) [25].

Цей документ містить специфікацію для формату файлів адитивного виробництва (AMF), формату обміну адресами поточних і майбутніх потреб технології адитивного виробництва. AMF можна підготувати, відобразити та передати за умови дотримання вимог цієї специфікації. При підготовці в структурованому електронному форматі необхідно суворе дотримання схеми розширюваної мови розмітки (XML) необхідне для підтримки взаємодії, сумісної зі стандартами.

ISO/ASTM TR 52917:2022 Additive manufacturing. Round robin testing. General guidelines (Адитивне виробництво. Циклічне тестування. Загальні вказівки) [26].

Цей документ зосереджений на управлінні циклічним дослідженням (RRS) і надає вказівки щодо розробки обсягу, планування та виконання дослідження RRS. Він надає вказівки щодо визначення вихідної сировини, операцій машини, засобів керування процесом та операцій після обробки до початку дослідження. Організатори тестування можуть визначити під час дослідження контрольовані та додаткові параметри. Цей документ також надає вказівки щодо вибору та використання методів тестування. RRS досліджує варіації, виявлені в методах АМ. Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення технологій АМ.

RRS, як описано в цьому документі, відрізняється від міжлабораторного порівняння, оскільки міжлабораторне дослідження встановлює варіабельність методу вимірювання, коли його проводять кілька користувачів на добре контрольованому зразку.

ISO/ASTM TS 52930:2021 Additive manufacturing. Qualification principles. Installation, operation and performance (IQ/OQ/PQ) of PBF-LB equipment (Адитивне виробництво. Принципи відповідності. Монтаж, експлуатація та продуктивність (IQ/OQ/PQ) обладнання PBF-LB) [27].

У цьому документі розглядають питання відповідності встановлення (IQ), відповідності експлуатації (OQ) і відповідності продуктивності (PQ), безпосередньо пов'язані з адитивним виробництвом, які безпосередньо впливають на консолідацію матеріалу. Перші три елементи валідації процесу, відображення процесу, оцінка ризику та планування валідації є необхідними передумовами для встановлення характеристик машини. Цей документ охоплює питання, безпосередньо пов'язані з обладнанням АМ. Питання щодо фізичних засобів, персоналу, процесу та матеріалів включено лише в обсязі, необхідному для визначення характеристик машини.

ISO/ASTM 52931:2023 Additive manufacturing of metals. Environment, health and safety. General principles for use of metallic materials (Адитивне виробництво металів. Навколишнє середовище, здоров'я та безпека. Загальні принципи використання металевих матеріалів) [28].

У цьому документі містяться вказівки та вимоги щодо оцінки ризиків у адитивному виробництві із використанням металевих порошків та впровадження заходів запобігання таких ризиків. Ризики, що описані у цьому документі, стосуються всіх етапів виробничого процесу, включаючи управління відходами. Цей документ не встановлює вимог до конструкції машин і обладнання, що використовуються для адитивного виробництва.

ISO/ASTM 52941:2020 Additive manufacturing. System performance and reliability. Acceptance tests for laser metal powder-bed fusion machines for metallic materials for aerospace application (Адитивне виробництво. Продуктивність і надійність системи. Приймальні випробування лазерних машин для плавлення металевих порошкових шарів у металевих матеріалах для аерокосмічного застосування) [29].

Цей документ визначає вимоги та методи випробувань для оцінки та повторної оцінки лазерних променевих машин для сплавлення шарів металевих порошків для аерокосмічного застосування у адитивному виробництві. Його також можна використовувати для перевірки характеристик машини під час періодичних перевірок або після технічного обслуговування та ремонту.

ISO/ASTM 52942:2020 Additive manufacturing. Qualification principles. Qualifying machine operators of laser metal powder bed fusion machines and equipment used in aerospace applications (Адитивне виробництво. Принципи кваліфікації. Кваліфікація операторів машин та

обладнання для лазерного плавлення металевих порошкових шарів, що використовується в аерокосмічній галузі) [30].

У цьому документі встановлюють вимоги до кваліфікації операторів лазерних машин та обладнання для плавлення металевих порошків для адитивного виробництва, що застосовують у аерокосмічній галузі. Цей документ застосовують, якщо кваліфікаційне оцінювання оператора вимагається контрактом або стандартами застосування в галузі аерокосмічної галузі.

ISO/ASTM 52950:2021 Additive manufacturing. General principles. Overview of data processing (Адитивне виробництво. Загальні принципи. Огляд обробки даних) [31].

Цей документ охоплює основні аспекти обміну даними для адитивного виробництва. Він уточнює терміни та визначення, які дозволяють обмінюватися інформацією з описом геометрії або деталей, щоб їх можна було виготовляти адитивними методами. У методі обміну даними вказують тип файлу, форматування даних і те, для чого їх можна використати. Також цей документ дозволяє вказати відповідний формат для обміну даними, описує існуючі розробки для адитивного виробництва 3D геометрій, описує існуючі формати файлів, що використовуються як частина існуючих розробок, і дозволяє зрозуміти необхідні функції для обміну даними для тих, хто приймає цей документ. Він призначений для користувачів і виробників процесів адитивного виробництва та відповідних програмних систем. Застосовують його виробники систем і обладнання адитивного виробництва, включаючи програмне забезпечення; інженери-програмісти, що займаються системами CAD/CAE; розробники систем зворотного проектування; випробувальні лабораторії, що порівнюють задану та фактичну геометрію.

Адитивне виробництво деталей із металів сьогодні досягло статусу, за якого воно робить крок до індустріалізації. Зокрема, стоматологічна та аерокосмічна галузі вже перейшли на виробництво у промислових масштабах, і їм потрібні стандарти для властивостей матеріалів, процедур випробувань та багато іншого.

Попереду ще багато завдань, щоб зробити цю технологію успішною. Зокрема, тісний зв'язок між параметрами виробничого процесу та властивостями матеріалу потребує особливої уваги порівняно із звичайними процесами обробки металів тиском. Також необхідно враховувати вплив різних систем машин та умов виробництва, що призводить до різних властивостей.

Крім того, властивості матеріалу сильно залежать від вихідного матеріалу (наприклад, металевого порошку) у поєднанні з надійним набором параметрів у межах технологічних операцій. Знаючи це, дуже важливо перевіряти властивості та створювати надійні виробничі процеси для адитивного виробництва. Системи управління якістю також потребують уваги з погляду на правила контролю та перевірки.

Міжнародні організації зі стандартизації не припиняють роботу над створенням нових стандартів для адитивного виробництва. У таблиці 2 наведено проекти стандартів, над якими ведеться робота.

З розвитком адитивного виробництва зріс інтерес до металевих деталей, що виготовляються цими методами, а це у свою чергу поставило ряд питань перед академічним та науковим світом з розроблення нових сплавів, оптимізації параметрів процесів та геометрії виробів, питанням надійності виготовлених деталей.

Україна не відстає від високотехнологічних країн у впровадженні адитивних технологій.

Науково-дослідні колективи Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича НАН України, Інституту електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України, Національного авіаційного університету, Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М.Бакуля НАН України ведуть свої дослідження в області нових матеріалів та технологій для адитивного виробництва. В Україні існує декілька успішних стартапів із розроблення 3D-принтерів для друку керамічними та металевими матеріалами.

В Україні, на жаль, ще не створено технічного комітету зі стандартизації адитивних технологій, який би займався створенням національних та впровадженням міжнародних стандартів у цій галузі. Такий комітет можна створити на базі Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича НАН України, тим більше, що при інституті діє Технічний комітет стандартизації «Порошкова металургія» (ТК 54), роботу якого можна орієнтувати на забезпечення впровадження адитивних технологій, з метою розробки вітчизняних та гармонізації міжнародних та європейських стандартів.

Міжнародні стандарти можуть допомогти гарантувати рівень відтворюваності та дати бізнесу та виробникам такі необхідні гарантії.

Табл. 2.

Проекти міжнародних стандартів в галузі адитивного виробництва [32]

з/п	Позначення та назва стандарту	
	2	3
	ISO/DIS 27548	Additive manufacturing of plastics. Environment, health, and safety. Test method for determination of particle and chemical emission rates from desktop material extrusion 3D printer (Адитивне виробництво пластмас. Навколишнє середовище, здоров'я та безпека. Метод випробувань для визначення інтенсивності викидів частинок і хімічних речовин із настільного 3D-принтера для екструзії матеріалів)
	ISO/ASTM FDIS 52902	Additive manufacturing. Test artifacts. Geometric capability assessment of additive manufacturing systems (Адитивне виробництво. Тестові артефакти. Оцінка геометричних можливостей систем адитивного виробництва)
	ISO/ASTM DIS 52904	Additive manufacturing of metals. Process characteristics and performance. Metal powder bed fusion process to meet critical applications (Адитивне виробництво металів. Характеристики процесу та продуктивність. Процес плавлення шару металевого порошку для критичних застосувань)
	ISO/ASTM DTR 52905	Additive manufacturing of metals. Non-destructive testing and evaluation. Defect detection in parts (Адитивне виробництво металів. Неруйнівний контроль та оцінка. Виявлення дефектів деталей)
	ISO/ASTM DIS 52908	Additive manufacturing of metals. Finished Part properties. Post-processing, inspection and testing of parts produced by powder bed fusion (Адитивне виробництво металів. Властивості готової частини. Подальше оброблення, перевірка та випробування деталей, виготовлених методом порошкового сплавлення)
	ISO/ASTM DIS 52910	Additive manufacturing. Design. Requirements, guidelines and recommendations (Адитивне виробництво. Дизайн. Вимоги, вказівки та рекомендації)
	ISO/ASTM DTR 52913-1	Additive manufacturing. Feedstock materials. Part 1: Parameters for characterization of powder flow properties (Адитивне виробництво. Вихідні матеріали. Частина 1: Параметри для характеристики властивостей текучості порошку)
	ISO/ASTM CD TR 52918	Additive manufacturing. Data formats. File format support, ecosystem and evolutions (Адитивне виробництво. Формати даних. Підтримка форматів файлів, екосистема та еволюція)
	ISO/ASTM CD 52919	Additive manufacturing. Qualification principles. Test method of sand moulds for metal casting (Адитивне виробництво. Принципи кваліфікації. Метод випробування піщаних форм для лиття металу)
0	ISO/ASTM FDIS 52920	Additive manufacturing. Qualification principles. Requirements for industrial additive manufacturing processes and production sites (Адитивне виробництво. Принципи кваліфікації. Вимоги до промислових процесів адитивного виробництва і виробничих ділянок)
1	ISO/ASTM FDIS 52924	Additive manufacturing of polymers. Qualification principles. Classification of part properties (Адитивне виробництво полімерів. Принципи кваліфікації. Класифікація властивостей деталей)
2	ISO/ASTM DIS 52926-1	Additive Manufacturing of metals. Qualification principles. Part 1: General qualification of operators (Адитивне виробництво

		металів. Принципи кваліфікації. Частина 1: Загальна кваліфікація операторів)
3	ISO/ASTM DIS 52926-2	Additive Manufacturing of metals. Qualification principles. Part 2: Qualification of operators for PBF-LB (Адитивне виробництво металів. Принципи кваліфікації. Частина 2. Кваліфікація операторів для PBF-LB)
4	ISO/ASTM DIS 52926-3	Additive Manufacturing of metals. Qualification principles. Part 3: Qualification of operators for PBF-EB (Адитивне виробництво металів. Принципи кваліфікації. Частина 3. Кваліфікація операторів для PBF-EB)
5	ISO/ASTM DIS 52926-4	Additive Manufacturing of metals. Qualification principles. Part 4: Qualification of operators for DED-LB (Адитивне виробництво металів. Принципи кваліфікації. Частина 4: Кваліфікація операторів для DED-LB)
6	ISO/ASTM DIS 52926-5	Additive Manufacturing of metals. Qualification principles. Part 5: Qualification of operators for DED-Arc (Адитивне виробництво металів. Принципи кваліфікації. Частина 5: Кваліфікація операторів для DED-Arc)
7	ISO/ASTM DIS 52927	Additive manufacturing. General principles. Main characteristics and corresponding test methods (Адитивне виробництво. Загальні принципи. Основні характеристики та відповідні методи випробувань)
8	ISO/ASTM DIS 52928	Additive manufacturing of metals. Feedstock materials. Powder life cycle management (Адитивне виробництво металів. Вихідні матеріали. Управління життєвим циклом порошку)
9	ISO/ASTM CD 52929	Additive manufacturing of metals. Powder bed fusion. Presentation of material properties in material data sheets (Адитивне виробництво металів. Розплавлення порошкового шару. Відображення властивостей матеріалів у паспортах матеріалів)
0	ISO/ASTM DIS 52933	Additive manufacturing. Environment, health and safety. Test method for the hazardous substances emitted from material extrusion type 3D printers in the non-industrial places (Адитивне виробництво. Навколишнє середовище, здоров'я та безпека. Метод випробування небезпечних речовин, що виділяються 3D-принтерами типу екструзії матеріалів у непромислових місцях)
1	ISO/ASTM DIS 52935	Additive manufacturing of metals. Qualification principles. Qualification of AM coordination personnel (Адитивне виробництво металів. Принципи кваліфікації. Кваліфікація координаційного персоналу AM)
2	ISO/ASTM DIS 52938-1	Additive manufacturing of metals. Environment, health and safety. Part 1: Safety requirements for PBF-LB machines (Адитивне виробництво металів. Навколишнє середовище, здоров'я та безпека. Частина 1: Вимоги безпеки до машин PBF-LB)
3	ISO/ASTM DIS 52939	Additive Manufacturing for construction. Qualification principles. Structural and infrastructure elements (Адитивне виробництво для будівництва. Принципи кваліфікації. Конструктивні та інфраструктурні елементи)
4	ISO/ASTM CD 52940	Additive manufacturing of ceramics. Feedstock materials. Characterization of ceramic slurry in vat photopolymerization (Адитивне виробництво кераміки. Вихідні матеріали. Характеристика керамічної суспензії при фотополімеризації у ваннах)
5	ISO/ASTM CD 52941	Additive manufacturing. System performance and reliability. Acceptance tests for laser metal powder-bed fusion machines for metallic materials for aerospace application (Адитивне виробництво. Продуктивність і надійність системи.

		Приймальні випробування для лазерних машин для плавлення металевих порошкових шарів металевих матеріалів для аерокосмічного застосування)
6	ISO/ASTM DIS 52943-2	Additive manufacturing for aerospace. Process characteristics and performance. Part 2: Directed energy deposition using wire and arc (Адитивне виробництво для аерокосмічної промисловості. Характеристики процесу та продуктивність. Частина 2: Спрямоване укладання дроту за допомогою електричної дуги)
7	ISO/ASTM DIS 52945	Additive manufacturing for automotive. Qualification principles. Generic machine evaluation and specification of key performance indicators for PBF-LB/M processes (Адитивне виробництво для автомобілів. Принципи оцінки. Загальна оцінка машини та специфікація ключових показників продуктивності для процесів PBF-LB/M)
8	ISO/ASTM AWI 52948	Additive manufacturing for metals. Non-destructive testing and evaluation. Imperfections classification in PBF parts (Адитивне виробництво для металів. Неруйнівний контроль та оцінка. Класифікація недосконалостей в деталях PBF)
9	ISO/ASTM DTR 52952	Additive manufacturing of metals. Feedstock materials. Correlating of rotating drum measurement with powder spreadability in PBF-LB machines (Адитивне виробництво металів. Вихідні матеріали. Вимірювання співвідношення обертового барабану із розтіканням порошку в машинах PBF-LB)
0	ISO/ASTM DIS 52953	Additive manufacturing for metals. General principles. Registration of geometric data acquired from process-monitoring and for quality control (Адитивне виробництво для металів. Загальні принципи. Реєстрація геометричних даних, отриманих від моніторингу процесу та для контролю якості)
1	ISO/ASTM CD 52957	Additive Manufacturing. Design. Parts using ceramic materials (Адитивне виробництво. Дизайн. Деталі з використанням керамічних матеріалів)
2	ISO/ASTM CD 52958	Additive Manufacturing of Metals. Powder Bed Fusion (PBF). Best Practice for In-Situ Flaw Detection and Analysis for Laser-based PBF (Адитивне виробництво металів. Розплавлення порошкового шару (PBF). Найкраща практика виявлення та аналізу дефектів на місці для PBF на основі лазера)
3	ISO/ASTM CD 52959	Additive Manufacturing. Test Artifacts. Compression Validation Coupons for Lattice Designs (Адитивне виробництво. Тестові зразки. Система перевірки стисненням для решітчастих конструкцій)

Висновок. Чим більше технологія розвивається і затверджується на ринку, тим більшою стає потреба у загальному розумінні технічних термінів та деталей процесу. Стандарти допомагають підвищити рівень довіри щодо досяжності властивостей, особливо у нових виробничих процесах, таких як адитивне виробництво. Адитивне виробництво - це глобальний бізнес, що потребує міжнародних стандартів. Стандартизація сприяє технічному та економічному співробітництву на національному, регіональному та міжнародному рівнях, забезпечує надійність, прийнятність та безпеку, а також сприяє просуванню технологій на ринку. Впровадження міжнародних стандартів відкриє для України можливість переходу на світові стандарти підвищення рівня технологій, освоєння ресурсів природного середовища, раціонального та розумного споживання енергії, юридичного захисту інтелектуальної власності. Кінцевою метою є створення прогресивної конкурентноспроможної продукції.

Список використаних джерел:

1. ASTM International. – Режим доступу: <https://www.astm.org/committee-f42>.
2. ISO. – Режим доступу: <https://www.iso.org/committee/629086.html>.

3. CEN. – Режим доступу: <https://www.cencenelec.eu>.
4. BSI. – Режим доступу: <https://www.bsigroup.com>.
5. AFNOR ASSOCIATION. – Режим доступу: [afnor.org](https://www.afnor.org).
6. DIN. – Режим доступу: <https://www.din.de/de>.
7. Verband deutscher Maschinen-und Anlagenbauer. – Режим доступу: <https://www.vdma.org>.
8. Verein Deutscher Ingenieure. – Режим доступу: <https://www.vdi.de>.
9. Standards by ISO/TC 261 Additive manufacturing. – Режим доступу: <https://www.iso.org/committee/629086/x/catalogue/p/1/u/0/w/0/d/0>.
10. ISO/ASTM 52900:2021 Additive manufacturing. General principles. Fundamentals and vocabulary. – Режим доступу: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/74514/57d795b6267a427899d7b351598bece2/ISO-ASTM-52900-2021.pdf>.
11. ISO 17296-3:2014 Additive manufacturing. General principles. Part 3: Main characteristics and corresponding test methods. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/61627.html>.
12. ISO/ASTM 52950:2021 Additive manufacturing. General principles. Overview of data processing. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/76830.html>.
13. ISO 17295:2023 Additive manufacturing. General principles. Part positioning, coordinates and orientation. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/76471.html>.
14. ISO 17296-2:2015 Additive manufacturing. General principles. Part 2: Overview of process categories and feedstock. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/61626.html>.
15. ISO/ASTM 52901:2017 Additive manufacturing. General principles. Requirements for purchased AM parts. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/67288.html>.
16. ISO/ASTM 52902:2019 Additive manufacturing. Test artifacts. Geometric capability assessment of additive manufacturing systems. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/67287.html>.
17. ISO/ASTM 52904:2019 Additive manufacturing. Process characteristics and performance. Practice for metal powder bed fusion process to meet critical applications. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/74637.html>.
18. ISO/ASTM TR 52906:2022 Additive manufacturing. Non-destructive testing. Intentionally seeding flaws in metallic parts. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/75716.html>.
19. ISO/ASTM 52907:2019 Additive manufacturing. Feedstock materials. Methods to characterize metal powders. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/73565.html>.
20. ISO/ASTM 52909:2022 Additive manufacturing of metals. Finished part properties. Orientation and location dependence of mechanical properties for metal powder bed fusion. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/74639.html>.
21. ISO/ASTM 52910:2018 Additive manufacturing. Design. Requirements, guidelines and recommendations. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/67289.html>.
22. ISO/ASTM 52911-1:2019 Additive manufacturing. Design. Part 1: Laser-based powder bed fusion of metals. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/72951.html>.
23. ISO/ASTM 52911-3:2023 Additive manufacturing. Design. Part 3: PBF-EB of metallic materials. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/81137.html>.
24. ISO/ASTM TR 52912:2020 Additive manufacturing. Design. Functionally graded additive manufacturing. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/71905.html>.
25. ISO/ASTM 52915:2020 Specification for additive manufacturing file format (AMF) Version 1.2. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/74640.html>.
26. ISO/ASTM TR 52917:2022 Additive manufacturing. Round robin testing. General guidelines. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/75757.html>.
27. ISO/ASTM TS 52930:2021 Additive manufacturing. Qualification principles. Installation, operation and performance (IQ/OQ/PQ) of PBF-LB equipment. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/79527.html>.
28. ISO/ASTM 52931:2023 Additive manufacturing of metals. Environment, health and safety. General principles for use of metallic materials. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/74641.html>.
29. ISO/ASTM 52941:2020 Additive manufacturing. System performance and reliability. Acceptance tests for laser metal powder-bed fusion machines for metallic materials for aerospace application. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/74948.html>.

30. ISO/ASTM 52942:2020 Additive manufacturing. Qualification principles. Qualifying machine operators of laser metal powder bed fusion machines and equipment used in aerospace applications. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/74949.html>.

31. ISO/ASTM 52950:2021 Additive manufacturing. General principles. Overview of data processing. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/76830.html>.

32. Standard and/or project under the direct responsibility of ISO/TC 261 Secretariat. – Режим доступу: <https://www.iso.org/committee/629086/x/catalogue/p/0/u/1/w/0/d/0>.

Рецензенти:

Баглюк Г.А., в.о. 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 517.5

DOI 0.36910/775.24153966.2023.75.4

Ю. О. Григор'єв

Одеський національний морський університет

ЕКСТРЕМАЛЬНА ЗАДАЧА У ЗГОРТКАХ З ДВОМА ЯДРАМИ

Розглянуто ситуацію, коли інтегральне рівняння з двома ядрами у згортках не має розв'язків. Тоді нетривіальною стає задача побудована у згортках з двома ядрами сформована на базі інтегрального рівняння та обмежена мінімальною функціональною залежністю. Де ядерні функції належать певному класу, є задана функція і шукана функція, які належать до підкласу, вагова функція обмежена зверху і знизу додатними сталими.

У даній роботі запропоновано наступну методику розв'язання цієї екстремальної задачі. Використовуючи умови розв'язності інтегрального рівняння та позначивши вираз під модулем через сталу, прийдемо до задачі мінімізації квадратичного функціоналу з шуканою функцією і лінійними функціоналами у додаткових умовах.

В роботі доведено, що отримана екстремальна задача має єдиний розв'язок та знайдено цей розв'язок. Таким чином, у роботі показано перехід до розв'язного рівняння з двома ядрами.

В образах Фур'є дане рівняння зведено до задачі Рімана на осі абсцис теорії аналітичних функцій і розв'язано в квадратурах. Розв'язок єдиний.

В роботі наведено алгоритм розв'язання поставленої екстремальної задачі та приклад. У сучасній теорії функцій з комплексною змінною однією з найважливіших областей досліджень є теорія крайових (граничних) задач у класах аналітичних функцій та їх різних узагальнень.

Оператори типу згортки часто зустрічаються при вивченні лінійних систем. Якщо на вхід такої системи подаються певні сигнали, то сигнал на виході представляється у вигляді згортки двох функцій. При цьому одна з функцій називається імпульсною функцією відгуку, а її образ Фур'є – передаточною функцією системи. Значить, поставлену задачу можна трактувати так: імпульсну функцію відгуку потрібно підібрати так, щоб сигнал на виході системи якомога менше відрізнявся б від попередньо заданої функції.

Результати, отримані в ході виконання представленої роботи, можуть бути використані для розробки наближених чисельно-аналітичних розв'язків задачі.

Ключові слова: інтегральні рівняння, рівняння типу згортки, рівняння з двома ядрами, екстремальна задача, задача Рімана теорії аналітичних функцій.

Yu.A. Hryhoriev

AN EXTREME PROBLEM IN CONVOLUTIONS WITH TWO KERNELS

We considered the situation when the integral equation with two kernels in convolutions has no solutions. Then a problem constructed in convolutions with two kernels, formed on the basis of an integral equation and limited by minimal functional dependence, becomes non-trivial. Where kernel functions belong to a certain class, there is a given function and a sought function that belong to a subclass, the weight function is bounded above and below by positive constants.

In this work, the following method of solving this extreme problem is proposed. Using the solvability conditions of the integral equation and denoting the expression under the modulus by the constant, we arrive at the problem of minimizing the quadratic functional with the desired function and linear functionals under additional conditions.

In the paper, it is proved that the obtained extremal problem has a unique solution and this solution is found. Thus, the paper shows the transition to a solvable equation with two kernels.

In Fourier images, this equation is reduced to the Riemann problem on the abscissa axis of the theory of analytic functions and solved in quadratures. There is only one solution.

The paper provides an algorithm for solving the given extreme problem and an example. In the modern theory of functions with a complex variable, one of the most important areas of research is the theory of boundary (boundary) problems in classes of analytic functions and their various generalizations.

Convolution operators are often found in the study of linear systems. If certain signals are applied to the input of such a system, the output signal is presented as a convolution of two functions. At the same time, one of the functions is called the impulse response function, and its Fourier image is called the transfer function of the system. So, the given task can be interpreted as follows: the impulse response function should be selected so that the signal at the output of the system would differ as little as possible from the predefined function.

The results obtained in the course of the presented work can be used to develop approximate numerical and analytical solutions to the problem.

Key words: integral equations, convolution-type equations, equations with two kernels, extremal problem, Riemann problem of the theory of analytic functions.

Вступ. В останні роки зростає увага до операторів типу нелокальної згортки з двома ядрами. Цьому сприяє формування низки цікавих і нетривіальних математичних проблеми, що виникають в теорії таких операторів, з одного боку, і різної важливості застосування цієї теорії з іншого боку. Серед прикладних галузей, в яких оператори типу згортки нульового порядку мають істотне значення, варто відмітити динаміку популяції, екологічні проблеми та теорію пористих середовищ. Зокрема, в моделях популяційної динаміки оператори, можна використовувати для аналізу поширення інфекцій або зростання біологічних популяцій рослин або тварин. У будівній механіці є функція, обернена до функції механічного спротиву, в електротехніці вона являє собою лінійний

фільтр, який у широкому сенсі можна розуміти як лінійну операцію, що визначається оператором типу згортки.

Розглянемо інтегральне рівняння у згортках з двома ядрами

$$u(x) + \int_0^{\infty} k_1(x-s)u(s)ds - \int_{-\infty}^0 k_2(x-s)u(s)ds = g(x). \quad (1)$$

Тут ядерні функції $k_1(x)$ і $k_2(x)$ належать класу $L(-\infty, +\infty)$, задана функція $g(x)$ і шукана функція $u(x)$ належать класу $L_2(-\infty, +\infty)$.

Далі, для скорочення запису, будемо застосовувати узагальнені ядерні функції. Наприклад,

$$\begin{aligned} u(x) + \int_{-\infty}^{+\infty} \tau(x-s)u(s)ds &= \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x-s)u(s)ds + \int_{-\infty}^{+\infty} \tau(x-s)u(s)ds = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} (\delta(x-s) + \tau(x-s))u(s)ds = \int_{-\infty}^{+\infty} \mu(x-s)u(s)ds. \end{aligned}$$

Тут $\delta(x)$ - дельта-функція, $\mu(x)$ - узагальнена функція.

Таким чином, у скороченому та більш загальному вигляді рівняння (1) будемо записувати наступним чином:

$$\int_0^{\infty} k_1(x-s)u(s)ds - \int_{-\infty}^0 k_2(x-s)u(s)ds = g(x), \quad -\infty < x < +\infty \quad (2)$$

і вважати, що ядерні функції $k_j(x)$ на зімкнутій осі мають неперервні та обмежені зверху і знизу образи Фур'є $K_j(x)$:

$$0 < c < K_j(x) < C < +\infty, \quad j=1,2.$$

Із теорії інтегральних рівнянь з двома ядрами відомо, що якщо індекс

$$\chi = \text{Ind} \frac{K_2(x)}{K_1(x)} = \frac{1}{2\pi} \left[\arg \frac{K_2(x)}{K_1(x)} \right]_{-\infty}^{+\infty}$$

рівняння (2) від'ємний, то рівняння, взагалі кажучи, розв'язків немає [1. С. 50]. В цьому випадку стає нетривіальною задача знаходження функції $u(x) \in L_2(-\infty, +\infty)$ за умовою

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \rho(x) \left| \int_0^{\infty} k_1(x-s)u(s)ds - \int_{-\infty}^0 k_2(x-s)u(s)ds - g(x) \right|^2 dx \rightarrow \min, \quad (3)$$

де вагова функція $\rho(x)$ обмежена зверху і знизу додатними сталими.

Ми прийшли до екстремальної задачі з операторами типу згортки. Оператори типу згортки часто зустрічаються при вивченні лінійних систем (напр. [2] і [3]). Якщо на вхід такої системи подаються сигнали $k_j(t)$, то сигнал на виході можна представити у вигляді згортки функцій. При цьому функція $u(s)$ називається імпульсною функцією відгуку, а її образ Фур'є – передаточною функцією системи.

Основи теорії оптимальних лінійних фільтрів були закладені у роботах А.Н. Колмогорова [4] і Н. Вінера [5]. В роботах [6, 7, 8] розглянуто ще декілька задач оптимальної лінійної фільтрації, що зводяться до рівнянь типу Вінера-Хопфа.

Метою роботи є представлення методики розв'язання екстремальної задачі (3) у згортках з двома ядрами.

Гіпотезою роботи виступає припущення, що задача мінімізації квадратичного функціоналу з шуканою функцією $v(x)$ і лінійними функціоналами у додаткових умовах:

$$\begin{cases} \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(x) |v(x)|^2 dx \rightarrow \min, \\ \int_{-\infty}^{+\infty} y_j(x)v(x)dx = - \int_{-\infty}^{+\infty} y_j(x)g(x)dx, \quad j=1,2,\dots,-\chi, \end{cases}$$

має єдиний розв'язок та є основою для розв'язного рівняння з двома ядрами.

Результати дослідження. Розв'язання задачі (3). Введемо позначення

$$\int_0^{\infty} k_1(x-s)u(s)ds - \int_{-\infty}^0 k_2(x-s)u(s)ds - g(x) = v(x) \quad (4)$$

і вкажемо, при яких значеннях $v(x) \in L_2(-\infty, +\infty)$ рівняння (4) розв'язне та знайдемо його розв'язок. В образах Фур'є рівняння (4) буде мати вигляд

$$K_1(x)U^+(x) - K_2(x)U^-(x) - G(x) = V(x). \quad (5)$$

Ми отримали задачу Рімана теорії аналітичних функцій. Тут великими буквами позначено образи Фур'є від функцій, що позначені малими буквами:

$$V(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} v(s)e^{isx} ds, \quad G(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(s)e^{isx} ds,$$

через $U^{\pm}(x)$ позначено образи Фур'є від функцій $u_{\pm}(x)$, де

$$u_+(x) = \begin{cases} u(x), & \text{якщо } x > 0, \\ 0, & \text{якщо } x < 0, \end{cases} \quad u_-(x) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } x > 0, \\ u(x), & \text{якщо } x < 0. \end{cases}$$

Запишемо рівняння (5) у вигляді, зручному для факторизації:

$$U^+(x) - \frac{G(x)+V(x)}{K_1(x)} = \left(\frac{x-i}{x+i}\right)^{-\lambda} \frac{K_2(x)}{K_1(x)} \left(\frac{x-i}{x+i}\right)^{\lambda} U^-(x).$$

Тут коефіцієнт

$$\left(\frac{x-i}{x+i}\right)^{-\lambda} \frac{K_2(x)}{K_1(x)}$$

має нульовий індекс, його можна факторизувати

$$\left(\frac{x-i}{x+i}\right)^{-\lambda} \frac{K_2(x)}{K_1(x)} = \frac{X^+(x)}{X^-(x)},$$

де функції $X^{\pm}(x)$ аналітично продовжувані на верхню і нижню півплощини і не мають там нулів:

$$\ln \left[\left(\frac{x-i}{x+i}\right)^{-\lambda} \frac{K_2(x)}{K_1(x)} \right] = \ln X^+(x) - \ln X^-(x),$$

$$X^{\pm}(x) = \exp \left[\pm P^{\pm} \ln \left[\left(\frac{x-i}{x+i}\right)^{-\lambda} \frac{K_2(x)}{K_1(x)} \right] \right].$$

Оператори P^{\pm} визначаються наступним чином:

$$(P^{\pm}w)(x) = \frac{1}{2} w(x) \pm \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{w(s)}{s-x} ds.$$

Вони діють із $L_2(\mathbb{R})$ у L_2^{\pm} . Через $L_2^{\pm}(L_2)$ ми позначили півпростори функцій $\Psi^+(x)$ ($\Psi^-(x)$), що належать $L_2(\mathbb{R})$, оригінали Фур'є яких $\psi^+(t)$ ($\psi^-(t)$) дорівнюють нулю при $t < 0$ ($t > 0$). Таким чином $P^{\pm} : L_2(\mathbb{R}) \rightarrow L_2^{\pm}$.

У просторі функцій \mathcal{W} таких, що

$$\frac{w(x)}{x+i} \in L_2(\mathbb{R})$$

оператори P^{\pm} будемо визначати формулами:

$$(P^{\pm}w)(x) = \frac{1}{2} w(x) \pm \frac{x+i}{2\pi i} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{w(s)}{(s+i)(s-x)} ds.$$

Тепер рівняння (5) можна записати в наступному вигляді:

$$\frac{U^+(x)}{X^+(x)} - \frac{G(x)+V(x)}{K_1(x)X^+(x)} = \left(\frac{x-i}{x+i}\right)^{\lambda} \frac{U^-(x)}{X^-(x)}.$$

Застосовуючи до цього рівняння оператори P^{\pm} , знайдемо шукані функції:

$$U^+(x) = X^+(x)P^+ \frac{G(x)+V(x)}{K_1(x)X^+(x)}, \quad (6)$$

$$U^-(x) = -X^-(x) \left(\frac{x-i}{x+i} \right)^{-\chi} P^- \frac{G(x)+V(x)}{K_1(x)X^+(x)}. \quad (7)$$

Умови розв'язності мають вигляд:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{V(x)dx}{X^+(x)K_1(x)(x+i)^j} = - \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{G(x)dx}{X^+(x)K_1(x)(x+i)^j}, \quad j=1,2,\dots,-\chi.$$

Позначимо

$$Y_j(x) = \frac{1}{X^+(x)K_1(x)(x-i)^j}, \quad j=1,2,\dots,-\chi$$

і зазначимо, що $Y_j(x)$ - лінійно незалежні функції.

Враховуючи позначення (4), прийдемо до наступної екстремальної задачі визначення функції $v(x) \in L_2(-\infty, +\infty)$:

$$\begin{cases} \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(x)|v(x)|^2 dx \rightarrow \min, \\ \int_{-\infty}^{+\infty} y_j(x)v(x)dx = - \int_{-\infty}^{+\infty} y_j(x)g(x)dx, \quad j=1,2,\dots,-\chi. \end{cases} \quad (8)$$

Метод множників Лагранжа приводить до рівняння

$$\rho(x)v(x) + \sum_{j=1}^{-\chi} \lambda_j y_j(x) = 0,$$

звідки

$$v(x) = - \sum_{j=1}^{-\chi} \lambda_j \frac{y_j(x)}{\rho(x)}. \quad (9)$$

Підставляючи (9) у додаткові умови (8), отримаємо лінійну систему алгебраїчних рівнянь для знаходження множників Лагранжа λ_j :

$$\sum_{j=1}^{-\chi} \lambda_j \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{y_p(x)}{\sqrt{\rho(x)}} \right) \left(\frac{y_j(x)}{\sqrt{\rho(x)}} \right) dx = \int_{-\infty}^{+\infty} y_p(x)g(x)dx, \quad (10)$$

$$p=1,2,\dots,-\chi$$

Система (10) має єдиний розв'язок, оскільки головний визначник системи є визначником Грама, складений із лінійно незалежних елементів $\frac{y_j(x)}{\sqrt{\rho(x)}}$.

Приклад. Розглянемо рівняння з двома ядрами (1). Ядра та вільний член задамо наступними виразами:

$$k_1(x) = \begin{cases} -2e^{-x}, & x > 0, \\ 0, & x < 0, \end{cases} \quad k_2(x) = \begin{cases} e^{-x}, & x > 0, \\ 0, & x < 0, \end{cases} \quad g(x) = \begin{cases} 0, & x > 0, \\ -e^x, & x < 0. \end{cases}$$

Знайдемо їх образи Фур'є:

$$K_1(x) = -2 \int_0^{+\infty} e^{-t} e^{itx} dt = \frac{-2i}{x+i}, \quad K_2(x) = \frac{i}{x+i}, \quad G(x) = \frac{i}{x-i}.$$

Представимо шукану функцію $u(x)$ у вигляді

$$u(x) = u_+(x) - u_-(x)$$

і запишемо рівняння (1) в образах Фур'є:

$$U^+(x) + K_1(x)U^+(x) - U^-(x) - K_2(x)U^-(x) = G(x).$$

В нашому прикладі ми отримаємо наступну задачу Рімана теорії аналітичних функцій:

$$U^+(x) = \frac{x+2i}{x-i}U^-(x) + \frac{i(x+i)}{(x-i)^2}.$$

Індекс цієї задачі від’ємний:

$$\chi = \text{Ind} \frac{x+2i}{x-i} = -1.$$

Теорія стверджує, що задача розв’язків немає. Дійсно, ліва частина останнього рівняння є функцією, що аналітично продовжувана у верхню півплощину, а права частина – аналітично продовжувана у нижню півплощину. Застосовуючи до цього рівняння оператори P^\pm , знайдемо:

$$U^+(x) = 0, \quad 0 = \frac{x+2i}{x-i}U^-(x) + \frac{i(x+i)}{(x-i)^2},$$

звідки

$$U^-(x) = -\frac{i(x+i)}{(x-i)(x+2i)}.$$

Отримана функція $U^-(x)$ не належить класу L_2^- бо не є аналітично продовжуваною у нижню півплощину.

Поставимо екстремальну задачу. Знайти функцію $u(x) \in L_2(-\infty, +\infty)$ за умовою:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \left| u(x) + \int_0^{\infty} k_1(x-s)u(s)ds - \int_{-\infty}^0 k_2(x-s)u(s)ds - g(x) \right|^2 dx \rightarrow \min.$$

Позначимо

$$u_+(x) + \int_0^{\infty} k_1(x-s)u(s)ds - u_-(x) - \int_{-\infty}^0 k_2(x-s)u(s)ds - g(x) = v(x)$$

і підберемо $v(x)$ так, щоб рівняння стало розв’язним. В образах Фур’є отримаємо задачу Рімана:

$$U^+(x) - \frac{1+K_2(x)}{1+K_1(x)}U^-(x) = \frac{G(x)+V(x)}{1+K_1(x)}.$$

В нашому прикладі ця задача Рімана буде мати наступний вигляд:

$$U^+(x) - \frac{x+2i}{x-i}U^-(x) = \frac{i(x+i)+V(x)(x-i)(x+i)}{(x-i)^2}. \tag{11}$$

Задача буде розв’язною, якщо буде виконана умова розв’язності:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{(x+i)V(x)dx}{(x-i)(x+2i)} = -i \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{(x+i)dx}{(x-i)^2(x+2i)}.$$

Враховуючи рівність Парсеваля, в образах Фур’є, отримаємо наступну екстремальну задачу:

$$\begin{cases} \int_{-\infty}^{+\infty} |U(x)|^2 dx \rightarrow \min, \\ \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{(x+i)V(x)dx}{(x-i)(x+2i)} = \frac{-2\pi i}{9}. \end{cases}$$

Метод множників Лагранжа приводить до рівняння

$$V(x) + \lambda \frac{x-i}{(x+i)(x-2i)}.$$

Підставляючи

$$V(x) = -\lambda \frac{x-i}{(x+i)(x-2i)}$$

у додаткову умову екстремальної задачі, знайдемо

$$\lambda = \frac{4i}{9}.$$

Значить,

$$V(x) = \frac{-4i(x-i)}{9(x+i)(x-2i)}.$$

Підставляючи знайдене $V(x)$ у рівняння (11), отримаємо розв'язну задачу Рімана:

$$U^+(x) - \frac{x+2i}{x-i}U^-(x) = \frac{i(x+2i)(5x-11i)}{9(x-i)^2(x-2i)}.$$

Запишемо її розв'язок

$$U^+(x) = 0, \quad U^-(x) = \frac{-i(5x-11i)}{9(x-i)(x-2i)},$$

$$U(x) = U^+(x) - U^-(x) = \frac{i(5x-11i)}{9(x-i)(x-2i)}.$$

Перейшовши до оригіналів Фур'є, запишемо відповідь:

$$u(x) = \begin{cases} 0, & x > 0, \\ \frac{1}{9}e^{2x} - \frac{2}{3}e^x, & x < 0. \end{cases}$$

Відзначимо, що при цьому

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |u(x)|^2 dx = \frac{19}{108}.$$

Висновки. У випадку, коли інтегральне рівняння з двома ядрами у згортках (2) не має розв'язків, ми розглядаємо задачу мінімізації квадратичного функціоналу (3). Екстремальна задача розв'язна в квадратурах і має єдиний розв'язок. Розв'язок задачі можна знайти за наступною схемою.

1) Із системи (10) знаходимо множники λ_j , $j=1,2,\dots,-\chi$.

2) Із (9) знаходимо $v(x)$, потім його образ Фур'є $V(x)$.

3) Із (6) та (7) знаходимо образи Фур'є єдиного розв'язку задачі (3).

Результати цієї роботи можуть бути використані для розробки наближеного чисельно-аналітичного розв'язку задачі. Цьому питанню передбачається присвятити окрему роботу.

Список використаної літератури

- [1] Ф.Д. Гахов, Ю.И. Черский, *Уравнения типа свертки*. М.: Наука, 1978, 296 с.
- [2] Дж. Бендат, А. Пирсол, *Применения корреляционного и спектрального анализа*: Пер. С англ. М.: Мир, 1983. 312 с.
- [3] Р. Отнес, Л. Эноксон, *Прикладной анализ временных рядов*. Основные методы: пер с англ. М.: Мир, 1982. 428 с.
- [4] А.Н. Колмогоров, *Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей* // Изв. АН СССР. Сер. Матем. 1941. Т. 5, № 1. С. 3-14.
- [5] N. Wiener, "Extrapolation, interpolation and smoothing of stationary time series". *John Wiley*, New-York, 1949, 163 pp.
- [6] A. Steiner, "Zum Mechanismus der Quazianalytizitat gewisser Randfunctionen auf endlichen Intervallen // *Annales Acad. Scient*". Fenn. 1970. Ser. A, I, 459, *Mathematica*, Helsinki. P. 3-33.
- [7] М.Г. Крейн, П.Я. Нудельман, *Аппроксимация функций из $L_2(\omega_1, \omega_2)$ передаточными функциями линейных систем с минимальной энергией*// В сб. : Дифференц. Уравнения и их приложения. Воронеж, 1985. С. 73-79.
- [8] Y.A. Hryhoriev, A.Yu. Grygoriev, Extremum problem in convolutions with additional conditions on the axis. *International Journal of Applied Mathematics*. Volume 33, No.2, 2020, pp. 355-367.

УДК 681.004

DOI 10.36910/775.24153966.2023.75.5

О. І. Проватар, О. П. Ількун

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

ПРО УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ НЕЧІТКОГО ЛОГІЧНОГО ВИВЕДЕННЯ В СИСТЕМАХ ЗАСНОВАНИХ НА ЗНАННЯХ

В статті розглядаються два методи розробки та дослідження систем нечіткого виведення для діагностики стану пацієнта на основі множини нечітких симптомів. Описано задачу визначення хвороби пацієнта відповідно до даних діагностики стану здоров'я і поточних симптомів. Для вирішення цієї задачі в контексті нечіткої логіки запропоновано систему нечіткого логічного виведення, що використовує інформацію залежностей між хворобами, симптомами, рівнями симптомів. Представлено таблицю відповідності рівнів конкретних симптомів та хвороби. Для кожної лінгвістичної змінної поточного симптому та рівня хвороб побудовано нечіткі модифіковані трикутні функції належності. Розглянуто кілька способів задання правил, які окреслено у рамках двох методів. Перший метод використовує стандартний підхід до побудови системи нечіткого виведення. В його основі лежить поняття лінгвістичної змінної та нечіткого правила, яке створюється на основі експертних знань. Сформовано інтуїтивно зрозумілі прямі правила, які представлені у математичній формі. Використовуючи цю систему правил можна застосувати різні механізми виведення, наприклад, виведення Мамдані. Другий метод, в свою чергу, представляє удосконалену нечітку модель, що включає додаткові лінгвістичні змінні та правила з метою кількісного врахування правильно вказаних симптомів у множині всіх симптомів хвороби пацієнта. Дана система правил оперує лінгвістичними змінними, що використовують кількість правильно наданих симптомів відносно загальної кількості симптомів хвороби. Виконано порівняння описаних систем логічного виведення на тестовому наборі даних. Запропоновані методи аналізуються на предмет їх ефективності та точності при встановленні діагнозу. Результати дослідження можуть бути важливими для розробки новітніх методів діагностики, заснованих на нечіткій логіці, які можуть виявитись більш ефективними у порівнянні з традиційними методами.

Ключові слова: нечітка множина, нечіткі правила, системи нечіткого виведення, експертні системи.

O.I. Provota, O.P. Ilkun

ON THE IMPROVEMENT OF THE METHOD OF FUZZY INFERENCE IN KNOWLEDGE-BASED SYSTEMS

The article discusses two methods of developing and researching fuzzy inference systems for diagnosing a patient's condition based on a set of fuzzy symptoms. The problem of determining the patient's disease according to the data of the diagnosis of the state of health and current symptoms is described. To solve this problem in the context of fuzzy logic, a system of fuzzy logical inference is proposed, which uses the information of dependencies between diseases, symptoms, and levels of symptoms. A table of correspondence between the levels of specific symptoms and the disease is presented. Fuzzy modified triangular membership functions were constructed for each linguistic variable of current symptom and disease level. Several ways of setting rules are considered, which are outlined within the framework of two methods. The first method uses a standard approach to building a fuzzy inference system. It is based on the concept of a linguistic variable and a fuzzy rule, which is created on the basis of expert knowledge. Intuitive direct rules are formed, which are presented in mathematical form. Using this rule system, various derivation mechanisms can be applied, such as Mamdani derivation. The second method, in turn, presents an improved fuzzy model that includes additional linguistic variables and rules to quantify the correctly specified symptoms in the set of all symptoms of the patient's disease. This system of rules operates on linguistic variables that use the number of correctly given symptoms relative to the total number of symptoms of the disease. A comparison of the described logical inference systems was made on the test data set. The proposed methods are analyzed for their effectiveness and accuracy in establishing a diagnosis. The results of the study may be important for the development of new diagnostic methods based on fuzzy logic, which may prove to be more effective compared to traditional methods.

Keywords: fuzzy set, fuzzy rules, fuzzy inference systems, expert systems.

Постановка проблеми. Медична діагностика є важливою складовою сучасної медицини, що допомагає у виявленні та визначенні різноманітних хвороб. Однак, існують численні виклики, такі як велика кількість можливих симптомів, а також невизначеність і неясність інформації, отриманої від пацієнтів, що можуть ускладнити процес діагностики. У світлі цього нечітка логіка та системи нечіткого виведення [1][2] виступають як потенційно ефективні інструменти для обробки такої нечіткої інформації, покращуючи точність діагностики.

В рамках цієї статті розглядається застосування нечіткої логіки для діагностики медичних станів на основі симптомів, вказаних пацієнтами. Основна увага приділяється розробці та порівнянню двох різних систем нечіткого виведення, кожна з яких оперує на основі сету лінгвістичних змінних і правил, створених з метою моделювання і аналізу медичних даних.

Перша система базується на стандартному підході до нечіткого виведення, де симптоми і хвороби представлені за допомогою лінгвістичних змінних, і правила формулюються на основі експертних знань. Проте, цей метод має обмеження, зокрема з огляду на «прокляття розмірності» [3] та потенційні проблеми із неповними даними.

Друга система запропонована як варіант вдосконалення, в якому введено нові лінгвістичні змінні та правила, що дозволяють більш точно враховувати кількість правильно вказаних симптомів відносно загальної кількості симптомів хвороби.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Формулювання наукової думки в окресі діагностики стану пацієнта на основі множини нечітких симптомів є різномірним та масштабним. У сучасній науковій площині з'являються роботи присвячені дослідженням сервісів та алгоритмів їх впровадження у сферу охорони здоров'я для підвищення рівня якості діагностики хвороб.

Н. І. Мельникова [4] вирішила важливу науково-прикладну проблему розроблення та удосконалення моделей, методів і засобів машинного навчання в задачах класифікації, кластеризації, прогнозування та візуалізація результатів опрацювання персональних даних для адаптації медичних рішень до пацієнта.

О. О. Василенко [5] розглянув інтелектуальні методи та засоби експертних систем медичної діагностики. Автором досліджено методи застосування потенціалу штучного інтелекту в медицині та проведення діагностики на основі байєсівських мереж. Реалізовані інтелектуальні обчислювальні засоби у вигляді медичної експертної системи на підставі моделей та запропонованих у дослідженні засобів діагностування.

У [6] запропоновано підхід, який дозволяє описувати нечіткі знання, які стосуються як діагностики, так і захворювання. Особливістю запропонованої діагностичної системи є наявність інтелектуального компонента, який забезпечує реалізацію різних функціональностей виключно за рахунок власних можливостей без зміни програмного коду.

Із зарубіжних авторів варто відмітити роботи таких науковців як: Фам Хай, Лун Цу, Кхань Фан, Ха Куок [7], Ду Цюяо, Ван Сяо, Чень Цзюньюй, Ван Іран, Лю Веньлань, Ван Ліпін, Лю Хуейхуей, Цзян Ліся, Не Цзунсю [8], Лекшмі І., Реджіс М. [9] та інших.

Однак незважаючи на масштабність наукових досліджень питання актуальності даної роботи не викликає сумнівів.

Метою даної роботи є дослідження ефективності обох систем через їх порівняння та визначення оптимальної стратегії для використання нечіткої логіки у медичній діагностиці. Дослідження спрямоване на виявлення переваг та недоліків кожної системи, з метою виявлення наявності покращеного методу діагностики хвороб.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо задачу визначення хвороби пацієнта відповідно до даних діагностики стану здоров'я і поточних симптомів.

Для вирішення цієї задачі в контексті нечіткої логіки потрібно побудувати систему нечіткого логічного виведення, що використовує інформацію залежностей між хворобами, симптомами, рівнями симптомів.

Для прикладу, нехай кількість хвороб 3, а кількість симптомів 3.

Позначимо множину хвороб D :

$$D = \{Хвороба_1, Хвороба_2, Хвороба_3\}$$

Також введемо множину симптомів S і терм-множину рівнів симптомів L :

$$S = \{Симптом_1, Симптом_2, Симптом_3\}, L = \{Низький, Середній, Високий\}$$

Тоді належність одного чи іншого симптома s з відповідним рівнем l до хвороби d можна визначити за допомогою множини пар R_d :

$$R_d = \{(s, l) \mid s \in S, l \in L\}$$

Аналогічно, дану залежність можна позначити у табличному вигляді, де рядки відповідають за хворобу, а колонки за симптоми:

Табл. 1

Таблиця відповідності рівнів конкретних симптомів до хвороби

Хвороби	Симптом_1	Симптом_2	Симптом_3
Хвороба_1	Середній	Високий	-
Хвороба_2	Низький	Середній	Середній
Хвороба_3	-	Високий	Низький

Додатково введемо терм-множину рівнів визначеності хвороби M :

$$M = \{Малий, Помірний, Великий\}$$

Використовуючи вищезазначену початкову інформацію про предметну область і залежності в ній можна безпосередньо приступати до нечіткого моделювання. Перш за все введемо лінгвістичні змінні та функції належності, для поточних рівнів симптомів і рівнів визначеності хвороби:

{Поточний_Симптом_1, Поточний_Симптом_2, Поточний_Симптом_3} – поточні симптоми.

{Рівень_Хвороба_1, Рівень_Хвороба_2, Рівень_Хвороба_3} – рівні хвороб.

Для кожної лінгвістичної змінної поточного симптома та рівня хвороб побудуємо наступні нечіткі модифіковані трикутні функції належності[10] відповідно:

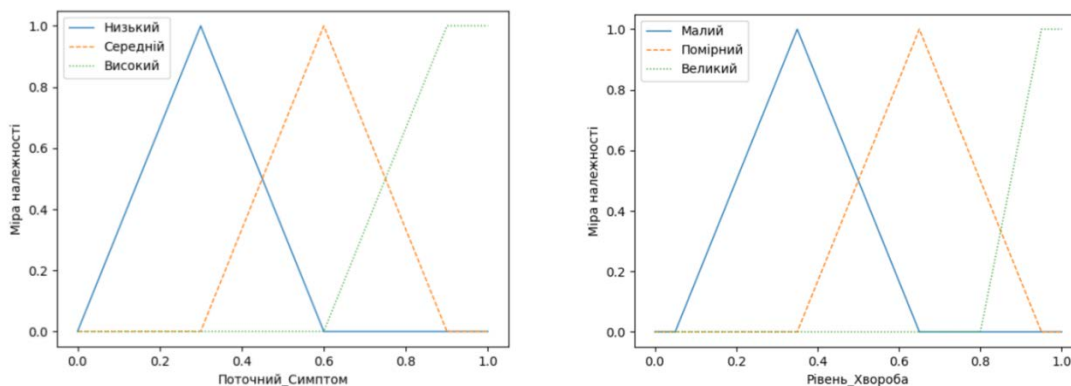


Рис. 1. Функції належності для лінгвістичних змін поточного симптому та рівня хвороби

Аналогічно, такі функції можна задати трійками значень, а саме:

- Поточний_Симптом: Низький – (0, 0.3, 0.6); Середній – (0.3, 0.6, 0.9); Високий – (0, 0.9, 0.9)
- Рівень_Хвороба: Малий – (0.05, 0.35, 0.65); Помірний – (0.35, 0.65, 0.95); Великий – (0.8, 0.95, 0.95)

Наступний крок – це побудова нечітких правил, саме від них залежить якість і точність виведення в системах логічного виведення. Ці правила визначають, як система реагує на різноманітні вхідні дані та обставини, тому їх правильне формування є ключовим для отримання бажаних результатів.

Розглянемо декілька способів задання правил:

1) Метод 1

В контексті нашої проблеми визначення хвороби пацієнта за симптомами і початкової інформації про залежність симптомів і хвороб має сенс використати наступні інтуїтивно зрозумілі прями правила за наступним форматом:

1. Якщо (Поточний_Симптом_1 $\in R_1$ (Поточний_Симптом_1)) І (Поточний_Симптом_2 $\in R_1$ (Поточний_Симптом_2)) ... І (Поточний_Симптом_М $\in R_1$ (Поточний_Симптом_К)) ТО Рівень_Хвороба_1 \in Великий;

2. Якщо (Поточний_Симптом_1 $\in R_2$ (Поточний_Симптом_1)) І (Поточний_Симптом_2 $\in R_2$ (Поточний_Симптом_2)) ... І (Поточний_Симптом_М $\in R_2$ (Поточний_Симптом_К)) ТО Рівень_Хвороба_2 \in Великий;

...

N. Якщо (Поточний_Симптом_1 $\in R_N$ (Поточний_Симптом_1)) І (Поточний_Симптом_2 $\in R_N$ (Поточний_Симптом_2)) ... І (Поточний_Симптом_М $\in R_N$ (Поточний_Симптом_К)) ТО Рівень_Хвороба_N \in Великий.

де N – кількість хвороб, K – кількість симптомів, $R_i(x)$ – функція, що визначає рівень симптому $x \in S$ для хвороби $i = 1..N$.

Для наведеного вище прикладу загальна система правил нечіткого виведення матиме вигляд:

1. Якщо (Поточний_Симптом_1 \in Середній) І (Поточний_Симптом_2 \in Високий) ТО Рівень_Хвороба_1 \in Великий;

2. Якщо (Поточний_Симптом_1 \in Низький) І (Поточний_Симптом_2 \in Середній) І (Поточний_Симптом_3 \in Середній) ТО Рівень_Хвороба_2 \in Великий;

3. Якщо (Поточний_Симптом_2 \in Високий) І (Поточний_Симптом_3 \in Низький) ТО Рівень_Хвороба_3 \in Великий.

Використовуючи цю систему правил можна застосувати різні механізми виведення, наприклад, виведення Мамдані [11][12].

Даний підхід простий і зрозумілий, водночас, при такій системі правил можуть виникати, проблеми. Наприклад, нерідко під час опитування пацієнта можна припуститись помилки – пацієнт може надати лише частину симптомів і не надати їх на вхід для обробки програмою.

Оскільки, особливість роботи нечітких правил з оператором "І" під час процесу виведення така, що якщо хоча б одна з вхідних лінгвістичних змінних не відповідає терму в правилі, то результат для цього конкретного правила буде дуже низьким, оскільки мінімальний оператор відображає найнижчий ступінь належності серед змінних. Таку проблему можна спробувати вирішити додатковими, компенсуючими правилами, проте, коли кількість вхідних змін зростає, кількість комбінацій правил може швидко збільшуватися, призводячи до проблеми "прокляття розмірності".

Для підвищення ефективності процесу визначення хвороби за нечіткими правилами пропонується розглянути дещо іншу систему.

2) Метод 2

Дана система правил буде оперувати лінгвістичними змінними, що використовують кількість правильно наданих симптомів відносно загальної кількості симптомів хвороби.

Введемо додаткову терм-множину відносної кількості правильно наданих симптомів C :

C

$= \{ \text{Низька_Відносна_Кількість}, \text{Середня_Відносна_Кількість}, \text{Велика_Відносна_Кількість} \}$

Варто зазначити, що значення лінгвістичних змін $\text{Відносна_Кількість}_i$, $i = 1..N$ обчислюється як кількість наявних симптомів на вході які є i для Хвороби $_i$ поділене на кількість всіх симптомів Хвороби $_i$.

Введемо лінгвістичні змінні та функції належності для відносної кількості коректно наданих симптомів для наданих вище хвороб:

$\{ \text{Відносна_Кількість}_1, \text{Відносна_Кількість}_2, \text{Відносна_Кількість}_3 \}$ – відносні кількості хвороб.

Задамо кожній такій лінгвістичній змінній наступні нечіткі модифіковані трикутні функції належності відповідно до терм-множини:

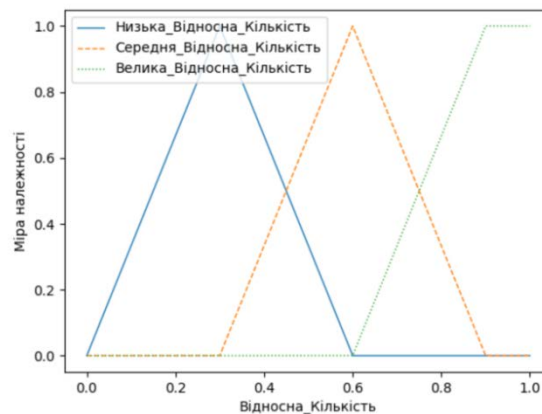


Рис. 2. Функція належності лінгвістичних змін відносної кількості коректно наданих симптомів хвороби

Аналогічно, такі функції змінної $\text{Відносна_Кількість}$ можна задати трійками значень, а саме:

Низька_Відносна_Кількість – (0, 0.3, 0.6);

Середня_Відносна_Кількість – (0.3, 0.6, 0.9);

Висока_Відносна_Кількість – (0.6, 0.9, 0.9).

Можна побудувати нечіткі правила логічного виведення наступним чином:

1.1 Якщо ($\text{Відносна_Кількість}_1$ є Висока_Відносна_Кількість) ТО Рівень_Хвороба_1 є Великий;

1.2 Якщо ($\text{Відносна_Кількість}_1$ є Середня_Відносна_Кількість) ТО Рівень_Хвороба_1 є Помірний;

1.3 Якщо (*Відносна_Кількість_1* є Низька_Відносна_Кількість) ТО *Рівень_Хвороба_1* є Малий;

...

N.1 Якщо (*Відносна_Кількість_N* є Висока_Відносна_Кількість) ТО *Рівень_Хвороба_N* є Великий;

N.2 Якщо (*Відносна_Кількість_N* є Висока_Відносна_Кількість) ТО *Рівень_Хвороба_N* є Помірний;

N.3 Якщо (*Відносна_Кількість_N* є Висока_Відносна_Кількість) ТО *Рівень_Хвороба_N* є Малий.

де N – кількість хвороб, *Відносна_Кількість_i*, $i = 1..N$ відносні кількості коректних симптомів хвороб

Для наведеного вище прикладу загальна система правил нечіткого виведення матиме вигляд:

1.1 Якщо (*Відносна_Кількість_1* є Висока_Відносна_Кількість) ТО *Рівень_Хвороба_1* є Великий;

1.2 Якщо (*Відносна_Кількість_1* є Середня_Відносна_Кількість) ТО *Рівень_Хвороба_1* є Помірний;

1.3 Якщо (*Відносна_Кількість_1* є Низька_Відносна_Кількість) ТО *Рівень_Хвороба_1* є Малий;

2.1 Якщо (*Відносна_Кількість_2* є Висока_Відносна_Кількість) ТО *Рівень_Хвороба_2* є Великий;

2.2 Якщо (*Відносна_Кількість_2* є Середня_Відносна_Кількість) ТО *Рівень_Хвороба_2* є Помірний;

2.3 Якщо (*Відносна_Кількість_2* є Низька_Відносна_Кількість) ТО *Рівень_Хвороба_2* є Малий;

3.1 Якщо (*Відносна_Кількість_3* є Висока_Відносна_Кількість) ТО *Рівень_Хвороба_3* є Великий;

3.2 Якщо (*Відносна_Кількість_3* є Середня_Відносна_Кількість) ТО *Рівень_Хвороба_3* є Помірний;

3.3 Якщо (*Відносна_Кількість_3* є Низька_Відносна_Кількість) ТО *Рівень_Хвороба_3* є Малий;

Порівняння описаних систем логічного виведення

Порівняємо два описаних типи систем з точки зору правильності визначення хвороби в умовах, коли на вхід системи можуть прийти не всі симптоми.

Для тестування скористаємось набором даних [13]. Використовуючи ці дані підготуємо наступні спотворені 11 наборів, кожен з яких містить $P = 2650$ прикладів хвороб і 370 потенційно спотворених значень симптомів для кожного з прикладів хвороби відповідно до таблиці 2.

Оскільки вихід системи нечіткого логічного виведення для кожного прикладу хвороби є набір пар (міра, *Рівень_Хвороба_i*), $i = 1..N$ з потенційно однаковими значеннями міри, введемо функцію γ_j , $j = 1..P$ для обчислення дійсного значення правильно визначеного j прикладу хвороби.

$$\gamma_j = \begin{cases} 0.0, & \text{якщо хвороби } j \text{ немає серед пар з максимальною мірою} \\ \frac{1.0}{T}, & \text{де } T \text{ кількість пар з однаковою максимальною мірою} \end{cases}$$

Тоді коректність роботи системи σ на тому чи іншому наборі даних будемо визначати як суму правильно визначених прикладів хвороб γ_j відносно загальної кількості прикладів хвороб у наборі, враховуючи можливість отримання однакової міри під час роботи програми.

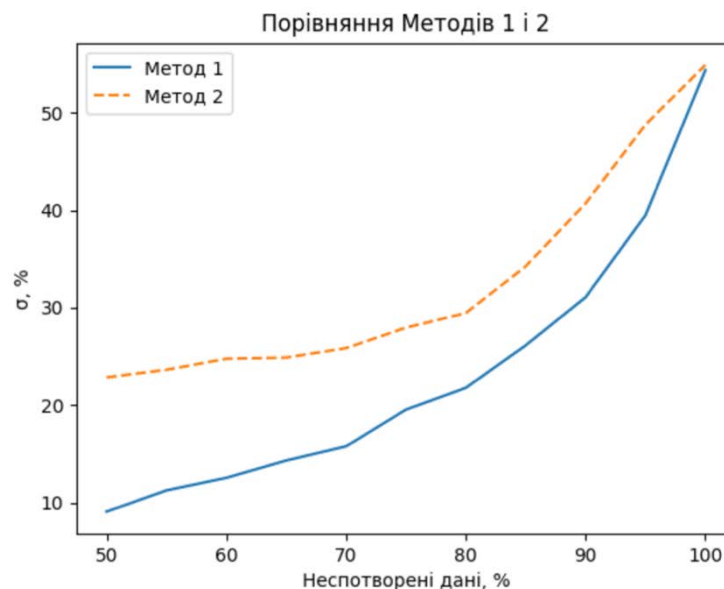
$$\sigma = \frac{\sum_{j=1}^P \gamma_j}{P}$$

Табл. 2.

Опис наборів тестових даних і результатів визначення хвороби кожним типом системи

Набір	% неспотверених симптомів	σ 1 метод, %	σ 2 метод, %	$\Delta\sigma$, %
data_50	50	9.06	22.84	13.78
data_55	55	11.24	23.62	12.38
data_60	60	12.53	24.76	12.23
data_65	65	14.31	24.87	10.56
data_70	70	15.76	25.84	10.08
data_75	75	19.53	27.95	8.42
data_80	80	21.76	29.44	7.68
data_85	85	26.13	34.24	8.11
data_90	90	31.96	40.70	8.74
data_95	95	39.48	48.78	9.3
data_100	100	54.36	54.90	0.54

Додатково побудуємо графіки відповідно до даних з таблиці:

Рис. 3. Порівня графіків σ для Метод 1 і Метод 2

Висновки. У даній статті було представлено та досліджено дві системи нечіткого виведення для діагностування медичних станів на основі симптомів, поданих пацієнтами. Показано, що ці системи можуть служити як фундамент для розробки ефективних методів діагностики у медицині, особливо у випадках, коли не всі симптоми хвороби є наявними чи точними.

Обидві розглянуті системи нечіткого виведення показали свою ефективність адекватно та гнучко обробляти нечітку інформацію, що подавалась на вхід та знаходити правильні діагнози на основі наявних даних. Вдосконалена система, що включає нові лінгвістичні змінні та правила, показала себе дещо ефективніше, ніж традиційна, особливо при наявності обмеженої чи спотвореної інформації. Заснований на аналізі двох моделей нечіткого виведення досвід вказує на значний потенціал для подальшого вдосконалення та розвитку систем діагностування, заснованих на нечіткій логіці, для більш точного та надійного визначення хвороб.

Розроблені методики можуть внести вагомий вклад у поліпшення медичної діагностики, дозволяючи лікарям та медичним експертам здійснювати більш точні та обґрунтовані висновки на основі неповних чи нечітких даних.

Список літератури:

1. Zadeh L.A. (1965) Fuzzy Sets // Information and Control. – Vol.8.
2. Provotar A.I., Lapko A.V., Provotar A.A. (2013) Fuzzy inference systems and their applications. Int. Sci. J. Cybern. Syst. Anal. 49(4), pp. 517–525.

3. Keogh E., Mueen A. (2017) Curse of Dimensionality. In: Sammut, C., Webb, G.I. (eds) Encyclopedia of Machine Learning and Data Mining. Springer, Boston, MA. pp. 314–315.
4. Мельникова Н.І. Моделі та методи підтримки персоналізованих рішень у медичних системах. – На правах рукопису. Дисертаційна робота на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.23 – системи штучного інтелекту. – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2023. 293 с.
5. Василенко О. О. Інтелектуальні методи та засоби експертних систем медичної діагностики. РИ, 2018. №4. С. 86-94.
6. Саввакін В. Д., Провотар О. І. Діагностична система на основі нечітких знань / Компьютерная математика. 2019. № 1. С.56-63.
7. Pham Hai, Long Cu, Khanh Phan, Ha Quoc. (2023). A Fuzzy Knowledge Graph Pairs-Based Application for Classification in Decision Making: Case Study of Preeclampsia Signs. Information. 14. 104. 10.3390/info14020104.
8. Du Qiuyao, Wang Xiao, Chen Junyu, Wang Yiran, Liu Wenlan, Wang Liping, Liu Huihui, Jiang Lixia, Nie Zongxiu. (2023). Machine learning encodes urine and serum metabolic patterns for autoimmune disease discrimination, classification and metabolic dysregulation analysis. The Analyst. 148. 10.1039/d3an01051a.
9. Lekshmi I., Regees M. (2022). review on fuzzy multi-criteria decision-making methods in medical diagnosis. International journal of health sciences. 2546-2554. 10.53730/ijhs.v6nS5.9198.
10. Alemu, Matiwos. (2018) A fuzzy model for chaotic time series prediction. International Journal of Innovative Computing, Information and Control. 14. pp. 1767-1786.
11. Mamdani, E. H. (1974) Application of fuzzy algorithms for the control of a simple dynamic plant. In Proc IEEE, pp. 121–159.
12. M.M. Gupta, J. Qi (1991) Theory of T-norms and fuzzy inference methods, Fuzzy Sets and Systems, Volume 40, Issue 3, pp. 431-450.
13. Boger, C.M. (2002) A Synoptic Key of the Materia Medica.

А.В. Кузьмов^{1,2}¹Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ МІКРОМЕХАНІЧНОГО ОСЕРЕДНЕННЯ ЛІНІЙНО-В'ЯЗКОЇ ТЕЧІЇ ПОРИСТОГО МАТЕРІАЛУ З КАПІЛЯРНИМИ НАПРУЖЕННЯМИ НА ПОВЕРХНІ ПОР

Базуючись на теоретичних засадах механіки мікронеоднорідних матеріалів було проаналізовано загальну структуру визначальних реологічних співвідношень для течії пористого матеріалу з лінійно-в'язким каркасом за наявності на поверхні пор капілярних напружень. Визначальні співвідношення, що описують ефективну течію такого матеріалу можуть бути отримані з ефективних визначальних співвідношень для «звичайного» пористого матеріалу з вільною поверхнею пор додаванням додаткового тензорного поля напружень викликаного наявністю капілярних сил на поверхні пор. Одержані в роботі загальні результати, безвідносно до конкретної структури пористого матеріалу, корисні перш за все для прямого комп'ютерного моделювання структури порового простору в ході спікання, без використання аналітичних моделей.

Ключові слова: спікання, пористий матеріал, реологічна теорія спікання, мікромеханіка, представницький осередок, мультимасштабне моделювання.

A. Kuzmov

THEORETICAL PRINCIPLES OF MICROMECHANICAL AVERAGING OF LINEAR VISCOUS FLOW OF A POROUS MATERIAL WITH CAPILLARY STRESSES ON THE PORE SURFACE

Based on the fundamentals of composite mechanics, the general structure of the constitutive relationship for the flow of a porous material with a linear-viscous matrix in the presence of capillary stresses on the surface of the pores was analyzed. Such rheological models are used in modeling the sintering process in powder metallurgy and ceramic. The constitutive relationship describing the effective flow of such a material can be obtained from the constitutive relationship for a "usual" porous material with a free pore surface by adding an additional tensor stress field caused by the presence of capillary forces on the pore surface. The general results obtained in the work, regardless of the specific structure of the porous material, are useful first of all for direct computer simulation of the structure of the pore space during sintering, without the use of analytical models. These results were used in the author's previous works on multiscale modeling of the sintering process.

Keywords: sintering, porous material, rheological theory of sintering, micromechanics, unit cell, multiscale modeling.

1. Вступ

Процес спікання пористих тіл, тобто явище їх консолідації та усадки під дією надлишкової вільної поверхневої енергії [1], використовується в багатьох технологіях та галузях виробництва. Але ключового значення цей процес набув у технологіях порошкової металургії та керамічного виробництва, де однією з технологічних операцій є спікання попередньо сформованих з порошкової суміші напівфабрикатів. Крім порошкової металургії спікання також відіграє важливу роль в процесі виробництва оптоволоконних кабелів [2]. При вивченні процесу спікання крім його фізичних засад на мікрорівні, які можуть бути вельми різноманітними [3] важливу роль відіграє також прогнозування неоднорідності процесу спікання в різних точках тіла, що спікається. Таке прогнозування стало можливим завдяки створенню моделей процесу спікання в термінах в'язкої течії ефективного пористого матеріалу. Одна з перших таких моделей була запропонована В.В. Скороходом [1] та дістала назву реологічна теорія спікання. Аналогічні моделі спікання мікронеоднорідного пористого матеріалу були запропоновані також низкою інших авторів. Досить детальний огляд таких моделей подано в роботі [4].

Крім прогнозування кінетики усадки такі моделі дають можливість прогнозувати спотворення форми порошкової заготовки в процесі неоднорідної усадки при спіканні та відповідно запобігати небажаному відхиленню форми виробу від початково запланованої. Зокрема, якщо немає змоги або економічно недоцільно застосовувати схему формування порошкової заготовки з більш рівномірним розподілом густини, можна піти шляхом варіювання геометрії формовки з врахуванням результатів скінченно-елементного моделювання процесу неоднорідної усадки при спіканні [5]. Зокрема в роботі [6] на основі скінченно-елементного моделювання пресування і спікання пропонується та випробовується модифікована криволінійна форма пуансона для

пресування в закритій прес-формі заготовок з порошку оксиду алюмінію з метою компенсації спотворення форми виробу в ході неоднорідної усадки при спіканні. Опосередковано про актуальність реологічних моделей спікання свідчить їх імплементація в комерційні пакети скінчено-елементного моделювання. Зокрема останні версії пакету SFTC Deform містять різні варіанти «потенціалу спікання».

Такі реологічні моделі базуються на тому, що оскільки лінійний розмір пор зазвичай принаймні на декілька порядків менший розміру тіла, що спікається, можна розглядати спікання пористого тіла як процес деформування деякого мікронеоднорідного ефективного континууму. Опису поведінки таких мікронеоднорідних матеріалів присвячена галузь мікромеханіки або механіки композиційних матеріалів. Пористі матеріали з в'язкою твердою фазою можна розглядати як частинний випадок мікронеоднорідних матеріалів, де пори або пустота є однією з фаз композиту з нульовими параметрами жорсткості або в'язкості. Проте наявність розподілених капілярних напружень на поверхні пор дещо модифікує процедуру мікромеханічного осереднення та сам вигляд визначальних реологічних співвідношень для ефективного пористого матеріалу. Також з розвитком засобів комп'ютерного моделювання зменшується актуальність побудови аналітичних моделей за суттєвих спрощуючи припущень, та з'являється можливість чисельного моделювання більш складних процесів з більш точним врахуванням реальної структури пористого матеріалу. Зокрема автором здійснювалось мультимасштабне моделювання процесу спікання [7,8]. Проте для такого моделювання важливо мати чіткі уявлення про загальний характер математичного опису процесу спікання, безвідносно до конкретної структури матеріалу. Серед низки фізичних процесів внаслідок яких може відбуватися спікання пористого тіла [3] (в'язка течія під дією капілярних сил, об'ємна дифузія вакансій, зерногранична та поверхнева дифузія, перенос через газову фазу) найбільш прийнятним для аналізу методами механіки композитів є в'язка течія каркасу пористого тіла під дією капілярних сил. Тому **метою** даної роботи є саме послідовний розгляд процедури мікромеханічного осереднення реології в'язкої течії пористого матеріалу за наявності на поверхні пор капілярних сил. Така реологія описуватиме як вільне спікання однорідного матеріалу за відсутності макроскопічних напружень, так і випадок наявності макроскопічних напружень в тілі, що спікається. Такі напруження можуть бути викликані як неоднорідністю пористої структури матеріалу, так і іншими чинниками: прилипанням до деякої поверхні, гравітаційними силами, тиском інструменту тощо.

2. Загальні відомості з механіки мікронеоднорідних матеріалів.

Фундаментальним принципом мікромеханіки є принцип еквівалентної гомогенності, який полягає в тому, що у випадку досить великого тіла порівняно з розміром неоднорідності, в більшості випадків можна виділити такий розмір, який набагато менший за розмір тіла, але більший за масштаб неоднорідності, що границі областей такого розміру внаслідок деформування тіла рухаються близько до лінійного перетворення [9]. Причому для подальшого осереднення важлива саме симетрична частина лінійного перетворення, бо саме вона описує деформування, а несиметрична частина - поворот області як твердого тіла [10]. Або, іншими словами, поле швидкостей V_i на границі області розміру L залежить від координат майже лінійно

$$V_i = \sum_{j=1}^3 E_{ij} x_j + o(L) \approx \sum_{j=1}^3 E_{ij} x_j$$
; При цьому компоненти симетричної матриці E_{ij} мають зміст ефективних осереднених за об'ємом швидкостей деформацій. Тому при мікромеханічному осередненні прийнято розглядати рух матеріалу в певній області масштабу довжини осереднення, яка називається представницькою коміркою (або представницьким осередком) з граничними умовами

$$V_i = \sum_{j=1}^3 E_{ij} x_j ; \quad (1)$$

що залежать від ефективних швидкостей деформацій E_{ij} . Таким чином, внаслідок розв'язку рівнянь руху на представницькому осередку здійснюється відповідність між ефективними макроскопічними деформаціями E_{ij} та полем швидкостей на мезорівні, яке внаслідок граничних умов (1) параметрично залежить від макроскопічних деформацій. Варто зауважити, що принцип еквівалентної гомогенності у відповідній літературі досить строго обґрунтовується. Зокрема в [11]

розв'язок задачі для тіла з періодичною геометрією розкладається в ряд по малому параметру відношення розміру неоднорідності до всього розміру тіла, й оцінюється збіжність такої процедури.

Зауважимо, що внаслідок того що середнє значення за об'ємом компонент тензора швидкостей деформацій $\langle e_{ij} \rangle$ для представницького осередку Ω об'єму U повністю визначається полем

швидкостей на границі області S за формулою $\langle e_{ij} \rangle = \frac{1}{2U} \int_S (V_i n_j + V_j n_i) dS$ (де n_i вектор нормалі до поверхні S) [12], середні значення компонент тензора швидкостей деформацій для розв'язку

вищеописаної задачі руху в точності дорівнюватимуть E_{ij} . Тому ефективні або макроскопічні швидкості деформацій є також середніми за об'ємом. Щодо макроскопічних напружень то вони визначаються формулою [12]

$$\Sigma_{ij} = \frac{1}{U} \int_S p_i x_j dS = \frac{1}{U} \int_S p_j x_i dS = \frac{1}{2U} \int_S (p_i x_j + p_j x_i) dS \quad (2)$$

де p_i зусилля на границі представницького осередку, що відповідають розв'язку рівнянь руху з граничними умовами (1), а x_j координати в об'ємі представницького осередку. А оскільки p_i параметрично залежать від E_{ij} то таким чином за допомогою формули (2) отримуємо залежність ефективних напружень Σ_{ij} від ефективних швидкостей деформацій E_{ij} , тобто реологію ефективного мікронеоднорідного матеріалу. Зауважимо, що за відсутності розподілених зусиль на поверхні пор компоненти макроскопічного тензора напружень будуть середніми за об'ємом комірки значеннями компонент напружень. У випадку ж наявності поверхневих зусиль на поверхні пори, макроскопічні напруження відображатимуть як середні напруження в матеріалі, так і поверхневі зусилля на поверхні пор. Саме цим і відрізняється реологія спікання від звичайної реології в'язкої течії пористих матеріалів. Характер цієї відмінності у випадку лінійно-в'язкої реології твердої фази, в подальшому розкривається в цій роботі.

3. Реологія в'язкої течії пористого матеріалу за наявності на поверхні пор капілярних сил.

Нехай реологія твердої фази описується деякими лінійно в'язкими визначальними співвідношеннями $\sigma_{ij} = \sum_{k,n=1}^3 C_{ijkn} e_{kn}$. Тоді, відповідно до описаної в попередньому пункті процедури

мікромеханічного осереднення поле швидкостей на мезорівні повинно задовольняти рівняння руху $\sum_{j=1}^3 \partial/\partial x_j \left(\sum_{k,n=1}^3 C_{ijkn} (\partial V_k/\partial x_n + \partial V_n/\partial x_k) \right)$; $i = 1, 2, 3$; та граничні умови в швидкостях (1) на

границі осередку, разом з умовою наявності капілярних лапласівських напружень на поверхні пор $p_i = p_c n_i$; $p_c = \sigma(1/R_1 + 1/R_2)$ де σ - поверхневий натяг, R_1, R_2 - головні радіуси кривини поверхні пори. p_c - капілярне лапласівське напруження. Оскільки у цьому випадку рівняння руху є лінійними та однорідними відносно поля швидкостей то сума (втім як і довільна лінійна комбінація) будь-яких розв'язків цього рівняння знов задовольнятиме рівняння руху. При цьому швидкості та зусилля на границі також сумуються. Тому для подальшого аналізу зручно подати розв'язок V_i задачі мікромеханічного осереднення на комірці як суму розв'язків $V_i = V_i^0 + V_i^1$ двох задач руху на комірці, рис. 1.

Розв'язок V_i^1 задовольняє мікромеханічні граничні умови (1) на комірці, але із вільною від зусиль поверхнею пор $p_i = 0$. Інший розв'язок V_i^0 відповідає жорстко закріпленій $V_i = 0$ границі комірки за наявності на поверхні пор капілярних напружень $p_i = p_c n_i$.

Зауважимо, що розв'язок V_i^1 відповідає розв'язку задачі про ефективні в'язкі властивості пористого матеріалу.

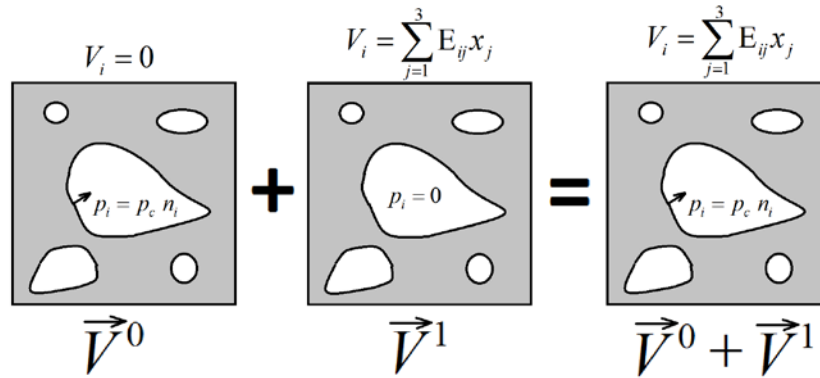


Рис. 1 – Розклад розв’язку задачі на представницькому осередку

В випадку лінійної в’язкості твердої фази ефективні властивості пористого мікронеоднорідного матеріалу також будуть лінійно-в’язкими й будуть задаватись ефективними модулями в’язкості \tilde{C}_{ijkn} . Знаходження цих ефективних модулів в’язкості аналогічно до ефективних модулів пружності, які описуються в численній літературі з механіки композитів [9]. В свою чергу, інший розв’язок V_i^0 описує поле швидкостей на мезорівні при нульових компонентах макроскопічного тензору швидкостей деформацій та відповідно не залежить від макроскопічних швидкостей деформацій E_{ij} . Розв’язок V_i^0 відповідає процесу «сфероїдизації» пор в матеріалі при гіпотетичному повністю закріпленому спіканні, та відповідно відсутній (тобто є нульовим) у випадку наявності в матеріалі виключно сферичних пор однакового розміру. Макроскопічний тензор напружень Σ_{ij} за означенням $\Sigma_{ij} = \frac{1}{U} \int_S p_i x_j dS$. Оскільки реологія твердої фази лінійна, то

$p_i = p_i^0 + p_i^1$, де p_i^0 і p_i^1 зусилля на границі комірки, що відповідають V_i^0 та V_i^1 відповідно. Тому

$$\Sigma_{ij} = \frac{1}{U} \int_S p_i^0 x_j dS + \frac{1}{U} \int_S p_i^1 x_j dS = P_{Lij} + \Sigma_{ij}^1 = P_{Lij} + \sum_{k,n=1}^3 \tilde{C}_{ijkn} E_{kn} \quad (3)$$

де $\Sigma_{ij}^1 = \frac{1}{U} \int_S p_i^1 x_j dS = \sum_{k,n=1}^3 \tilde{C}_{ijkn} E_{kn}$ ефективний макроскопічний тензор напружень для

«звичайного» пористого композиту з вільною поверхнею пор, що відповідає макроскопічним швидкостям деформацій E_{ij} . А складова $P_{Lij} = \frac{1}{U} \int_S p_i^0 x_j dS$ відображає внесок в реологію

капілярних лапласівських сил на поверхні пор, і тому її прийнято називати ефективними лапласівськими напруженнями. Спочатку макроскопічна реологічна модель спікання була запропонована для ізотропного випадку в якому модулі в’язкості \tilde{C}_{ijkn} описуються двома модулями об’ємної ζ та зсувної η в’язкості, а P_{Lij} є шаровим тензором, $P_{Lij} = P_L \delta_{ij}$ (де δ_{ij} - символ Кронекера), що відповідає всебічним гідростатичним напруженням, і тому P_L було названо ефективним лапласівським тиском. В цьому ізотропному випадку співвідношення (3) набудуть вигляду [4]

$$\Sigma_{ij} = P_L \delta_{ij} + \zeta E \delta_{ij} + 2\eta (E_{ij} - 1/3 E \delta_{ij}); \quad E = \sum_{k=1}^3 E_{kk} \quad (4)$$

Зауважимо також, що відповідно до формальної в’язко-пружної аналогії [1], між полем переміщень в теорії пружності (геометрично-лінійній, яка використовує тензор малих деформацій Коші) та полем швидкостей в’язкої течії (за наявності дисипативного потенціалу), можна використати зокрема теорему Бетті-Максвела [13] про взаємність робіт. У випадку в’язкої течії це означає, що для будь-яких двох зрівноважених напружено-деформованих станів, потужність вдовж границі області зусиль одного напружено-деформованого стану на швидкостях іншого рівні між собою. Ця теорема справедлива лише для лінійної реології. Розглянемо поле швидкості V_k^1 для

випадку коли макроскопічний тензор швидкостей деформацій в граничних умовах (1) має єдину ненульову одиничну компоненту $E_{ij} = 1$; i, j - фіксовані, та позначимо це поле швидкостей V_k^{ij} . Тоді граничні умови (1) для V_k^{ij} набудуть вигляду $V_k^{ij} = \delta_{ik} x_j$. Зауважимо, що V_k^{ij} також буде похідною по E_{ij} параметричної залежності V_k від E_{ij} тобто $V_k^{ij} = \partial V_k / \partial E_{ij}$. Така інтерпретація може стати в нагоді для нелінійно-в'язкого випадку. Застосуємо принцип взаємності робіт до полів швидкостей V_k^{ij} та V_k^0 . При цьому потужність зусиль викликаних V_k^{ij} на швидкостях V_k^0 вздовж всієї границі матеріалу твердої фази комірки, тобто як вздовж поверхні пор так і на границі комірки, дорівнює нулю, оскільки на границі комірки V_k^0 дорівнює нулю, а на поверхні пор зусилля, породжені полем швидкостей V_k^{ij} теж нульові. Але це, відповідно до теореми про взаємність робіт, означає що також сумарна потужність \hat{W} вздовж повної границі матеріалу твердої фази комірки швидкостей V_k^{ij} на зусиллях викликаних швидкостями V_k^0 теж нульова. Ця повна потужність з врахуванням того, що на границі представницького осередку $\sum_{k=1}^3 V_k^{ij} p_k^0 = \sum_{k=1}^3 \delta_{ik} x_j p_k^0 = p_i^0 x_j$ набуде

вигляду $\hat{W} = \int_{S_0} \sum_{k=1}^3 V_k^{ij} p_c n_k dS + \int_S p_i^0 x_j dS = 0$; де S_0 - поверхня пори. Що в свою чергу дає змогу виразити ефективні лапласівські напруження формулою

$$P_{Lij} = \frac{1}{U} \int_S p_i^0 x_j dS = -\frac{1}{U} \int_{S_0} \sum_{k=1}^3 V_k^{ij} p_c n_k dS \quad (5)$$

тільки через величину капілярних зусиль на поверхні пори та поле швидкостей V_k^1 , без необхідності обчислювати поле швидкостей V_k^0 . Таке означення дещо зручніше і, зокрема, використовувалось автором при мультимасштабному моделюванні спікання [7,8].

4. Питома дисипація енергії при в'язкій течії пористого матеріалу за наявності на поверхні пор капілярних сил.

Тепер розглянемо осереднення дисипації енергії пористого ефективного матеріалу при спіканні. Питома дисипація енергії ефективного пористого матеріалу D зумовлена дисипацією енергії внаслідок в'язкої течії. в матеріалі каркасу пористого тіла Тому вона пов'язана з середньою дисипацією енергії в твердій фазі $D_{me,\phi} = D/(1-\theta)$, де θ пористість або об'ємна частка пор в матеріалі. Величина $D_{me,\phi}$ є важливою інтегральною характеристикою стану матеріалу [1, 14].

Зауважимо, що з термодинамічних міркувань у випадку лінійної в'язкості для реології твердої фази завжди існує дисипативний потенціал $\hat{U}(e_{ij}) = 1/2 \sum_{i,j,k,l=1}^3 C_{i,j,k,l} e_{ij} e_{kl}$ такий, що $\sigma_{ij} = \partial \hat{U} / \partial e_{ij}$; , який

є половиною від питомої дисипації $D(e_{ij}) = \sum_{i,j=1}^3 \sigma_{ij} e_{ij} = 2\hat{U}$ Зауважимо, що питома дисипація як

функція швидкостей є додатно визначеним квадратичним функціоналом, або що теж саме білінійним симетричним функціоналом з однаковим значенням аргументу $D(V_i) = F(V_i, V_i)$;

$F(V_i^1, V_i^2) = F(V_i^2, V_i^1) = 1/4 \sum_{i,j,k,l=1}^3 C_{i,j,k,l} (\partial V_i^1 / \partial x_j + \partial V_j^1 / \partial x_i) (\partial V_k^2 / \partial x_l + \partial V_l^2 / \partial x_k)$; Тому питому

дисипацію від суми полів V_k^0 та V_k^1 . можна подати у вигляді $D(V_k^0 + V_k^1) = F(V_k^0 + V_k^1, V_k^0 + V_k^1) = D(V_k^0) + D(V_k^1) + 2F(V_k^0, V_k^1)$. Ефективна ж питома дисипація пористого матеріалу буде середнім за об'ємом представницького осередку від питомої дисипації в

твердій фазі $D_{macro} = \frac{1}{U} \int_{\Omega_1} D(V_k^0 + V_k^1) d\Omega$, де Ω_1 область яку займає тверда фаза в

представницькому осередку. Але виявляється, що інтеграл за об'ємом від змішаної складової $2F(V_k^0, V_k^1)$ буде нульовим. Оскільки змішану складову можна подати як потужність напружень зумовлених полем швидкостей V_k^1 на швидкостях деформації зумовлених полем швидкостей V_k^0 , а також внаслідок того, що поле напружень врівноважене, тому ця змішана складова буде дорівнювати потужності зусиль викликаних V_k^1 на швидкостях V_k^0 вздовж всієї границі матеріалу. Але як вказувалось в попередньому пункті ця потужність буде нульовою.

Тобто у випадку лінійно-в'язкої поведінки твердої фази питома дисипація течії ефективного пористого матеріалу з капілярними напруженнями на поверхні пор є сумою питомої дисипації «звичайного» ефективного пористого матеріалу з вільною поверхнею пор D_{macro}^1 та питомої дисипації у випадку повністю закріпленого спікання D_{macro}^0 .

$$D_{macro} = D_{macro}^0 + D_{macro}^1; \quad D_{macro}^0 = \frac{1}{U} \int_{\Omega_1} D(V_k^0) d\Omega; \quad D_{macro}^1 = \frac{1}{U} \int_{\Omega_1} D(V_k^1) d\Omega \quad (6)$$

Причому одна складова D_{macro}^1 є квадратичною функцією макроскопічних швидкостей деформацій E_{ij} та не залежить від величини капілярних напружень. В свою чергу інша складова D_{macro}^0 не залежить від макроскопічних швидкостей деформацій E_{ij} . Зауважимо, що у випадку сферичних пор однакового розміру складова швидкості V_k^0 відсутня, та відповідно складова D_{macro}^0 обнуляється і питома дисипація енергії повністю визначатиметься макроскопічною течією ефективного пористого матеріалу.

Висновки

Як видно з вищенаведених викладок у випадку лінійно-в'язкої поведінки твердої фази визначальні співвідношення, що описують ефективну течію пористого матеріалу з врахуванням процесу спікання можуть бути отримані з ефективних визначальних співвідношень для «звичайного» пористого матеріалу з вільною поверхнею пор додаванням додаткового поля напружень викликаного наявністю капілярних сил на поверхні пор. Це додаткове поле напружень дістало назву ефективних лапласівських напружень, або в ізотропному випадку ефективного лапласівського тиску. Була виведена зручна для обчислювального моделювання формула (5) для знаходження ефективних лапласівських напружень шляхом інтегрування по поверхні пор. Виявилось що ефективна питома дисипація енергії є сумою ефективної питомої дисипації для в'язкої течії «звичайного» пористого матеріалу з вільною поверхнею пор та питомої дисипації у випадку гіпотетичного повністю закріпленого спікання.

Список використаних джерел.

1. Скороход В.В. Реологические основы теории спекания, К., Наукова думка, 1972, -149с.
2. G.W Sherer, Sintering of inhomogeneous glasses: Application to optical waveguides, J. Non-Cryst. Solids 34 (1979) 239
3. Гегузин Я.Е. Физика спекания.-М.: Наука, 1984.-312с
4. Olevsky, Eugene A.. "Theory of sintering: from discrete to continuum." Materials Science & Engineering R-reports 23 (1998): pp. 41-100
5. Maximenko A.L. Prediction of initial shape of functionally graded ceramic pre-forms for near-net-shape sintering /A.L.Maximenko,E.Olevsky, O.Van Der Biest// Science of Sintering.-2003.- 35[1].- C.6-12.
6. Torsten Kraft, Hermann Riedel and Ottmar Rosenfelder Compaction and Sintering of a Ceramic Seal: Modeling and Experimental Response Int.J. Powder Metall. 39 (6) (2003) 27-34
7. Kuzmov, A., Olevsky, E., & Maximenko, A. (2008). Multi-scale modeling of viscous sintering. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 16(3), 035002. DOI 10.1088/0965-0393/16/3/035002
8. Andrey Maximenko, Andrey Kuzmov, Evgeny Grigoryev, Eugene Olevsky . Direct Multi-Scale Modeling of Sintering. Journal of the American Ceramic Society. (2012), Volume 95, Issue 8. DOI 10.1111/j.1551-2916.2012.05083.x.

-
9. R. M. Christensen *Mechanics of composite materials*, , Wiley-Interscience, New York, 1979, 348 pp.
 10. Мейз Дж. Теория и задачи механики сплошных сред -М.: Мир, 1974. - 319 с.
 11. Bakhvalov N.S., Panasenko G.P. *Homogenisation: Averaging processes in periodic media*. Kluwer Academic Publishers, 1989. 366 pp.
 12. Б. Победря, *Механика композиционных материалов*, Москва: Изд-во Моск. ун-та., 1984.
 13. Божидарник В.В., Сулим Г.Т. *Елементи теорії пружності*. — Львів: Світ, 1994. — 559 с.
 14. Штерн М.Б. *Феноменологические теории прессования порошков* / М.Б. Штерн, Г.Г. Сердюк, Л.А. Максименко и др. — Киев: Наук. думка, 1982. — 140 с.

УДК 66:621.762

DOI 10.36910/775.24153966.2023.75.7

С. Ю. Тесля¹, М. Я. Втерковський¹, Т. О. Соловйова¹, П. І. Лобода¹, Є. В. Солодкий¹,
Б. А. Котелюх², О. С. Мовчан², О. С. Кучер¹, В. І. Шеремет¹

¹Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

²Національний університет охорони здоров'я України ім. П. Л. Шупика

ЗАКОНОМІРНОСТІ ОТРИМАННЯ ПОРОШКІВ СПЛАВІВ МАГНІЮ РОЗПИЛЕННЯМ РОЗПЛАВУ

Проведено модельні дослідження умов отримання порошків сплавів магнію розпилюванням аргонем високого тиску. Показано, що зі збільшенням швидкості газу від 100 до 400 м/с та температури розплаву від 700 °С до 1000 °С відбувається інтенсифікація процесів диспергування частинок порошків. Встановлено, що отримання частинок менших за 150 мкм досягається розпилюванням за швидкості енергоносія 400 м/с та температури розплаву 1000 °С. Отримані частинки порошків мають середній розмір менше 70 мкм, та сферичну форму. Формування правильної морфології частинки обумовлено значно більшим часом охолодження ніж сфероїдизації. Встановлено, що на поверхні частинок за рахунок вторинної деструкції струменю розплаву відбувається утворення дрібних закристалізованих краплин розплаву.

Ключові слова: розпилювання газом, біоматеріали, біорезорбція, порошки магнію, порошкова металургія

S. Teslia, M. Vterkovskiy, T. Soloviova, P. Loboda, I. Solodkiy,
B. Koteliukh, O. Movchan, O. Kucher, V. Sheremet

THE PROCESS OF MAGNESIUM ALLOYS POWDER PREPARATION BY GAS ATOMIZATION

Model studies of the conditions for obtaining powders of magnesium alloys by gas atomization with high-pressure argon have been carried out. It is shown that with an increase in the gas velocity from 100 to 400 m/s and the melt temperature from 700 °C to 1000 °C, the processes of dispersion of powder particles are intensified. It was established that obtaining particles smaller than 150 μm is achieved by atomization at a speed of the energy carrier of 400 m/s and a melt temperature of 1000 °C. The resulting powder particles have an average size of less than 70 μm and a spherical shape. The formation of the regular particle morphology is due to a significantly longer cooling time than spheroidization. It was established that the formation of small crystallized drops of the melt occurs on the surface of the particles due to the secondary destruction of the melt jet.

Key words: gas spraying, biomaterials, bioresorbable, magnesium powders, powder metallurgy

Постановка проблеми. Сучасне інженерне матеріалознавство вирішує не лише завдання важкої промисловості, але й активно створює матеріали та вироби для вирішення екологічних проблем людства відновної енергетики та медицини [1]. Одним з важливих напрямків сучасних досліджень є розробка матеріалів біорезорбних імплантів для ортопедії [2]-[3]. Створення та впровадження такого класу матеріалів дозволить значно скоротити термін реабілітації та не вимагатиме повторних оперативних втручають для видалення фіксуючих конструкцій після зростання кісток. З погляду біорезорбних матеріалів перспективним є використання магнію, як основного компоненту [4]. В чистому вигляді застосування магнію є обмеженим через низькі механічні властивості та низьку корозійну стійкість. Так, під час взаємодії з плазмою крові відбувається активна взаємодія з виділенням великої кількості водню. Газифікація негативно впливає на оточуючі тканини та регенерацію кісток [5]. Тому досить широкого поширення набуло легування магнію перехідними металами, міддю, кальцієм та цинком. За рахунок введення різної кількості легуючих елементів можливо в широкому діапазоні регулювати період резорбції та механічні властивості [6]. Отримання сплавів магнію, методами литва є досить складним процесом за рахунок високої активності магнію під час взаємодії із киснем. Тому під час плавки та литва застосовують або високий вакуум, або суміш газів SF₆-CO [7]. Використання вакууму обмежене за рахунок активного випаровування магнію та осадженням в камері. Суміш газів SF₆-CO є ефективним

© С. Ю. Тесля, М. Я. Втерковський, Т. О. Соловйова, П. І. Лобода, Є. В. Солодкий,
Б. А. Котелюх, О. С. Мовчан, О. С. Кучер, В. І. Шеремет

та загальноновживаним інструментом для отримання сплавів магнію литвом, але за рахунок високої токсичності та накопичення в атмосфері вказану суміш виводять з використання. Перспективним методом щодо отримання магнієвих сплавів є порошкова металургія [8]. Під час отримання порошків магнію застосовується розпилювання у вакуумі інертним газом [9]. Подальше отримання виробів здійснюється без плавлення, пресування та спікання, що дозволяє значно забезпечити виробництво та масштабувати виготовлення деталей зі сплавів магнію.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Отримання виробів методами порошкової металургії базуються на процесах отримання порошків, пресування та спікання. До одного з найважливіших етапів забезпечення високих експлуатаційних властивостей сплавів магнію із заданою мікроструктурою є етап отримання порошків. В роботах [9]-[11] передбачається отримання порошків сплаву магнію розпиленням газами. Отримані частинки порошків мають близьку до сферичної форму із середнім розміром 20 мкм. Було встановлено, що порошки мають два сімейства частинок: дочірні та основні. Дочірні дрібні частинки утворюються за рахунок вторинного розпаду струменю по механізму десорбції, натомість основні частинки утворюються після завершення розпаду струменю. Було встановлено, не зважаючи на відмінності в поверхневій енергії з розплавами алюмінію, закономірності розпилення в цілому є ідентичними, що значно спрощує вибір технологічної оснастки.

Альтернативним методом отримання порошків без попередньої підготовки розплаву є використання розпилення порошків аргонем електродуговим плавленням дроту [12]. В даному випадку формування розплаву відбувається шляхом запалювання дуги між анодом камери та катодом у вигляді дроту з диспергуючого матеріалу. Утворена краплина розплаву утримується кавітаційно у підвішеному стані та диспергується потоком аргону. Даний метод є привабливим з точки зору отримання порошків для адитивних технологій, однак до недоліків варто віднести низьку продуктивність.

Однією з можливих варіацій методів отримання порошків з розплаву є центробіжне розпилення. В роботі [13] проводили дослідження процесів розпилення сплаву AZ91 відцентровим розпиленням. Формування частинок порошків відбувається шляхом руйнування струменю металу відцентровими силами які виникають під дією диску який обертається. Швидкість обертання диску складала 100 000 об/хв, для уникнення окиснення в камеру подавали гелій з добавками 1-2 % кисню. Кисень відіграє роль пасиваційного газу який знижує ризики детонації та горіння порошків магнію. Частинки порошку мають сферичну та перехідну морфологію у вигляді гантелей. Морфологічні зміни пов'язані як з часом охолодження так і з наявністю кисню в середовищі розпилення який суттєво змінює в'язкість розплаву та поверхневу енергію. Не зважаючи на поширеність методу отримання порошків розпиленням газами, в літературних джерелах обмежено висвітлено теоретичні засади процесів розпилення сплавів магнію. Відсутність аналітичного опису унеможливує прогнозування режимів отримання порошків магнієвих сплавів для медицини із заданим гранулометричним складом та морфологією.

Постановка проблем дослідження. Виходячи з літературних даних, визначення умов розпилення та експериментальне отримання порошків сплавів магнію для подальшого застосування у виробництві біоімплантів є актуальним завданням.

Мета дослідження. Є теоретичний аналіз та експериментальна апробація умов отримання порошків сплавів магнію легованих цинком та рідкісно-земельними елементами, з метою отримання порошків біорезорбних магнієвих сплавів із заданим гранулометричним складом та морфологією.

Викладення основного матеріалу. В роботі проведено дослідження умов отримання промислових сплавів магнію ZK61 та WE46 розпиленням інертним газом за швидкості газу 100, 200, 300, 400 м/с та температури розплаву 700, 800, 900, 1000 °С. Хімічний склад сплавів наведено на в

таблиці 1. Оцінка процесів формування частинок порошків, а саме розміру та форми проводили відповідно до теоретичних засад викладених в роботах [14]-[16].

Як вихідний матеріал для розпилення взято чушки сплавів ZK61 та WE46. Підготовка розплаву проводилась шляхом індуктивного плавлення в графітовому тиглі за температури 800 градусів з ізотермічною витримкою 20 хв. Перед плавленням камера вакуумувалась для видалення адсорбованого кисню, після досягнення тиску менше 10^{-2} Па в порожнину тигля подавали високочистий аргон.

Таблиця 1

Сплав	Хімічний склад сплавів магнію					
	Хімічні елементи					
	Mg	Zn	Y	Zr	Gd	Nd
ZK-61	Бал.	5,5	-	0,4		-
WE-43	Бал.	0,2	4	0,4	1,2	2,1

Після плавлення та гомогенізації розплав через металоприймач діаметром 3 мм подавався в камеру розпилення. Диспергування у фокусі форсунки досягається шляхом дії на струмінь розплаву потоку високо чистого аргону. Камера розпилювання має два проміжних блоки в нижній частині камери частинки після сфероїдизації продуваються аргоном зі доабвками 1 % кисню, з метою первинної пасивації поверхні частинок порошків та уникнення можливих детонаційних процесів. Також в камері розпилення присутня окрема система для видалення порошків з розміром частинок менше 5 мкм, оскільки дана фракція є не стабільною та досить небезпечною в експлуатації.

Під час аналітичного опису процесу отримання порошків магнію розпилення розплавів важливе місце займає оцінка в'язкості. За рахунок обмеженої інформації щодо властивостей розплавів на основі WE та ZK оцінку величини динамічної в'язкості розплаву проводили виходячи з моделі Хірая та Чанга-Крамба [14]:

$$\mu_m = A \exp\left(\frac{B}{RT}\right)$$

$$A = \frac{1,7 * 10^{-7} * \rho^{0.667} T_m^{0.5} M^{-0.167}}{\exp\left(\frac{B}{RT_m}\right)}$$

$$B = 2.65 * T_m^{1.27},$$

де μ_m – в'язкість розплаву, мПа·с; R – універсальна газова стала (8,31 Дж×моль⁻¹К⁻¹); T – температура розплаву, °К; T_m – температура ліквідус, °К; ρ – густина сплаву за кімнатних температур, кг/м³; M – молярна маса, кг×моль⁻¹.

Вихідні дані для оцінки динамічної в'язкості розплавів на основі сплавів магнію наведено в таблиці 2. Результати щодо зміни в'язкості в залежності від температури розплаву наведено на рисунку 1. Як можна побачити введення легувальних елементів різної природи не суттєво змінює величину в'язкості в широкому інтервалі температур, тому в подальших розрахунках прийнято усереднене значення динамічної в'язкості. Збільшення температури розплаву знижує динамічну в'язкість, за рахунок збільшення рухливості атомів складових сплаву. Дані уявлення узгоджується із теоретичним уявленнями щодо будови розплавів [17].

Іншим важливим параметром під час отримання порошків розпилюванням є поверхневий натяг розплаву. Для мікро легованих сплавів магнію, поверхнева енергія суттєво не змінюється від температури та місту легувальних елементів, тому для попередньої оцінки процесів розпилювання сплавів ZK-61, WE-46 поверхневу енергію прийнято за 0,5 Н/м [18].

Табл. 2.

Вихідні дані для оцінки динамічної в'язкості сплавів ZK-61, WE-46

Сплав	Атомна вага, кг×моль ⁻¹	Густина, кг/м ³	Температура ліквідус, °С	Температура розплаву, °С
ZK-61	0,180	1800	630	700
				800
WE-46	0,230	1850	650	900
				1000

Виходячи із засад порошкової металургії, формування виробів з порошків здійснюється методами пресування. Як відомо [19], одними з ключових факторів, які визначають процес компактування (пресуємість, формуємість, міцність пресовок, щільність тощо) є гранулометричний склад та морфологія порошків. Під час розпилювання порошків інертним газом, регулювання середнього розміру частинок найчастіше проводять шляхом зміни технологічних параметрів процесу розпилювання (температури розплаву, швидкості газу, діаметром сопла тощо).

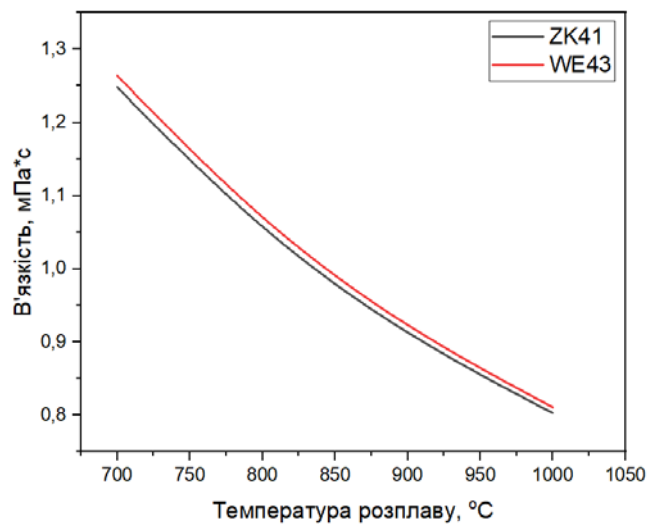


Рис. 1. Теоретична зміна в'язкості розплавів ZK-61, WE-46 в залежності від температури перегріву розплаву

Варто відмітити, що в практиці отримання порошків найчастіше застосовують таке відношення тиску газу та розміру сопла, щоб досягнути вибухового руйнування струменю металу у факелі розпилення. Ефект вибуху супроводжується руйнуванням великих краплин розплаву з утворенням багатьох дрібних. Вибуховий механізм розпилювання дозволяє отримати високий рівень виходу придатної фракції та високу гомогенність порошку. В роботі передбачається оцінку середнього розміру частинок порошку входячи з моделі Г. Любанської [14], [15]:

$$d_{50} = K \sqrt{\frac{\eta_m \sigma_m d_0}{\eta_g U_g^2 \rho_m} \left(1 + \frac{m}{G}\right)},$$

де K – інструментальна константа (120-150); η_m – кінематична в'язкість розплаву, м²/с; σ_m – поверхнева енергія розплаву, Н/м; d_0 – діаметр сопла, м; η_g – кінематична в'язкість газу, м²/с; U_g – швидкість газу, м/с; ρ_m – густина металу, кг/м³; m – потік металу, кг/с; G – потік газу, кг/с

Аналіз результатів впливу температури розплаву та швидкості газу наведено на рисунку 2. Зі збільшенням температури розплаву, за інших рівних умов, відбувається збільшення ступеню дисперсності продуктів диспергування за рахунок зниження в'язкості розплаву (рис. 1). Відповідно, для подрібнення первинного пасма розплаву струмінь газу в зоні розпилення витрачає меншу кінетичну енергію на руйнування, що дозволяє підвищити інтенсивність подрібнення первинних та вторинних краплин розплаву. Вплив швидкості енергоносія є досить неоднозначним, з одного боку збільшення швидкості газу призводить до активізації диспергування розплаву з отриманням більш дрібних частинок порошку. З іншого боку за високих швидкостей дуття підвищується коефіцієнт теплопередачі, що знижує ефективність подрібнення, на що вказує затухаюча обернено пропорційна залежність зміни розміру частинок від швидкості енергоносія (рис. 2).

З погляду отримання виробів з порошків сплавів магнію, оптимальний розмір частинок порошків змінюється в залежності від конкретних умов експлуатації та технології компактування.

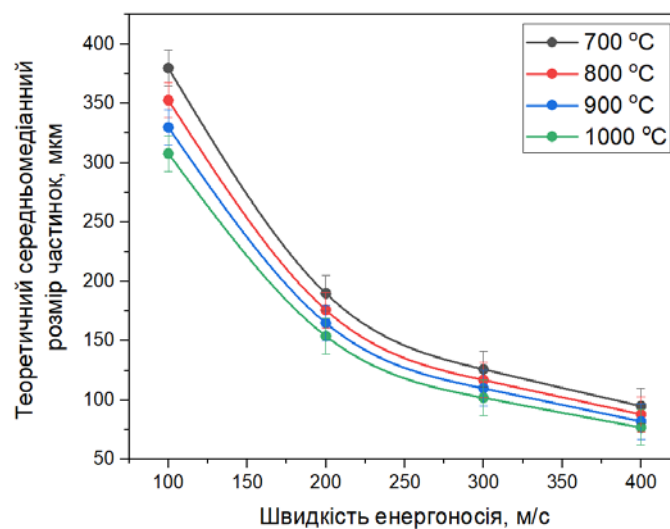


Рис. 2. Теоретична оцінка середньомедіанного розміру частинок сплавів ZK-61, WE-46 в залежності від швидкості енергоносія та температури розплаву

Найбільш раціональним є використання поліфракційних порошків із середнім розміром частинок менше 150 мкм. За таких умов від час пресування частинки порошків більш дрібної фракції будуть заповнювати порожнечу яку утворюють каркас із крупних частинок тим самим підвищуючи відносну щільність виробу. Тому для отримання порошків сплавів ZK-61, WE-46 обрано режим обробки за якого: 1) швидкість енергоносія – 300 м/с; 2) температура розплаву – 1000 °C; 3) плавлення під тиском аргону.

Однак, не лише розмір частинок порошків визначає закономірності процесі подальшого компактування, але й морфологія частинок. Відомо [20], що порошок не правильної форми гірше ущільнюється, але мають високу міцність пресовок, а сферичні навпаки. Під час отримання порошків магнію, з урахуванням різних технологій подальшої консолідації доцільним є отримання сферичних частинок, що особливо важливо під час отримання виробів 3д друком. З метою прогнозування морфології частинок порошків було проведено оцінку часу охолодження та сфероїдизації, відношення між якими дозволяє оцінити імовірність отримання частинок правильної форми.

Час охолодження:

$$\tau_{\text{ох}} = \frac{c \gamma d}{6 \alpha_{\text{к}}} \ln \left(\frac{t_m - t_r}{t_k - t_r} \right),$$

де c – теплоємність розплаву, 34 Дж/(кг*К) [21]; γ – густина розплаву, 1504.4 кг/м³ [21]; t_m, t_k, t_r – температури розплаву, кристалізації та енергоносія.

Час сфероїдизації розраховується відповідно до формули:

$$\tau_{\text{сф}} = \frac{3\pi\eta_m}{\sigma_m} (R - r),$$

де η_m – кінетична в'язкість розплаву; σ_m – поверхневий натяг 0,5 Н/м; R, r – радіуси сфероїдизованій каплі, та первинного пасма.

Для більшості теоретичних розрахунків процесів розпилювання визначення коефіцієнту тепловіддачі конвекцією може бути визначено емпіричною формулою Д. Н. Ляховського [22], [23]:

$$\alpha_k = (3,4 - 0,2 \frac{t_m}{1000}) \sqrt{\frac{U_r}{d}},$$

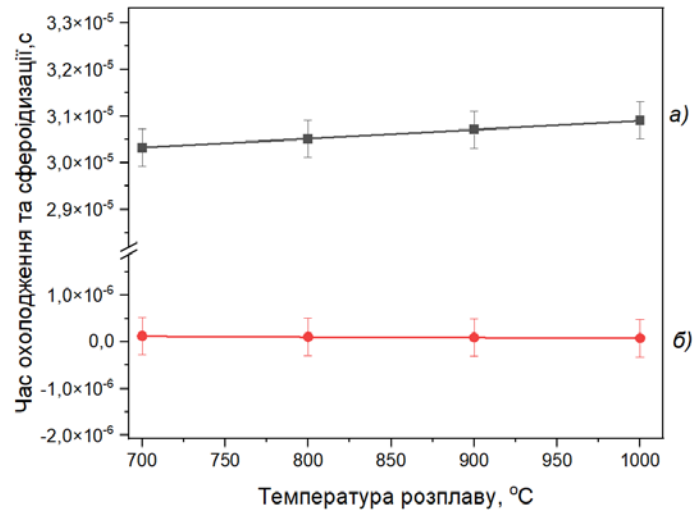
де U_r – швидкість газу, м/с; d – діаметр каплі розплаву, м.

Результати розрахунків наведено на рисунку 3. Час охолодження (рис. 3, а) за інших рівних умов значно вище від часу сфероїдизації (рис. 3, б). Таке відношення дозволяє припустити імовірність отримання частинок порошків сферичної форми. Проте, під час розпилювання особливу увагу варто приділяти кількості атомів кисню в диспергувальному об'ємі. За умов збільшення кількості кисню відбувається значне окиснення поверхневих шарів і відповідне збільшення в'язкості. Зміна тепло-фізичних властивостей може суттєво змінювати відношення між часом охолодження та часом сфероїдизації. Відповідно, отримання частинок сферичної форми є ускладненим за даних умов.

За встановлених оптимальних умов розпилення було отримано порошки сплавів ZK-61, WE-46 розпилюванням аргонем високого тиску. На рисунку 4 наведено гранулометричний склад порошків та морфологію частинок. Середній розмір частинок порошків для обох матеріалів складає близько 70 мкм. Близькі відношення гранулометричного складу порошків сплавів зумовлені природою та величиною тепло-фізичних властивостей. Отримані порошки мають менший середній розмір частинок, ніж під час аналітичної оцінки (рис. 2), що може бути обумовлено розпилення в режимі вибуху, який проявляється стрибком ступеню диспергування, та практично не може бути аналітично оцінений за рахунок одночасної дії різних параметрів.

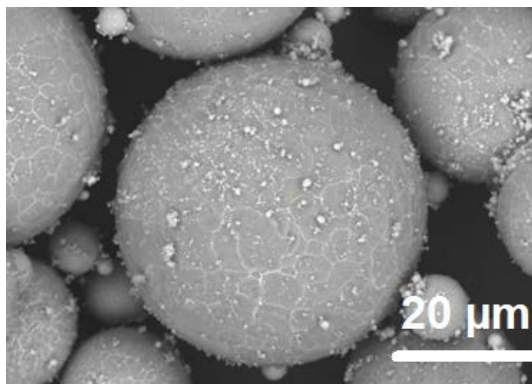
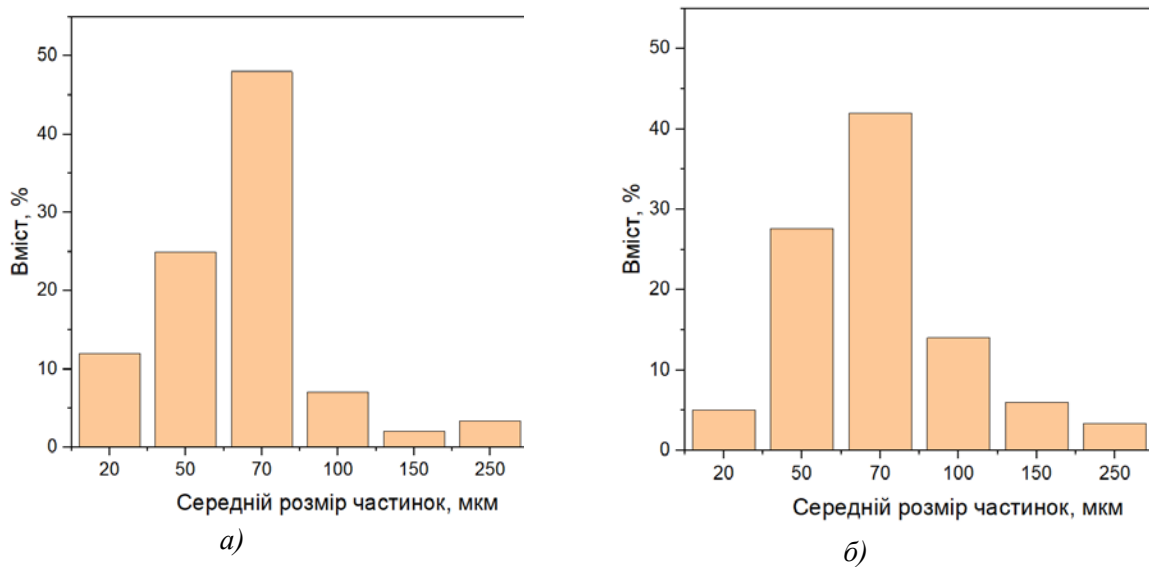
Морфологія частинок порошків має характерну сферичну форму, що узгоджується з даними щодо розрахунку часу охолодження та сфероїдизації. На поверхні частинок відмічається утворення вторинних краплин, що може бути зумовлено явищами вторинної деструкції струменю розплаву, що узгоджується з даними роботи [9].

Висновки. Проведено модельну оцінку параметрів розпилювання сплавів магнію ZK-61, WE-46, встановлено, що отримання частинок порошків середнім розміром менше 150 мкм можливо за температури розплаву 1000 °С, та швидкості газу 400 м/с. Модельні дослідження часу охолодження та сфероїдизації вказують на імовірність отримання частинок сферичної форми. Середній розмір частинок порошків склюють 70 мкм. Морфологія порошків сферична з не однорідними проявами вторинної деструкції струменю розплаву, що проявляється у вигляді дрібних краплин на поверхні частинок. В подальших дослідження доцільним є визначення умов компактування отриманих порошків різними методами, з метою встановлення режимів формування виробів біомедичного призначення.

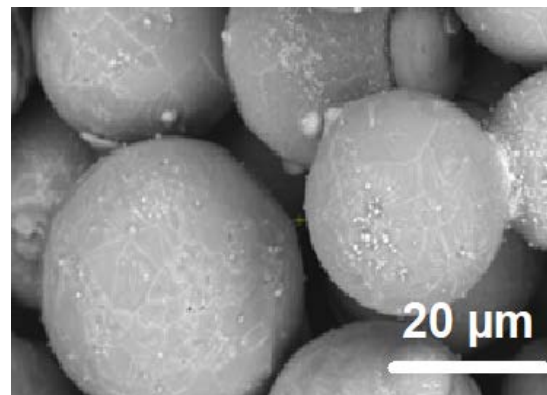


а) час охолодження; б) час сфероїзації

Рис. 3. Зміна часу охолодження та сфероїзації від температури розплаву за швидкості газу 400 м/с



в)



г)

Рис.4. Гранулометричний склад та морфологія частинок порошків ZK-61 (а, в), WE-46 (б,г)

Література

1. Nanocrystalline apatites: From powders to biomaterials / C. Drouet та ін. *Powder Technology*. 2009. Т. 190, № 1-2. С. 118–122. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.04.041>
2. Pietrzak W. S., Sarver D., Verstynen M. Bioresorbable implants – practical considerations. *Bone*. 1996. Т. 19, № 1. С. S109–S119. URL: [https://doi.org/10.1016/s8756-3282\(96\)00139-1](https://doi.org/10.1016/s8756-3282(96)00139-1)
3. Čapek J., Vojtěch D. Powder Metallurgical Techniques for Fabrication of Biomaterials. *Manufacturing Technology*. 2015. Т. 15, № 6. С. 964–969. URL: <https://doi.org/10.21062/ujep/x.2015/a/1213-2489/mt/15/6/964>
4. Amukarimi S., Mozafari M. Biodegradable magnesium based biomaterials: An overview of challenges and opportunities. *MedComm*. 2021. Т. 2, № 2. С. 123–144. URL: <https://doi.org/10.1002/mco2.59> (дата звернення: 22.11.2023).
5. Gas formation and biological effects of biodegradable magnesium in a preclinical and clinical observation / Y.-K. Kim та ін. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2018. Т. 19, № 1. С. 324–335. URL: <https://doi.org/10.1080/14686996.2018.1451717> (дата звернення: 22.11.2023).
6. Haghshenas M. Mechanical characteristics of biodegradable magnesium matrix composites: A review. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2017. Т. 5, № 2. С. 189–201. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jma.2017.05.001> (дата звернення: 22.11.2023).
7. Emami S., Sohn H. Y., Kim H. G. Formation and Evaluation of Protective Layer Over Magnesium Melt Under SF₆/Air Atmospheres. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2014. Т. 45, № 4. С. 1370–1379. URL: <https://doi.org/10.1007/s11663-014-0059-2> (дата звернення: 22.11.2023).
8. Biodegradable Magnesium Alloys for Personalised Temporary Implants / R. E. Hendea та ін. *Journal of Functional Biomaterials*. 2023. Т. 14, № 8. С. 400. URL: <https://doi.org/10.3390/jfb14080400> (дата звернення: 22.11.2023).
9. Ünal A. RAPID SOLIDIFICATION OF MAGNESIUM BY GAS ATOMIZATION. *Materials and Manufacturing Processes*. 1992. Т. 7, № 3. С. 441–461. URL: <https://doi.org/10.1080/10426919208947431> (дата звернення: 22.11.2023).
10. Date K., Iwaoka T. Investigations on Manufacturing of Magnesium Alloy Powder by Air Atomization. *MATERIALS TRANSACTIONS*. 2020. Т. 61, № 9. С. 1790–1797. URL: <https://doi.org/10.2320/matertrans.y-m2020834> (дата звернення: 22.11.2023).
11. Meyers E. A., Carrillo M. C. The Production of AZ31 Alloys by Gas Atomization Method and Its Characteristics / *The Journal of Prevention of Alzheimer's Disease*. 2020. С. 1–2. URL: <https://doi.org/10.14283/jpad.2020.42> (дата звернення: 22.11.2023).
12. Ultrasonic atomization of magnesium alloy AZ61 based on the TIG melting method / J. Jaros та ін. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/s12206-023-2301-9> (дата звернення: 22.11.2023).
13. LABRECQUE, C., ANGERS, R., TREMBLAY, R., & DUBE, D. (1997). *Inverted disk centrifugal atomization of AZ91 magnesium alloy*. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 36(3), 169–175. doi:10.1016/s0008-4433(97)00007-4
14. Hirai M. Estimation of Viscosities of Liquid Alloys / Masazumi Hirai // ISIJ International. – 1993. – Т. 33, № 2. – С. 251–258. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.33.251>
15. Н. Lubanska. Correlation of Spray Ring Data for Gas Atomization of Liquid Metals [Електронний ресурс] / Н. Lubanska // The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society. – 1970. – С. 45–49. – Режим доступу: <https://doi.org/10.14283/jpad.2020.42>
16. A mathematical model of the spray deposition process [Електронний ресурс] / E. Gutierrez-Miravete [та ін.] // Metallurgical Transactions A. – 1989. – Т. 20, № 1. – С. 71–85. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1007/bf02647495> (дата звернення: 22.11.2023). – Назва з екрана.

17. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей / Я. И. Френкель. – Москва : Наука, 1975. – 592 с.
18. Bohdansky J., Schins H. E. J. Surface tension and density of the liquid earth alkaline metals Mg, Ca, Sr, Ba. *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry*. 1968. Т. 30, № 9. С. 2331–2337. URL: [https://doi.org/10.1016/0022-1902\(68\)80241-6](https://doi.org/10.1016/0022-1902(68)80241-6)
19. Бальшин М. Порошковое металловедение. / М. Бальшин. – Москва : Metallurgizdat, 1948. – 332 с.
20. Степанчук А. М. Теоретичні та технологічні основи отримання порошків металів, сплавів і тугоплавки сполук : Підручник / А. М. Степанчук. – К.: НТТУ «КПІ», 2006. – 353 с.
21. Thermophysical Properties of Magnesium in Solid and Liquid States / R. N. Abdullaev та ін. *Journal of Engineering Thermophysics*. 2022. Т. 31. С. 384–40.
22. Ляховский, Д. Н. Конвективный теплообмен между газами и взвешенными частицами / Д. Н. Ляховский // Журнал технической физики. -1940.-Т. 10, № 12.-С. 999.
23. Ляховский, Д. Н. Конвективный теплообмен сферических взвешенных частиц с окружающей средой / Д. Н. Ляховский // Котлотурбостроение. -1947.-Т. 29, №5.-С. 29-31.

Рецензент: д. т. н., проф. Мініцький Анатолій В'ячеславович. КПІ ім. Ігоря Сікорського, НН ІМЗ ім. Є. О. Патона, каф. ВТМ та ПМ

Д.А. Гусачук, М.Д. Мельничук, І.О. Парфентьєва, Т.В. Фурс, І.В. Боярська, М.М. Карпюк

Луцький національний технічний університет

ПРОТОТИПУВАННЯ ТА СТРАТЕГІЯ РЕВЕРС ІНЖИНІРИНГУ НА ПРИКЛАДІ ІНЖЕНЕРНИХ ЗАДАЧ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА

В роботі розглядаються аспекти, які прямо чи опосередковано впливають на результати реверс інжинірингу в практиці прототипування виробів машинобудівного призначення. На основі аналізу типових схем і алгоритмів реверс інжинірингу з використанням технологій адитивного виробництва та оптимізації процесів 3D сканування, розроблені рекомендації щодо підготовки, виконання та постобробки цифрових сканів інженерних об'єктів для забезпечення якості та швидкості їх реконструкції, з використанням оптичних 3D сканерів зі структурованим світлом. Дослідження здійснено завдяки успішній реалізації міжнародного проєкту "Посилення ролі ЗВО в промисловій трансформації в контексті парадигми Industry 4.0 в Грузії та Україні" (<https://hein4.net>).

Ключові слова: адитивне виробництво, реінжиніринг, 3D друк, CAD модель, 3D сканер, FDM технології, прототип, STL модель, слайсинг

D. Husachuk, M. Melnychuk, I. Parfentieva, T. Furs, I. Boiarska, M. Karpyuk

PROTOTYPING AND REVERSE ENGINEERING STRATEGY USING THE EXAMPLE OF ADDITIVE MANUFACTURING ENGINEERING PROBLEMS

The aspects that directly or indirectly affect the results of reverse engineering in the practice of prototyping mechanical engineering products are examined in the work. Based on the analysis of typical reverse engineering schemes and algorithms using additive manufacturing technologies and optimization of 3D scanning processes, recommendations have been developed regarding the preparation, execution, and post-processing of digital scans of engineering objects to ensure the quality, accuracy, and speed of their reconstruction using optical 3D scanners with structured light. The research was carried out thanks to the successful implementation of the International Project "Boosting the role of HEIs in the industrial transformation towards the Industry 4.0 paradigm in Georgia and Ukraine" (<https://hein4.net>).

Keywords: additive manufacturing, reengineering, 3D printing, CAD model, 3D scanner, FDM technologies, prototype, STL model, slicing

Постановка проблеми. Сучасному інженеру добре відомо, якими трудомісткими є процеси створення предмету інженерної розробки, починаючи від обґрунтування ідеї, створення прототипу й виробництва першого промислового зразка та, з рештою, комерційного оригіналу продукції. В цьому ланцюжку, якраз етапи створення прототипів продукції, проведення їх ґрунтового аналізу, перевірки функціоналу й ергономіки, займають значний час всієї розробки.

До не давна роботи зі створення та виготовлення прототипів виконувались вручну кваліфікованими інженерами. Крім збільшення часу на виготовлення продукту, ручна робота часто обмежувала кількість можливих конструктивних змін. Це не дозволяло досягнути достатньої оптимізації продукту, його конструктивної досконалості і, особливо, функціональності. Тут, слід зазначити, що ця стратегія відтворення конструктивних елементів для деталей простої геометрії, активно використовується і зараз, коли за допомогою примітивів у спеціалізованому програмному середовищі будується параметрична 3D модель. Проте, в умовах значного зростання вимог до продуктивності та мобільності виробництва ручне прототипування переросло у серйозну проблему, рішення якої було знайдено за рахунок розробки та впровадження автоматизованих комп'ютерних технологій швидкого прототипування (RP – Rapid Prototyping). На етапах підготовки продукту до комерційного виробництва стали широко використовувати 3D системи та полігональні 3D моделі для створення фізичних предметів, прототипів, інструментального оснащення та функціональних деталей. Можливості цього напрямку, звісно, були сильно посилені швидким та глобальним прогресом в галузі цифрових та інформаційних технологій, процесорних систем, комп'ютерної інженерії, апаратних засобів комп'ютерних систем, також в галузі матеріалознавства, структурування сучасних матеріалів, та цифрового світу виробництва, загалом.

Функціональність матеріальних об'єктів залежить від двох їх характеристик: форми й складу матеріалу. Наприклад, хороший естетичний вигляд скульптури залежить від її форми, в той час, як, її міцність залежить від фізичних властивостей матеріалу. Відповідно, ідеальним виробничим процесом є такий, за допомогою якого можна згенерувати будь-яку геометричну форму з будь-якого

матеріалу. Однак традиційні виробничі процеси (консервативні чи субтрактивні) вкрай обмежені в цьому відношенні.

Адитивний підхід передбачає створення об'єкта на «порожньому місці» шляхом поступового додавання матеріалу. Матеріал, який додається кожен раз, може бути однаковим або різним. Таким чином, тут забезпечується можливість одночасного вирішення завдань формоутворення і контролю складу матеріалу в рамках одного процесу. Чим менше об'єм матеріалу, який додається на кожному етапі, тим більше досяжна точність форми та ступінь контролю складу матеріалу. Перевагою цього підходу, є те, що теоретично з його допомогою може бути отримана будь-яка тривимірна форма без використання зовнішніх інструментальних засобів із заданою формою. Це дозволяє повністю уникнути проблем, пов'язаних з консервативними і субтрактивними методами.

Методи пошарового синтезу на початку використовувались для створення демонстраційних моделей виробів в процесі їх розробки [1]. Загальновідомо, що ці моделі можуть бути набагато корисніші, ніж креслення або зображення для повного розуміння функцій виробу при концептуальному проектуванні. Незважаючи на наявність швидких і просто створюваних креслень, в кінцевому підсумку, більш бажаним є використання фізичних моделей, щоб досконало перевірити працездатність виробу.

Переслідуючи цю початкову мету простого створення моделей, адитивне виробництво (AM – Additive Manufacturing) прогресувало в напрямку поліпшення матеріалів, точності та загальної якості вихідного продукту [2]. Отримувані моделі швидко стали використовуватися для забезпечення інформації про те, що зараз називається «3F» (Form – форма; Fit – збирання; Function – функція). Відповідно, якщо зараз сказати, що технологія адитивного виробництва корисна лише для створення моделей, то це буде неточною і заниженою оцінкою. Сучасне адитивне виробництво в його поєднанні з іншими технологіями для формування технологічних ланцюжків може бути використано для значного скорочення термінів розробки та вартості продукції. В таких умовах постає проблема та ряд комплексних задач, пов'язаних з вирішенням питань швидкої адаптації методів реконструкції об'єктів до значної мінливості процесів AM в розрізі їх комерційних переваг. Інженеру слід швидко отримувати цифрові дані про об'єкт, що були би придатні для успішної реалізації відтворення об'єкту адитивними методами, та й ще ж до того – з можливістю простої та швидкої їх корекції. Звісно, мова тут іде про швидке отримання якісної параметричної моделі на основі цифрових сканів чи полігональних моделей, що навіть зараз, з появою спеціалізованих програмних продуктів, є не настільки простим завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використовуючи різноманітне програмне забезпечення та технологічні платформи, розширені обчислювальні потужності та можливості комунікацій, масштаби гнучкості сучасного адитивного виробництва різко зросли [1-3]. Крім того, значно зросла точність та надійність виробів, а висока ефективність проектування дає можливість впровадити індивідуальні технології виробництва продуктів із майже нескінченною гнучкістю дизайну.

Всі існуючі зразки комерційного обладнання для адитивного виробництва в даний час використовують пошаровий підхід, і головна їхня відмінність полягає в матеріалах, які вони можуть використовувати, в техніці створення шарів і способах зв'язування шарів між собою. Дані відмінності визначають такі чинники, як точність побудованої деталі, а також склад її матеріалу і механічні властивості. Крім того, вони визначають, як швидко може бути виготовлена деталь, розміри використовуваного AM обладнання та загальну вартість обладнання і процесу [4].

У випадку FDM друку, як найбільш доступної зараз технології пошарового просторового синтезу, номенклатура використовуваних полімерних матеріалів є найбільш широкою серед [5] інших способів адитивного виробництва. Це розширює можливості щодо оптимізації експлуатаційних характеристик виробів. З іншого боку, актуальними залишаються питання стратегії побудови CAD моделей [6], оптимізації її геометрії, підготовки та адаптації цифрових даних, вибору напрямку пошарового синтезу, оптимізації алгоритму побудови, для кожного конкретного виробу та задачі реінжинірингу, загалом [7].

За останні роки розроблено досить досконалий математичний апарат для обробки великих цифрових масивів CAD даних, на основі якого з'явилися багато комерційних програмних продуктів реінжинірингу [8]. Проте, для конкретних завдань прототипування важливим є вибір чи власна побудова стратегії процесу, що вимагає аналізу та співставлення переваг та недоліків відомих методів реконструкції моделей.

Постановка завдання та мета дослідження. Метою роботи є аналіз сучасних стратегій реверс інжинірингу з використанням технологій адитивного виробництва та оптимізація процесу прототипування, зокрема, на прикладах FDM друку конструктивних елементів та виробів.

Виклад основного матеріалу. Адитивне виробництво включає в себе кілька етапів (рис. 1), починаючи з віртуального CAD опису деталі та її функціоналу, отримання цифрових даних процесу, та закінчуючи фізичним результатом її створення. Різноманітні вироби включають в себе процеси адитивного виробництва різними шляхами та в різній мірі. Відносно прості вироби можуть використовувати адитивне виробництво для демонстраційних моделей, в той час як, більші та складні вироби з великим інженерним наповненням можуть використовувати адитивне виробництво на багатьох етапах процесу розробки.

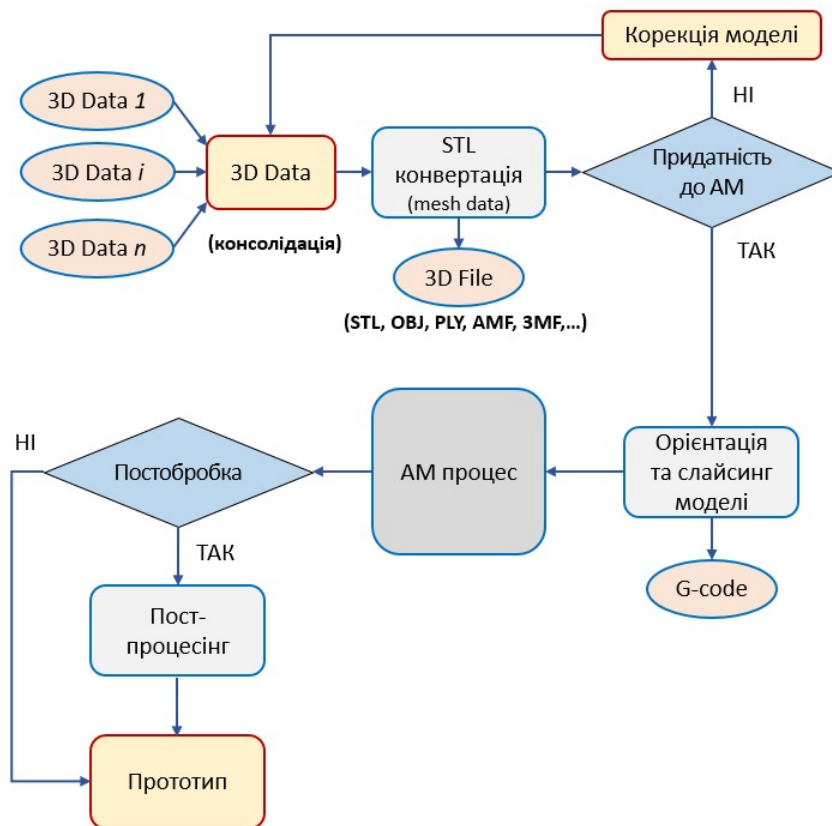


Рис. 1. Основні етапи та елементи АМ процесу

За багатьох процесів адитивного виробництва, виріб являє собою чорновий зразок, з чорновими розмірами та грубими поверхнями, швидке створення яких може бути забезпечено адитивним виробництвом. На кінцевих етапах процесу виготовлення, деталі можуть зажадати ретельного очищення і подальшої обробки, шліфування, підготовку поверхні та забарвлення перед своїм використанням. Тут, також, адитивне виробництво може бути більш вигідним, в силу своєї можливості створення складних геометричних форм без інструментальної обробки.

Результат реінжинірингу залежить від детального аналізу кожного його етапу та вибору стратегії CAD підготовки, процесу друку та постобробки. Тут, сам процес пошарової побудови чи 3D друку, після отримання 3D машиною цифрових даних побудови, мало залежить від користувача, що вигідно вирізняє адитивне виробництво від інших виробничих процесів. Можливі похибки на цьому етапі мінімізуються. Важливими є етапи, так званого препроцесінгу, якраз прийняті тут рішення і визначають загальну стратегію прототипування. Для виробів машинобудівного призначення актуальним буде інженерний аналіз, який визначить методи збору цифрових даних та САД моделювання, варіанти цифрових форматів, просторову орієнтацію моделі та напрям пошарового синтезу, можливі матеріали, а відповідно і загалом вид технології адитивного виробництва. В машинобудівних задачах на етапі збору інформації про об'єкт актуальним є аналіз можливих способів, якими був виготовлений цей об'єкт. Тут, стратегії реінжинірингу пов'язують з методами навчання, що полягають у комплексному аналізі виробу, складу матеріалів, технологій, з

формуванням не просто CAD даних, а і опису виробничих процесів – CAE/CAM даних. Тобто зворотній інжиніринг для індустріальних процесів це не просте копіювання створеного раніше виробу, а отримання знань про те, яким чином цей виріб був виготовлений. Така стратегія дозволить покращити виріб та знайти нові рішення щодо його виробництва.

Важливим етапом RE процесів є оцифрування фізичного об'єкту (отримання та моделювання форми) та його віртуальне представлення. Для цього можливе застосування контактних датчиків, що широко використовуються для вимірювання механічних деталей у промисловості. Проте, для деталей складної форми, більше підходять безконтактні датчики та 3D сканери. Оцифрування дозволяє контролювати деталі, порівнювати результат оцифрування з еталонною CAD моделлю та вимірювати точні геометричні характеристики. Але оцифрування за допомогою безконтактного датчика залишається складним процесом.

Сьогодні на ринку 3D технологій отримали широке застосування активні системи 3D сканування зі структурованим світлом [2]. 3D сканери зі структурованим світлом працюють за методом захоплення всього поля опромінення, що зменшує час сканування в порівнянні з лазерними системами. Структурований світловий потік (малюнок) спрямовується на об'єкт за допомогою LCD проектора або іншого стабільного джерела світла (рис. 2) та аналізується деформація малюнка на об'єкті. Камера, зміщена від джерела світла, спрямована на форму візерунка під кутом (β) та обчислює відстань до кожної точки в полі зору.

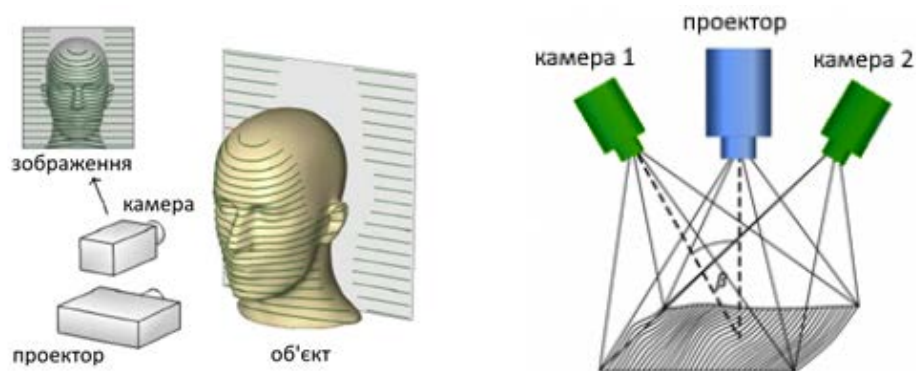


Рис. 2. Принцип роботи оптичного 3D сканера зі структурованим світлом

Зворотна інженерія з використанням оптичних структурованих 3D сканерів дозволяє досягати високої роздільної здатності, що важливо за потреб захоплення дрібних елементів деталей. Проте, точність сканування (рис. 3) може поступатися лазерним сканерам. Для мінімізації останнього виконують сканування з багатьох ракурсів, з наступною консолідацією отриманих хмар точок та корекцією точкових даних.

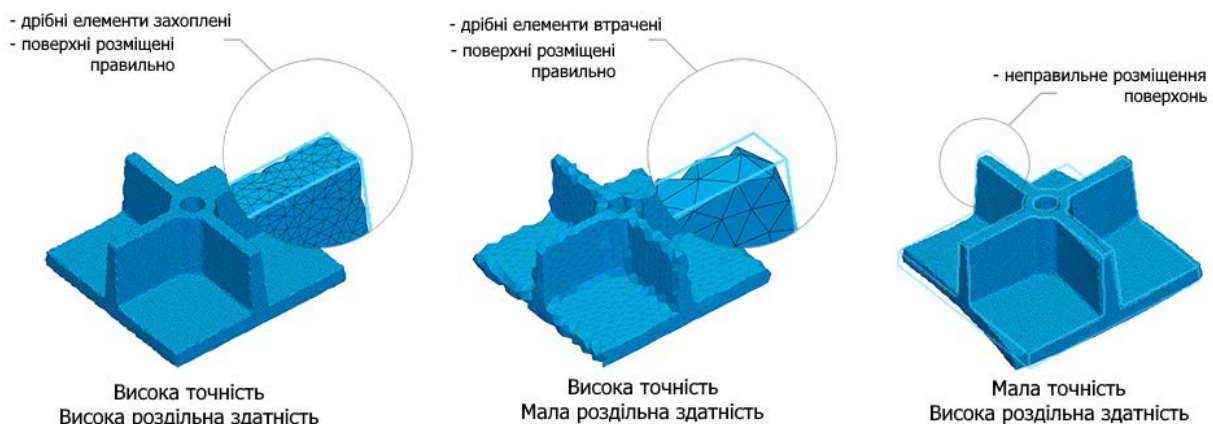


Рис. 3. Точність та якість полігональних моделей

Слід зазначити, що ступінь деталізації, так важлива для візуалізації 3D об'єктів, може не мати такої актуальності у випадках реінжинірингу, кінцевою метою якого є виготовлення об'єкту одним зі способів адитивного виробництва. Зокрема, для звичайних процесів FDM, ступінь деталізації конструктивних елементів деталі може бути спотворена товщиною шарів пластику, що наносяться

соплом екструдера. В даному випадку більш актуальною є геометрична точність 3D сканування, що в звичайних оптичних сканерах компенсується алгоритмами обробки точкових даних та багатопозиційним скануванням об'єкту.

В деяких задачах точність сканування оптичними сканерами може не задовольняти інженера. Таким чином, за вибору стратегії реінжинірингу, що передбачає повну автоматизацію отримання цифрової моделі, слід уважно обирати методи 3D сканування. Часто така стратегія є виправданою в аматорстві, де основною задачею є отримання звичайної копії виробу, без точного відтворення всіх конструктивних елементів оригіналу.

Для прикладу, у роботі отримували цифрову модель важеля подачі акумуляторного клейового пістолета Bosch GluePen (рис. 4). Аналіз геометрії, матеріалу та основних конструктивних поверхонь, показав, що важіль виготовлений методом екструзії пластику у формах для лиття під тиском. Функціонально важіль приводить в рух механізм подачі клейового стрижня у блок нагріву та під час роботи зазнає згинального навантаження. Як помилку виробника, слід відмітити відсутність блокування руху важеля за умов повного розрідження клею у нагрівальній камері, тобто не досягнення робочої температури блоку нагріву. Неуважність користувача та прикладання надмірних зусиль викликали руйнування важеля в зоні дії найбільшого згинального моменту, це місцеве заглиблення для входу колінного шарніру механізму подачі, що розташоване в середній його частині.

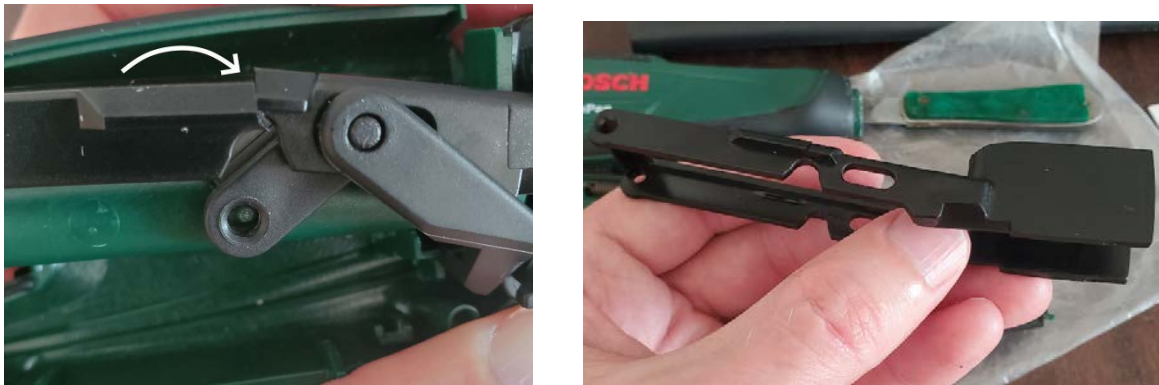


Рис. 4. Важіль подачі клейового пістолету (місце руйнування)

Використовували дві стратегії реверс інжинірингу: оцифровування хмар точкових даних, отриманих за допомогою оптичного сканера моделі EinScan-SE фірми Shining 3D; ручна реконструкція з використанням твердотільного моделювання у CAD редакторі.

Принциповий аналіз об'єкту та його функціоналу, а також можливості EinScan-SE, як активної системи сканування зі структурованим світлом дає надію на адекватність результату реалізації першої стратегії. Слабкою стороною цього варіанту реінжинірингу є колірна температура об'єкту: важіль виготовлений з темного, чорного пластику, що послаблює температурну насиченість променів структурованого світла сканера та може ускладнити збір хмар точок під час сканування. Як відомо деталі чорного кольору мають проблеми сканів у випадку використання оптичних активних 3D сканерів [6]. Особливою проблемою може стати також недостатня матовість зовнішніх та глянець внутрішніх поверхонь деталі. Глянцеві темні поверхні взагалі нездатні формувати хмари точок в оптичних системах сканування.

Ці особливості здатні вкрай ускладнити швидке та якісне формування цифрової моделі, що може викликати навіть зміну стратегії реверс інжинірингу. Зокрема, в процесі синтезу 3D моделі нами була використана стратегія прямого CAD моделювання з використанням примітивів у просторових редакторах. Як відомо, такий процес реінжинірингу є вкрай трудомістким та зайняв багато часу на побудову моделі. Цю стратегію можна виправдати за умов виробництва великої кількості деталей одного прототипу з визначеною геометрією. Також, на перевагу стратегії, може бути використана потреба у наступній корекції геометрії моделі, зміни її конструкції та дизайну, на випадок еволюції самого виробу чи механізму, в якому вона застосовується.

У першому варіанті прототипування важеля здійснювали в автоматичному режимі сканування об'єкту системи Shining EinScan-S, з поворотом столу на 360° та без врахування текстур. За результатами сканування (рис. 5) встановлено, що навіть за умов повільного сканування з кроком

повороту стола у 10° , для оригіналу деталі без підготовки поверхонь, важко отримати потрібну кількість точок, за якими програма могла б здійснити відтворення хоча б примітивної геометрії важеля. На таку ситуацію мало впливає навіть режим HDR сканеру, що працює у високому динамічному діапазоні світлового поля: отримана хмара точок скану мала густину, недостатню для відтворення потрібної геометрії.

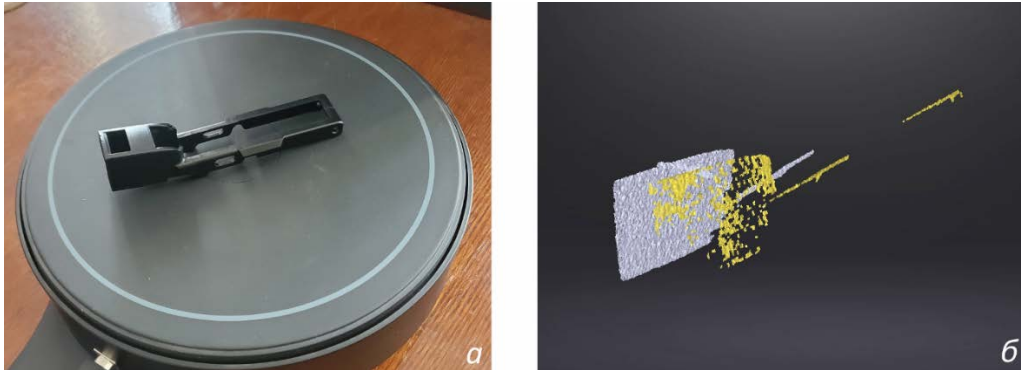


Рис. 5. Результат сканування деталі без обробки поверхні

Кардинально виправити ситуацію можна використанням аерозолі чи спреїв для матування поверхонь. Нанесений шар ефективно матує поверхню, що сприяє поглинанню падаючих світлових променів та дозволяє камерам сканеру з легкістю фіксувати всі тонкощі геометрії деталі. Спеціалізовані спреї є досить ефективними, але й дорогими. У нашому випадку було використано спосіб покриття поверхонь деталей звичайною акриловою суспензією білого кольору без глянцевого ефекту. Суспензію наносили пензликом (рис. 6), розрівнюючи на плоских ділянках. Основним результатом тут є матовість поверхонь та їх високий температурний колір, що сприятливо впливає на результат оптичного сканування з використанням структурованого світла.

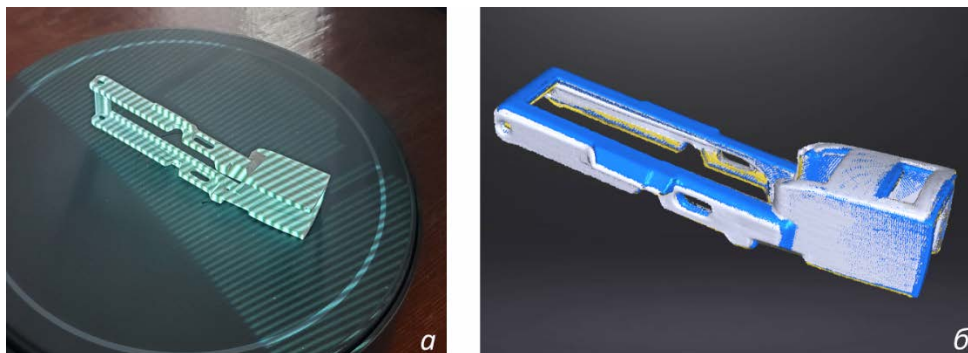


Рис. 6. Результат сканування деталі після матування поверхні

Сканування підготовленого таким чином об'єкту дозволило легко отримати три групи хмар точок, зі скануванням важеля у різних положеннях. Об'єднання груп в автоматичному режимі системи дало якісний результат, було отримано консолідацію поверхонь, яка мала практично замкнений геометричний об'єм.

Накладання 3D сканів у програмі EinScan-S реалізовано за послідовною схемою. Отримані групи хмар точкових даних для двох сканів з різних ракурсів об'єднувались в автоматичному режимі на основі характеристик. Лише після виконання консолідації попередніх двох сканів є можливість додавання наступного третього скану, отриманого під іншим ракурсом розміщення деталі на поворотному столику. Об'єднанням декількох 3D сканів можна досягати більшої точності сканування. На цьому етапі реконструкції встановлено, що за умов матування поверхні пластику для отримання якісної полігональної моделі достатньо двох сканів, з використання максимальної кількості поворотів стола (36 , з кроком 10°). Враховуючи, що на отримання одного скану витрачається чимало часу, який залежить від обчислювальної потужності комп'ютера, вибір кількості сканів та повороту столика сканеру напряму впливають на продуктивність та вартість процесу RE. Зрозуміло, що ця обставина має бути врахована у загальній стратегії реінжинірингу, та вона є залежною від складності геометрії деталі й стану її поверхні.

Після фази збору необхідний етап попередньої обробки, щоб підготувати отримані 3D дані для наступних операцій. Цей крок є частиною кожного процесу RE, часто є простою програмною реалізацією та іноді виконується безпосередньо програмним забезпеченням 3D сканера. На цьому етапі виконується зменшення кількості отриманих точок, реєстрація хмар точок і процес згладжування. Це лише деякі з типових процесів, які виконуються для того, щоб зменшити помилки й складність цифрових даних, та, з рештою, отримати придатну основу для сегментації, тобто формування полігональної моделі, або ж STL файлу.

Отримана таким чином полігональна модель може містити надмірно велику множину *mesh* даних. Це збільшує розмір файлу STL моделі та значно ускладнює подальшу роботу, аж до блокування програмного забезпечення для слайсингу, не говорячи вже про цифрову обробку моделі та її параметризацію, за потреби. Як відомо, більшість програм слайсерів для FDM друку задовільно справляються з файлами твердотільних моделей, розмір яких не перевищує 25 Мб. Виправити положення можна безпосередньо у програмі сканування EinScan-S, вибравши функцію спрощення у процесі постобробки моделі. Так можна забрати артефакти на плоских поверхнях моделі, що виникають як наслідок фіксації текстур акрилової фарби, залишені пензликом (рис. 7).

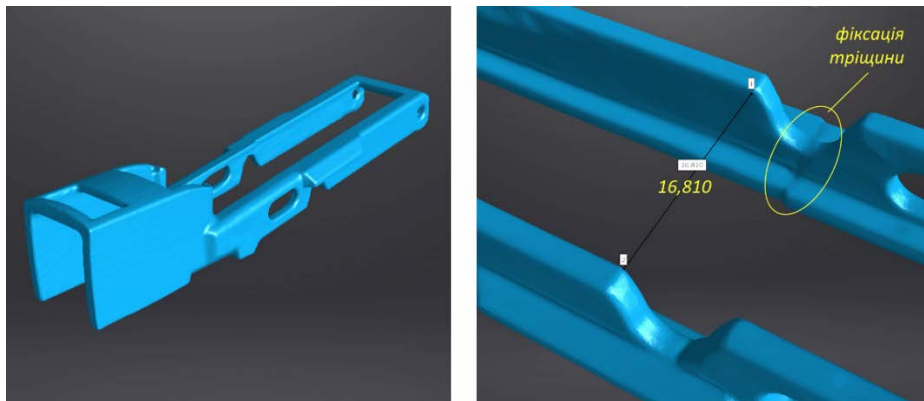


Рис. 7. Полігональна STL модель важеля

Фазу корекції моделі продовжили у зовнішньому редакторі *mesh* даних MeshLab [9]. Робота полягала у видаленні артефактів, згладжуванні, що відповідно дало зменшення розміру файлу моделі. Проте, головним завданням було корекція та реконструкція цілісності моделі за ознаками функціональності деталі у виробі. Як видно з рисунку 7 (праворуч), у *mesh* даних зафіксовано зміщення у тілі моделі, причиною якого є тріщина на оригіналі. З аналізу інженерних даних, зрозуміло, що такий дефект можна усунути банальним копіюванням цілісної частини моделі, адже важіль є симетричним за конструктивними ознаками. Подібну корекцію часто застосовують у стратегіях реінжинірингу деталей з втраченими чи пошкодженими симетричними елементами.

Подібна постобробка дозволяє отримати придатну до FDM друку 3D модель деталі та не займає багато часу. Але функціональність моделі з огляду на глобальну корекцію геометрії та конструктивної еволюції виробу, за потреби, є обмеженою, адже модель являє собою полігональне тіло, а не CAD модель з параметричним набором даних. Для отримання повноцінної CAD модель важеля, як вже відмічалось, в роботі паралельно використовували іншу стратегію побудови в інженерній системі Solidworks, на основі прямих обмірів та послідовним параметричним моделюванням, з використанням примітивів. Такий процес є досить кропітким та тривалим, відповідно, цю стратегію можна запропонувати для геометрично простих інженерних виробів, чи у випадку потреби внесення постійних змін у геометрію конструктивних елементів. Наявність базової параметричної моделі тут значно полегшує роботу, адже ми маємо дерево побудови з конкретними геометричними примітивами, поверхні яких визначені математично, наприклад на основі *B-Spline* або *NURBS* кривих.

Слід зазначити, що у практиці реінжинірингу, останнім часом, застосовують ще одну стратегію реконструкції, яка поєднує елементи попередніх стратегій. Для її реалізації необхідне спеціалізоване програмне забезпечення (Geomagic Design X, Polyworks, Autodesk Powershape) та значні потужності апаратних систем обчислень [6]. Хоча в роботі цю стратегію не використовували, але суть її полягає в отриманні полігональних цифрових моделей, з використанням методів 3D сканування, та наступного перетворення моделі у параметричну, за допомогою програмних

алгоритмів комплементції сегментованих поверхонь та математичних сплайнів. Постійне вдосконалення алгоритмів та збільшення обчислювальних потужностей комп'ютерів дозволяє з успіхом застосовувати таку стратегію реінжинірингу для індустріальних задач з високим ступенем комерціалізації кінцевого продукту. З метою зменшення інвестиційного навантаження у задачах інженерної реконструкції зустрічається також застосування програмних модулів та додатків (Solidworks ScanTo3D, Siemens NX, Autodesk Fusion 360), в яких процес детермінації просторових 3D даних є напівавтоматичним.

Висновок. Отже, на вибір стратегії реверс інжинірингу впливають багато факторів. Це і сам зміст задачі відтворення об'єкту (велике комерційне замовлення, власний проект, чи одиничний ремонт), це і функціональність та геометрія виробів, їх ступінь інженерії, а також, як і матеріал прототипу, так і матеріал відтворення об'єкту у процесі самого 3D друку. Саме в інженерних задачах, часто переслідується повноцінне параметричне моделювання, що обумовлено потребами змін конструктивних елементів, адаптації до еволюції вузлів машин, з метою їх просування на ринок, з рештою створення електронних баз даних конструктивних елементів, потреби у симуляції, тощо. У цьому випадку доцільні стратегії параметричного моделювання чи реінжиніринг на основі автоматичної ідентифікації профілів сегментованих поверхонь. Повна та вичерпна ідентифікація стратегій реінжинірингу в машинобудуванні є справді складним завданням через низку специфічних ознак, які можна прийняти як дискримінаційні фактори. Для простих же задач реінжинірингу просторово складних об'єктів машинобудівного застосування більш доцільною є перша стратегія, реалізована у роботі для важеля клейового пістолету. Хоча профілі поверхонь не є математично визначеними, а гострі елементи містять артефакти, для задач FDM друку, навіть інженерного призначення, така стратегія є цілком прийнятною. Особливості екструзії філаменту, як правило нівелюють більшість артефактів моделі. Однак, у алгоритм стратегії доцільно ввести окремий етап для підготовки оригіналів, що пов'язаний з матуванням блискучих поверхонь та збільшенням температурного кольору темних ділянок. Це спростить задачу збору хмар точок, придатних для нормальної їх консолідації, з наступною сегментацією та генерацією параметричних моделей, що загалом прискорить процес створення STL моделей, придатних для 3D друку.

Список використаних джерел:

1. Additive Manufacturing Technologies / Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker, Mahyar Khorasani // Springer, Cham, 2021. – p. 675, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7>.
2. Адитивні технології та матеріали: навч. посібник / Д.А. Гусачук, М.Д. Мельничук, В.М. Малець. – Луцьк : ЛНТУ, 2022. – 272 с. ISBN 978-617-8018-36-8.
3. Additive Manufacturing: A Tool for Industrial Revolution 4.0 / Manjaiah, M. Raghavendra, K. Balashanmugam, N. Davim, P.J., Woodhead Publishing Reviews: Mechanical Engineering Series. 2021, p. 324. ISBN: 978-0-12-822057-3.
4. Гречко А.М. Сучасні адитивні технології та 3D-друк. Огляд останніх досягнень в різних сферах людського життя // Вісник НТУ «ХП». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2019. – №1. – С. 63-75. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2019.1.12>.
5. Адитивні технології полімерних матеріалів (Огляд) / О.П. Масючок, М.В. Юрженко, Р.В. Колісник, М.Г. Кораб // "Автоматичне зварювання", 2020. – № 5. – С. 53-60. <https://doi.org/10.37434/as2020.05.08>.
6. F. Buonamici, M. Carfagni, R. Furferi, L. Governi, A. Lapini, Y. Volpe (2018) Reverse engineering modeling methods and tools: a survey. Computer-Aided Design & Applications, 2018, 15(3), P.443–464. <https://doi.org/10.1080/16864360.2017.1397894>.
7. Gerbino, S., Martorelli, M. (2023). Reverse Engineering. In: Pei, E., et al. Springer Handbook of Additive Manufacturing. Springer Handbooks. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20752-5_16.
8. Saiga, K.; Ullah, A.S.; Kubo, A.; Tashi. A Sustainable Reverse Engineering Process. Procedia CIRP Volume 98, 2021, PP 517-522. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.144>.
9. MeshLab. Url - <https://www.meshlab.net>.

Н.В. Тарельник, М.М. Майфат

Сумський національний аграрний університет

ЗАХИСТ ДЕТАЛЕЙ З ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУННУ ВІД ГІДРОАБРАЗИВНОГО ЗНОСУ КОМБІНОВАНИМИ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИМИ МЕТОДАМИ

Запропонована нова технологія захисту деталей з високоміцних чавунів, яка полягає в електроіскровому легуванні їх поверхні алюмінієм з подальшим нанесенням шару електродом з композиційного матеріалу 90%ВК6+10%ІМ. На сформоване покриття наносять металополімерний матеріал, армований порошком WC, ZrN або їх сумішшю, доданих в двокомпонентну епоксидну систему, наповнену феросиліконом марки Loctite 3478 при концентрації армуючої речовини, відповідно ~ 80% WC; 80% ZrN і 40%WC+40%ZrN. Частину шару МПМ видаляють шліфуванням до виступів шорсткості нанесеного покриття.

Ключові слова: електроіскрове легування, високоміцний чавун, деталь, гідроабразивний знос, цементация, алітування, покриття, металополімерний матеріал.

N.V. Tarelnyk, M.M. Maifat

PROTECTING OF HIGH-STRENGTH CAST IRON PARTS FROM HYDRO ABRASIVE WEAR THEREOF BY COMBINED ENVIRONMENTALLY SAFE METHODS

There has been proposed a new technology for protecting the parts made of high-strength cast iron. The technology consists in electrospark alloying (ESA) of the part surfaces with aluminum followed by applying a special layer thereon with the use of an electrode made of 90%VK6+10%IM composite material. Onto the formed coating, there is applied a metal-polymer material (MPM), reinforced with WC and ZrN powders or their mixture, which has been added to a two-component epoxy system filled with Loctite 3478 ferrosilicon at the concentration of the reinforcing substances of ~ 80% WC; 80% ZrN and 40%WC+40%ZrN, respectively. After that, a portion of the MPM layer is removed by grinding it up to the applied coating roughness protrusions.

Comparative examinations have established that for the high-strength cast iron of VCh50 grade, in terms of hydro abrasive wear resistance thereof, the best results had been achieved by the specimens with the coating formed in the sequence of ESA Al → ESA (90% VK6 + 10% IM) → MPM (80% ZrN), the wear of which was 97.1% less as compared to the specimens without coatings, 44.1% less as compared to the prototype (the specimens of 12X18H10T steel) and, accordingly, 5.9 and 14.7% less as compared to the specimens with the coating formed in the sequence of ESA Al → ESA (90%VK6+10%IM) → MPM (40 %WC+40%ZrN) and in the sequence of ESA Al → ESA (90%BK6+10%IM) → MPM (80% WC).

Key words: electrospark alloying, high-strength cast iron, part, hydro abrasive wear, carburizing, aluminizing, coating, metal-polymer material.

Постановка проблеми.

Високоміцний чавун (ВЧ) із кулястим графітом, який суміщає в собі технологічні властивості сірих чавунів з низкою відзнак сталевих матеріалів, отриманих шляхом, як лиття так і кування с кожним роком все більше застосовується в різних галузях вітчизняної промисловості: машинобудівній, хімічній, транспортній, залізничній, при видобутку та переробці нафти та газу, тощо і з кожним роком попит на нього збільшується. Згідно з [1] аналіз світового ринку лиття свідчить, що за кількістю (24,6 %) відливки з ВЧ займають проміжне місце між сірим чавуном (44,9%) та алюмінієвими сплавами (15,4 %). З високоміцних чавунів виготовляють безліч деталей, які застосовуються в гідравлічному обладнанні: арматурі, насосах різного призначення, центрифугах, сепараторах, зрешувальних і поливних машинах тощо. Розширення галузі застосування кола деталей гідравлічних машин з ВЧ залежить від їх надійності та довговічності, пов'язаних з їх можливістю чинити опір зношуванню.

Деталі гідравлічних машин підлягають різним видам зношування (абразивному, кавітації, корозії тощо), основним з яких є гідроабразивне зношування. Тому роботи, направлені на підвищення стійкості деталей з ВЧ проти гідроабразивного зношування, актуальні і своєчасні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз літературних і патентних джерел показує, що існує велика кількість робіт, направлених на покращення параметрів якості поверхневих шарів деталей з чавунів, у тому числі і ВЧ. При цьому дослідниками використовуються різні технології: плазмове поверхнєве модифікування [2], нанесення у вигляді шлікера сумішей різного складу з подальшим висушуванням і нагріванням плазмотроном [3] фрикційною обробкою [4], введенням домішок модифікаторів [5], підігріванням перед заливанням форми [6] тощо.

В [7] авторами був проведений аналіз технологій, за допомогою яких можливо відновлювати зношені поверхні сталних і чавунних деталей. При цьому перевага віддавалась методам, які базуються на технологіях, що базуються на використанні висококонцентрованих джерел енергії: електролітичний метод [8, 9], газотермічне напилення [10, 11], лазерної обробки [12 - 15] та електроіскрове легування (ЕІЛ) [16]. В результаті аналізу розглянутих технологій перевага була віддана методу ЕІЛ, особливостями якого є: можливість використання в якості матеріалу, що наноситься, чистих металів, сплавів, сталей різного ступеню легування, металокерамічних матеріалів, графіту тощо, міцний зв'язок нанесеного металу з основою, локальність процесу, низька енергоємність та екологічна безпека тощо [17]. При застосуванні методу ЕІЛ, автори [7] рекомендують використовувати в якості електроду-інструменту (ЕІ) прутки з ніхрому Х20Н80.

Крім значних переваг метод ЕІЛ має і недоліки: обмеження товщини і нерівномірність нанесеного шару, підвищення шорсткості поверхні, зниження утомної міцності [17]. Недоліки ЕІЛ усуваються за рахунок об'єднання з іншими екологічно безпечними, мало затратними і ефективними технологіями: поверхневим пластичним деформуванням (ППД), в якості якого останнім часом все більше використовують метод безабразивної фінішної обробки (БУФО) [18] і нанесення металополімерних матеріалів (МПМ), які додатково можуть армуватись порошком з зносостійких матеріалів, наприклад, з карбіду вольфраму, WC [17, 19].

Для захисту проти гідроабразивного зносу деталей з високоміцного чавуну перспективними можуть бути покриття нанесені методом ЕІЛ коли в якості ЕІ використовують матеріали, що складаються з тонкодисперсної суміші 1М (70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% В) та ВК6. Покриття складу 90% ВК6 + 10% 1М дозволяють формувати поверхневий шар на сталевих поверхнях з мікротвердістю до 14200 МПа [20]. Для покращення властивостей МПМ в якості матеріалу для армування можна використовувати порошок з нітриду цирконію, який характеризується високою температурою плавлення, твердістю та міцністю. Крім цього нітрид цирконію використовують для захисних зносостійких покриттів виробів, які працюють в агресивних середовищах. Також нітрид цирконію, серед інших мононітридів перехідних металів має найкращу корозійну стійкість [21].

Отже, виникає як науковий, так і практичний інтерес провести порівняльні дослідження зносостійкості покриттів, складу (90% ВК6 + 10% 1М), сформованих на поверхнях з високоміцного чавуну способом, який би підвищив здатність поверхневого шару деталей з ВЧ чинити опір зношуванню, гарантував би надійність і довговічність їх роботи в агресивних середовищах, був би екологічно безпечним і скоротив витрати на їх виготовлення.

Найближчим аналогом запропонованої технології, є спосіб формування покриття на поверхнях сталних деталей, який виконують наступним чином. Перед нанесенням комбінованого електроіскрового покриття (КЕП) поверхню деталі шліфують до Ra=0,5 мкм. Потім проводять цементацію шліфованої поверхні деталі методом ЕІЛ (ЦЕІЛ). Після виконують алітування цементованого шару алюмінієвим електродом з подальшим нанесенням на нього електроіскрового покриття електродом з твердого сплаву Т15К6. Далі поверхню сформованого КЕП піддають ППД методом обкатки кулькою (ОК). Після полімеризації металополімерним матеріалом, армованим при полімеризації порошком твердосплавної суміші ВК6, частину шару металополімерного матеріалу видаляють до виступів шорсткості покриття з твердого сплаву Т15К6 [22]

Недоліками даного способу є:

- дуже складна технологія формування покриття;
- висока вартість використання технології;
- спосіб придатний тільки для деталей тіл обертання;
- недостатній захист сталевих поверхонь від гідроабразивного зношування.

Слід відмітити що поверхневий шар деталі з ВЧ непотрібно насичувати вуглецем, тобто проводити ЦЕІЛ.

Таким чином, метою дійсної роботи є удосконалення технології захисту деталей з ВЧ від гідроабразивного зносу шляхом нанесення на їх поверхні комбінованих покриттів в послідовності ЕІЛАІ → ЕІЛ (90%ВК6+10%1М) → МПМ, армованих порошком карбіду вольфраму, або нітриду цирконію, або їх сумішню і проведення порівняльних іспитів.

Методика досліджень

Апробацію запропонованої технології формування КЕП, виконували на зразках з ВЧ з кулястим графітом ВЧ60. Для проведення порівняльних досліджень проти гідроабразивного зносу

виготовляли чавунні зразки, розміром 15x15x8 мм, на які наносили покриття електродами-інструментами на установці "Елітрон-52А" згідно з №3-6 (табл. 1).

Табл. 1

Зразки з ВЧ60 для порівняльних досліджень проти гідроабразивного зношування

№ зразка	Вид зміцнення
1	Без покриття
2	ЦЕЛІ → ЕІАІ → ЕІЛТ15К6 → обкатка кулькою (ОК) → МПМ (армований ВК6).
3	ЕІАІ → ЕІЛ (90%ВК6+ 10%ІМ).
4	ЕІАІ → ЕІЛ (90%ВК6+ 10%ІМ) → МПМ, армований порошком 80%WC
5	ЕІАІ → ЕІЛ (90%ВК6+ 10%ІМ) → МПМ, армований порошком 80%ZrN.
6	ЕІАІ → ЕІЛ (90%ВК6+ 10%ІМ) → МПМ, армований порошком 40%WC+ 40%ZrN.

* зразок №2 зі сталі 12Х18Н10Т.

Для порівняння стійкості зразків проти гідроабразивного зносу використовували зразки зі сталі 12Х18Н10Т, з покриттям, сформованим, згідно з прототипом (№2, табл. 1). При цьому ЕІЛ шліфованої поверхні виконували на установці "Елітрон-52А" графітовим електродом МПГ-7 при енергії розряду $W_p=3,4$ Дж. Далі на цій же установці проводили алітування цементованого шару алюмінієвим електродом (три проходи при $W_p=3,4$ Дж) і нанесення покриття електродом з твердого сплаву Т15К6, виконуючи два проходи при $W_p=0,9$ Дж і два проходи при $W_p=3,4$ Дж. ОК виконували за три проходи з питомим зусиллям вигладжування $P=2500$ МПа. На покриття з твердого сплаву Т15К6, ретельно втираючи, наносили МПМ, попередньо армований порошком у вигляді твердосплавної суміші ВК6, доданої в двокомпонентну епоксидну систему, наповнену феросиліконом марки Loctite 3478 при концентрації армуючої речовини $\sim 60\%$. Після полімеризації шар МПМ шліфували до виступів шорсткості покриття з твердого сплаву Т15К6.

Нанесення КЕП на шліфовані поверхні чавунних зразків №3-6 (табл. 1) виконували на установці "Елітрон-52А" алюмінієвим електродом (три проходи при $W_p=3,4$ Дж) і ЕІ з композиційного зносостійкого матеріалу 90%ВК6+10%ІМ. На покриття складу 90%ВК6+10%ІМ, нанесене методом ЕІЛ, ретельно втираючи, наносили МПМ, попередньо армований порошком WC (№ 4, табл. 1), ZrN (№5, табл. 1) і їх суміші (№6, табл. 1), доданих в двокомпонентну епоксидну систему, наповнену феросиліконом марки Loctite 3478 при концентрації армуючої речовини, відповідно $\sim 80\%$ WC; 80% ZrN і 40% WC+40% ZrN. Частину шару металополімерного матеріалу видаляли шліфуванням до виступів шорсткості покриття з композиційного зносостійкого матеріалу 90%ВК6+10%ІМ.

Для проведення випробувань зразків на зносостійкість проти гідроабразивного зношування було розроблено конструкцію та виготовлено дослідну установку [23]. Як абразивний матеріал використовували водну суміш піску з розміром частинок 0,1- 0,5 мм і концентрацією 100 г/л. Дослідження проводили протягом 24 годин.

Зразки фіксувалися на диску за допомогою утримувачів. Кріплення тримача диска дозволяє змінювати кут зустрічі зразка з абразивом. У процесі випробувань зразки, закріплені під кутом 45° оберталися зі швидкістю 120 об/хв.

Результати досліджень

При проведенні порівняльних досліджень зразків з високоміцного чавуну ВЧ60 на гідроабразивний знос, встановлено, що найінтенсивніше зношуються зразки без покриття (табл. 2, рис. 1).

Для високоміцного чавуну ВЧ60 найкращі результати з гідроабразивної зносостійкості показали зразки з покриттям, сформованим в послідовності: ЕІЛ АІ → ЕІЛ (90%ВК6+ 10%ІМ) → МПМ (80% ZrN), знос яких на 97,1% менше зразків без покриття, на 44,1% менше в порівнянні з прототипом (зразками зі сталі 12Х18Н10Т) і відповідно, на 5,9 і 14,7% менше сформованих в послідовності ЕІАІ → ЕІЛ (90%ВК6+10%ІМ) → МПМ (40%WC+40%ZrN) і в послідовності ЕІАІ → ЕІЛ (90%ВК6+10%ІМ) → МПМ (80% WC).

Висновки:

1. Запропонована нова технологія захисту деталей з ВЧ марки ВЧ60, шляхом нанесення зносостійких КЕП, яка полягає в ЕІЛ їх поверхні алюмінієвим ЕІ при $W_p=3,4$ Дж з подальшим нанесенням при $W_p=3,4$ Дж шару ЕІ з композиційного зносостійкого матеріалу 90%ВК6+10%1М. На сформоване покриття, ретельно втираючи, наносять МПМ, попередньо армований порошком WC, ZrN або їх сумішшю, доданих в двокомпонентну епоксидну систему, наповнену феросиліконом марки Loctite 3478 при концентрації армуючої речовини, відповідно ~ 80% WC; 80% ZrN і 40% WC+40%ZrN. Частину шару МПМ видаляють шліфуванням до виступів шорсткості покриття з КЕП- 90%ВК6+10%1М.

Табл. 2

Результати досліджень гідроабразивного зношування зразків з високоміцного чавуну ВЧ60 з різними покриттями

№ зразка	Вид покриття	Величина зносу, Δm , мг/год		
		Час іспитів, год		
		8	16	24
1	Без покриття	21	43	67
2*	ЦЕЛІ → ЕІАІ → ЕІЛТ15К6 → обкатка кулькою (ОК) → МПМ (ВК6) → ПД	18	37	49
3	ЦЕЛІ → ЕІАІ → ЕІЛ (90%ВК6+ 10%1М)	13	28	44
4	ЕІАІ→ЕІЛ (90%ВК6+ 10%1М)→МПМ (80% WC)	12	25	39
5	ЕІАІ→ЕІЛ (90%ВК6+10%1М) МПМ (40%WC+ 40%ZrN)	11	23	36
6	ЕІАІ→ЕІЛ (90%ВК6+10%1М)→МПМ (80% ZrN)	10	22	34

* - зразок №2 зі сталі 12Х18Н10Т.

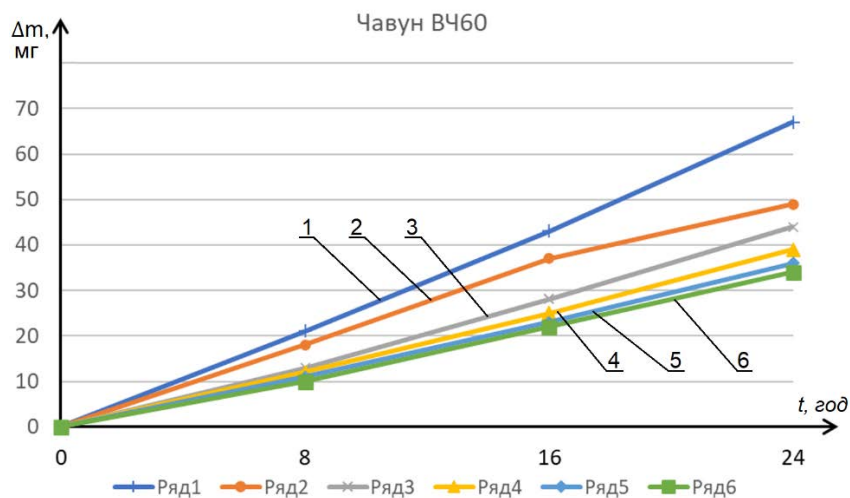


Рис. 1. Результати досліджень гідроабразивного зношування зразків з високоміцного чавуну ВЧ60 (№3-6) і сталі 12Х18Н10Т (№2) з різними покриттями: 1 - без покриття; 2 - ЦЕЛІ → ЕІАІ → ЕІЛТ15К6 → ОК → МПМ (ВК6) → ПД; 3 - ЕІАІ → ЕІЛ (90%ВК6 + 10%1М); 4 – ЕІАІ → ЕІЛ (90%ВК6+ 10%1М) → МПМ (80% WC); 5 - ЕІАІ→ЕІЛ (90%ВК6+10%1М) → МПМ (40% WC+ 40%ZrN); 6 - ЕІАІ→ЕІЛ (90%ВК6+10%1М) →МПМ (80% ZrN).

2. Для високоміцного чавуну марки ВЧ60 найкращі результати з гідроабразивної зносостійкості показали зразки з покриттям, сформованим в послідовності: ЕІЛ АІ → ЕІЛ (90%ВК6+ 10%1М) → МПМ (80% ZrN), знос яких на 97,1% менше зразків без покриття, на 44,1% менше в порівнянні з прототипом (зразками зі сталі 12Х18Н10Т) і відповідно, на 5,9 і 14,7% менше сформованих в послідовності ЕІАІ → ЕІЛ (90%ВК6+10%1М) → МПМ (40%WC+40%ZrN) і в послідовності ЕІАІ → ЕІЛ (90%ВК6+10%1М) → МПМ (80% WC).

Список використаних джерел:

1. Лалазарова Н.О., Дощечкіна І.В., Орлов М.С., Афанасьєва О.В., Покращення оброблюваності високоміцного чавуну використанням технологічних середовищ. Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету: зб. наук. пр., 2020. – Вип. 91. С. 150–154.
2. Samotugina Yu.S., Lyashenko B. A., and Bezumova O.O., Influence of Plasma Modification Technology on Structure Formation Mechanisms and Wear Resistance of High Carbon Steels and Cast Irons, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 2021, 43, No. 8, С.1105–1119. (in Ukrainian), DOI: 10.15407/mfint.43.08.1105.
3. Шиліна О.П., Зміцнення сталевих та чавунних деталей терморегулюючими сумішами, *ВМТ*, вип. 2, 2017, с. 115–119.
4. Гурей Т.А. Підвищення зносостійкості чавунних деталей поверхневим зміцненням. *Вестник ХНАДУ*, 2016, вип. 74, –С.48-52.
5. Скобло Т.С., Сідашенко О.І., Сайчук О.В., Корпусні деталі з чавунів та їх якісні показники: Монографія / Т.С. Скобло, О.І. Сідашенко, О.В. Сайчук. Під ред. д.т.н. проф. Скобло Т.С. – Х: Діса плюс, 2019. – 282 с.
6. Патент України на корисну модель №105761 «Спосіб виробництва прокатних валків»: МПК В22D 23/00, В21В 27/00. u2015 07442. заявл. 24.07.2015.; опубл. 11.04.2016., Бюл. № 7.
7. Іванкова О. В., Гаращук О. В., Куценко В. І., Щербина В. В., Чижевський Д. В., Бабич Я. В., Тіхонов М.О., Дослідження методів відновлення зношених деталей сільськогосподарської техніки. *Вісник ПДАА*. 2020. № 4. С. 283–292.
8. Karakurkchi A. V., Functional properties of multicomponent galvanic alloys of iron with molybdenum and tungsten. *Functional Materials*, 2015, 22 (2), С. 181–187. doi: 10.15407/fm22.02.181
9. Yar-Mukhamedova G.S., Sakhnenko N.D., Ved' M.V., Yermolenko I.Y., & Zyubanova S.I., 2017 Surface analysis of Fe-Co-Mo electrolytic coatings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 213, 012019. doi: 10.1088/1757-899x/213/1/012019
10. Student M. M., Hvozdetzkyi V. M., Stupnytskyi T. R., & Dzioba Y. V., Development of Electrometallic Equipment and Newest Consumables for Applying Protective and Reductive Coatings to Parts of Machinery Used in Mining, Transport, and Food Processing Industries. *Science and Innovation*, 2017, 13 (6), С. 34–38. doi: 10.15407/scine13.06.034
11. Gvozdecki V.M., Electric arc restorative and protective coatings from cored wires. *Visnik Nacional'noi' Akademii' Nauk Ukraini*, 03, С. 79–84. doi: 10.15407/visn2018.03.079
12. Lyashenko B. A., Solovykh Ye. K., & Mirnenko, V. I., *Optimizatsiya tekhnologii naneseniya pokrytiy po kriteriyam prochnosti i iznosostoykosti*. Kiyev: IPP NAN Ukrainy, 2010.
13. Skoblo T.S., Rybalko N.N., Tykhonov A.V., & Martynenko, A.D., *Analyz sposobov yz-hotovlenyya, uprochnenyya y vosstanovlenyya lap kul'tyatora. Tekhnichnyy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta Transportnoho Kompleksiv*, 2019, 15, С. 60–85 [In Ukrainian].
14. Carcel B., Sampedro J., Ruescas A., & Toneu X. Corrosion and wear resistance improvement of magnesium alloys by laser cladding with Al-Si. *Physics Procedia*, 2011, 12, С. 353–363. doi: 10.1016/j.phpro.2011.03.045
15. Guzanova A., Džupon M., Draganovská D., Brezinová J., Viňáš J., Cmorej D., Janoško E., & Maruschak P., The corrosion and wear resistance of laser and mag weld deposits. *Acta Metallurgica Slovaca*, 2020, 26 (2), 37–41. doi: 10.36547/ams.26.2.557.
16. Burumkulov F. Kh., Lezin P. P., Senin P. V., Ivanov V. I., Velichko S. A., & Ionov P. A., *Elektroiskrovyye tekhnologii vosstanovleniya i uprochneniya detaley mashin i instrumentov (teoriya i praktika)*. Saransk: Krasnyy Oktyabr', 2003.
17. Tarelnyk V.B., Gaponova O.P., Loboda V.B., Konoplyanchenko E.V., Martsinkovskii V.S., Semirnenko Yu.I., Tarelnyk N.V., Mikulina M.A., Sarzhanov B.A., *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 57: 173 (2021). <https://doi.org/10.3103/S1068375521020113>
18. Tarelnyk V.B., Gaponova O.P., Konoplianchenko Ye.V., Martsynkovskyy V.S., Tarelnyk N. V., and Vasylenko O.O., Improvement of Quality of the Surface Electroerosive Alloyed Layers by the Combined Coatings and the Surface Plastic Deformation. III. The Influence of the Main Technological Parameters on Microgeometry, Structure and Properties of Electrolytic Erosion Coatings, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 41, No. 3: 313–335 (2019), <https://doi.org/10.15407/mfint.41.03.0313>

19. Tarel'nyk, V.B., Konoplianchenko, I.V., Gaponova, O.P., Sarzhanov, O.A., Antoszewski, B. Effect of Laser Processing on the Qualitative Parameters of Protective Abrasion-Resistant Coatings, Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 2020, 58(11-12), страницы 703–713.

20. Tarel'nik V.B., Paustovskii A.V., Tkachenko Y.G. et al., Electric-spark coatings on a steel base and contact surface for optimizing the working characteristics of babbitt friction bearings. Surf. Engin. Appl. Electrochem, 2017, 53, 285–294. <https://doi.org/10.3103/S1068375517030140>

21. Способ получения нитрида циркония Патент на изобретение РФ №2522601С1 / Е.В. Чаплина, Ю. И. Паутова, А. А. Громов.- 20.07. 29014г.

22. Tarel'nyk V., Konoplianchenko I., Gaponova O., Sarzhanov B. Assessment of Hydroabrasive Wear Resistance of Construction Materials with Functional Coatings, which are Formed by Resource-Saving and Environmentally Friendly Technologies. Key Engineering Materials. 2020. vol 864, p. 265–277. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.864.265>

23. Tarel'nyk V. B., Gaponova O. P., Melnyk V. I., Tarel'nyk N. V., Zubko V. M., Vlasovets V. M., Konoplianchenko Ie. V., Bondarev S. G., Radionov O. V., Mayfat M. M., Okhrimenko V. O., and Tkachenko A. V., The Surfaces Properties of Steel Parts with Wear-Resistant Coatings of the 1M and 90% BK6 + 10% 1M Composition Applied by the Method of Electrospark Alloying with the Use of Special Technological Environments. Pt. 1. The Strengthened-Surfaces' Structural State Features, 2023, т. 45, С. 683-706.

Рецензент: д.т.н., професор Шуляк М.Л.

О. В. Калюжний¹, В. Л. Калюжний², С. В. Ситник², К. М. Шульга², М. В. Готра²

¹Кременчуцький національний технічний університет імені Михайла Остроградського

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЗБІЛЬШЕННЯ ПРОПРАЦЮВАННЯ ПЛАСТИЧНОЮ ДЕФОРМАЦІЄЮ СТІНОК І ДОННОЇ ЧАСТИНИ ПОРОЖНИСТОГО НАПІВФАБРИКАТУ ПРИ ГАРЯЧОМУ ЗВОРОТНОМУ ВИДАВЛЮВАННІ

Методом скінченних елементів з використанням програми DEFORM-3D створені математичні моделі та проведений комп'ютерний аналіз процесів гарячого зворотного видавлювання з роздачою круглих порожнистих напівфабрикатів із низьковуглецевої сталі із циліндричних і квадратних заготовок. Розглянуто процеси видавлювання, вилучення пуансонів із отриманих напівфабрикатів та виштовхування напівфабрикатів із матриць. Встановлено залежності зусиль таких процесів від переміщення деформуючого інструменту. Зусилля видавлювання напівфабрикату із круглої заготовки на 8% менше від зусилля видавлювання із квадратної заготовки. Визначено форми і розміри напівфабрикатів з розподілами температури, напружень і деформацій в кінці видавлювання. Пропрацювання структури металу гарячою пластичною деформацією оцінено по розподілу інтенсивності деформації. Використання квадратної заготовки при видавлюванні приводить до збільшення пропрацювання структури металу по висоті стінки на 12% і на 16% у донній частині напівфабрикату.

Ключові слова: гаряче видавлювання; круглий напівфабрикат; метод скінченних елементів; зусилля видавлювання; напруження; деформації; форма і розміри напівфабрикатів.

O. Kaliuzhnyi, V. Kaliuzhnyi, S. Sytnyk, K. Shulga, M. Hotra

INCREASE OF PLASTIC DEFORMATION WORKOUT OF WALLS AND BOTTOM PART OF HOLLOW SEMI-FINISHED PRODUCT DURING HOT REVERSE EXTRACTION

Computer analysis of the processes of hot reverse extrusion with crushing of round hollow semi-finished products from cylindrical and square billets made of mild steel by the finite element method using the DEFORM-3D program has been carried out. The extrusion with crushing provides hollow semi-finished products with external dimensions that are larger than the dimensions of the billets. The processes of extrusion, removal of punches from the obtained semi-finished products and pushing of semi-finished products out of dies are considered. The dependences of the forces of such processes on the movement of the deforming tool have been established. The extrusion force of semi-finished product from round billet is 12% less than the extrusion force from square billet. Shapes and sizes of semi-finished products with distributions of temperature, stresses and deformations at the end of extrusion are determined. The elaboration of metal structure by hot plastic deformation is estimated by the distribution of strain intensity in semi-finished products. The use of a square billet in extrusion leads to an increase in the elaboration of the metal structure along the wall height by 12% and by 16% at the bottom part of the semi-finished product.

Keywords: hot extrusion; round semi-finished product; finite element method; force; stresses; deformations; shape and dimensions of semi-finished products.

Постановка проблеми. Для виготовлення порожнистих виробів великих розмірів із різноманітних марок сталей використовують процеси гарячого зворотного видавлювання. Визначення параметрів такого видавлювання та рекомендації по проектуванню штампного оснащення достатньо добре описані в джерелі [1]. При виробництві виробів спеціального призначення певного калібру гаряче зворотне видавлювання порожнистих напівфабрикатів є першим переходом штампування. На цьому переході необхідно забезпечити інтенсивне пропрацювання структури металу пластичною деформацією донної частини напівфабрикату для досягнення відповідних механічних властивостей у здеформованому металі. Пропрацювання структури металу стінки відбувається на подальших переходах витягування з потоншенням та кінцевій операції обтиску.

Традиційно для видавлювання порожнистих виробів круглої форми використовують циліндричні заготовки, які встановлюють з центруванням по матриці. При видавлюванні осередок деформації охоплює всю донну частину заготовки, але пропрацювання структури металу пластичною деформацією може бути недостатнє для досягнення механічних властивостей.

Тому актуальними є дослідження, які спрямовані на збільшення пропрацювання структури металу при гарячому пластичному формоутворенні порожнистих виробів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В монографії [1] викладено рекомендації із виробничого досвіду по проектуванню технології і штампового оснащення для гарячого зворотного видавлювання із круглих заготовок порожнистих виробів із різних марок сталей.

Використання методу скінченних елементів (МСЕ) для удосконалення існуючих і розробки нових технологій по гарячому пластичному формоутворенню різноманітних виробів із кольорових металів наведено в роботі [2].

Приклад використання МСЕ для моделювання багатоперехідного моделювання гарячого пластичного формоутворення заготовок залізодорожних коліс приведено у праці [3].

В джерелі [4] шляхом моделювання МСЕ встановлені параметри гарячого штампування порожнистого виробу із високоміцного алюмінієвого сплаву В95 з інтенсивним пропрацюванням структури металу у донній частині і стінці виробу. Проведені експериментальні дослідження підтвердили результати розрахунків.

В роботі [5] авторами виконано чисельне моделювання отримання деталі типу стакан з матеріалу In718 за допомогою способу гарячого зворотного видавлювання. В різних частинах отриманої деталі досліджено структуру зерна. Автори вказують, що більш дрібну та рівномірну структуру зерна вдалося отримати із заготовки, яка перед початком зворотного видавлювання була розігріта до температури 1000...1050°C, а швидкість деформування складала 5 мм/с.

З використанням МСЕ та програми Forge, досліджено процес радіально-зворотного видавлювання роторною голівкою. Також проведено натурний експеримент цього процесу за допомогою торсійного пластоміру STD 810 [6]. В результаті дослідження авторами встановлено, що при застосуванні вказаного способу, виникають напруження зсуву в отриманому виробі, що може вплинути на активацію додаткових механізмів деформації. Це в свою чергу суттєво впливає на механічні властивості кінцевого виробу.

Розглянуто та досліджено нову схему процесу зворотного видавлювання порожнистого виробу [7]. Наукова новизна схеми полягає в наступному. Між пуансоном та матрицею розміщується нерухома втулка, що має в собі отвір, в якому встановлюється заготовка. Пуансон починає деформувати заготовку в отворі втулки, внаслідок чого матеріал заготовки починає текти між втулкою та матрицею доки виріб не набуде необхідної геометричної форми. Дослідження виконано за допомогою МСЕ та проведені натурні експериментів на заготовках з алюмінію. Автори дослідження, вказують на те, що при застосуванні такої схеми зворотного видавлювання порожнистого виробу ступінь деформації збільшується, структура матеріалу покращується, що зменшує дефекти в деформованому металі отриманого виробу.

Процес зворотного видавлювання обміднених алюмінієвих стержнів описано в джерелі [8]. Проведено чисельні розрахунки за допомогою МСЕ в програмному комплексі DEFORM та виконано натурні експерименти. Для правильного задання матеріалу в програмі DEFORM, було попередньо випробувано на гаряче стискання алюмінієвого сплаву EN AW-1080A та мідного сплаву CW004A. Отримані дані діаграм істинних напружень заведено в програму DEFORM. Встановлено, що швидкість потоку сердечника з алюмінієвого сплаву EN AW-1080A вища ніж у втулці з мідного сплаву CW004A. Це призвело до високих значень розтягуючих напружень і відбулось руйнування виробу. Результати чисельних розрахунків МСЕ порівняно з натурним експериментом, за допомогою чого було остаточно визначено необхідну технологію для процесу зворотного видавлювання.

З використанням МСЕ, виконано чисельні розрахунки процесу гарячого зворотного видавлювання порожнистого виробу з титанового сплаву марки Ti-6Al-4V [9]. Також проведено натурний експеримент такого процесу. Результати отриманих чисельних розрахунків було порівняно з результатами натурального експерименту, який показав що гаряче видавлювання титанового сплаву тісно пов'язано з фазовими перетвореннями і впливає на ріст зерен. Отримано достатньо точну збіжність результатів чисельних розрахунків з результатами натурального експерименту.

Досліджено процес зворотного видавлювання порожнистого виробу [10]. Авторами проведено чисельне моделювання з використанням МСЕ в програмному комплексі DEFORM та виконано натурні експерименти. Вихідним матеріалом для заготовки обрано алюмінієвий сплав. Заготовка циліндричної форми розміщувалась у матриці, а деформування її відбувалось за допомогою пуансону, який при поступальному русі також обертвся. Завдяки такому обертанню автори стверджують, що заготовка розігрівається та в зоні деформування характер процесу змінюється з холодного на гаряче видавлювання. Як висновок цього дослідження вказано, що

отриманий виріб має підвищену міцність та меншу пластичність в порівнянні зі стаціонарним способом, коли пуансон рухається поступально без обертання.

Досліджено процес комбінованого видавлювання, який поєднує в собі пряме та зворотне видавлювання [11]. Виконано чисельні розрахунки з використанням МСЕ, а також проведено натурний експеримент. Під час розрахунків було враховано та порівняно наступні показники: вплив швидкості деформування (2 мм/с та 20 мм/с), вплив початкової температури заготовки (180°C та 200°C), а також вплив коефіцієнту тертя. В результаті цього дослідження отримано достатньо високу збіжність між проведеними чисельними розрахунками за допомогою МСЕ з проведеними натурними експериментами.

Постановка завдань. Метою роботи є збільшення пропрацювання структури металу пластичною деформацією при гарячому зворотному видавлюванні порожнистих напівфабрикатів із маловуглецевої сталі.

Завданнями дослідження є встановлення зусиль видавлювання, вилучення пуансонів із zdeформованої заготовки і виштовхування напівфабрикатів із матриць; визначення кінцевих форми і розмірів напівфабрикатів, виявлення напружено-деформованого стану і пропрацювання структури металу пластичною деформацією.

Для проведення дослідження було використано схему гарячого зворотного видавлювання з розмірами деформуючого інструменту, яку зображено на рис. 1 на прикладі формоутворення напівфабрикату круглої форми із квадратної заготовки.

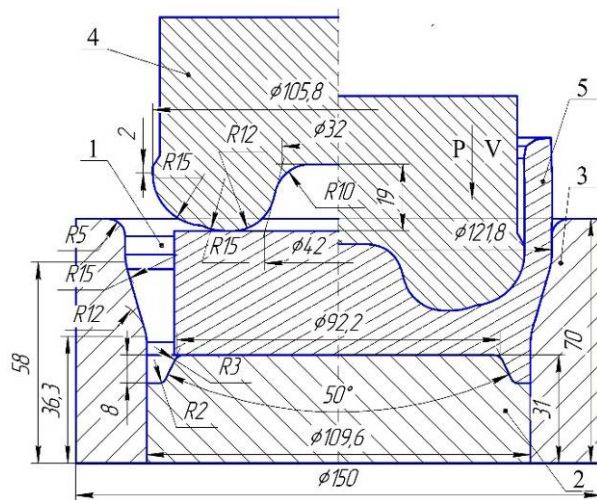


Рис. 1. Схема зворотного видавлювання: 1 – заготовка, 2 – плита, 3 – матриця, 4 – пуансон, 5 – напівфабрикат

напівфабрикату круглої форми із квадратної заготовки. Ліворуч від вісі симетрії показано положення інструменту та заготовки на початку видавлювання, а праворуч – в кінці видавлювання. Вихідна квадратна заготовка 1 розміщена з центруванням в циліндричній частині матриці 3 та спирається на плиту 2. Процес деформування зусиллям P виконується при опусканні пуансону 4 зі швидкістю V з отриманням напівфабрикату 5. Після вилучення пуансону 4 із отриманого напівфабрикату 5 при зворотному переміщенні здійснюється виштовхування напівфабрикату 5 із матриці 3 за допомогою плити 2. Розміри порожнини напівфабрикату 5 визначаються розмірами пуансону 4, а

розміри зовнішньої поверхні і торцю – розмірами матриці 3 і плити 2.

Для видавлювання використано заготовки із сталі 25 квадратної форми з розмірами сторін 76,1x76,1 мм і висотою 56,6 мм та циліндричної форми з діаметром 109,6 мм і висотою 35,5 мм. Об'єми вихідних заготовок однакові. Початкова температура цих заготовок була $T=1000^{\circ}\text{C}$.

Розрахунковий аналіз процесів видавлювання, вилучення пуансонів із zdeформованих заготовок та виштовхування напівфабрикатів із матриць проведено методом скінченних елементів (МСЕ) з використанням програми DEFORM3D. Тертя на контактуючих поверхнях абсолютно жорсткого деформуючого інструменту підігрітого до температури $T=400^{\circ}\text{C}$ враховано по Зібелю з коефіцієнтом тертя $\mu=0,25$. Швидкість деформування складала $V=40$ мм/сек.

Викладення основного матеріалу. Розрахункові схеми при видавлюванні напівфабрикату із квадратної заготовки наведено на рис. 2. Схему в розрізі по площині zox на початку видавлювання зображено на рис. 2а. Квадратна заготовка 1 з центруванням кутами в матриці 2 встановлено на плиті 3. Деформування виконується пуансоном 4, при опусканні якого отримується напівфабрикат 5 із виступами на донній частині зі сторони порожнини та на нижньому торці (рис.2б). При зворотному переміщенні пуансону 4 проходить вилучення його із напівфабрикату 5, який залишається в матриці 2 (рис. 2в). Виштовхування напівфабрикату 5 із матриці 2 відбувається при переміщенні плити 3 (рис. 2г).

Форму і розміри напівфабрикатів в розрізі по площині zox (див. рис. 2а) після видавлювання заготовок різної форми представлено на рис. 3. Після видавлювання циліндричної заготовки отримується круглий напівфабрикат з рівною висотою стінки по периметру торцю (рис. 3а). Торець стінки має утяжини зі сторони порожнини та зі сторони зовнішньої поверхні. При цьому на проміжній стадії видавлювання повністю заповнюються виступи на донній частині зі сторони порожнини та на торці цієї частини.

Після видавлювання квадратної заготовки стінка напівфабрикату має чотири виступи в місцях, які відповідають кутовим зонам заготовки (рис. 3б). Торець стінки має утяжину зі сторони зовнішньої поверхні напівфабрикату. Розміри порожнин з виступами напівфабрикатів відповідають розмірам пуансону, а розміри зовнішньої поверхні з виступами на торцях напівфабрикатів визначаються розмірами матриці і плити (див. рис. 1).

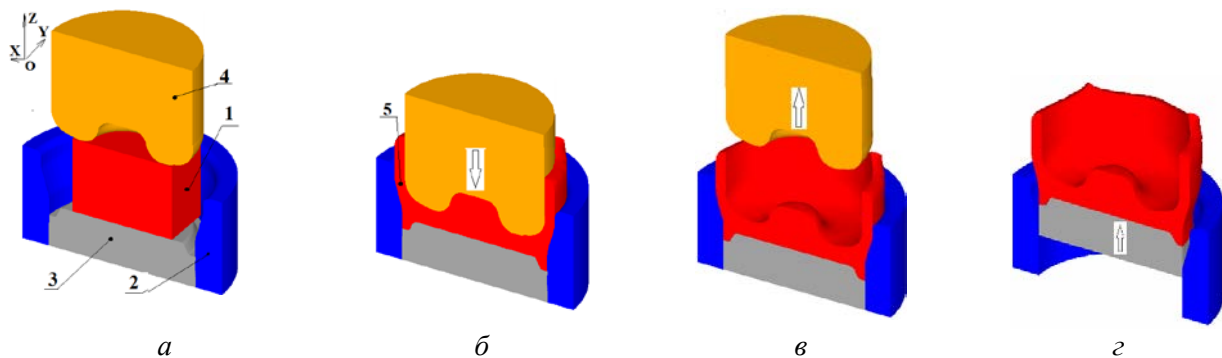


Рис. 2. Розрахункові схеми: *a* – на початку видавлювання; *б* – в кінці видавлювання; *в* – після вилучення пуансону із напівфабрикату; *z* – після виштовхування напівфабрикату із матриці

На рис. 4 показано розподіли температури у zdeформованому металі напівфабрикатів в кінці видавлювання заготовок круглої і квадратної форми. Встановлено, що швидкість деформування $V=40$ мм/сек забезпечує витримку температурного інтервалу гарячого видавлювання в обох варіантах формоутворення виробів. При видавлюванні круглої заготовки температура zdeформованого металу у донній частині та у стінці виробу знижується до $T=940^{\circ}\text{C}$ (рис. 4а), а при

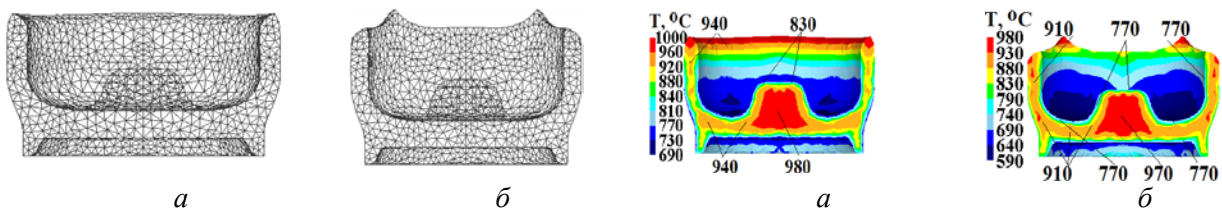


Рис. 3. Форма і розміри напівфабрикатів після видавлювання: *a* – круглої заготовки, *б* – квадратної заготовки

Рис. 4. Розподіли температури у напівфабрикатах в кінці видавлювання: *a* – круглої заготовки, *б* – квадратної заготовки

видавлюванні квадратної заготовки – до $T=910^{\circ}\text{C}$ (рис. 4б). Різниця в температурах пов'язана з різною висотою вихідних заготовок та часом на формоутворення напівфабрикатів. Найбільше охолодження відбувається у шарах металу біля контактуючих поверхонь з деформуючим інструментом. У першому випадку в таких шарах отримано $T=830^{\circ}\text{C}$, а у другому - $T=770^{\circ}\text{C}$. Таким чином, відкриваються можливості виконання деформування стінок отриманих напівфабрикатів наступним переходом витягуванням з потоншенням без проміжного підігріву.

Для двох варіантів формоутворення напівфабрикатів визначено залежності зусиль видавлювання, вилучення пуансонів із напівфабрикатів та виштовхування напівфабрикатів із матриць від переміщення деформуючого інструменту. На рис. 5 зображено залежності зусиль видавлювання в напрямку вісі z (див. рис. 2а) на пуансоні, виштовхувачі і матриці від переміщення пуансону. При видавлюванні із круглої заготовки такі залежності зусиль наведено на рис. 5а. Зусилля на пуансоні і плиті постійно зростають та досягають максимальних значень відповідно 4812 кН і 4440 кН в кінці видавлювання. На матриці зусилля змінюється незначно і досягає найбільшої величини 472 кН.

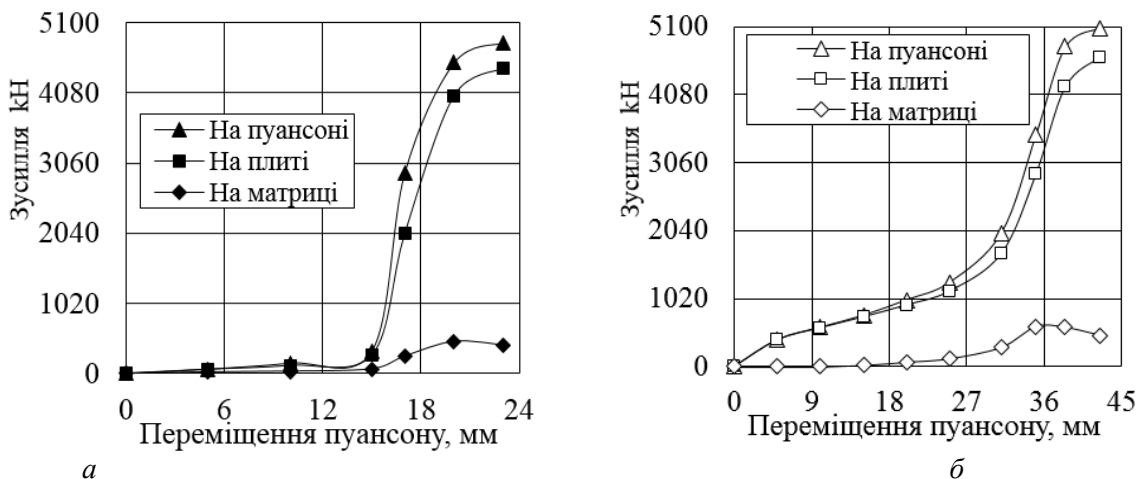


Рис. 5. Залежності зусиль видавлювання на пуансоні, плиті і матриці від переміщення пуансону: а – при видавлюванні круглої заготовки, б – при видавлюванні квадратної заготовки

Аналогічні залежності зусиль при видавлюванні квадратної заготовки представлено на рис. 5б. Зусилля на пуансоні і плиті спочатку зростають повільно до переміщення пуансону 30 мм, а потім відбувається інтенсивне збільшення зусиль до величин 5080 кН і 4640 кН в кінці видавлювання. На матриці отримано 600 кН. Різниця в зусиллях, в порівнянні з видавлюванням круглої заготовки, зв'язана з різною величиною гідростатичного тиску, який виникає при видавлюванні.

На рис. 6 наведено розподіли гідростатичного тиску $\sigma_{\text{ср}} = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) / 3$ у zdeформованому металі напівфабрикатів в кінці видавлювання. В кінці видавлювання круглої заготовки (рис. 6а) у донній частині напівфабрикату отримано величину такого тиску у межах $\sigma_{\text{ср}} = -210 \div -690$ МПа, а в кінці видавлювання квадратної заготовки у цій частині стискаючі напруження зростають по абсолютній величині і величина гідростатичного тиску досягає значень у межах $\sigma_{\text{ср}} = -220 \div -750$ МПа (рис. 6б).

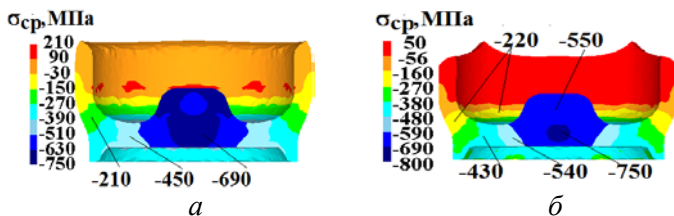


Рис. 6. Розподіли гідростатичного тиску у zdeформованому металі в кінці видавлювання: а – круглої заготовки, б – квадратної заготовки

зворотному переміщенні, та залежності зусиль виштовхування напівфабрикатів із матриць від переміщення плит. Зусилля виштовхування досягають максимальних величин на початку зворотного переміщення пуансонів і складають 28 кН після видавлювання круглої заготовки (рис. 7а) та 26 кН (рис. 7б) після видавлювання квадратної заготовки. Наведені величини зусиль необхідно враховувати при проектуванні пуансонотримачів у штамповому оснащенні. Залежності зусиль виштовхування напівфабрикатів із матриць від переміщення плити представлено на рис. 8. Найбільші значення цих зусиль складають 152 кН після видавлювання круглої заготовки (рис. 8а) і 172 кН після видавлювання квадратної заготовки (рис. 8б). Ці величини зусиль необхідно враховувати при проектуванні матрицетримачів у штамповому оснащенні.

Моделюванням визначено напружений і деформований стани металу у напівфабрикатах після видавлювання згідно вибраної системи координат (див. рис. 2а).

На рис. 9 зображено розподіли компонент напружень σ_z , σ_x , σ_y , і σ_t . Вигляди розподілів практично однакові для видавлювання круглої і квадратної заготовок, але величини напружень відрізняються.

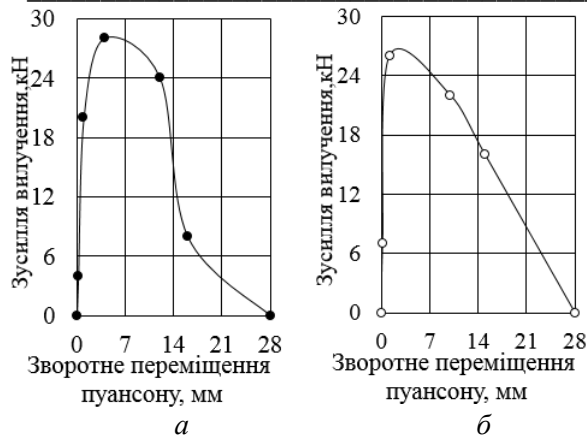


Рис. 7. Залежність зусилля вилучення пуансону від його зворотного переміщення після видавлювання: а – круглої заготовки, б – квадратної заготовки

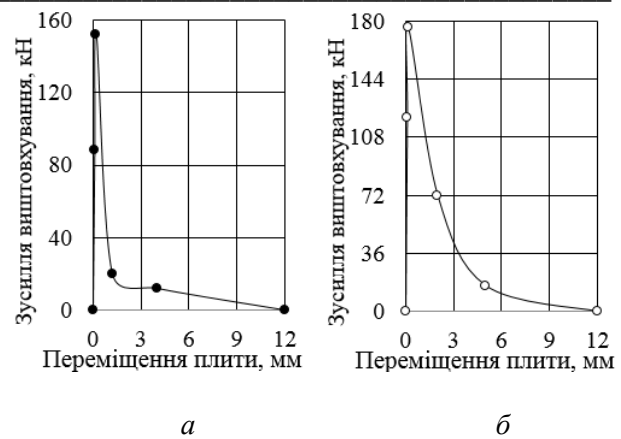


Рис. 8. Залежність зусилля виштовхування від переміщення плити: а – після видавлювання круглої заготовки, б – після видавлювання квадратної заготовки

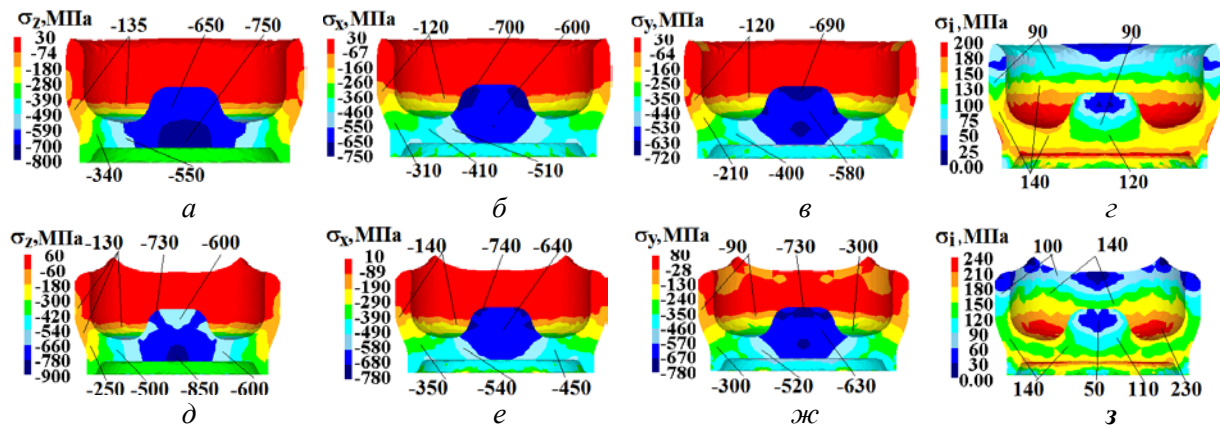


Рис. 9. Розподіли напружень σ_z , σ_x , σ_y , і σ_i у здеформованому металі напівфабрикатів в кінці видавлювання: а, б, в, г – круглої заготовки; д, е, ж, з – квадратної заготовки

У донних частинах напівфабрикатів виникають стискаючі напруження. Розглянемо напруження, які виникають при видавлюванні круглої заготовки. У донній частині напівфабрикату напруження σ_z змінюються від $\sigma_z = -135$ МПа у місці переходу стінки у донну частину до $\sigma_z = -750$ МПа в області вісі донної частини (рис. 9а). Напруження σ_x у донній частині знаходяться у межах $\sigma_x = -310 \div -510$ МПа (рис. 9б). У виступі зі сторони порожнини отримано $\sigma_x = -700$ МПа. Приблизно таких величин досягають напруження σ_y . По донній частині вони знаходяться у межах $\sigma_y = -210 \div -580$ МПа, а у виступі зі сторони порожнини отримано $\sigma_y = -690$ МПа (рис. 9в). Інтенсивність напружень σ_i змінюється від $\sigma_i = 90$ МПа у стінці напівфабрикату до $\sigma_i = 140$ МПа у донній частині (рис. 9г).

При видавлюванні квадратної заготовки розподіли компонент напружень виглядають наступним чином. Напруження σ_z змінюються від $\sigma_z = -130$ МПа у місці переходу стінки у донну частину до $\sigma_z = -850$ МПа на вісі цієї частини (рис. 9д). Напруження σ_x у донній частині знаходяться у межах $\sigma_x = -350 \div -640$ МПа (рис. 9е). Аналогічні величини отримано для напружень σ_y (рис. 9ж). Інтенсивність напружень змінюється від $\sigma_i = 100$ МПа у стінці напівфабрикату до $\sigma_i = 140$ МПа у донній частині (рис. 9з).

По напруженнях σ_z можна оцінити питомі зусилля, які виникають на контактуючих поверхнях пуансонів і плит, що дозволяє призначити марку матеріалу та прогнозувати стійкість такого інструменту для розглянутих варіантів видавлювання.

На рис. 10 зображено розподіли компонент деформацій ε_z , ε_x , ε_y і ε_i у здеформованому металі напівфабрикатів, які виготовлені із круглої і квадратної заготовок. Розподіли деформацій у напівфабрикаті, який отримано після видавлювання круглої заготовки, представлено на рис. 10а – 10г. Деформації ε_z у донній частині стискаючі ($\varepsilon_z = -0,2 \div -0,35$), а по висоті стінки – розтягувальні і збільшуються від $\varepsilon_z = 0,08$ в області торцю стінки до $\varepsilon_z = 0,6$ в зоні переходу стінки у донну частину

(рис. 10а). Деформації ε_x у стінці стискаючі та змінюються по висоті у межах $\varepsilon_x = -0,25 \div -0,9$. У донній частині ці деформації стають розтягувальними і досягають значень $\varepsilon_x = 0,15 \div 0,6$ (рис. 10б). Розтягувальні деформації ε_y (рис. 10в) виникають по висоті стінки ($\varepsilon_y = 0,15$) та у донній частині ($\varepsilon_y = 0,15 \div 0,4$). Результуюче пропрацювання структури металу гарячою пластичною деформацією можна оцінити по розподілу інтенсивності деформацій ε_i (рис. 10г). По висоті стінки отримано $\varepsilon_i = 0,58$ в зоні торцю стінки зі збільшенням до $\varepsilon_i = 1,8$ у місці переходу стінки у донну частину, у якій інтенсивність деформацій змінюється у межах $\varepsilon_i = 0,58 \div 1,3$.

Зовсім інші значення компонент деформацій ε_z , ε_x , ε_y і ε_i отримано у zdeформованому металі напівфабрикату, що виготовлений із квадратної заготовки (рис. 10д – 10з). Поведемо порівняльний аналіз з величинами таких деформацій, які отримано у напівфабрикаті після видавлювання круглої заготовки. Розтягувальні деформації ε_z в стінці досягають величин у межах $\varepsilon_z = 0,15 \div 0,9$, а стискаючі деформації у донній частині отримано у межах $\varepsilon_z = -0,65 \div -0,9$ (рис. 10д). Зростання величин цих деформацій склало в 1,5-2 рази. Стискаючі деформації ε_x по висоті стінки змінюються від $\varepsilon_x = -0,4$ в області торцю до $\varepsilon_x = -0,9$ в області переходу стінки у донну частину, в якій вони стають розтягувальними та досягають значень у межах $\varepsilon_x = 0,4 \div 0,9$ (рис. 10е). Величини розтягувальних деформацій збільшилися в 1,5 раз. Зросли в 2 рази у стінці розтягувальні деформації ε_y (рис. 10ж). Також зростають по висоті стінки і у донній частині напівфабрикату величини інтенсивності деформацій ε_i . В області торцю стінки отримано $\varepsilon_i = 0,8$, у місці переходу стінки у донну частину - $\varepsilon_i = 2,3$, а у донній частині - $\varepsilon_i = 0,8 \div 2,0$ (рис. 10з). Результуюче пропрацювання структури металу гарячою деформацією по висоті стінки збільшилося на 12%, а у донній частині зросло на 16%.

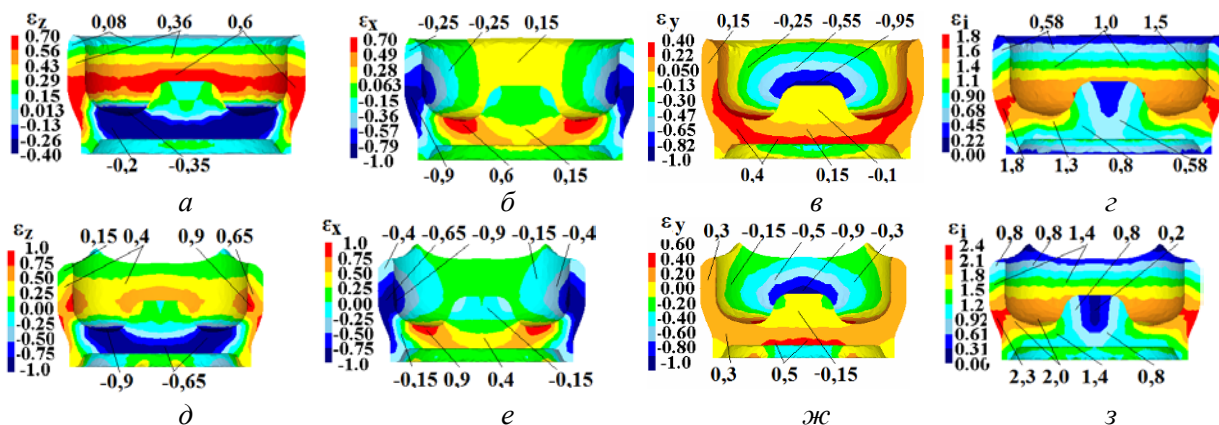


Рис. 10. Розподіли компонент деформацій ε_z , ε_x , ε_y і ε_i у напівфабрикатах після видавлювання: а, б, в, г – круглої заготовки; д, е, ж, з – квадратної заготовки

Збільшення величин інтенсивності деформацій у напівфабрикаті, який отриманий після видавлюванням із квадратної заготовки обумовлене тим, що при видавлюванні спочатку відбувається осаджування заготовки з висоти 56,6 мм до висоти 25 мм. При цьому ступінь деформації складає $\varepsilon = [(56,6 - 25) / 56,6] \times 100 = 55,8\%$ і zdeформований метал сторони квадрату досягає поверхні матриці діаметром 109,6 мм (див. рис. 1). Після цього починається заповнюватися металом зазор між пуансоном і матрицею і відбувається течія металу в стінку напівфабрикату.

Висновки.

1. За допомогою МСЕ створені моделі та проведено розрахунковий аналіз процесів гарячого зворотного видавлювання з роздачою круглих порожнистих напівфабрикатів із заготовок круглої і квадратної форми під подальше витягування з потоншенням.

2. Встановлено залежності зусилля видавлювання, вилучення пуансонів із zdeформованих заготовок та виштовхування напівфабрикатів із матриць від переміщення деформуючого інструменту. Зусилля видавлювання при використанні круглої заготовки на 16% менше від зусилля видавлювання квадратної заготовки.

3. У металі донних частин і стінках напівфабрикатів виявлено напружений стан на деформуючому інструменті, а також деформований стан після видавлювання. Використання квадратної заготовки забезпечує більш інтенсивне пропрацювання структури металу пластичною деформацією по висоті стінки та у донних частинах напівфабрикатів.

4. Подальші дослідження в цьому напрямку необхідно проводити по вивченню впливу швидкості деформування на силові режими видавлювання і формозміну металу при видавлюванні напівфабрикатів із квадратної заготовки.

Список використаних джерел.

1. Ковка и штамповка: Справочник в 4-х. т. Москва: Машиностроение. 1986. Т.2. Горячая объемная штамповка. Под ред. Е.И. Семенова. 1986. 592 с.
2. Данченко В.Н., Миленин А.А, Кузьменко В.И. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением. Численные методы. Днепропетровск: Системные технологии. 2008. 448 с.
3. Снитко С.А., Калюжный В.Л. Конечно-элементное моделирование многопереходного формоизменения при производстве железнодорожных колес. *Вестник НТУУ «КПИ»*. *Машиностроение*. Киев: НТУУ «КПИ». 2011. № 11. С. 106-112.
4. Калюжный В.Л., Алиева Л.И., Алиев И.С., Горностаев В.Н. Горячая объемная штамповка полых изделий из высокопрочного алюминиевого сплава с заданными механическими свойствами. *Заготовительное производство*. Москва. 2018. №12. С. 18-25.
5. X Hu. Numerical Simulation for Microstructure Evolution in In718 Alloy During Cylindrical Cup Backward Extrusion / X Hu, R B Mei, F Zhu, Y Fan, Y B Liang, X B Wang, D G Wang and Z R Jing // Northeastern University at Qinhuangdao Branch, Northeastern University, Qinhuangdao 066004, China. ISSN: 1662-8985, Vol. 650. Pp. 92-97.
6. S. Zota, S. Mróz, A. Stefanik, K. Laber, R. Mola, Theoretical and experimental analysis of the backward extrusion process with a rotational die of AZ31 alloy / *Metabk 60 (2021) 1-2*. Pp. 36-38, ISSN 0543-5846.
7. S.H. Hosseini, K. Abrinia & G. Faraji (2015). Applicability of a modified backward extrusion process on commercially pure aluminium. *Materials and Design*. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.09.043. Vol. 65. Pp. 521-528.
8. Kuhnke S, Sanabria V, Gensch F, Nitschke R, Mueller S, Numerical Investigations on Material Flow During Indirect Extrusion of Copper-Clad Aluminum Rods / *Front. Mater.* June 2020, Volume 7, Article 157. Pp. 1-10, doi: 10.3389/fmats.2020.00157.
9. Jong-Taek Yeom, Jeoung Han Kim, Jae-Keun Hong, Nho-Kwang Park, Chong Soo Lee, Prediction of Microstructure Evolution in Hot Backward Extrusion of Ti-6Al-4V Alloy / Hindawi Publishing Corporation, *Journal of Metallurgy*, Volume 2012, Article ID 989834. Pp. 1-6, doi:10.1155/2012/989834.
10. Roham Broomand, Alireza Babaei, Hadi Mazloom Bashiri, Mohammad Hasan Zaheri, Processing MMC tubes via friction stir backward extrusion, *Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical and Aerospace Engineering*, Volume 19, Issue 1 – Serial, Number 57, July 2022. Pp. 225-242, doi:10.48301/KSSA.2021.287462.1550.
11. Duk Jae Yoon, Eung-Zu Kim, Kyoung Hoan Na, Yong-Shin Lee, A study on the forming characteristics of AZ 31B Mg Alloy in a combined Forward-backward extrusion at warm temperatures / MDPI, Received: 15 October 2018; Accepted: 2 November 2018; Published: 8 November 2018. Pp. 1-10, doi:10.3390/app8112187.

Рецензент: Ковальов Василь Анатолійович, д.т.н., професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Скорського»

С.О.Руденький¹, М. Я. Втерковський¹

¹Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

ОСОБЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ ВИСОКОПОРИСТОГО НАНОКОМПЗИТУ Al_2O_3 - SiO_2 З ВИКОРИСТАННЯМ РІЗНИХ ТИПІВ ПОРОУТВОРЮВАЧІВ

У даній роботі досліджено вплив технологічних параметрів, а саме тиску пресування та типу пороутворювача на мікроструктуру, об'єм та розподіл за розмірами пор під час отримання високопористого наноккомпозиту на основі Al_2O_3 - SiO_2 . Показано, що використання карбаміду в якості пороутворювача за тиску пресування 50 МПа дозволяє отримати кераміку з 70 % пористістю. Встановлено, що не залежно від типу пороутворювача, у кінцевій структурі кераміки спостерігається дві області розмірів пор, після видалення пороутворювача, – макропори між агломератами, та мікропори – між частинками всередині агломератів. Використання хлористого амонію, карбаміду та двовуглецевого амонію дозволяє отримати пори з розмірами від 7 до 16 нм та з площею до $198 \text{ м}^2/\text{г}$.

Ключові слова: наноккомпозит, пороутворювач, оксид алюмінію, оксид кремнію.

S. Rudenkyi, M. Vterkovskyi

FEATURES OF OBTAINING HIGH-POROSITY NANOCOMPOSITE Al_2O_3 - SiO_2 USING DIFFERENT TYPES OF PORE-FORMERS

In this work, the influence of technological parameters, namely pressing pressure and type of pore former, on the microstructure, volume and distribution of pore sizes during the production of a highly porous nanocomposite based on Al_2O_3 - SiO_2 was investigated. It is shown that the use of urea as a pore former at a pressing pressure of 50 MPa allows obtaining ceramics with 70% porosity. It was established that, regardless of the type of pore former, in the final structure of the ceramics, two regions of pore sizes are observed after the removal of the pore former - macropores between agglomerates, and micropores - between particles inside agglomerates. The use of ammonium chloride, urea and ammonium dicarbonate allows to obtain pores with sizes from 7 to 16 nm and an area of up to $198 \text{ m}^2/\text{g}$.

Key words: nanocomposite, pore former, aluminum oxide, silicon oxide.

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток промисловості зумовлює більше вимог до матеріалів та виробів. Наприклад, пористі керамічні матеріали (ПКМ) здатні працювати в умовах дії агресивних середовищ та високих температур. Це в першу чергу і зумовило використання пористої кераміки в якості матеріалів для виготовлення різноманітних теплоізоляційних елементів, для фільтрації газів та рідин, або в медичній індустрії [1-2]. Загальновідомим є, що отримання ПКМ та виробів з них можливе за рахунок використання методів порошкової металургії. Так, зміна параметрів технологічних операцій зумовлює отримання ПКМ з пористістю від 50 до 90 % [3].

Під час виготовлення керамічних фільтрів, такий параметр, як пористість матеріалу задається заздалегідь та формується за рахунок введення спеціальних речовин – пороутворювачів, які під час кінцевого спікання виробу видаляються із структури матеріалу за рахунок вигорання пороутворювача. Оптимізація технологічних процесів отримання ПКМ в поєднанні з вибором типу пороутворювача дозволяють прогнозувати та регулювати розмір та довжину порових каналів в структурі отриманої ПКМ. Важливим фактором також є, яка кількість пороутворювача залишається в матеріалі після спікання, як пороутворювач впливає на форму та кількість пор, на міцність міжчастинного контакту після спікання матеріалу [4].

Зростання промислових запитів на вдосконалення властивостей вже відомих виробів та отримання нових матеріалів з заздалегідь заданими властивостями зумовлює необхідність у детальнішому дослідженні процесів, які відбуваються під час отримання пористих керамічних матеріалів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Під час отримання ПКМ можливе застосування різних типів консолідації в поєднанні з використанням різних видів пороутворювачів. Так, авторами роботи [4] було отримано ПКМ на основі Al_2O_3 з використанням технології іскроплазмового спікання (ІПС) та порошок сажі (5-30 об. %) з різним розміром питомої поверхні в якості пороутворювача. Отримано ПКМ з 39-60 % відкритою пористістю. В роботі [6] застосовували метод 3D друку для отримання ПКМ на основі Al_2O_3 - ZrO_2 з використанням поліметилметакрилату як пороутворювача. В іншій роботі [7] для отримання ПКМ застосовували поєднання методів лазерного спікання та реакційного спікання матеріалів на основі Al_2O_3 . В якості вихідних матеріалів використовували порошки Al_2O_3 з різним вмістом Al (0-32 мас. %), а в якості пороутворювача використовували епоксидну смолу. Максимальне значення пористості (55 %) після спікання

спостерігається при додаванні 22 мас. % Al. Вплив додавання SiC на формування сферичної оболонкової структури ПКМ на основі Al_2O_3 досліджували в роботі [8]. В якості пороутворювача використовували оброблене просо в розчині поліетиленгліколю. Зазначено, що кількість утворених сферичних пор прямопропорційно збільшується з зменшенням температури спікання з 1500 до 1400 °C. Як альтернативний варіант отримання ПКМ на основі Al_3O_2 використовують відходи виробництва фосфору після відновлення його оксидів Mg, Al та Ca. Після спікання при температурі 1225 °C вихідний склад отриманих композитів складався з алюомагнієвої шпінелі та алюмінату кальцію. При цьому зазначається, що максимальні значення пористості (63 %) та межі міцності на стиск (14,8 МПа) досягаються при додаванні 60 мас. % залишків продуктів отримання фосфору.

Враховуючи широке застосування ПКМ в промисловості, все ще залишається багато не висвітлених питань, щодо впливу використання різних типів пороутворювачів на вихідні властивості отриманих ПКМ.

Постановка проблем дослідження. В той же час, після аналізу літературних даних спостерігається, що питання дослідження впливу природи пороутворювача на розподіл за формою, розміром вихідних пор в структурі ПКМ на основі $Al_2O_3-SiO_2$ не є досконало вивченим та має високий науковий потенціал для майбутніх наукових праць та є актуальним технічним завданням з високим науковим інтересом.

Мета дослідження. Експериментальне встановлення впливу використання різних видів пороутворювачів на мікроструктуру, розподіл за розмірами пор та загальну (кінцеву) пористість ПКМ на основі $Al_2O_3-SiO_2$.

Викладення основного матеріалу. В даній науковій роботі наведено більш детальні та поглиблені дослідження, зазначені авторами статті в попередній публікації [9]. Як початкові матеріали в даному дослідженні використовувалися порошки оксиду алюмінію (Al_2O_3) і діоксиду кремнію (SiO_2 –аеросил), отримані за рахунок кріохімічного методу. Використання даного способу отримання порошків забезпечує високі значення питомої поверхні (40-50 m^2/g для Al_2O_3 і 175 m^2/g для SiO_2 відповідно). Слід зазначити, що значення питомої поверхні відмінно корелюють з високою дисперсністю частинок отриманого порошку в нанорозмірному діапазоні (10–100 нм). З іншого боку, зазначені порошки мають вузький діапазон розподілу за розмірами та високу хімічну чистоту.

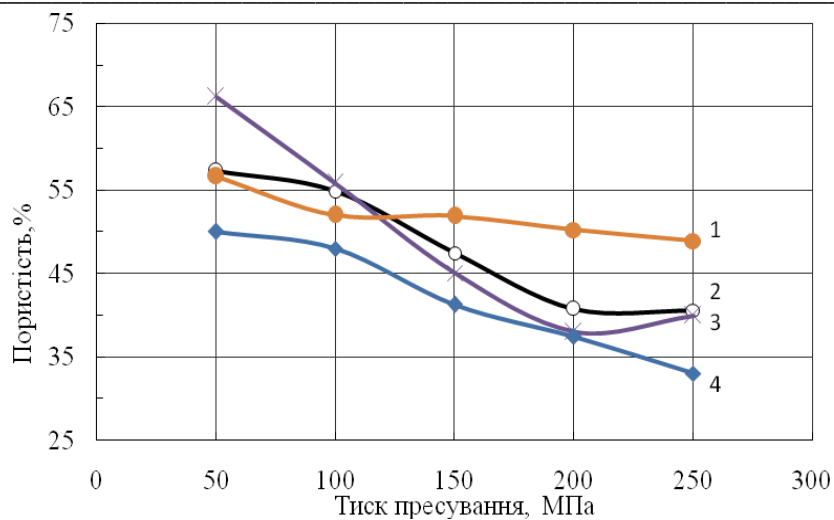
Як матеріали для дослідження використовували зразки на основі нанопорошків $Al_2O_3-50\%$ об. % SiO_2 з додаванням різного типу пороутворювачів в кількості 65 об. %. Дане співвідношення основного матеріалу та пороутворювача були обрані на основі проблематики останніх наукових робіт за заданою тематикою. Як пороутворювач використовували водні розчини (в дистильованій воді) сполук $(NH_4)_2CO_3$, $(NH)_2CO$, NH_4Cl . Рівномірність розподілу пороутворювача в структурі вихідного композиту з різним типом пороутворювачів забезпечувалася за рахунок застосування змішування в установках типу «мікшер» в середовищі дистильованої води. З метою встановлення впливу параметрів формування (а саме, тиску пресування) в роботі розглядаються типи нанокompозитів отриманих з наступними технологічними параметрами: різний тиск пресування (50-250 МПа, відповідно та різні типи пороутворювачів). Процес фінальної консолідації (спікання) відбувався за рахунок спікання попередньо сформованих пресовок за температури 1300 °C в середовищі повітря. Згідно результатів досліджень, зазначених в роботах [10]-[12] температурний інтервал спікання таких високо пористих матеріалів 1300–1400 °C, оптимальний час ізотермічної витримки в середньому 1 година в залежності від складу композиту. При цьому спостерігається досить висока об'ємна усадка.

В роботі досліджені зразки з використанням пороутворювачів хлористого амонію, карбаміду та двовуглецевого амонію та порівняно із результатами для аналогічного композиту без пороутворювача. Дослідження порової структури проводились за допомогою приладу ASAP – 2000.

Попередні результати дослідження залежності розміру пор від тиску пресування та типу пороутворювача зазначені в нашій роботі [9]. Результати досліджень наведені у роботі [9] та на рисунках 1-9.

Дані мікроструктурного аналізу структури ПКМ та розподілу пор без вигораючих добавок представлені на рисунках 2–5.

В той же час, залежності зміни значення питомої поверхні порошкових частинок від діаметру отриманих пор зазначені на рис. 3-9.



1 – $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$; 2 – NH_4Cl ; 3 – $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$; 4 – без вигораючої добавки

Рис. 1 Залежність пористості кераміки з Al_2O_3 -50% об. SiO_2 від тиску пресування після спікання

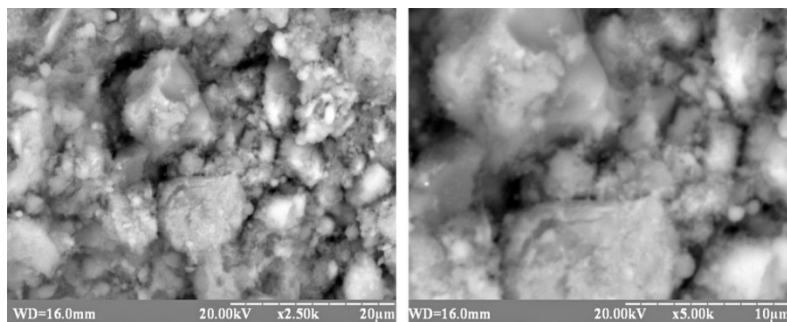
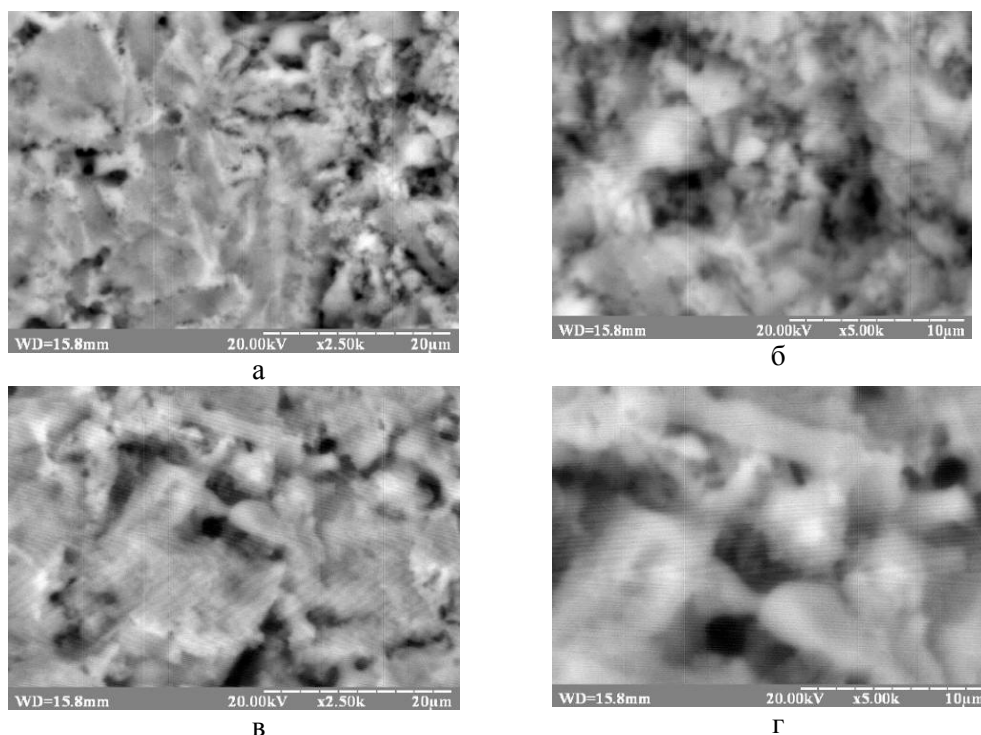
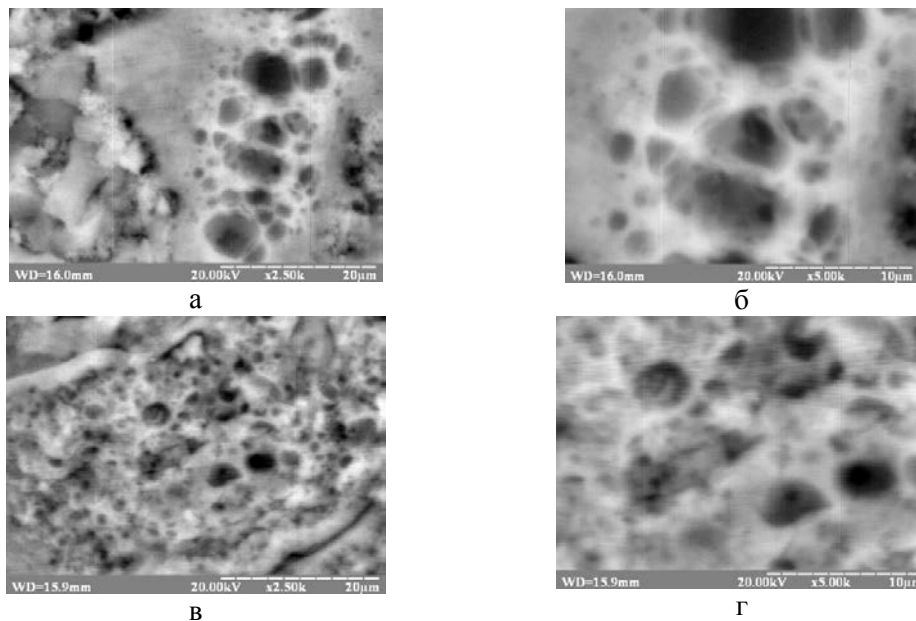


Рис. 2 Мікроструктура кераміки Al_2O_3 -50% об. SiO_2 без порутворювачів, отриманої при тиску пресування 50 МПа

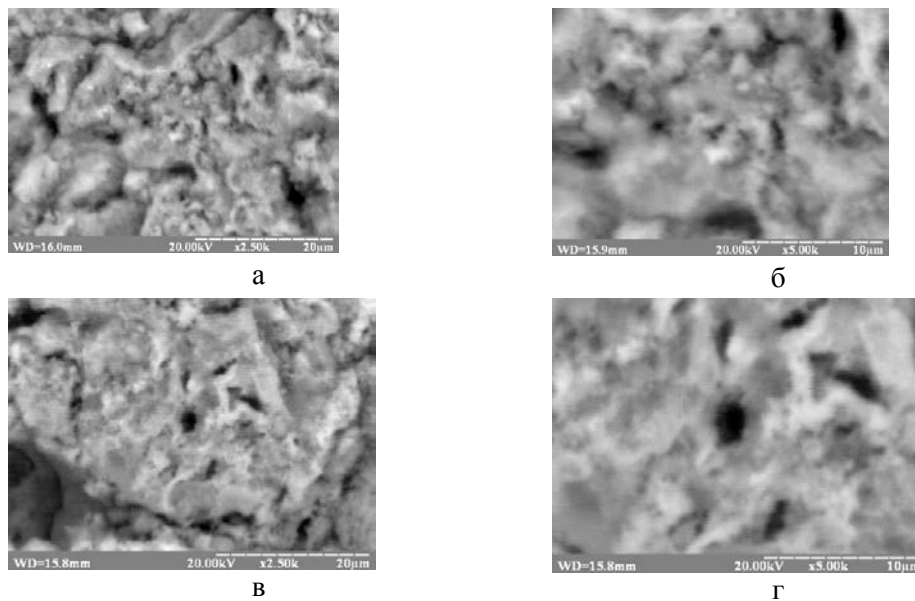


а,б – 50 МПа; в,г – 250 МПа

Рис. 3 Мікроструктури кераміки з Al_2O_3 -50% об. SiO_2 +65% об. NH_4Cl



а, б – 50 МПа; в, г – 250 МПа
 Рис. 4 Мікроструктури кераміки з Al_2O_3 -50% об. SiO_2 +65% об. $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$



а, б – 50 МПа; в, г – 250 МПа
 Рис. 5 Мікроструктури кераміки Al_2O_3 -50% об. SiO_2 +65% об. $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$

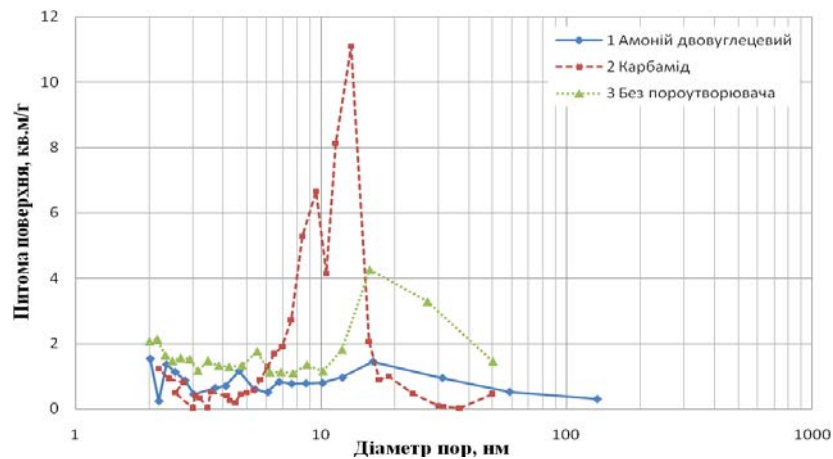


Рис. 6 Розподіл пор за питомою поверхнею кераміки Al_2O_3 -50% об. SiO_2 в залежності від пороутворювача при тиску пресування 50 МПа

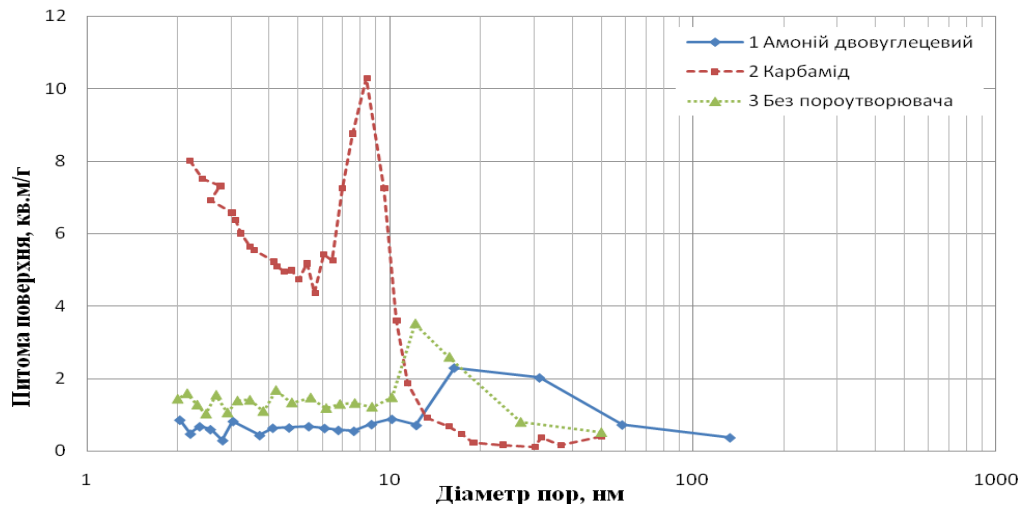


Рис.7 Розподіл пор за питомою поверхнею кераміки $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}50\%\text{об. SiO}_2$ в залежності від пороутворювача при тиску пресування 250 МПа

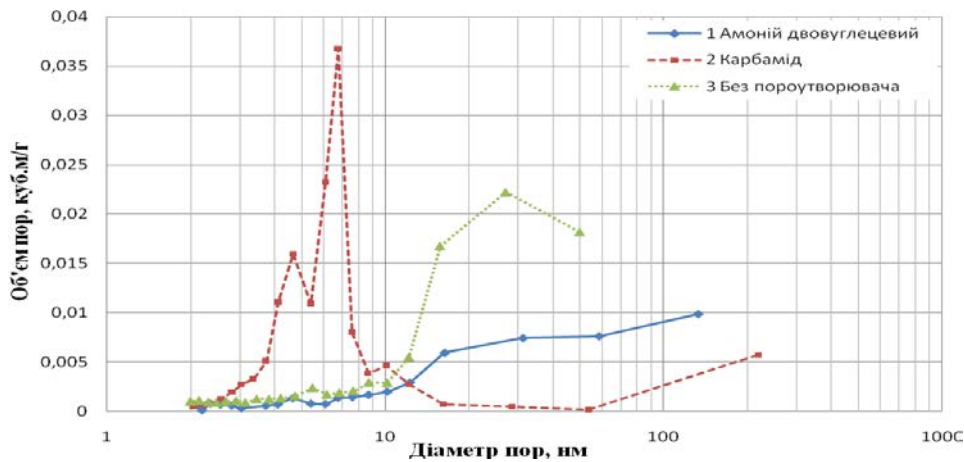


Рис. 8 Розподіл пор за об'ємом досліджуваної кераміки в залежності від пороутворювача при тиску пресування 50 МПа

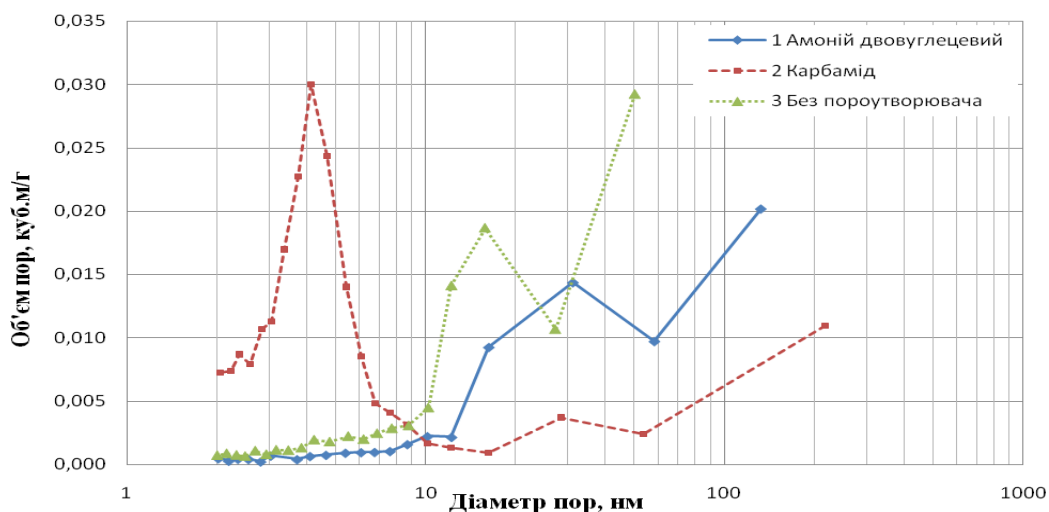


Рис. 9 Розподіл пор за об'ємом кераміки $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}50\%\text{ об. SiO}_2$ в залежності від пороутворювача при тиску пресування 250 МПа

Таким чином, маємо дві області розмірів пор, після видалення пороутворювача, – макропори між агломератами, та мікропори – між частинками всередині агломератів. За рахунок зволоження

при збільшенні тиску пресування пороутворювач виходить із мікропор і залишається по границях агломератів, збільшуючи тим самим макропористість.

З аналізу питомої поверхні, виходить, що найбільш розвинену поверхню має матеріал з карбамідом, при цьому матеріал з двовуглецевим амонієм має значно меншу питому поверхню навіть за матеріал без використання пороутворювача.

Це може бути пояснене тільки тим, що при використанні двовуглецевого амонію утворюється пористість більша за граничну чутливість методів БЕТ та ВЛН - 300 нм. Щоб підтвердити це твердження необхідно дослідити розмір частинок пороутворювача у системі після шихтування.

Висновки. З точки зору формування більш однорідної порової структури в дослідженому високопористому нанокompозиті $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, а також досягнення переважного діапазону пор в середньому 5-10 нм при високій пористості 55-65 %, є застосуванням такого пороутворювача як карбамід. Підтвердженням цього, в тому числі, є і результати досліджень представлені на рис. 6-9. В цьому випадку досягається порова структура кераміки з більш оптимальна характеристиками.

Такий оксидний високопористий композит може використовуватися для виготовлення фільтрів і мембран для тонкого очищення газів або рідин, а також може бути запропонований для широкого застосування в техніці і приладах.

Література

1. Бабашов В. Г. Пористая керамика для фильтрации расплавов металлов и горячих газов / В. Г. Бабашов та ін. // ТРУДЫ ВИАМ. – 2020. – №8. – С. 54 – 63.
2. Shakir R. Structure and properties of $\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ porous ceramic for biomedical applications / R. Shakir, R. Géber // Results in Engineering. – 2023. - Vol. 18. – P. 138-146.
3. Степанчук А. Н., , Технология порошковой металлургии / А. Н. Степанчук, И. И. Билык, П. А. Бойко. - Київ: "Вища школа", 1989. – 415 с.
4. Микушина В. А. Численное моделирование деформирования и разрушения пористой алюмооксидной керамики на мезоуровне / В. А. Микушина, И. Ю. Смолин. // Вестник Томского государственного Университета. – 2019. – №58. – С. 99 – 108
5. Çelik A. Fabrication of porous Al_2O_3 ceramics using carbon black as a pore forming agent by spark plasma sintering /A. Çelik , G. Çağlar , Y. Çelik // Ceramics International. – 2022. – Vol. 48. - P. 28181-28190.
6. Wu R. Microstructure and mechanical properties of 3D printed porous $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ laminated ceramics with tailored porosity / R. Wu, T. Zeng, M. Fan та ін.// Ceramics International. – 2023. – Vol. 49. - P. 33369-33381.
7. Dong Y. Porous Al_2O_3 ceramics with spontaneously formed pores and enhanced strength prepared by indirect selective laser sintering combined with reaction bonding / Y. Dong , H. Jiang, A. Chen та ін. // Ceramics International. – 2020. – Vol. 46. - P. 15159-15166.
8. Wan L. Preparation of porous $\text{SiC-Al}_2\text{O}_3$ ceramics with spherical shell structures of large surface area and high strength / L. Wan, X. Guo, K. Li та ін. // Ceramics International. – 2020. - Vol. 46. - P. 10325-10331.
9. Руденький С. О. Вплив пороутворювачів на формування структури високопористого нанокompозиту $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ / Руденький С. О., Втерковський М. Я. // МАТЕРІАЛИ VII ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ ТА МОЛОДИХ ВЧЕНИХ «Фізика і хімія твердого тіла. Стан, досягнення і перспективи» 21-22 жовтня 2022 р. – Луцьк, 2022. – 176 с.
10. Бакунов В.С. Особенности спекания оксидной керамики / Е.С. Лукин, В.С. Бакунов // Стекло и керамика. – 2011. – № 7. – С. 9-13
11. М. Рассемакин, С.М. Хайрмасов, С.О. Руденький. Свойства капиллярной структуры на основе оксида алюминия для контурных тепловых труб // Наукові вісті. - 2003. - №6. – С.40-45.
12. Руденький С.О. Високопориста кераміка на основі кріодисперсного порошку Al_2O_3 / Руденький С.О., Степанчук А.М. // Наукові нотатки: Міжвузівський збірник, випуск. 13, Луцьк.- 2003. – С. 286-295.

Рецензент: Богомол Юрій Іванович, д. т. н., проф., КПІ ім. Ігоря Сікорського, НН ІМЗ ім. Є. О. Патона, каф. ВТМ та ПМ

Т. В. Іванишин, Б. П. Поберейко, О. А. Валюх

Національний лісотехнічний університет України

СИСТЕМА МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ЯК МОДЕЛЬ ДЛЯ ФОРМАЛІЗАЦІЇ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ ЛІНІЙ З ЖОРСТКИМ АГРЕГАТУВАННЯМ ДВОХ МАШИН

Обґрунтовано проблеми та задачі дослідження продуктивності і автосмагивованих ліній як випадкової величини з метою пошуку резервів щодо її підвищення та розроблення методів розрахунку якісних показників машинних систем для побудови їх ефективних структур і раціональної системи експлуатації. Описано структуру, параметри та аналітичні залежності ймовірностей фінальних станів системи масового обслуговування як математичної моделі автоматичної лінії з жорстким зв'язком між двома верстатами. Побудовано аналітичні залежності і для розрахунку коефіцієнта використання та накладених втрат робочого часу автосмагивованої лінії, жорстко агрегатованої двома машинами неоднакової продуктивності.

Ключові слова: продуктивність, автосмагивована лінія, ймовірність, система масового обслуговування, верстат, математична модель, коефіцієнт використання, накладені втрати

T. Ivanyshyn, B. Pobereyko, O. Valyukh

MASS SERVICE SYSTEM AS A MODEL FOR FORMALIZING PERFORMANCE INDICATORS OF AUTOMATED LINES WITH RIGID AGGREGATION OF TWO MACHINES

The problems and research tasks of studying the productivity of automated lines as a random variable in order to identify reserves for its improvement and develop methods for calculating the quality indicators of machine systems to construct their effective structures and rational operating systems are justified. The structure, parameters, and analytical dependencies of the probabilities of the final states of a mass service system are described as a mathematical model of an automatic line with a rigid connection between two machines. Analytical dependencies are constructed for calculating the utilization ratio and imposed losses of working time of an automated line, rigidly aggregated by two machines with different productivity.

Keywords: productivity, automated line, probability, mass service system, machine, mathematical model, utilization ratio, imposed losses.

Постановка проблеми. Аналіз процесу функціонування автоматизованих ліній показує, що на практиці важко забезпечити раціональні умови їх експлуатації. У результаті ефективність прийнятих структурно-компонувальних рішень, рівень надійності й стабільності роботи обладнання та якісні показники оброблення заготовок, які були закладені в будову машинної системи на основі проведених теоретичних досліджень, дають змогу реалізувати певну частину продуктивних можливостей автоматизованої лінії [1]. Як правило, в процесі її функціонування продуктивність обладнання, якість виготовленої продукції та витрати на експлуатацію є не постійними величинами через нестабільність інтервалів технологічних операцій, якості предметів оброблення та інструментів, рівня кваліфікації обслуговуючого персоналу тощо. Це призводить до того, що реальні показники ефективності автоматизованої лінії під час її роботи не співпадають з прогнозованими, оскільки мають випадковий характер [2]. Тому, забезпечення проектних показників машинної системи у виробничих умовах, розроблення теорії та методів їх розрахунку з метою побудови раціональної системи експлуатації автоматизованої лінії є важливою науковою проблемою [1-3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Для оброблення заготовок чи виготовлення деталей можна вибирати різні варіанти побудови автоматизованої системи машин, які відрізняються методами та маршрутами технологічних операцій, ступенем їх диференціювання та концентрації, типом обладнання й числом робочих позицій, компонованням транспортної системи, системою керування та числом різнотипних буферних пристроїв [3]. Тому, вибір оптимального поєднання технологічних і конструктивних параметрів проєктованих ліній базується на формалізації їх взаємозв'язків з показниками надійності, продуктивності й економічної ефективності роботи обладнання.

Дослідження продуктивності машинних систем в умовах їх експлуатації, передбачає розв'язання двох задач: знаходження резервів підвищення продуктивності ліній та отримання статистичних даних для проєктування нових автоматизованих систем машин з одночасним

узагальненням досвіду експлуатації діючих їх конструкцій і порівняльним аналізом ефективності роботи обох варіантів [2]. Тому математичною основою теорії продуктивності ліній є рівняння, які описують функціональну залежність продуктивності верстатів і машинної системи від технологічних, технічних, конструктивних, вартісних й інших показників обладнання [3].

Продуктивність автоматизованої лінії залежить від числа і продуктивності верстатів, які працюють в її структурі, ступеня диференціювання й концентрації технологічних операцій, числа і ємності міжверстатних накопичувачів та місць їх розташування, структурних варіантів побудови машинної системи [1-3]. Чим більша кількість дільниць і міжопераційних накопичувачів запасів заготовок, тим вища продуктивність ліній. Але ця залежність має асимптотичний характер: додавання кожного нового накопичувача дає зменшувальний додатковий приріст продуктивності [3].

Проектування раціональної структури автоматичної лінії й принципів її експлуатації повинно базуватись, перш за все, на аналізі реального технологічного процесу із врахуванням можливої зміни фактичної продуктивності ліній, позациклових втрат робочого часу, коефіцієнтів використання робочого часу, завантаження й технічного використання машинної системи тощо [1, 2]. Оскільки ці величини за своєю природою є випадковими (варіюються в певних межах), то визначити їх достовірні числові значення можна лише шляхом тривалих спостережень і замірів із відповідним математичним обробленням статистичних даних. Отримані результати дають змогу проводити структурний аналіз багатостатних систем із застосуванням аналітичних методів та методу імітаційного моделювання [2].

Викладення основного матеріалу. Дослідження показують, що під час функціонування автоматичної лінії практично всі її технологічні дільниці працюють в умовах стохастичної невизначеності зміни важливих показників процесу оброблення чи виготовлення деталей [2]. Тобто, ці показники є випадковими величинами, або випадковими функціями. Їх імовірнісні характеристики, як правило, невідомі через мінливість параметрів сировини, матеріалів і заготовок та конструктивну особливість обладнання зі стохастичним варіюванням параметрів потоків замовлень і їх оброблення.

Тому для математичного моделювання автоматизованої лінії з жорстким зв'язком між двома машинами (рис. 1) можна застосувати аналітичний апарат системи масового обслуговування (СМО) з обмеженим часом очікування замовлення [2, 4], процес роботи якої є випадковим марковським процесом з відсутністю післядії та з дискретним станом і неперервним часом поступлення найпростішого потоку заготовок (потоків Пуассона) і показниковим розподілом часу їх обслуговування на технологічних дільницях [4].

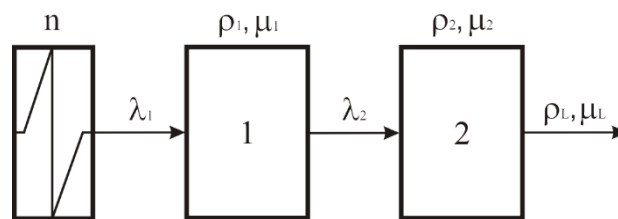


Рис. 1. Схема автоматизованої лінії послідовної структури з жорстким зв'язком між двома верстатами:

n – число вхідного потоку заготовок; λ_1, λ_2 – інтенсивності подачі заготовок на перший і другий 2 верстати; ρ_1, ρ_2 – коефіцієнти використання робочого часу верстатів; μ_1 і μ_2 – продуктивності верстатів; ρ_L – коефіцієнт використання робочого часу лінії; μ_L – продуктивність лінії

У такому разі автоматизована лінія є багатоканальною системою масового обслуговування (рис. 2), яка характеризується числом каналів, випадковим поступленням потоку замовлень, випадковим часом їх обслуговування, коефіцієнтами використання робочого часу каналів та продуктивністю системи [4]. Ці параметри відображають здатність СМО обслуговувати потоки замовлення і зв'язують їх у вигляді математичного очікування випадкових величин з такими показниками ефективності роботи системи, як: середнє число замовлень, що обслуговуються в одиницю часу; середнє число замовлень в черзі; середній час очікування обслуговування; імовірність відмови в обслуговуванні без очікування; імовірність того, що число замовлень у черзі перевищує певне значення тощо.

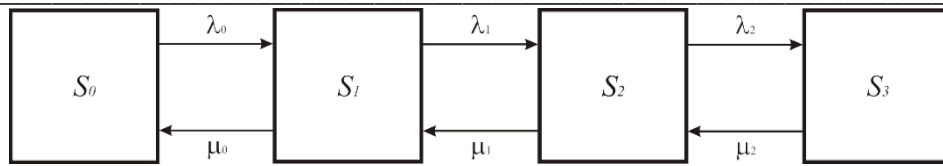


Рис. 2. Граф багатоканальної СМО як моделі автоматизованої двоверстатної лінії з жорстким міжагрегатним зв'язком:

S_0 – два верстати вільні (простоюють); S_1 – перший верстат виконує замовлення, другий вільний; S_2 – другий верстат виконує замовлення, перший вільний; S_3 – обидва верстати виконують замовлення; $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$ – інтенсивності вхідних потоків замовлень; μ_0, μ_1, μ_2 – інтенсивності виконання замовлень на верстатах

Відповідно до рис. 1 рівняння ймовірностей станів системи в період часу $t + \Delta t$ для усталеного режиму роботи верстатів мають вигляд [2]:

– в системі роботи двох машин відсутні заготовки – $p(0, 0, t)$, тобто на перший верстат не поступає жодна заготовка – $(1 - \lambda_1 \Delta t)$, а на другому верстаті обробляється одна заготовка – $p(0, 1, t)$ і після завершення її обробки – $\mu_2 \Delta t$ вона покине систему, але надалі на другий верстат за час Δt не поступають інші заготовки $(1 - \lambda_2 \Delta t)$:

$$p(0, 1) = \rho_2 p(0, 0), \quad n_1 = n_2 = 0, \quad (1)$$

де n_1, n_2 – число заготовок на ділянці роботи першого і другого верстатів;

$$\rho_2 = \frac{\lambda_2}{\mu_2} \text{ – коефіцієнт використання робочого часу другого верстата;}$$

– на ділянці роботи першого верстата знаходиться n_1 заготовок (одна обробляється, інші чекають своєї черги), а на другому верстаті відсутні заготовки:

$$(1 + \rho_1) p(n_1, 0) = \frac{\rho_1}{\rho_2} p(n_1, 1) + \rho_1 p(n_1 - 1, 0), \quad n_1 > 0, \quad n_2 = 0, \quad (2)$$

де $\rho_1 = \frac{\lambda_1}{\mu_1}$ – коефіцієнт використання робочого часу першого верстата;

– на ділянці роботи першого верстата відсутні заготовки (одна обробляється, інші чекають своєї черги), а в зоні роботи другого верстата знаходиться n_2 заготовок (одна обробляється, інші чекають своєї черги):

$$(1 + \rho_2) p(0, n_2) = \frac{\rho_2}{\rho_1} p(1, n_2 - 1) + p(0, n_2 + 1), \quad n_1 = 0, \quad n_2 > 0; \quad (3)$$

– обидва верстати працюють: на ділянці першої машини знаходиться n_1 заготовок, а на ділянці другої машини – n_2 заготовок:

$$(\rho_1 + \rho_2 + \rho_1 \rho_2) p(n_1, n_2) = \rho_2 p(n_1 + 1, n_2 - 1) + \rho_1 p(n_1, n_2 + 1) + p(n_1 - 1, n_2), \quad n_1 > 0, \quad n_2 > 0; \quad (4)$$

Розв'язання системи рівнянь фінальних ймовірностей станів СМО (1-4) дає змогу отримати залежності для визначення максимальних значень коефіцієнтів використання машин двофазної системи з жорстким агрегуванням верстатів різної продуктивності [2]:

$$\rho_1 = \frac{1 - \mu^2}{1 - \mu^3}; \quad \rho_2 = \mu \cdot \frac{1 - \mu^2}{1 - \mu^3}, \quad (5)$$

де $\mu = \frac{\mu_1}{\mu_2}$ – співвідношення продуктивностей верстатів у лінії.

Тоді, граничне значення інтенсивності потоку замовлень у СМО (пропускної здатності системи) в усталеному режимі її роботи можна визначити зі співвідношення:

$$\lambda_{max} = \mu_L = \mu_1 \rho_1 = \mu_2 \rho_2 \quad (6)$$

Враховуючи те, що в теорія продуктивності ліній запропоновано обчислювати величину використання робочого часу всієї автоматизованої системи машин за формулою [1]:

$$\rho_L = \frac{1}{1 + \sum \frac{1 - \rho_i}{\rho_i}} \quad (7)$$

то для випадку двоверстатної лінії ця залежність має вигляд:

$$\rho_L = \frac{1}{1 + \frac{1 - \rho_1}{\rho_1} + \frac{1 - \rho_2}{\rho_2}} = \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_2 + \rho_1 - \rho_1 \rho_2} = \frac{1}{\frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\rho_1} - 1}. \quad (8)$$

Практичне застосування рівняння (8) для розрахунку чи прогнозування параметра ρ_L характеризується значними труднощами та суттєвими похибками в зв'язку зі складністю визначення коефіцієнтів ρ_1 і ρ_2 , як випадкових величин [2].

Тому, виразивши ρ_1 і ρ_2 у рівнянні (8) через співвідношення (5), які були виведені під час аналітичного аналізу фінальних імовірностей станів СМО як моделі автоматизованої лінії, отримаємо залежність для розрахунку ρ_L за величинами співвідношення продуктивностей верстатів у машинній системі:

$$\rho_L = \frac{1}{\frac{1}{\mu \frac{1 - \mu^2}{1 - \mu^3}} + \frac{1}{\mu \frac{1 - \mu^2}{1 - \mu^3}} - 1} = \frac{\mu(1 - \mu^2)}{1 - \mu^4} = \frac{\mu}{1 - \mu^2}. \quad (9)$$

Тоді, підставивши у (9) співвідношення $\mu = \frac{\mu_1}{\mu_2}$, отримаємо рівняння для обчислення величини коефіцієнта використання робочого часу ρ_L автоматизованої лінії за показниками продуктивності верстатів з умовою, що їх величини є неоднаковими ($\mu_1 \neq \mu_2$, $\mu \neq 1$):

$$\rho_L = \frac{\mu}{1 + \mu^2} = \frac{\mu_1 \mu_2}{\mu_1^2 + \mu_2^2}. \quad (10)$$

Продуктивності машин у лінії можна визначити як $\mu_i = \frac{1}{t_i}$, де t_i – середнє значення тривалості технологічної операції на верстаті.

Враховуючи те, що згідно з теорією продуктивності ліній накладені втрати H_L робочого часу автоматизованої машинної системи дорівнюють [2, 5]

$$H_L = 1 - \rho_L, \quad (11)$$

то в нашому випадку:

$$H_L = 1 - \frac{\mu}{1 + \mu^2} = \frac{1 - \mu + \mu^2}{1 + \mu^2}. \quad (12)$$

Або, виразивши (12) через продуктивності верстатів, що компонують автоматизовану лінію, отримаємо співвідношення:

$$H_L = \frac{\mu_1^2 - \mu_1 \mu_2 + \mu_2^2}{\mu_1^2 + \mu_2^2}. \quad (13)$$

Висновки. Побудовані математичні залежності дають змогу отримати адекватні результати обчислень і роботи справедливих висновки під час аналізу чи прогнозування показників ефективності функціонування автоматизованих машинних систем в умовах стохастичної невизначеності зміни інтервалів випуску продукції, коли потоки заготовок на лінії є найпростішими, а тривалості їх оброблення описуються показниковим законом розподілу ймовірностей.

Список використаних джерел

1. Кузнецов М. М. Автоматизация производственных процессов: учеб. для вузов / М. М. Кузнецов, Л. И. Волчкевич, Ю. П. Замчалов; под ред. Г. А. Шаумяна – М.: Высшая школа, 1978. – 431 с.
2. Елементи теорії автоматичних ліній / Дудюк Д. Л., Загвойська Л. Д., Максимів В. М., Сорока Л. М. – Київ-Львів, 1998. – 190 с.
3. Автоматизация процессов машиностроения: учеб. пособие для машиностр. спец. вузов / Я. Буда, В. Гановски, В. С. Вихман и др.; под ред. А. И. Дашенко. – М.: Высш. школа, 1991. – 480 с.
4. Литвинов А. Л. Теорія систем масового обслуговування: навч. посібник / А. Л. Литвинов. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 141 с.
5. Дудюк Д. Л. Оцінка й елімінування втрат робочого часу в автоматизованих системах деревообробного виробництва / Д. Л. Дудюк, Л. Д. Загвойська. – Львів: вид. дім “Панорама”, 2003. – 140 с.

Р.В. Пузік, В.Ю. Кондусь

Сумський державний університет

СТВОРЕННЯ НОВОГО ПОКОЛІННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ВІЛЬНОВИХРОВИХ НАСОСІВ У КОНТЕКСТІ СТРАТЕГІЇ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ КОНКУРЕНТОЗДАТНОСТІ

Завдяки своїй видатній спроможності до перекачування рідин з включеннями, вільновихрові насоси поступово набувають все більш широкого поширення та застосування в останні роки. Це стало можливим завдяки їх низькій схильності до засмічень та руйнувань під впливом абразивних часток, а також підвищеному ресурсу роботи. Тим не менше, даний тип насосів має певні недоліки, найбільш суттєвим з яких є порівняно низькі значення ККД, котрі зазвичай не перевищують 58%.

В даній роботі розглянуто можливість модернізації проточної частини вільновихрового насосу шляхом збільшення ширини лопатей його робочого колеса.

Проведений за допомогою програмного забезпечення ANSYS CFX числовий експеримент показав, що дана модифікація конструкції дозволяє позбутися деформації тороподібного вихору, збільшити частку лопатевого робочого процесу у вільновихровому насосі і, як наслідок, отримати підвищення напору та ККД насосної установки.

В результаті виконання фізичного експерименту було перевірено гіпотези, висунуті в результаті проведення аналітичного дослідження, а також підтверджено результати числових експериментів.

Ключові слова: вільновихровий насос, робочий процес, робоче колесо, вільна камера, лопать, тороподібний вихор, напір, ККД.

R. Puzik, V. Kondus

CREATION OF A NEW GENERATION OF ENERGY-EFFICIENT TORQUE FLOW PUMPS IN THE CONTEXT OF THE STRATEGY OF INCREASE IN THEIR COMPETITIVENESS

Due to their outstanding ability to pump liquids with inclusions, torque flow pumps have gradually become more and more widely used in recent years. This became possible thanks to their low tendency to clogging and destruction under the influence of abrasive particles, as well as increased service life. Nevertheless, this type of pump has certain disadvantages, the most significant of which are low efficiency values, which usually do not exceed 58%.

This work considers the possibility of modernizing the flow part of the torque flow pump by increasing the width of its impeller blades.

A numerical experiment conducted using the ANSYS CFX software showed that this modification of the design allows us to get rid of the deformation of the toroidal vortex, increase the share of the blade work process in the torque flow pump. As a result we get an increase in the head and efficiency of the pump installation.

As a result of the physical experiment, the hypotheses put forward in after the analytical study was verified. Also it allowed us to confirm the results of the numerical experiments.

Key words: torque flow pump, work process, impeller, free camera, blade, toroidal vortex, head, efficiency.

Вступ

Вільновихрові насоси здебільшого застосовуються для перекачування забруднених рідин, котрі мають тверді домішки, пісок, волокнисті, кристалічні або ж абразивні частки, мають високу в'язкість та інше. Даний тип насосів характеризується меншими експлуатаційними витратами в порівнянні з відцентровими насосами, якщо розглядати роботу при аналогічних умовах. Це пояснюється з тим, що відцентрові насоси більш уражені кавітаційним явищем, зношування та закупорки елементів проточної частини [1]. Ще до переваг вільновихрових насосів можна віднести спрощення конструкції, а також їх виготовлення, зниження рівня вібрації, відносно просте обслуговування.

Не зважаючи на це, робота вільновихрових насосів супроводжується рядом суттєвих недоліків. Основним є нижчий, порівняно з іншими типами насосів коефіцієнт корисної дії, котрий зазвичай не перевищує 58%. Це пов'язано з певними особливостями робочого процесу насосів, котрий одночасно включає в себе вихровий та лопатевий процеси [2].

Так як ціни на енергоресурси залишаються високими, то враховуючи загальну структуру вартості життєвого циклу насосної установки, одним із базових шляхів зниження енергоспоживання насосного обладнання залишається модернізація його конструкції.

На загальну вартість життєвого циклу насосної установки найбільш суттєвий вплив мають витрати на електроенергію, котра споживається в процесі його роботи. На них припадає близько половини від загальних витрат. Через це підвищення ефективності роботи насосів є нагальною

потребу в сучасному машинобудуванні, вирішення котрої дасть можливість збільшити конкурентоспроможність даних насосів на ринку.

Постановка задачі

Вільновихрові насоси широко застосовуються у найрізноманітніших галузях промисловості, таких як харчова, гірничовидобувна, при транспортуванні стічних вод тощо. Через особливості своєї конструкції насоси даного типу підходять для перекачування рідин із твердими, абразивними, волокнистими та газоподібними включеннями [3]. При цьому витрати на їх обслуговування значно нижчі у порівнянні з іншими типами насосів.

Ефективність вільновихрових насосів при транспортуванні рідин, що містять тверді та волокнисті включення пояснюється зниженням ризику засмічення міжлопатевих каналів робочого колеса, котре може призводити до зниження ККД роботи установки, а при повному закупорюванні проточної частини унеможливує перекачування рідини [4].

При цьому вільновихрові насоси мають певні недоліки, основним з яких є низькі значення ККД. Згідно досліджень Соляника, Євтушенко тощо [5], максимальний теоретично досяжний ККД вільновихрового насоса складає $\eta_{E\ max} = 0,63$. При цьому відносно високі показники ефективності роботи спостерігаються лише на певному вузькому відрізку коефіцієнтів швидкохідності. В роботі показано, що оптимальний діапазон роботи для вільновихрових насосів складає $n_s = 80 - 150$ [6]. Схожі результати для вітчизняного обладнання описані в роботі, згідно якої в діапазоні $n_s = 80 - 140$ практично отримані значення ККД складають $\eta = 0,5 - 0,52$ (рис. 1) [7].

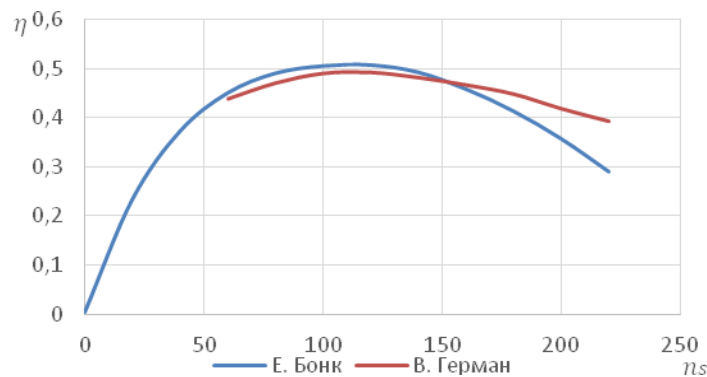


Рис. 1. Залежність ККД вільновихрових насосів від коефіцієнту швидкохідності

Як показано на рисунку 1, ефективність роботи вільновихрових насосів стрімко знижується при високій та низькій швидкохідностях $60 \leq n_s \leq 150$.

Таким чином основною метою даної роботи є підвищення енергоефективності вільновихрових насосів, а також розширення діапазону їх роботи.

Методика досліджень

Методика проведення числового дослідження

Через вкрай складний, багатомірний та не повністю вивчений процес течії перекачуваної рідини у проточній частині вільновихрового насоса її математичний опис здебільшого проводять з рядом припущень, котрі спрямовані на спрощення моделі [8]. В той же час використовуються спрощені математичні вирази та диференційні рівняння, емпіричні коефіцієнти, що в результаті не дозволяє отримати їх точного рішення [9], [10].

Подібні розрахунки мають вкрай високу складність та трудомісткість, тому широкого поширення набули числові методи обчислювальної гідродинаміки – CFD-коди [11]. Їх використовують для вирішення широкого спектру завдань в машинобудуванні і, зокрема, в сфері насособудування [12].

Для проведення числового дослідження з використанням програмного продукту Solidworks була побудована тривимірна модель проточної частини вільновихрового насоса СВН 500/32. Розрахункову подачу досліджуваного насоса на оптимальному режимі приймаємо рівною $500 \text{ м}^3/\text{год}$, розрахунковий напір 32 м , частота обертання валу 1500 об/хв .

Експериментальний насос СВН 500/32 має консольну конструкцію. Підведенням робочої рідини є осьовим. Корпус насоса обладнано відводом кільцевого типу. Робоче колесо розміщується у спеціальній циліндричній розточці корпусу. Вал насоса має сальникове ущільнення. В ролі опор валу використовувалися підшипники кочення з рідким змащуванням.

При проведенні експериментального дослідження було обрано два варіанти конструктивного виконання робочого колеса досліджуваного насосу:

1. Робоче колесо базової конструкції зі стандартною шириною лопатей;
2. Робоче колесо модифікованої конструкції зі збільшеною шириною лопатей

$\Delta b_2 = +30 \text{ мм}$.

Числові дослідження течії рідини в проточній частині вільновихрового насоса було проведено за допомогою університетської версії програмного комплексу Ansys CFX.

Побудова розрахункової сітки проводилась з використанням пакету ICEM CFD. Це дало можливість отримати неструктуровану розрахункову сітку. Вся розрахункова область спочатку була розділена на комірки у формі тетраедра з подальшою перевіркою якості та згладжуванням. Далі було побудовано пристінковий шар з призматичних комірок. Це дозволило збільшити роздільну здатність сітки у пристінковій області і, як наслідок, підвищити точність розрахунків у приміжовому шарі рідини.

Створення розрахункової моделі проводилось в пакеті CFX-Pre. Для замикання рівнянь Рейнольдса використовувалась стандартна k-ε модель турбулентності, так як вона добре зарекомендувала себе при розрахунках внутрішніх течій.

Умовою збіжності було обрано досягнення точності 10^{-4} . З метою контролю розрахунків задавалися вирази для визначення напору та ККД досліджуваного насоса.

Обробка і аналіз результатів виконано з використанням програмного пакету CFD-Post. Аналіз отриманих результатів виконувався у графічній та числовій формах.

Методика проведення експериментального дослідження

З метою експериментальної перевірки гіпотез, що були отримані під час виконання аналітичного дослідження, а також підтвердження результатів проведення числових експериментів з використанням програмного продукту ANSYS CFX на базі випробувального стенду кафедри Прикладної гідроаеромеханіки Сумського державного університету було виконано ряд стендових випробувань вільновихрового насоса.

Всі інші елементи конструкції насоса залишилися незмінними.

З метою проведення фізичного експерименту було розроблено спеціальний випробувальний стенд, який працює за схемою замкнутого контуру циркуляції робочої рідини.

Експериментальні дослідження та вимірювання усіх фізичних величин проводилися відповідно до ДСТУ ГОСТ 6134:2009.

Подача насоса визначалася за допомогою витратоміра та могла регулюватися за допомогою спеціальної засувки. При цьому похибка вимірювання подачі рідини за допомогою витратоміру не повинна була перевищувати 0,5 – 1 %.

В якості перекачуваної рідини в процесі експериментального дослідження була використана вода. Температура води вимірювалася за допомогою термометра, після чого була визначена її густина. Крутий момент на валу електродвигуна Д вимірювався за допомогою мотор-вагів.

Теоретичні дослідження

Робочий процес вільновихрового насоса (рис. 2) характеризується складним характером передачі енергії у його проточній частині.

На початковому етапі він є аналогічним до робочого процесу відцентрових насосів. Тобто енергія переходить до потоку рідини за допомогою його силової взаємодії з лопатями робочого колеса насоса. В результаті, у проточній частині відцентрового насоса рідина з міжлопатеми каналів робочого колеса переходить безпосередньо до відводу та напірного патрубку.

На відміну від даної схеми, при роботі вільновихрових насосів із міжлопатеми каналів робочого колеса до відводу надходить лише незначна частина рідини (q_k).

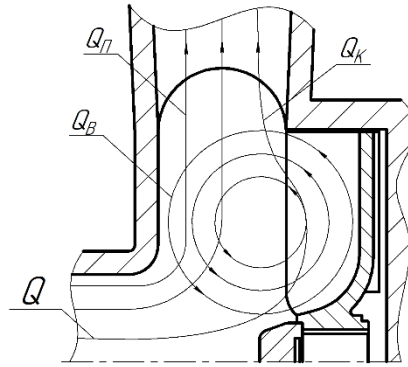


Рис. 2. Схема робочого процесу у вільновихровому насосі

Інша ж частина потоку (Q_v) утворює собою вихровий потік (інша назва – тороподібний вихор), котрий продовжує циркулювати у проточній частині насоса. Даний тороподібний вихор має властивості «рідкої лопаті». Таким чином він відповідає за передачу енергії тій частині потоку (Q_n), котра не взаємодіє безпосередньо з лопатями (потіку протікання). В результаті, рідина потоку протікання проходить із всмоктувального патрубку до відводу насоса без взаємодії з лопатями робочого колеса вільновихрового насоса [13].

Згідно попередніх досліджень [14], теоретична модель робочого процесу у вільновихровому насосі передбачає, що основними його компонентами є лопатевий і вихровий робочі процеси. Встановлено відсотковий склад витрати, котра бере участь в кожному з них. Підраховано максимальний теоретично досяжний ККД вільновихрового насоса. Однак дана розрахункова модель буде справедливою лише у випадку, коли ширина вільної камери насоса B , буде рівною ширині лопатей робочого колеса b_2 . При цьому варто зазначити, що робоче колесо розташовується в циліндричній розточці корпусу.

У тому ж випадку, коли ширина лопатей робочого колеса b_2 перевищує ширину вільної камери, центр тороподібного вихору буде знаходитися у просторі міжлопатевих каналів робочого колеса. Подібна конструкція є характерною для вільновихрових насосів з низькими коефіцієнтами швидкохідності n_s [15], котрі визначаються за наступною формулою:

$$n_s = \frac{n\sqrt{Q}}{H^{\frac{3}{4}}}$$

де n – частота обертання валу насоса, об/хв, Q – подача насоса, м³/год, H – напір насоса, м

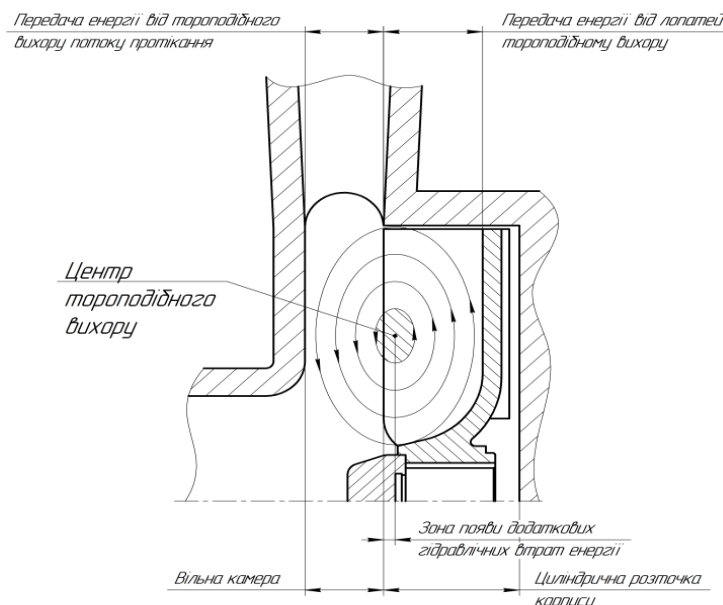


Рис. 3. Схема тороподібного вихору у вільновихрових насосах з низьким коефіцієнтом швидкохідності

В даному випадку потік рідини намагається рухатися від периферії насоса до його центру на проміжку від центру тороподібного вихору до зовнішнього діаметра лопатей робочого колеса. Тим не менше, в результаті силової взаємодії з лопатями в даному діапазоні він відкидається в протилежному напрямку, а саме від центру до периферії. Як наслідок є виникнення деяких додаткових гідравлічних втрат.

Для вільновихрових насосів, котрі мають високий коефіцієнт швидкохідності n_s буде типовим більша ширина вільної камери B порівняно з шириною лопатей робочого колеса b_2 (рис. 4).

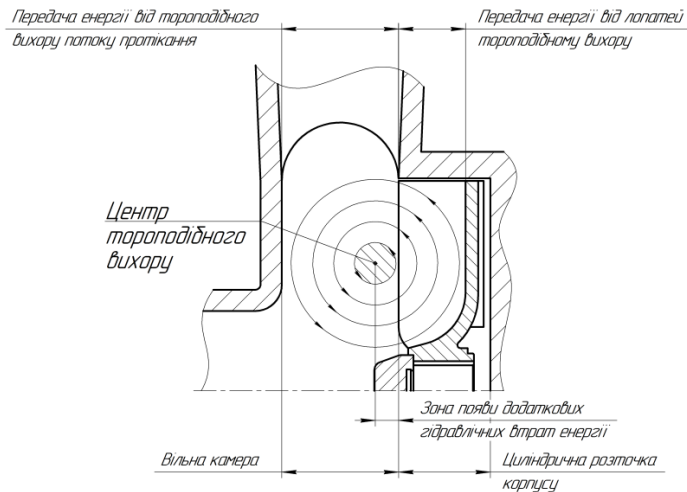


Рис. 4. Схема тороподібного вихору у вільновихрових насосах з високим коефіцієнтом швидкохідності

При цьому центр тороподібного вихору буде знаходитися у просторі вільної камери вільновихрового насоса. Це призводить до того, що тороподібний вихор може деформуватися наступним чином. На проміжку від кромки лопатей до центру тороподібного вихору потік рідини вступає в взаємодію з потоком протікання. Це супроводжується передачею частини енергії від тороподібного вихору потоку протікання. В результаті, енергія тороподібного вихору знижується, а сам він деформується. В даному діапазоні з'являються додаткові втрати гідравлічної енергії, котрі призводять до зниження загального ККД вільновихрового насоса.

Враховуючи усе вище сказане, у роботі пропонується виконувати модернізацію проточної частини за допомогою збільшення ширини лопатей робочого колеса насоса.

Результати числового дослідження

За результатами виконання числового дослідження, проведеного за допомогою програмного комплексу ANSYS CFX, були побудовані залежності ККД та напору вільновихрового насоса (рис. 5, 6).

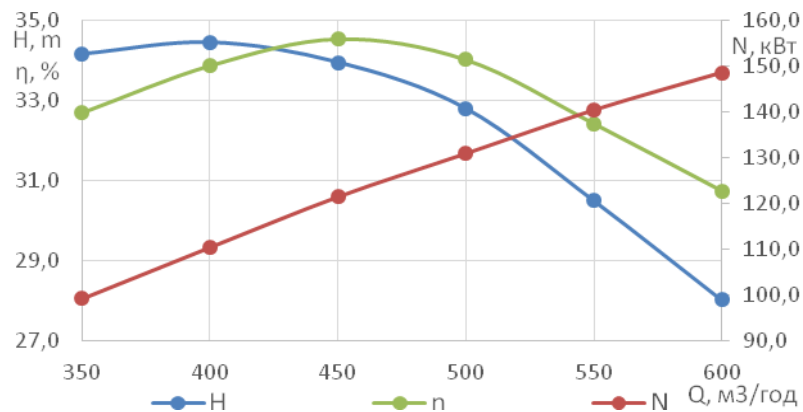


Рис. 5. Залежність напору, ККД та потужності насоса базової конструкції ($\Delta b_2 = 0$ мм) від величини подачі

Досліджуваний насос базової конструкції має ширину лопатей робочого колеса b_2 меншу за ширину вільної камери B . Це характерно для вільновихрових насосів типу «Туго», котрі мають

високий коефіцієнт швидкохідності. В даному випадку частка вихрового робочого процесу є більшою за частку лопатевого робочого процесу. Це є причиною порівняно невисокого значення ККД даного насоса (максимальний теоретично досяжний ККД вихрового робочого процесу приблизно дорівнює 0,5, в той час як лопатевого – 1).

Так на оптимальному режимі маємо:

–Напір: $H_{\text{опт}}^0 = 33,9$ м; ККД: $\eta_{\text{опт}}^0 = 0,345$.

Ще однією з причин зниження ККД пов'язана з деформацією тороподібного вихору, викликаною несиметричністю його розташування щодо лопатей робочого колеса. Як наслідок, центр вихору розташовується у вільній камері. Це призводить до виникнення нерівномірностей силової взаємодії вихору та лопатей, що спричиняє появу додаткових гідравлічних втрат енергії.

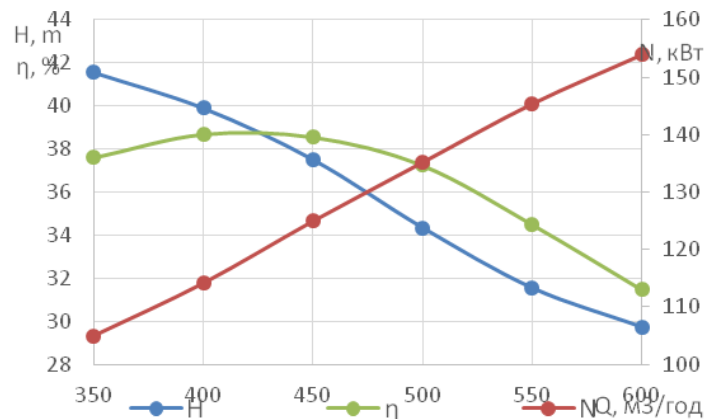


Рис. 6. Залежність напору, ККД та потужності насоса модифікованої конструкції ($\Delta b_2 = +30$ мм) від величини подачі

При збільшенні ширини лопатей робочого колеса до величини $\Delta b_2 = +30$ мм спостерігається плавний ріст напору та ККД вільновихрового насоса.

В результаті отримуємо:

– Напір: $H_{\text{опт}}^{+30} = 39,9$ м; ККД: $\eta_{\text{опт}}^{+30} = 0,387$.

Найбільш вагомими причинами подібного зростання є підвищення ефективності передачі енергії до «рідкої лопаті». При даній модифікації центр тороподібного вихору розташовується неподалік на кромках лопатей робочого колеса. Це забезпечує мінімізацію втрат гідравлічної енергії, пов'язаної з несиметричністю розташування даного вихору по відношенню до лопатей та, відповідно, усуненню його деформації.

Часткове розміщення робочого колеса у вільній камері насоса забезпечує зростання ролі лопатевого робочого процесу. Через те, що відцентрові сили тепер спроможні направляти потік перекачуваної рідини безпосередньо до відводу насоса, то це призводить до збільшення потоку протікання та, відповідно, зменшення циклічності обертання рідини у вільній камері вільновихрового насоса.

Результати експериментальних досліджень

При стендовому дослідженні вільновихрового насоса з модифікованим робочим колесом відносна гранична похибка при визначенні подачі склала 1,27 %, напору – 1,16 %, потужності – 1,23 %. Відносна гранична похибка вимірювання ККД 2,43 %.

Так як при вимірюванні даних параметрів значення відносних граничних похибок не перевищувало максимально допустимі величини, то можемо вважати проведення фізичного експерименту цілком адекватним. Використані контрольно-вимірювальні прилади та методика проведення експерименту забезпечують потрібну точність одержаних результатів фізичного експерименту.

В результаті проведення стендових випробувань було побудовано енергетичні та напірні характеристики насосів базової та модифікованої. На рисунках 5, 6 зображено залежності напору (H), ККД (η) та потужності (N), котрі були отримані шляхом проведення числових розрахунків (індекс «розр»), а також фізичного експерименту (індекс «експ»).

Після проведення аналізу характеристики, що були отримані експериментальним шляхом та співставивши їх із результатами числових досліджень, ми можемо стверджувати, що розбіжність результатів за ККД та напором не перевищує 3%. Можна припустити, що найбільш ймовірною та вагомою причиною отриманих розбіжностей характеристик є неточності в описі робочого процесу вільновихрових та похибки при виготовленні проточних частин досліджуваних вільновихрових насосів.

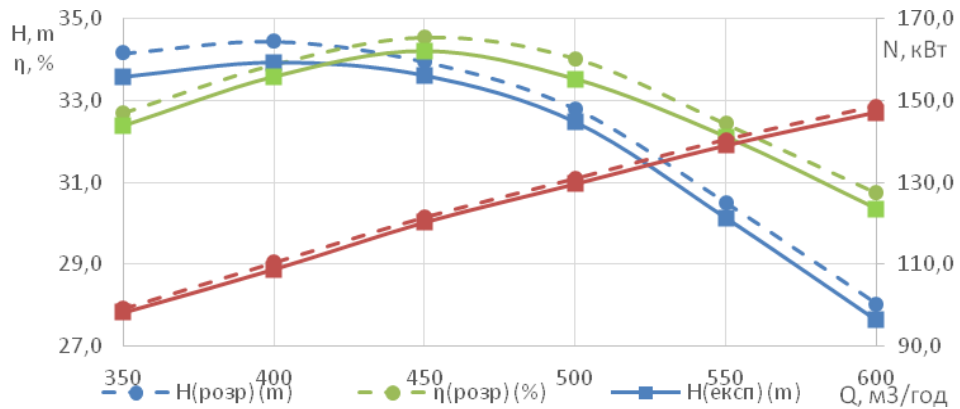


Рис. 7. Залежність напору, ККД та потужності насосу базової конструкції від величини подачі ($\Delta b_2 = 0 \text{ мм}$)

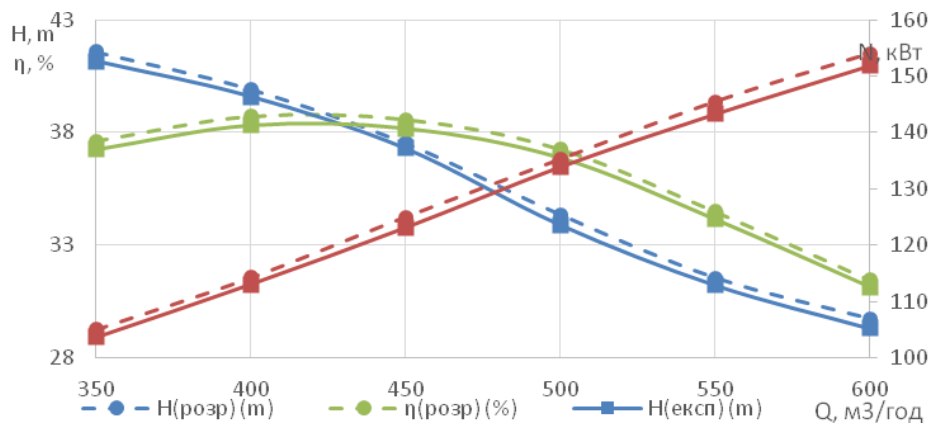


Рис. 8. Залежність напору, ККД та потужності насосу модифікованої конструкції від величини подачі ($\Delta b_2 = +30 \text{ мм}$)

Порівняння розрахункових та експериментально отриманих параметрів на оптимальних режимах роботи внесено до таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння розрахункових та експериментально отриманих параметрів

Варіанти конструкції робочого колеса	Базова конструкції $\Delta b_2 = 0 \text{ мм}$	Модифікована конструкції $\Delta b_2 = +30 \text{ мм}$
$H_{розр}, \text{ м}$	32,8	39,9
$H_{експ}, \text{ м}$	32,5	39,6
$\eta_{розр}, \%$	34,0	38,7
$\eta_{експ}, \%$	33,5	38,1
$\Delta H, \%$	0,9	0,8
$\Delta \eta, \%$	1,5	1,6

Через те що різниця отриманих величин параметрів на аналогічних значеннях подачі насоса не перевищує величину гранично допустимої похибки експериментальних методів досліджень, то одержані результати показують адекватність проведення числових експериментів та можливість їх використання при дослідженнях інших вільновихрових насосів.

Висновки

1. В ході попередніх досліджень та аналізу літературних джерел було встановлено, що одними з причин зниження ККД вільновихрових насосів є наявність одночасно вихрового та лопатевого робочих процесів у перекачуванні рідини а також несиметричність розташування тороподібного вихору відносно лопатей робочого колеса.

2. Було висунуто гіпотезу про можливість усунення даних недоліків шляхом модернізації проточної частини насосу за допомогою зміни ширини лопатей робочого колеса.

3. Проведення числового експерименту показало, що дана модифікація конструкції вільновихрового насосу дозволяє позбутися деформації тороподібного вихору, а також збільшити частку лопатевого робочого процесу у загальному робочому процесі і, як наслідок, підвищити напір та ККД насосної установки.

4. В результаті виконання стендових випробувань досліджуваного насосу було перевірено гіпотези, котрі були висунуті під час проведення аналітичного дослідження та підтверджено результати числових експериментів.

Список використаних джерел:

- [1] A. I. Kotenko, V. F. Herman, and A. A. Kotenko, "Rationalisation of Ukrainian industrial enterprises in a context of using torque flow pumps on the basis of valuation of the life cycle of pumping equipment," *Nauk. i Stud.*, vol. 16, no. 126, pp. 89–91, 2014.
- [2] V. Y. Kondus, R. V. Puzik, V. F. German, V. O. Panchenko, and S. M. Yakhnenko, "Improving the efficiency of the operating process of high specific speed torque-flow pumps by upgrading the flowing part design," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1741, no. 1, p. 12023, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1741/1/012023.
- [3] Y. Imasaka *et al.*, "Clogging mechanisms of vortex pumps: Fibrous material motion capture and simulation with a CFD and DEM coupling method," *Am. Soc. Mech. Eng. Fluids Eng. Div. FEDSM*, vol. 3, pp. 1–10, 2018, doi: 10.1115/FEDSM2018-83503.
- [4] R. V. Puzik, V. Y. Kondus, I. V. Pavlenko, and S. S. Antonenko, "THE INFLUENCE OF THE IMPELLER DESIGN FEATURES ON THE COMBINED OPERATING PROCESS OF THE TORQUE-FLOW PUMP," vol. 2023, pp. 71–76, Apr. 2023, doi: 10.33271/nvngu/20232/071.
- [5] A. A. Евтушенко, "Основы теории рабочего процесса вихревых гидромашин," *Технологические системы*, ч. 2, вип. 13, с. 110–113, 2002.
- [6] A. G. Gusak, I. V. Krishtop, V. F. German, and V. N. Baga, "Increase of economy of torque flow pump with high specific speed," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 233, no. 1, p. 12004, 2017, doi: 10.1088/1757-899X/233/1/012004.
- [7] В. Ф. Герман, А. Г. Гусак, А. А. Евтушенко, В. О. Панченко, "Поиск путей расширения диапазона рабочих параметров свободновихревых насосов типа «Туро»,» *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, вип. № 4(8), с. 33–37, 2011.
- [8] F. Pochylý, P. Rudolf, D. Štefan, P. Moravec, J. Stejskal, and A. Skoták, "Design of a pump-turbine using a quasi-potential flow approach, mathematical optimization and CFD," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 240, no. 7, p. 72043, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/240/7/072043.
- [9] H. Quan, Y. Chai, R. Li, and J. Guo, "Numerical simulation and experiment for study on internal flow pattern of vortex pump," *Eng. Comput.*, vol. 36, no. 5, pp. 1579–1596, Jun. 2019, doi: 10.1108/EC-09-2018-0420.
- [10] H. Quan, Y. Guo, R. Li, Q. Su, and Y. Chai, "Optimization design and experimental study of vortex pump based on orthogonal test," *Sci. Prog.*, vol. 103, no. 1, p. 003685041988188, Jan. 2020, doi: 10.1177/0036850419881883.
- [11] X. Song, R. Yao, L. Chao, and W. Zhengwei, "Study of the formation and dynamic characteristics of the vortex in the pump sump by CFD and experiment," *J. Hydrodyn.*, vol. 33, Dec. 2021, doi: 10.1007/s42241-021-0095-8.
- [12] W. Shi, Y. Shi, X. Gao, D. Zhang, T. Lang, and T. Zhao, "Simulation and Experiment on Flow Characteristics of Large Particles in Vortex Pump Based on DEM-CFD," *Nongye Jixie Xuebao/Transactions Chinese Soc. Agric. Mach.*, vol. 51, no. 10, pp. 176–185, 2020, doi: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.020.
- [13] V. Y. Kondus, P. M. Kalinichenko, and O. G. Gusak, "A method of designing of torque--flow pump

-
- impeller with curvilinear blade profile,” *Eastern-European J. Enterp. Technol.*, vol. 3, no. 8 (93), pp. 29–35, May 2018, doi: 10.15587/1729-4061.2018.131159.
- [14] Р. В. Пузік, В. Ю. Кондусь, І. В. Павленко, А. С. Твердохліб, “Аналіз перспектив зменшення енергоспоживання вільновихрових насосів для перекачування рідин з включеннями,” *НАУКОВІ НОВАТКИ Міжвузівський збірник наукових праць (за галузями знань «Фізико-математичні науки» та «Технічні науки»)*, vol. 75, pp. 113–119, 2023, doi: DOI 10.36910/775.24153966.2023.75.20.
- [15] R. V. Puzik, I. O. Kovalyov, O. V Ratushnyi, T. V Dzafarov, and S. S. Petrenko, “The ways to increase the efficiency of the stage of low specific speed,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1741, no. 1, p. 012013, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1741/1/012013.

М. В. Ямкової

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МЕРЕЖЕВИХ ЛОГІСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Національний лісотехнічний університет України

У роботі досліджено механізми математичного моделювання мережеских логістичних процесів. Підкреслено, що в умовах сьогодення активно використовуються технології взаємодії між різними машинами, швидкісні мережі передачі даних по логістичній системі і необмежений доступ до геолокації, які забезпечують потік даних, що містить повний набір інформації про окрему одиницю товару та логістичні дії з цим товаром у рамках всієї системи. Наголошено, що аналіз та обмін інформацією між усіма учасниками логістичної мережі відбувається на основі цифрової логістичної сітки. Процес побудови та реалізації логістичної сітки засновано на технології збору даних з датчиками та передачею в режимі реального часу за допомогою мобільного зв'язку з метою подальшого аналізу та цифрового обміну даними. У рамках роботи побудовано граф довільної топології логістичної мережі з детальним обґрунтуванням вузлів графу та відповідних їм ребер. Параметризація кожного окремого елемента графу відбувається враховуючи топологію мережі та орієнтації елементів. Сформовано математичну модель яку можна використовувати для оптимізації процесів, що відбуваються в представленій мережескій логістичній структурі. Представлено математичне моделювання для процесів перенесення та формалізації. Рішення крайової задачі покладено на принцип розкладання в ряд із використанням ортонормованої системи власних функцій, зазначається, їх відображає теорія Штурма–Ліувілля. Наголошується, що ефективністю окресленого підходу є можливість вирішення задачі моделювання потоків у мережі, із застосування результату як послідовності для пошуку рішення задач модального керування. У якості перспектив до подальшого дослідження запропоновано розробка програмного додатку та впровадження його на хмарних серверах, що дозволить онлайн взаємодіяти з експедиторами та транспортом безпосередньо в процесі переміщення, незалежно від їх місцезнаходження.

Ключові слова: логістична мережа, аналіз, побудова, математичне моделювання, процес, алгоритм.

M. Yamkovoï

MATHEMATICAL MODELING OF NETWORK LOGISTICS PROCESSES

Mechanisms of mathematical modeling of network logistics processes are investigated in the work. It is emphasized that in today's conditions, technologies of interaction between different machines, high-speed data transmission networks in the logistics system and unlimited access to geolocation are actively used, which provide a data flow containing a complete set of information about a separate unit of the product and logistics actions with this product within the framework of the entire systems. It was emphasized that the analysis and exchange of information between all participants of the logistics network takes place on the basis of a digital logistics network. The process of building and implementing a logistics network is based on the technology of data collection with sensors and real-time transmission via mobile communication for further analysis and digital data exchange. As part of the work, a graph of an arbitrary topology of the logistics network was constructed with a detailed justification of the nodes of the graph and their corresponding edges. The parameterization of each individual element of the graph takes into account the topology of the network and the orientation of the elements. A mathematical model has been formed that can be used to optimize the processes occurring in the presented network logistics structure. Mathematical modeling for transfer and formalization processes is presented. The solution of the boundary value problem is based on the principle of series expansion using an orthonormal system of eigenfunctions, it is noted that they are reflected by the Sturm–Liouville theory. It is emphasized that the effectiveness of the outlined approach is the possibility of solving the problem of modeling flows in the network, using the result as a sequence for finding a solution to modal control problems. As prospects for further research, the development of a software application and its implementation on cloud servers is proposed, which will allow online interaction with forwarders and transport directly in the process of moving, regardless of their location.

Key words: logistic network, analysis, construction, mathematical modeling, process, algorithm.

Вступ та постановка проблеми. За останнє десятиліття широкого поширення набули технології, а також обладнання, здатне кардинально змінити підхід до управління процесами переміщення товарів і вантажів. Це включає в себе можливість автоматизованого обміну інформацією про товари та вантажі між машинами, мобільними обчислювальними пристроями, системами відстеження, хмарними рішеннями, які координують у реальному часі діяльність усіх учасників ланцюжка поставок. Водночас ускладнилася структура відносин між учасниками цього сегменту економіки. Це викликано процеси консолідації в комерційні структури, що призводить до зростання складності модернізації таких бізнес-об'єктів, а також багаторазове збільшення витрат часу та коштів на матеріальні потоки товарів і вантажів, необхідні для підтримки конкурентоспроможного бізнесу. Для вирішення таких об'ємних задач необхідне використання науково обґрунтованих математичних моделей. Такий підхід дозволить використовувати цифровий

відбиток процесів у логістичній мережі та розробити алгоритмічну основу для цілої лінійки програмних засобів задля кращого управління логістичною галуззю.

Дослідницьку прогалину можна виявити в тому, що динаміка дискретних і безперервних потоків матеріальних ресурсів ще не була математично описана у науковій площині. Це пов'язано з тим, що не було поширених і доступних технологій автоматизованого обміну інформацією, особливо в цифровому вигляді. Крім того, існуючий математичний апарат для опису таких процесів системам диференціальних рівнянь у частинних похідних був в основному затребуваний у задачах математичної фізики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукова площина розробок щодо математичного моделювання мережевих логістичних процесів є різномірною та масштабною. Авторами формуються різні підходи присвячені дослідженням математичних алгоритмів та їх реалізації у зазначеній сфері.

В.І. Скілько та Ю.В. Ігнатова [1] розкрили проблеми розв'язку багатоцільових оптимізаційних задач логістики у малому бізнесі. Сформулювали задачу, в якій з'ясується вплив використання 3D-принтерів на кінцевий результат діяльності підприємств малого бізнесу. З метою мінімізації витрат часу на виробництво та підготовку продукції для доставки авторами розроблено відповідну математичну модель багатоцільової оптимізації логістичних процесів підприємства малого бізнесу. В статті [2] описана задача координації рішень на основі вже визначених стратегічних переваг учасників логістичного співтовариства та перерозподілених на випадок можливих збоїв функцій. Така координація дає можливість досягти оптимізації комерційної взаємодії військової частини та її партнерів за логістичним ланцюжком. В роботі за кожним етапом прописаний процес вирішення задачі координації управління в технологічному ланцюжку. Ефективне використання підходів для імітаційного моделювання логістичних процесів розглянув В. Р. Самостян розглянув у праці [3]. Представлена узагальнена структура імітаційної моделі функціонування логістичної системи. Для її реалізації запропоновано використання тривірневого комплексу моделей, що використовують різні парадигми імітаційного моделювання.

І. А. Топалова [4] надано авторське бачення сутності поняття логістичний ланцюг регіональних товарних ринків у вузькому та широкому розумінні; розроблено схему формування логістичних ланцюгів регіональних товарних ринків та визначено їх основні ознаки; розроблено класифікацію принципів формування логістичних ланцюгів регіональних товарних ринків за ознаками: базові вимоги до формування, функціональність, результативність, умови інтеграції, види надходження інформації, умови подальшого розвитку. На основі інтеграційного підходу запропоновано рівні планування ринкових логістичних ланцюгів, їх завдання, методи та очікуваний результат впровадження з позиції стратегічного, тактичного та оперативного рівнів.

Управління якістю логістичних бізнес-процесів автотранспортних підприємств розглянула А. Г. Овчаренко [5].

Із зарубіжних авторів варто відмітити роботи таких науковців як: Лян Хайцзюнь, Гу Цзін [6], Се Фен [7], Рохані Вала, Піраллі Джахан, Могхаввемі Седіге, Геррейро Флавіо, Піньо Тьяго [8], Чжен Чанцзян, Чжан Чен, Ма Цзюньцзе, У Фей, Сунь Кай [9], Праджапаті Раджу, Пал Джаянтіка, Дубей Ом [10], Нагаре Суніл, Бхосале Сурендра, Келкар Шріяш [11], Пен Джин [12], Базан Ехаб, Джабер Мохамад, Заноні Сімоні [13], Саффарі Хамід, Аташгар Карім Мортеза [14], Мін Х. Ян Ц. [15] та інших.

Однак незважаючи на масштабність наукових досліджень питання актуальності дослідження механізмів математичного моделювання мережевих логістичних процесів не викликає сумнівів.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження механізмів математичного моделювання мережевих логістичних процесів.

Викладення основного матеріалу дослідження. Методи лінійного програмування або мережевого планування є добре відомими в умовах сьогодення. Їх використання виправдано в детермінованих задачах розподілу та планування. Сучасне ринкове середовище демонструє високий ступінь невизначеності, що змушує шукати нові шляхи вирішення проблеми ефективної організації логістики.

Значним проривом стали доступні технології міжмашинної взаємодії, мобільні високошвидкісні мережі передачі даних по всіх значущих маршрутах і необмежений доступ до геолокації. Ці та інші пристрої забезпечують потік даних, що містить повний набір інформації про характер товару, його переміщення, терміни придатності, умови утримання та іншу важливу

інформацію. Щоб розробити алгоритми керування, потрібно формально представити, куди ці дані будуть входити у вигляді аргументів математичної моделі.

У цифровій концепції обмін даними відбувається не лише між тими, хто займається комерційною діяльністю, але й з урахуванням очікуваного завантаження терміналів на найближчому горизонті. Так само алгоритм серверу управління враховує трафік в реальному часі та можливості консолідованих транспортних пулів. При цьому обробка даних і прийняття управлінських рішень здійснюється на горизонті планування з використанням методів математичної оптимізації [16]. Сучасна логістична система включає дуже велику кількість учасників торговельної діяльності. Сюди входять виробники, постачальники, проміжні центри розподілу, клієнти та їхні власні склади. Найпоширенішим типом топології на сьогоднішній день є зірка. Це пов'язано з тим, що понад 80% торгівлі консолідовано в торгових мережах. Цей вид бізнесу має централізовану систему управління та розподілу товаро- і вантажопотоків. Слід зазначити, що кожна одиниця зіркоподібної топології в парадигмі логістичних мереж (парадигма розподілу) являє собою ланцюг із сотень або тисяч проміжних вузлів, партнерів логістичної мережі. Аналіз та обмін інформацією між усіма учасниками логістичної мережі здійснюється на основі цифрової логістичної сітки, побудованої на технології збору даних з датчиками та передачею в режимі реального часу за допомогою мобільного зв'язку з метою подальшого аналізу та цифрового обміну даними. Процес налаштування мережі цифрового ланцюга (DC) передбачає реагування на перебої шляхом адаптації конфігурації логістики ланцюга поставок за допомогою оптимізації з метою продовження роботи найкращим чином. Розроблена модель дозволяє аналізувати ринок і своєчасно реагувати на запити клієнтів в умовах динамічного розвитку логістичної мережі, а не статично, як у випадку з лінійною структурою традиційних ланцюгів поставок.

Символ \mathfrak{Z} вводиться для обмеженого компактного графа довільної топології (рис. 1).

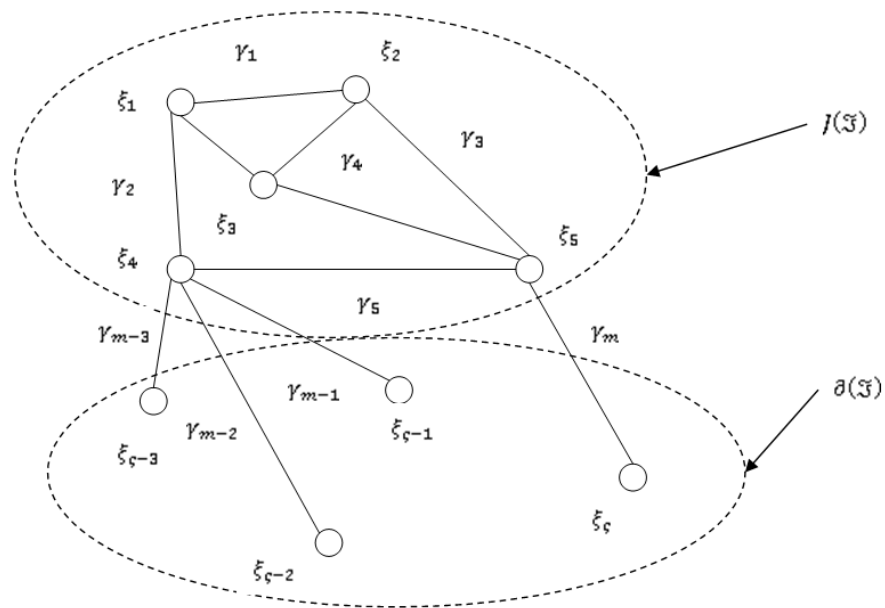


Рис. 1. Граф довільної топології логістичної мережі

Далі ребра цього графа позначаються як γ_k . Вузли графа позначаються символом ξ_c . Кількість граничних вузлів позначається як $A[\mathfrak{Z}]$; ряд внутрішніх вузлів $J(\mathfrak{Z})$. Кожен γ_k є орієнтованим ребром. Крім того, кожен γ_k параметризується сегментом. Зазначені властивості для параметризації та орієнтації залежать від топології мережі, яка формалізується за допомогою графа.

Першим прикладом є топологія зірки (рис. 2).

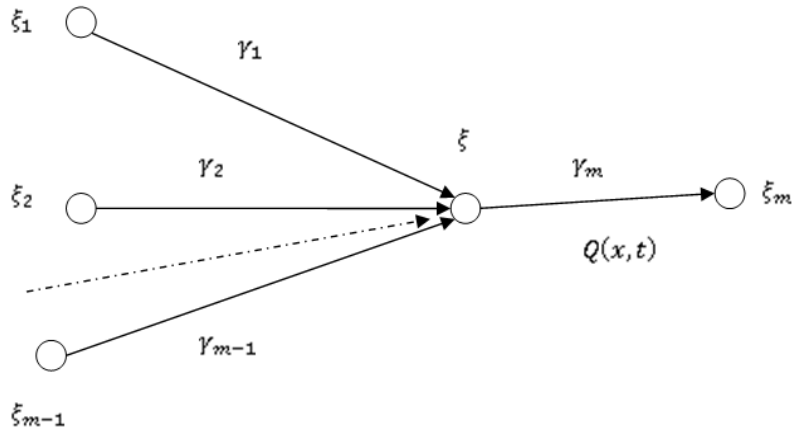


Рис. 2. Граф Γ топологічний, зірка

Різноманіття Γ позначається як геометричний граф Γ , який відображає даний тип взаємодії мережі. Ребра позначаються як $\gamma_k (k = \overline{1, m})$, а центральний вузол як ξ ; для кожного з країв $\gamma_k (k = \overline{1, m - 1})$ здійснюється параметризація відрізком $[0, \pi/2]$. Далі γ_m параметризується сегментом $[\pi/2, \pi]$. Дано орієнтацію на $\gamma_k (k = \overline{1, m - 1})$ – у бік ξ ; на γ_m – від ξ ; стан $x \in \gamma_k$ вводиться по порядку для кожного пункту x на γ_k та має відповідне числове значення $x: 0 \leq x \leq \pi/2$ або $\pi/2 \leq x \leq \pi$ ($x = \pi/2 \in \gamma_k$). Де k для усіх ($k = \overline{1, m}$) фіксується і це доводить, що x належить центру ξ .

Функція $f(x)$ на графіку є скалярною величиною. \mathfrak{S} відображається як $f: \mathfrak{S} \rightarrow R$; символ $f(x)_\gamma$ позначає обмеження $f(x)$ до γ .

Символ $C(\mathfrak{S})$ вводиться для набору функцій, неперервних на графіку \mathfrak{S} . Так само $C[\mathfrak{S}]$ позначає набір кусково-неперервних функцій. Тут необхідно виконати умови: функції на ребрах графа неперервні, в ξ межі можуть змінюватися. $C^2[\mathfrak{S}]$ позначає набір двічі неперервно диференційованих функцій, що задовольняють умову належності похідних до другого порядку множині $C[\mathfrak{S}]$. Тут вони односторонньо диференціюються на кінцях країв.

Лінійне диференціальне рівняння на ребрі розглядається на кривій з довільним поєднанням початкової та граничної похідних функції у вузлі, де існують умови згоди. Група диференціальних рівнянь на ребрах γ_k графа \mathfrak{S} , наприклад:

$$\frac{d}{dx} \left(a(x)_{\gamma_k} \frac{d}{dx} u(x)_{\gamma_k} \right) + b(x)_{\gamma_k} u(x)_{\gamma_k} = f(x)_{\gamma_k} \quad (1)$$

з умовами передачі у внутрішніх вузлах графа з урахуванням орієнтації і параметризація на графу \mathfrak{S} :

$$\sum_{\gamma} a(\alpha)_{\gamma} \frac{d}{dx} u(\alpha)_{\gamma} = 0 \quad (2)$$

є диференціальним рівнянням на графу. В цьому випадку $a(x)_{\gamma_k}, u(x)_{\gamma_k}, b(x)_{\gamma_k}$ це функції визначені для кожного γ_k в процесі. Враховуючи вищесказане, підсумовування проводиться по ребрах γ , прилеглих до α .

Умови (2) можуть бути задані іншими співвідношеннями. У граничних вузлах, що належать граничним ребрам $\tilde{\gamma}$ графа \mathfrak{S} , задані граничні умови, такі як

$$u|_{\partial \mathfrak{S}} = 0 \quad (3)$$

або

$$\alpha(\beta)_{\tilde{\gamma}} \frac{d}{dx} u(\beta)_{\tilde{\gamma}} + hu(\beta)_{\tilde{\gamma}} = 0 \quad (4)$$

Набір лінійних диференціальних рівнянь, наведений вище на ребрах (1) і граничні умови (3) або (4) в граничних вузлах, які доповнюються умовами узгодження у внутрішніх вузлах (2) в цілому, дозволяють сформулювати крайову задачу на графіку. В цьому випадку h, β – параметри визначені в процесі.

Крайові задачі в класі рівнянь із частинними похідними формують аналогічно задачам (1)–(4), додаючи до них початкові умови.

Математичні моделі можна використовувати для оптимізації процесів, що відбуваються в мережних логістичних структурах. У комерційній діяльності беруть участь об'єкти, для формалізації яких залучаються диференціальні рівняння з частинними похідними. До них, перш за

все, відносяться системи з розподіленими параметрами. Ці проблеми виникають у широкому діапазоні застосувань, зокрема, рух по мережах, логістика, розподіл.

Математичні моделі цих об'єктів дозволяють вирішувати важливі питання, що виникають при дослідженні динаміки процесу (основні задачі) і параметрів мережі (обернені задачі).

Розподіл обсягу товарів по сегменту торгової мережі по довжині L описується функцією $Q(x, t), x \in [0, L], t \in [0, T]$ підкоряється рівнянню масопередачі:

$$\frac{\partial}{\partial t} Q(x, t) = \frac{\partial^2}{\partial x^2} Q(x, t) - q(x)Q(x, t)$$

всюди в області $(0, L) \times (0, T)$, виключено набір змін параметрів передачі. Це напівдискретний набір $\{(x, t): x = k \frac{L}{m}, t \in (0, T)\}, k = \overline{1, m-1}$, де змінна x приймає дискретні значення, у яких за будь-яких $t \in (0, T)$ інтенсивність розподілу товарного обсягу $Q(x, t)$ залишається безперервним, тобто $Q(x, t)_{x=k \frac{L}{m}+0} = Q(x, t)_{x=k \frac{L}{m}-0}$, і потік товарного обсягу, який відображається в цю математичну модель величиною в одиницю часу $\frac{\partial}{\partial x} Q(x, t)$ (тут враховується вплив навантаження/розвантаження), зазнає стрибків з показником $a_k, k = \overline{1, m-1}$, тобто $\frac{\partial}{\partial t} Q(x, t)_{x=k \frac{L}{m}+0} - \frac{\partial}{\partial t} Q(x, t)_{x=k \frac{L}{m}-0} = a_k Q(x, t)_{x=k \frac{L}{m}}$. Таким чином, розподіл товарного обсягу по фрагменту комерційної мережі обумовлено властивістю збігу (сполучення) в певних точках (вузлах) торгової мережі:

$$Q(x, t)_{x=k \frac{L}{m}+0} = Q(x, t)_{x=k \frac{L}{m}-0}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} Q(x, t)_{x=k \frac{L}{m}+0} - \frac{\partial}{\partial t} Q(x, t)_{x=k \frac{L}{m}-0} = a_k Q(x, t)_{x=k \frac{L}{m}}$$

тут $k = \overline{1, m-1}$. Співвідношення (2) описують ситуацію, коли умови руху в певних точках (вузлах) впливають на швидкість потоку через ці точки з урахуванням явища стрибка потоків, пропорційного розподілу об'єму товару на вказаних точках.

Для математичного опису та побудови математичної моделі процесу передачі (дифузії) в комерційних мережах використовуються функції з просторовою змінною, що змінюється на графі. У цьому випадку розглянутий найпростіший граф є областю варіації просторової змінної x .

Для розглянутого графа вводиться символ Γ . Його ребра також формалізуються як $\gamma_k (k = \overline{1, m})$. Індеси вузлів $\xi_k (k = \overline{0, m})$. Орієнтація ребер γ_k приймається для кожного ξ_k . Краї параметризовані за допомогою $[(k-1)L/m, kL/m] (k = \overline{1, m})$. Для внутрішніх вузлів, розглянутих у цій топології маси $\xi_k (k = \overline{1, m-1})$, ідентифікація $kL/m (k = \overline{1, m-1})$. Для врахування граничних вузлів мережі, що розглядається, присвоємо кожному з них наступні номери: $\{\xi_0, \xi_m - 0, L\}$. Маючи на меті описати процес потоку в розглянутій мережі та його розподіл: $Q(x, t), (x, t) \in \Gamma \times [0, T]$ можна записати таке співвідношення:

$$\frac{\partial}{\partial t} Q(x, t)_{\gamma_k} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} Q(x, t)_{\gamma_k} - q(x)_{\gamma_k} Q(x, t)_{\gamma_k}$$

Далі, співвідношення для розглянутого $\gamma_k (k = \overline{1, m})$ з урахуванням введеної вище параметризації записуються у такому вигляді:

$$Q(x, t)_{x=k \frac{L}{m} \in \gamma_k} = Q(x, t)_{x=k \frac{L}{m} \in \gamma_{k+1}}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} Q(x, t)_{x=k \frac{L}{m} \in \gamma_k} - \frac{\partial}{\partial t} Q(x, t)_{x=k \frac{L}{m} \in \gamma_{k+1}} = a_k Q(x, t)_{x=k \frac{L}{m} \in \gamma_{k+1}}$$

Це, відповідно, виконується для всіх $\xi_k (k = \overline{1, m-1})$. Для значень $(k = \overline{1, m-1})$ оскільки рівняння (3) і (5) виконуються, то після перетворень виходить:

$$Q(x, t)_{x=k \frac{L}{m} \in \gamma_k} = Q(x, t)_{x=k \frac{L}{m} \in \gamma_{k+1}}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} Q(x, t)_{x=k \frac{L}{m} \in \gamma_k} - \frac{\partial}{\partial t} Q(x, t)_{x=k \frac{L}{m} \in \gamma_{k+1}} = C_k \frac{\partial}{\partial t} Q(x, t)_{x=k \frac{L}{m} \in \gamma_{k+1}}$$

Таким чином, набір рівнянь (4) і (6) дозволяє математичне моделювання процесів перенесення. Потім топологія відповідної мережі формалізується графом Γ .

Для строго математичного опису та розв'язку задачі необхідно задати початкові умови:

$$Q(x, t)_{t=0} = \varphi(x)$$

а також відповідні межі форми:

$$\frac{\partial}{\partial t} Q(x, t)_{x=0 \in \gamma_1} - hQ(x, t)_{x=0 \in \gamma_1} = \mu(t)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} Q(x, t)_{L=0 \in \gamma_m} + HQ(x, t)_{x=L \in \gamma_m} = \nu(t)$$

що повністю визначає крайову задачу разом із (4) і (6) на графі $\Gamma \times [0, T]$.

В цьому випадку $q(x), \varphi(x), \mu(t), \nu(t)$ – це функції, визначені в процесі. У множині α фіксуються відповідні константи $k(k = \overline{1, m-1}), h, H$. Таким чином, в мережі моделюється граф Γ у відповідній області значень $C(\Gamma) \cap C^2[\Gamma]$, сформульовано класичну теорію Штурма–Ліувілля, подвійна межа, визначена відношеннями (4)–(7) або символами (4), (5), (7) і (8) і позначає змінну як y :

$$-y''_{\gamma_k} + q(x)_{\gamma_k} y_{\gamma_k} = \lambda y_{\gamma_k} (k = \overline{1, m})$$

у множині $\gamma_k(k = \overline{1, m})$, тут проблема параметризована набором рівнянь:

$$y'(kL/2)_{\gamma_{k+1}} - y'(kL/2)_{\gamma_k} = y(kL/2)_{\gamma_k}$$

або

$$-y'(kL/2)_{\gamma_{k+1}} + y'(kL/2)_{\gamma_k} = \lambda y(kL/2)_{\gamma_k}$$

визначеними вузлами $\xi_k(k = \overline{1, m-1})$.

Для спектрального параметра λ відповідні граничні умови представлені у вигляді

$$y'(0)_{\gamma_1} - hy(0)_{\gamma_1} = 0$$

$$y'(L)_{\gamma_m} - Hy(L)_{\gamma_m} = 0$$

Системою диференціальних рівнянь на топології зірки Γ буде множина співвідношень (8), (9) (або (8), (10)). Розв'язок крайової задачі (4)–(7) на $\Gamma \times [0, T]$ методологічно можливий шляхом розкладання в ряд із використанням ортонормованої системи власних функцій $\{y_n(x)\}_{n \geq 0}$ які відображає теорія Штурма–Ліувілля (8), (9), (11) та (12) (або (8), (10)–(12)):

$$Q(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} Q_n(t) y_n(x), Q_n(t) = \int_{\Gamma} Q(x, t) y_n(x) dx$$

Функція $Q_n(t)$ диференціюється відповідно до змінної t . Далі, використовуючи співвідношення (8), (9) $Q_n(t)$, і, можливо, (8), (10) на розглянутій топології, відображеній Γ , інтеграли залежать від $\frac{\partial}{\partial t} Q(x, t)$. У результаті це можна записати як

$$Q_n(t) = \sum_{k=1}^m \int_{(k-1)\frac{L}{m}}^{\frac{kL}{m}} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} Q(x, t) - q(x)Q(x, t) \right) y_n(x) dx_{\gamma_k}$$

$$= \sum_{k=1}^m \left(\frac{\partial}{\partial x} Q(x, t) y_n(x) - Q(x, t) y'_n(x) \right)_{(k-1)\frac{L}{m}}^{\frac{kL}{m}}$$

$$- \lambda_n \sum_{k=1}^m \int_{(k-1)\frac{L}{m}}^{\frac{kL}{m}} Q(x, t) y_n(x) dx_{\gamma_k}$$

враховуючи це

$$\int_{\Gamma} p(x) dx = \sum_{k=1}^m \int_{\gamma_k} p(x) dx$$

Застосовуючи $Q(x,t)$, як початкове та граничне значення (7) та (8) відповідно та для $y_n(x)$ рівняння (8) і (9) як для власних функцій, поєднуючи з (11), (12) граничними умовами, необхідними для визначеності задачі (11) і (12), бажаний вираз для $Q_n(t)$ можна отримати, виконавши ($n \geq 0$):

$$Q_n(t) = -\lambda_n Q_n(t) + z_n(t)$$

де

$$z_n(t) = \left(\frac{\partial}{\partial x} Q(L,t) y_n(L) - Q(L,t) y_n'(L) \right) - \left(\frac{\partial}{\partial x} Q(0,t) y_n(0) - Q(0,t) y_n'(0) \right)_{\gamma_k} \\ = v(t) y_n(L)_{\gamma_L} - \mu_k(t) y_n(0)_{\gamma_1}$$

У такому розташуванні для (14) початкові умови досягаються розкладанням $\varphi(x)$ використовуючи набір власних функцій $\{y_n(x)\}_{n \geq 0}$:

$$\varphi(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \varphi_n y_n(x), \varphi_n = \int_{\Gamma} \varphi(x) y_n(x) dx$$

Рішення $Q_n(t)$ впливає з рівняння (14) з урахуванням початкових умов:

$$Q_n(t) = \varphi_n e^{-\lambda_n t} + \int_0^t e^{-\lambda_n(t-\tau)} z_n(\tau) d\tau$$

Рішення $Q(x,t)$ крайової задачі (4)–(7) на $\Gamma \times [0, T]$ має вигляд:

$$Q(x,t) = \sum_{n=0}^{\infty} \varphi_n e^{-\lambda_n t} y_n(x) + \sum_{n=0}^{\infty} \int_0^t e^{-\lambda_n(t-\tau)} z_n(\tau) d\tau y_n(x)$$

Важливим ефектом такого підходу до вирішення задачі моделювання потоків у мережі, представленої у вигляді графа, є можливість застосування результату $Q(x,t)$ як послідовності для пошуку рішення задач модального керування. Це актуально для практичних випадків керування зміною власних значень крайової задачі або режиму досягнення поставлених цілей.

Висновки. У роботі досліджено механізми математичного моделювання мережевих логістичних процесів. Наведено задачу створення алгоритмічних основ ядра цифрової логістичної платформи. Інформаційний потік дає дані про місцезнаходження транспорту, маршрут прямування, характер вантажу, включаючи термін придатності, умови зберігання та транспортування. Математична теорія графів дозволяє формалізувати множину можливих маршрутів, пунктів перевалки, складів проміжного зберігання та розподільних центрів. Зазначена інформація складає аргументи математичної моделі, за вдяки чому стає можливим розрахувати матеріальні потоки товарів і вантажів. Як наслідок, з'являється інструмент для прогнозування всього логістичного процесу і вирішення основної проблеми пошуку найбільш економічно вигідних варіантів організації логістики.

Перспективами подальших досліджень є розробка програмного додатку та впровадження його на хмарних серверах, що дозволить онлайн взаємодіяти з експедиторами та транспортом безпосередньо в процесі переміщення, незалежно від їх місцезнаходження.

Література

1. Скіцько В.І., Ігнатова Ю.В. Моделювання багатоцільових оптимізаційних задач логістики у малому бізнесі / Науковий вісник Ужгородського університету 2016. С. 233-240.
2. Сидоренко І. І. Математичне моделювання логістичних процесів військових частин національної гвардії України в рамках ланцюжків постачання. *Ефективна економіка*. 2021. № 12. – URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=9741> (дата звернення: 06.12.2023). DOI: [10.32702/2307-2105-2021.12.90](https://doi.org/10.32702/2307-2105-2021.12.90)
3. Самостян В. Р. Ефективне використання підходів для імітаційного моделювання логістичних процесів / В. Р. Самостян // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. 2020. № 2. С. 127-134. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ctmbt_2020_2_17.
4. Топалова І. А. Логістичні ланцюги регіональних товарних ринків: проблеми та шляхи формування і планування / Вісник Хмельницького національного університету 2019. № 3. С. 186-193.

5. Овчаренко А.Г. Управління якістю логістичних бізнес-процесів автотранспортних підприємств. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 073 – Менеджмент, (галузь знань 07 – Управління та адміністрування). – Харківський національний автомобільно-дорожній університет Міністерства освіти і науки України; Харківський національний автомобільно-дорожній університет Міністерства освіти і науки України, Харків, 2023. 232 с.
6. Liang Haijun, Gu Jing. (2022). Construction of Mathematical Model of Logistics Delivering Based on Intelligent Mobilization. *Journal of Function Spaces*. 2022. 1-11. 10.1155/2022/7386227.
7. Xie Feng. (2023). Analysis of vehicle paths for sharing e-commerce logistics resources in China. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*. 10.2478/amns.2023.2.00352.
8. Rohani Vala, Peerally Jahan, Moghavvemi Sedigheh, Guerreiro Flavio, Pinho Tiago. (2021). Illustrating scholar–practitioner collaboration for data-driven decision-making in the optimization of logistics facility location and implications for increasing the adoption of AR and VR practices. *The TQM Journal*. ahead-of-print. 10.1108/TQM-06-2021-0194.
9. Zheng Changjiang, Zhang Chen, Ma Junze, Wu Fei, Sun Kai. (2022). Location Selection of Metro-Based Distribution Nodes for Underground Logistics System with Bi-Level Programming Model. *Symmetry*. 14. 2411. 10.3390/sym14112411.
10. Prajapati Raju, Pal Jayantika, Dubey Om. (2022). Transportation problem with restriction on arcs and their Solution by mathematical modeling. *International Journal of Students' Research in Technology & Management*. 10. 67-75. 10.18510/ijstrtm.2022.1015.
11. Nagare Sunil, Bhosale Surendra, Kelkar Shreeyash. (2023). in *Data Analysis and Learning Based Approach for Logistics Optimization DATA ANALYSIS AND LEARNING BASED APPROACH FOR LOGISTICS OPTIMIZATION* 1. 11. 2349-204.
12. Peng Jin. (2019). Mathematical Models for Logistics Network Optimization with Uncertain Data. *ITCC 2019: Proceedings of the 2019 International Conference on Information Technology and Computer Communications*. 93-100. 10.1145/3355402.3355403.
13. Bazan Ehab, Jaber Mohamad, Zanoni Simone. (2015). A review of mathematical inventory models for reverse logistics and the future of its modeling: An environmental perspective. *Applied Mathematical Modelling*. 10.1016/j.apm.2015.11.027.
14. Saffari Hamid, Atashgar Karim, Abbasi Morteza. (2021). Robust Optimization model for forward/revers logistics network Using Design of Experiment.
15. Min H., Yang Q. (2018). Study on modeling and simulation of production logistics system based on flexsim. *Academic Journal of Manufacturing Engineering*. 16. 149-156.
16. Ivashko Larysa. (2023). OPTIMIZATION OF LOGISTICS PROCESS MANAGEMENT IN TRADE. *Market economy: modern management theory and practice*. 21. 360-384. 10.18524/2413-9998.2022.3(52).275817.

В. В. Калініченко, М. С. Мельник

Донбаська державна машинобудівна академія

**АВТОМАТИЗОВАНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМІВ
ТОКАРНОЇ ОБРОБКИ НА ВАЖКИХ ВЕРСТАТАХ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ АНАЛІЗУ
ДАНИХ ДІАГНОСТИКИ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ**

У статті обґрунтовані принципові підходи до вирішення задачі автоматизованого визначення енергоефективних режимів токарної обробки на важких верстатах за результатами аналізу даних про процес різання, отриманих при його діагностиці. З метою практичного вирішення цієї задачі сформульовано принцип роботи та розроблено функціональну схему самонавчальної системи для автоматизованого визначення енергоефективних режимів токарної обробки.

Ключові слова: токарна обробка на важких верстатах, режими різання, енергоефективність, автоматизований розрахунок, діагностика, аналіз даних, самонавчальна система.

V. V. Kalinichenko, M. S. Melnyk

**AUTOMATED DETERMINATION OF ENERGY-EFFICIENT TURNING MODES ON
HEAVY MACHINES BASED ON THE RESULTS OF ANALYSIS OF CUTTING PROCESS
DIAGNOSTIC DATA**

The article substantiates the principal approaches to solving the problem of automated determination of energy-efficient turning modes on heavy machines based on the results of the analysis of data on the cutting process obtained during its diagnosis. A general sequence for determining energy-efficient turning modes is presented, which provides for an automated calculation of modes based on dependencies built on the basis of the criterion of the minimum specific energy intensity of cutting, analysis of processing data obtained in the form of an array of diagnostic signals about the real cutting process and subsequent correction of the calculated dependencies based on the results of diagnostic data analysis. In order to solve the problem under consideration, a self-learning system for automated determination of energy-efficient turning modes is proposed. The principle of operation of the self-learning system has been formulated, and its functional scheme has been developed. The expected effect of the introduction of a self-learning system is formulated.

Keywords: turning on heavy machines, cutting modes, energy efficiency, automated calculation, diagnostics, data analysis, self-learning system.

Постановка проблеми. Однією з найактуальніших проблем машинобудівної галузі України є проблема підвищення енергоефективності виробничих процесів, чільне місце серед яких посідають процеси механічної обробки. З особливою гостротою зазначена проблема стоїть для високоенерговитратних процесів токарної обробки на важких верстатах. Заходи з практичного вирішення цієї проблеми мають передбачати забезпечення енергоефективних умов обробки [1]. Ключовим моментом при цьому є визначення енергоефективних режимів різання. Моделі для автоматизованого розрахунку таких режимів мають будуватися на використанні критеріїв оптимізації, пов'язаних з величиною енерговитрат у зоні різання. Особливістю токарної обробки на важких верстатах є значна кількість чинників, вплив яких на процес різання важко передбачити заздалегідь [2]. Врахування впливу цих чинників при визначенні енергоефективних режимів обробки може здійснюватися за результатами аналізу об'єктивних даних про процес різання, отриманих при його діагностиці. Відтак, набуває актуальності розробка методів та систем для автоматизованого визначення енергоефективних режимів токарної обробки на важких верстатах за результатами аналізу даних діагностики процесу різання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Широкому колу різнопланових питань, пов'язаних з енергоефективністю механічної обробки, присвячені роботи В. К. Старкова [3], А. В. Карпова [4–6], Д. Ю. Федориненка [7], Ж. А. Мрочка та співавторів [8], В. С. Гусарева та Ю. В. Ярового [9, 10], К. Grobmann [11], А. Vijayaraghavan та D. Dornfeld [12] та інших авторів. Різні дослідники пропонують у своїх роботах різні шляхи та способи підвищення енергоефективності процесів механічної обробки. Наприклад, у роботі [7] проаналізовані перспективні шляхи підвищення енергоефективності верстатного обладнання механічної обробки та запропонована оригінальна методологія підвищення енергоефективності верстатів на основі системного підходу до проектування їхніх конструкцій. Методологічні та практичні аспекти, що стосуються проектування та автоматизованого моніторингу роботи енергоефективного

верстатного обладнання, розглядаються у роботах [11, 12]. У роботі [8] наголошується на тому, що енергоощадна механічна обробка має базуватись на максимальному використанні активної потужності електродвигуна привода головного руху верстата. Разом з тим, у роботах [3–6, 9, 10] вирішення проблеми підвищення енергоефективності механічної обробки розглядається крізь призму забезпечення енергоефективних умов та параметрів процесу різання. Зниження витрат енергії на перебіг фізичних процесів у зоні різання досягається при цьому за допомогою оптимізації режимів обробки за критеріями, пов'язаними з рівнем енерговитрат при різанні.

Обґрунтований вибір критеріїв оптимізації є ключовою проблемою при створенні оптимізаційних моделей процесів механічної обробки. У практиці вирішення задач призначення режимів різання знаходять використання різні за своєю сутністю критерії оптимізації. Так, Ю. В. Яровий [13], виконуючи аналіз відомих критеріїв оптимізації технологічних процесів для операцій механічної обробки, класифікував їх на три наступні групи: 1) техніко-економічні (наприклад, собівартість, продуктивність, приведені витрати); 2) фізичні (оптимальна температура різання, інтенсивність зношування інструменту); 3) енергетичні (питома енергомідкість різання, енергетичний критерій якості, енергетичний коефіцієнт корисної дії процесу різання).

У оптимізаційних моделях процесів токарної обробки на важких верстатах традиційно найбільш широко використовують техніко-економічні критерії оптимізації [14]. Використання ж енергетичних критеріїв є обмеженим, попри високий рівень енерговитрат для вказаних процесів. Разом з тим, у роботі [15] відзначається, що моделі високоенерговитратних процесів токарної обробки на важких верстатах обов'язково повинні включати критерії оптимізації, пов'язані з рівнем енерговитрат при різанні. У роботі [16] до таких критеріїв були віднесені, зокрема, критерії мінімуму питомої енергомідкості різання $e \rightarrow \min$ [4], максимуму енергетичного коефіцієнта корисної дії процесу різання $K \rightarrow \max$ [5], максимуму безрозмірного енергетичного критерію для високоенерговитратних процесів чорнвої обробки $q_{\text{чорн}} \rightarrow \max$ [4], мінімуму критерію дії технологічної системи $D \rightarrow \min$ [10]. У вказаних роботах наведені характеристики критеріїв та математичні вирази для їхнього визначення.

Відзначена у [2, 17] відмінність реальних умов токарної обробки на важких верстатах від нормативних, зумовлена слабкопрогнозованим впливом значної кількості різних чинників на процес обробки, суттєво ускладнює автоматизоване визначення енергоефективних режимів різання за відповідними розрахунковими моделями. Разом з тим, можливості сучасних комп'ютерних та діагностичних засобів дозволяють забезпечити автоматизацію розрахунку режимів обробки з урахуванням результатів аналізу даних про вихідні параметри реального процесу різання, отриманих при його діагностиці [18]. Практична реалізація зазначеного підходу передбачає розробку самонавчальних систем (СНС) для автоматизованого визначення енергоефективних режимів обробки за результатами аналізу даних діагностики процесу різання.

Мета роботи – обґрунтувати принципові підходи до вирішення задачі автоматизованого визначення енергоефективних режимів токарної обробки на важких верстатах за результатами аналізу даних діагностики процесу різання; сформулювати принцип роботи та розробити функціональну схему самонавчальної системи для практичного вирішення цієї задачі.

Виклад основного матеріалу дослідження. Вирішення задачі автоматизованого визначення енергоефективних режимів токарної обробки на важких верстатах пропонується здійснювати шляхом розробки та реалізації оптимізаційної моделі, побудованої на базі використання енергетичного критерію оптимізації, що враховує питомі витрати енергії на перебіг фізичних процесів у зоні різання [15]. Такий критерій в залежності від специфіки поставленої задачі може бути єдиним критерієм оптимізації або враховуватися у якості складової при формуванні комплексного критерію багатокритеріальної оптимізації процесу обробки.

За результатами аналізу запропонованих у [3–6, 9, 10] енергетичних критеріїв оптимізації для використання у математичній моделі процесу токарної обробки на важких верстатах був обраний критерій мінімальної питомої енергомідкості різання, представлений у [16] як:

$$e = \frac{A_{\text{різ}}}{V} = \frac{N_{\text{еф}}}{P_{\text{різ}}} = \frac{N_{\text{еф}}}{v \cdot S \cdot t} \rightarrow \min, \quad (1)$$

де $A_{\text{різ}}$ – робота різання; V – об'єм зрізаного шару матеріалу заготовки, перетворюваного на стружку; $N_{\text{еф}}$ – ефективна потужність різання; $P_{\text{різ}}$ – продуктивність різання (об'єм матеріалу стружки, що видаляється за одиницю часу); v – швидкість різання; S – подача; t – глибина різання.

У якості переваг обраного критерію у роботах [3–5, 16] відзначені: чіткий фізичний сенс, універсальність, відносна простота визначення, беззаперечна доцільність у разі знаходження

умовних екстремумів техніко-економічних критеріїв на межі припустимих значень оптимізовуваних параметрів. Відомий монотонний характер залежностей питомої енергомідкості різання від подачі та швидкості різання [3] не вимагає спеціальних процедур пошуку екстремуму значення цільової функції у просторі можливих рішень. Використання ж альтернативних енергетичних критеріїв є більш доцільним не так для мінімізації величини енерговитрат на зняття стружки та утворення обробленої поверхні, як для вирішення інших задач, наприклад, виявлення резервів підвищення частки «корисної» складової роботи різання в загальному енергетичному балансі зони різання (критерії $K \rightarrow \max$, $q_{\text{чорн}} \rightarrow \max$) чи порівняння енергоефективності різних технологічних методів обробки (критерій $D \rightarrow \min$) [16].

Пропонована оптимізаційна модель розроблялась з урахуванням специфіки високоенерговитратних процесів токарної обробки на важких верстатах з ЧПК. Складнощі у проведенні експериментальних досліджень енергоефективності таких процесів, значні витрати матеріальних ресурсів та часу на них зумовили максимально повне використання апріорної інформації (в тому числі даних нормативів режимів різання [19]) при створенні моделі для визначення енергоефективних режимів обробки. Результати аналізу даних діагностики реальних випадків обробки при виконанні виробничої програми випуску деталей в подальшому мають стати основою для корегування моделі, початково розробленої на базі апріорної інформації.

Цільова функція пропонованої моделі процесу обробки матиме загальний вигляд [15]:

$$e = \min\{f(x, \omega) | x \in D\}, \quad (2)$$

де x – керовані параметри процесу обробки; ω – постійні вхідні параметри процесу обробки; D – область припустимих значень керованих параметрів.

Керованими параметрами процесу обробки у пропонованій моделі відповідно до [15] визначені частота n обертання шпинделю верстата та подача S різця, значення яких задаються керуючою програмою ЧПК. Безступінчасте регулювання значень n та S на сучасних важких верстатах з ЧПК дозволяє здійснювати пошук оптимальних значень керованих параметрів моделі у безперервному просторі значень, обмеженому областю D . Інші задані технологом параметри враховувались як вхідні і приймали фіксовані значення для заданого i -го випадку обробки.

Відповідно до виразу (1) та відомої пропорційної залежності ефективної потужності N_{ef} різання від величини тангенціальної складової P_z сили різання, мінімізація енерговитрат на зняття стружки та утворення обробленої поверхні деталі забезпечується за рахунок чинників, що знижують силове навантаження у зоні різання при зменшенні величини P_z . Відтак, реалізація моделей для автоматизованого визначення енергоефективних режимів різання має передбачати вираження зв'язку питомої енергомідкості різання з керованими та вхідними параметрами процесу обробки (КВППО) через ступеневі залежності P_z від цих параметрів. КВППО мають відповідати таким умовам обробки, що забезпечують мінімізацію P_z . Перспективними чинниками зниження силового навантаження у зоні різання можуть бути, зокрема, використання різального інструменту з покриттям [20] та полегшення умов деформації матеріалу заготовки при введенні додаткової теплової енергії (наприклад, при електроконтактному нагріванні матеріалу) [21].

З урахуванням положень і рекомендацій роботи [6] та відомих розрахункових методик теорії різання формула для визначення питомої енергомідкості різання при поздовжньому точінні циліндричних поверхонь деталей (для попередніх проходів) матиме наступний загальний вигляд:

$$e = \left(C_e \cdot \frac{\pi^{n_{P_z}}}{1000^{n_{P_z}}} \cdot C_{P_z} \cdot K_{P_z} \right) \cdot \frac{D^{n_{P_z}} \cdot n^{n_{P_z}}}{t^{1-x_{P_z}} \cdot S^{1-y_{P_z}}}, \quad (3)$$

де C_e – коефіцієнт, що являє собою добуток постійних чисел у формулі для визначення величини e через відношення $\frac{A_{\text{різ}}}{V}$ (за винятком C_{P_z} , K_{P_z}); C_{P_z} – коефіцієнт, що враховує вплив незмінних умов обробки на величину P_z ; K_{P_z} – поправочний коефіцієнт на величину P_z ; D – діаметр обробки; n – частота обертання шпинделю верстата; t – глибина різання; S – подача різця; n_{P_z} , u_{P_z} , x_{P_z} – показники ступеня, що відображають залежність величини P_z відповідно від величини v , S , t .

Можливість використання інструменту з покриттям та електроконтактного нагрівання матеріалу заготовки з метою зниження силового навантаження у зоні різання зумовлює потребу врахування у формулі для визначення K_{P_z} [19] додаткових поправочних коефіцієнтів.

Відтак, значення поправочного коефіцієнта K_{P_z} у формулі (3) дорівнюватиме:

$$K_{P_z} = K_{M_{P_z}} \cdot K_{\varphi_{P_z}} \cdot K_{\gamma_{P_z}} \cdot K_{\lambda_{P_z}} \cdot K_{r_{P_z}} \cdot K_{\Pi_{P_z}} \cdot K_{E_{P_z}}, \quad (4)$$

де $K_{M_{P_z}}, K_{\varphi_{P_z}}, K_{\gamma_{P_z}}, K_{\lambda_{P_z}}, K_{r_{P_z}}, K_{\Pi_{P_z}}, K_{E_{P_z}}$ – поправочні коефіцієнти, що враховують вплив на величину P_z відповідно: механічних властивостей оброблюваного матеріалу ($K_{M_{P_z}}$), головного кута φ у плані різця ($K_{\varphi_{P_z}}$); переднього кута γ різця ($K_{\gamma_{P_z}}$); кута λ нахилу головної різальної кромки різця ($K_{\lambda_{P_z}}$); радіуса r_B при вершині різця ($K_{r_{P_z}}$); покриття різальної пластини ($K_{\Pi_{P_z}}$); режимів електроконтактного нагрівання матеріалу заготовки (сили електричного струму та напруги) ($K_{E_{P_z}}$).

Аналіз особливостей досліджуваних процесів обробки дозволив окреслити область D моделі (2) обмеженнями за заданою стійкістю різця та міцністю різальної пластини, що згідно з відомими розрахунковими методиками матимуть вигляд:

$$v \leq \frac{C_v}{T_H^{m_v} \cdot S^{y_v} \cdot t^{x_v}} \cdot K_v; \quad (5)$$

$$P_z \leq 333,2 \cdot t^{0,77} \cdot c^{1,35} \cdot \left(\frac{\sin 60^\circ}{\sin \varphi} \right)^{0,8}, \quad (6)$$

де C_v – коефіцієнт, що враховує вплив незмінних умов обробки на швидкість різання; T_H – нормативний період стійкості різця; m_v, y_v, x_v – показники ступеня, що відображають вплив відповідно заданого періоду T стійкості різця, подачі S та глибини t різання на швидкість різання; $K_v = K_{M_v} \cdot K_{z_v} \cdot K_{\gamma_{\%v}} \cdot K_{\text{чПК}_v} \cdot K_{\varphi_v} \cdot K_{\varphi_{1v}} \cdot K_{\text{МОР}_v}$ – поправочний коефіцієнт на швидкість різання; $K_{M_v}, K_{z_v}, K_{\gamma_{\%v}}, K_{\text{чПК}_v}, K_{\varphi_v}, K_{\varphi_{1v}}, K_{\text{МОР}_v}$ – поправочні коефіцієнти, що враховують вплив на швидкість різання відповідно: механічних властивостей оброблюваного матеріалу (K_{M_v}), стану поверхні заготовки (K_{z_v}), імовірності безвідмовної роботи різця ($K_{\gamma_{\%v}}$), обробки на верстатному обладнанні з ЧПК ($K_{\text{чПК}_v}$), головного кута φ у плані різця (K_{φ_v}), допоміжного кута φ_1 у плані різця ($K_{\varphi_{1v}}$), мастильно-охолоджуючої рідини ($K_{\text{МОР}_v}$); c – товщина різальної пластини; φ – головний кут різця у плані.

Вищевикладена логіка представлення математичних виразів оптимізаційної моделі процесу обробки передбачає представлення обмежень (5–6) у вигляді ступеневих виразів типу $n^{n_v} \cdot S^{y_v} \leq p_1, n^{n_{P_z}} \cdot S^{y_{P_z}} \leq p_2$, де $n_v, y_v, n_{P_z}, y_{P_z}$ – показники ступеня; p_1, p_2 – числа.

Значення коефіцієнтів та показників ступеня у формулах (3–5) приймаємо згідно з [19], за винятком $K_{\Pi_{P_z}}$ та $K_{E_{P_z}}$, що мають визначитися за результатами окремих досліджень.

Успішна реалізація запропонованої моделі процесу обробки передбачає наявність точних даних про значення усіх КВППО, а також коефіцієнтів та показників ступеня у ступеневих залежностях $v = f(T, S, t), P_z = f(v, S, t)$, використовуваних при розробці розрахункових формул моделі. Особливе значення має точність визначення тангенціальної складової P_z сили різання, адже зв'язок питомої енергомосткості різання з КВППО при розробці розрахункових формул моделі виражається саме через ступеневі залежності $P_z = f(v, S, t)$. Реалізація розрахункових алгоритмів моделі вимагатиме і точних даних про реальне значення частоти n обертання шпинделю, що використовуватиметься при розрахунку питомої енергомосткості різання.

У якості обставин, що ускладнюють здійснення токарної обробки на важких верстатах на енергоефективних режимах, автори у [2, 17] відзначають: відмінність реальних умов обробки від нормативних внаслідок дії факторів, вплив яких на процес обробки важко передбачити заздалегідь (це, зокрема, динамічний стан верстата, нестабільність властивостей матеріалів заготовки та інструменту, інших показників фактичного стану технологічної системи зі слабопрогнозованим впливом на процес обробки); вплив суб'єктивного фактору при врахуванні реальних умов обробки верстатником безпосередньо на робочому місці; відсутність необхідних нормативних даних. Тому автоматизоване визначення енергоефективних режимів обробки має враховувати об'єктивні дані про вихідні параметри процесу обробки, отримані при його діагностиці у реальному часі [17].

Відтак, загальна послідовність визначення енергоефективних режимів токарної обробки на важких верстатах передбачає автоматизований розрахунок режимів за залежностями, побудованими на базі критерію мінімальної питомої енергомосткості різання з використанням апріорної інформації, аналіз даних про обробку, отриманих у вигляді масиву діагностичних сигналів про вихідні параметри реальних процесів різання та подальшу корекцію розрахункових залежностей оптимізаційної моделі за результатами цього аналізу.

З метою практичної реалізації наведеної послідовності дій авторами запропоновано самонавчальну систему (СНС) для автоматизованого визначення енергоефективних режимів токарної обробки на важких верстатах. Принцип роботи СНС полягає у наступному. Згідно з [22], до пам'яті обчислювального пристрою (ОП) системи за допомогою панелі оператора вводяться передбачені алгоритмом реалізації моделі процесу обробки формули для розрахунку енергоефективних значень подачі S_e та частоти n_e обертання шпинделю, а також значення необхідних для розрахунку вхідних параметрів. Коефіцієнти та показники ступеня у використовуваних у моделі залежностях $v = f(T, S, t)$ та $P_z = f(v, S, t)$ автоматично визначаються за табличними даними бази знань (БЗ) СНС і теж вводяться до пам'яті ОП СНС. Зміст інформації про параметри процесу обробки, що вводиться до пам'яті ОП СНС перед початком розрахунку, наведений у таблиці 1 (позначення коефіцієнтів та показників ступеня відповідають [19]).

Табл. 1

Зміст інформації про параметри процесу обробки, що вводиться до пам'яті обчислювального пристрою самонавчальної системи перед початком розрахунку режимів обробки

Параметр процесу обробки	Джерело інформації про значення параметру
Інформація про вхідні параметри процесу обробки	
Марка оброблюваного матеріалу	Технологічний процес (ТП) обробки деталі
Марка інструментального матеріалу	
Різновид та стан оброблюваної поверхні заготовки	
Наявність та тип покриття різального інструменту	ТП обробки деталі, інформація виробників інструменту
Нормативний (заданий) період T_H (T_3) стійкості різця, хв	Нормативи режимів різання, інформація виробників інструменту
Глибина t різання, мм	ТП обробки деталі
Діаметр D обробки, мм	
Товщина s різальної пластини, мм	Довідкова література, інформація виробників інструменту
Головний кут φ різця у плані, °	
Допоміжний кут φ_1 різця у плані, °	
Передній кут γ різця, °	
Кут λ нахилу головної різальної кромки різця, °	
Радіус r_B при вершині різця, мм	
Межа σ_B міцності на розтяг оброблюваної сталі, МПа	Результати вимірювань величин σ_B та HV для матеріалу заготовки
Твердість оброблюваного матеріалу, HV	
Імовірність безвідмовної роботи різця γ_0 , %	Нормативи режимів різання, вимоги до надійності технологічної системи
Технологічні режими електроконтактного нагрівання матеріалу заготовки (сила I електричного струму, А; електрична напруга U , В)	Результати експериментальних досліджень токарної обробки з електроконтактним нагріванням матеріалу заготовки
Приведена жорсткість $J_{прив}$ системи «супорт–різець» верстата, Н/мм	Результати експериментальних досліджень характеристик жорсткості системи «супорт–різець» та розрахунку $J_{прив}$
Наявність та тип мастильно-охолоджуючої рідини	ТП обробки деталі
Коефіцієнти та показники ступеня у залежностях $v = f(T, S, t)$ та $P_z = f(v, S, t)$	
Коефіцієнти C_v , C_{P_z} у відповідних залежностях	Нормативи режимів різання, довідкова література
Показники ступеня m_v , γ_v , x_v , n_{P_z} , U_{P_z} , x_{P_z} у відповідних залежностях	

Поправочні коефіцієнти $K_{M_v}, K_{z_v}, K_{\gamma_{\%v}}, K_{\text{чПК}_v}, K_{\phi_v}, K_{\phi_{1v}}, K_{\text{МОР}_v}, K_{\text{МР}_z}, K_{\phi_{P_z}}, K_{\gamma_{P_z}}, K_{\lambda_{P_z}}, K_{\Gamma_{P_z}}, K_{\Pi_{P_z}}, K_{E_{P_z}}$ у формулах для визначення K_v, K_{P_z}	Визначення за табличними даними БЗ в залежності від відповідних вхідних параметрів процесу обробки
---	--

Представлений у табл. 1 зміст, за необхідності, доповнюється інформацією про інші вхідні параметри процесу обробки, вплив яких на рівень питомих енерговитрат у зоні різання для заданих умов процесу встановлено за результатами попередніх досліджень. Відповідно, структура БЗ СНС передбачатиме можливість доповнення новими табличними файлами для визначення показників ступеня (коефіцієнтів) у залежностях, що враховують вплив цих вхідних параметрів.

Реалізація розрахункових алгоритмів моделі дозволяє вирахувати значення S_e та n_e , за якими і має здійснюватися енергоефективна обробка деталі.

Збирання даних про вихідні параметри процесу обробки здійснюється вимірювально-діагностичними засобами (ВДЗ) СНС у реальному часі. Діагностичні сигнали цифрового формату передаються від ВДЗ до ОП СНС безпосередньо, сигнали аналогового формату – після перетворення аналогово-цифровим перетворювачем (АЦП) на сигнали цифрового формату.

Вище йшлося про важливість наявності точних даних про реальні значення частоти n обертання шпинделю та тангенціальної складової P_z сили різання для успішної реалізації моделі. Втім, особливості досліджуваної обробки, зокрема вплив динамічних процесів у технологічній системі, спричиняються до відмінності реальних значень n та P_z від розрахункових. Так, фактори, пов'язані з впливом коливань заготовки при обробці, зумовлюють відмінність у загальному випадку реальної частоти n_i обертання шпинделю для i -го випадку обробки від розрахункового значення $n_{\text{розр}}$. Вплив вібраційних процесів у системі «супорт–різець» верстата зумовлює непостійність реального значення P_{z_i} для i -го випадку обробки. Представимо значення P_{z_i} як суму незалежної від характеристик вібрацій у системі «супорт–різець» постійної складової $P_{z_{\text{пост}_i}}$ та змінної складової $P_{z_{\text{зм}_i}}$, яка визначається амплітудою $A_{\text{різ}_i}$ вібропереміщення вершини різця. Значення $A_{\text{різ}_i}$ отримуємо подвійним інтегруванням амплітуди A_{a_i} віброприскорення вершини різця за часом τ . Добуток $A_{\text{різ}_i}$ на приведену жорсткість $j_{\text{прив}}$ системи «супорт–різець» дає амплітудне значення змінної складової $P_{z_{\text{зм}_i}}$:

$$P_{z_{\text{зм}_i}} = j_{\text{прив}} \cdot \iint A_{a_i} d\tau d\tau. \quad (7)$$

Сучасна практика токарної обробки на важких верстатах характеризується все частішим використанням нових оброблюваних та інструментальних матеріалів. При цьому, як у нормативах режимів різання, так і у каталогах фірм-виробників різального інструменту відсутня інформація про значення коефіцієнтів та показників ступеня у залежностях $v = f(T, S, t)$ та $P_z = f(v, S, t)$ для токарної обробки саме з використанням цих нових оброблюваних та інструментальних матеріалів. Зазначена обставина суттєво ускладнює отримання розрахункових формул моделі для визначення енергоефективних режимів обробки. За відсутності рекомендацій щодо нормативних режимів різання автори пропонують використовувати при розробці розрахункових формул моделі ступеневі залежності $v = f(T, S, t)$ та $P_z = f(v, S, t)$, отримані для умов обробки, що відповідають оптимальній температурі різання $\Theta_{\text{різ}_{\text{опт}}}$ для заданої пари «інструментальний–оброблюваний матеріал». Отримання цих залежностей можливе за результатами експериментальних досліджень з реєстрацією значень температури різання $\Theta_{\text{різ}}$ для випадків обробки з різними значеннями КВППО. Математична обробка результатів цих експериментів за спеціально розробленими алгоритмами з наступним визначенням $\Theta_{\text{різ}_{\text{опт}}}$ для заданої пари «інструментальний–оброблюваний матеріал» також може бути виконана за допомогою можливостей пропонованої СНС; інформація про результати досліджень при цьому має заноситися до відповідних табличних файлів БЗ СНС.

Таким чином, у якості інформативних вихідних параметрів реального процесу токарної обробки, значення яких для кожного i -того випадку обробки з заданим набором значень керованих та вхідних параметрів мають реєструватися ВДЗ та аналізуватися у ОП СНС, визначені: реальна частота n_i обертання шпинделю верстата; значення постійної складової $P_{z_{\text{пост}_i}}$ тангенціальної сили різання; значення амплітуди A_{a_i} віброприскорення вершини різця; температура $\Theta_{\text{різ}_i}$ різання.

У разі, якщо i -тий випадок обробки характеризується новим набором значень вхідних параметрів (НЗВП), дані про який відсутні у БЗ СНС, за заданим алгоритмом ОП СНС попередньо

визначає розрахункові значення енергоефективних подачі $S_{\text{ерозр}}$ та частоти обертання шпинделю $n_{\text{ерозр}}$ і вводить їх до програми ЧПК. Відомості про НЗВП, як і відповідні до нього значення коефіцієнтів та показників ступеня у розрахункових формулах для визначення $S_{\text{ерозр}}$ та $n_{\text{ерозр}}$ заносяться до БЗ СНС. Якщо ж НЗВП i -го випадку обробки вже був занесений до БЗ СНС, то обробка здійснюється з раніше розрахованими для цього НЗВП значеннями $S_{\text{ерозр}}$ та $n_{\text{ерозр}}$.

Реєстрація діагностичних сигналів зі значеннями n_i , $P_{z_{\text{пост}_i}}$, A_{a_i} , $\Theta_{\text{різ}_i}$ для кожного i -го випадку обробки, здійснюваного з попередньо визначеними $S_{\text{ерозр}}$ та $n_{\text{ерозр}}$, дозволяє сформувати масив даних про реальні процеси різання для вибірки з N випадків обробки. Значення n_i та $\Theta_{\text{різ}_i}$ заносяться до цього масиву даних безпосередньо; за отриманими при діагностиці процесу різання значеннями $P_{z_{\text{пост}_i}}$ та A_{a_i} і з урахуванням (7) ОП СНС визначає тангенціальну складову сили різання для кожного i -го випадку обробки: $P_{z_i} = P_{z_{\text{пост}_i}} + j_{\text{прив}} \cdot \iint A_{a_i} d\tau dt$.

Метою аналізу даних діагностики реальних процесів обробки є визначення коефіцієнтів та показників ступеня у ступеневих залежностях $v = f(T, S, t)$ та $P_z = f(v, S, t)$ за результатами регресійного аналізу вибірки з N діагностованих випадків обробки, що передбачає отримання рівнянь регресії у вигляді поліному:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot X_1 + \dots + b_j \cdot X_j + \dots + b_k \cdot X_k, \quad (8)$$

де $Y = \ln y$; $X_j = \ln x_j$; y – функція відгуку; x_j – j -тий змінний фактор регресійної залежності; b_j – коефіцієнт регресії, значення якого показує ступінь впливу j -го змінного фактору x_j на значення функції y відгуку; k – кількість j -тих змінних факторів регресійної залежності.

Наявність даних діагностики для вибірки з мінімально необхідною для побудови рівняння регресії кількістю N_{min} випадків обробки дозволяє отримати рівняння залежності (8) для заданої функції відгуку. Після успішної перевірки отриманої залежності на адекватність може бути сформоване рівняння ступеневої залежності функції відгуку наступного загального вигляду:

$$y = C_y \cdot x_1^{b_1} \cdot \dots \cdot x_j^{b_j} \cdot \dots \cdot x_k^{b_k}, \quad (9)$$

де $C_y = e^{b_0}$ – коефіцієнт, що враховує вплив незмінних умов обробки на функцію відгуку.

Традиційно у ступеневих залежностях $v = f(T, S, t)$ та $P_z = f(v, S, t)$ вплив на функцію відгуку параметрів процесу обробки, взятих у якості керованих (а саме: періоду стійкості T різця, подачі S , глибини t різання для залежностей $v = f(T, S, t)$; режимів різання v, S, t для залежностей $P_z = f(v, S, t)$) відображається значеннями показників ступеня для відповідних змінних; в той же час вплив на функцію відгуку інших вхідних параметрів процесу (властивостей інструментального та оброблюваного матеріалу, геометричних параметрів різця тощо) відображається значеннями поправочного коефіцієнта на даний параметр. Реалізація запропонованих авторами даної роботи підходів дозволяє отримати рівняння регресії, в яких у якості змінних факторів x_j фігурували б усі параметри, що справляють статистично значимий вплив на значення функції y відгуку. Можливості сучасних обчислювальних пристроїв дозволяють отримувати за допомогою регресійного аналізу ступеневі залежності функції y від значної кількості k змінних факторів x_j . Відмінністю залежностей $v = f(T, S, t)$, $P_z = f(v, S, t)$, отриманих за результатами аналізу даних діагностики реальних процесів різання, від залежностей, представлених у довідковій літературі, є заміна кожного q -того поправочного коефіцієнта K_{v_q} , $K_{P_{z_q}}$ (q – номер конкретного поправочного коефіцієнта) на окремі вхідні параметри процесу обробки на множник у ступені, показник якого кількісно відображатиме вплив даного вхідного параметра на функцію відгуку. Це дозволяє більш точно враховувати вплив усіх k вхідних параметрів процесу обробки на значення функції відгуку, що забезпечить підвищення точності запропонованої моделі. Окремою проблемою, що має бути вирішена при алгоритмізації послідовності розрахунку, є представлення значень змінних факторів x_j для вхідних параметрів процесу, що у загальному випадку не мають числового виразу.

Відповідно до загального вигляду (9) залежностей $v = f(T, S, t)$ та $P_z = f(v, S, t)$, отриманих за результатами аналізу даних діагностики процесів обробки, значень коефіцієнта C_y і

показників ступеня у цих залежностях здійснюється корегування формул для розрахунку S_e та n_e . З накопиченням нових даних про реальні процеси обробки формули постійно уточнюються.

Функціональна схема запропонованої СНС наведена на рисунку 1. У якості ВДЗ СНС у наведеній схемі використовуються: для контролю реальної частоти n_i обертання шпинделю верстата – інкрементальний енкодер 1; для вимірювання значень $P_{z_{\text{пост}_i}}$ – тензометричний динамометр 2; для контролю A_{a_i} – датчик віброприскорення 3; вимірювання температури $\Theta_{\text{різ}_i}$ різання здійснюється термоелектричним методом за допомогою природньої термопари 4. Наявність контролю $\Theta_{\text{різ}}$ у СНС, серед іншого, дозволяє здійснювати порівняння параметрів розрахованих енергоефективних режимів обробки з режимами, що відповідають оптимальній температурі $\Theta_{\text{різ}_{\text{опт}}}$ різання. При виборі конкретних моделей обчислювальних пристроїв, АЦП та ВДЗ СНС мають бути дотримані умови сумісності інтерфейсів усіх взаємодіючих пристроїв.

У якості очікуваного ефекту від впровадження запропонованої СНС автори відзначають:

- підвищення рівня автоматизації керування верстатом та надійності технологічної системи за рахунок впровадження сучасних засобів діагностики процесу різання та автоматизованого розрахунку енергоефективних режимів обробки;
- зниження трудомісткості технологічної підготовки виробництва за рахунок автоматизації процедур визначення режимів різання;
- створення можливості проведення досліджень енергоефективності обробки у режимі реальної виробничої ситуації з поступовим накопиченням БЗ про обробку.

Висновки. У роботі обґрунтовані принципові підходи до вирішення задачі автоматизованого визначення енергоефективних режимів токарної обробки на важких верстатах за результатами аналізу даних діагностики процесу обробки. Вказані підходи передбачають автоматизований розрахунок енергоефективних значень подачі S_e різця та частоти n_e обертання

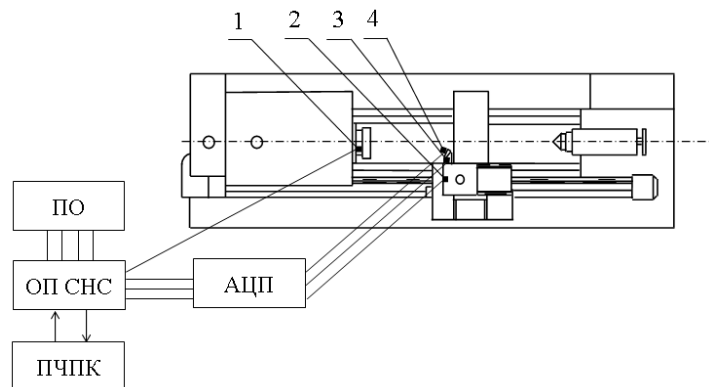


Рис. 1. Функціональна схема самонавчальної системи

ОП СНС – обчислювальний пристрій самонавчальної системи; ПЧПК – пристрій числового програмного керування; ПО – панель оператора; АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;

1 – інкрементальний енкодер; 2 – тензометричний динамометр;

3 – датчик віброприскорення; 4 – природня термопара

шпинделю за розрахунковими формулами, побудованими на базі критерію мінімальної питомої енергомісткості різання, аналіз даних про реальний процес обробки, отриманих у вигляді діагностичних сигналів про вихідні параметри процесу, та подальшу корекцію розрахункових формул за результатами проведеного аналізу, що дозволяє уточнити значення S_e та n_e . З метою практичної реалізації наведеного комплексу дій запропоновано самонавчальну систему; сформульовано принцип її роботи, розроблено функціональну схему системи. Очікуваним ефектом від впровадження запропонованої самонавчальної системи є: підвищення рівня автоматизації керування верстатом та надійності технологічної системи за рахунок впровадження сучасних засобів діагностики процесу різання та автоматизованого розрахунку енергоефективних режимів обробки; зниження трудомісткості технологічної підготовки виробництва за рахунок автоматизації процедур визначення режимів різання; створення можливості проведення досліджень енергоефективності токарної обробки на важких верстатах у режимі реальної виробничої ситуації з поступовим накопиченням бази знань про обробку.

Список використаних джерел.

© В. В. Калініченко, М. С. Мельник

1. Калініченко, В. В. Шляхи вирішення проблеми енергоефективності токарної обробки деталей важкого машинобудування / В. В. Калініченко // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції 04 – 07 травня 2019 року / Під заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ : ДДМА, 2019. – С. 46.
2. Калініченко, В. В. Перспективи самонавчальних систем автоматизованого визначення режимів токарної обробки на важких верстатах / В. В. Калініченко, М. С. Мельник // Інформатика, управління та штучний інтелект. Тези восьмої міжнародної науково-технічної конференції. – Харків : НТУ «ХПІ», 2021. – С. 59.
3. Старков, В. К. Физика и оптимизация резания материалов / В. К. Старков. – М. : Машиностроение, 2009. – 640 с. – ISBN 978-5-94275-460-0.
4. Карпов, А. В. Об оценке энергетической эффективности технологических процессов обработки резанием / А. В. Карпов // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2014. – № 2. – С. 61–68.
5. Карпов, А. В. Показатели энергетической эффективности процесса резания / А. В. Карпов // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. Том 14. № 1. 2012. Пермь : Издательство Пермского национального исследовательского политехнического университета. 2012. – С. 51–59.
6. Карпов, А. В. К вопросу управления процессом резания на основе энергетических закономерностей деформации и разрушения твердых тел / А. В. Карпов // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2011. – № 1 (8). – С. 37–49.
7. Федориненко, Д. Ю. Енергоефективність обробних верстатів / Д. Ю. Федориненко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки» : науковий збірник. – Чернігів : Черніг. нац. технол. ун-т, 2015. – № 2 (78). – С. 64–70.
8. Мрочек, Ж. А. Оценка и выбор критериев оптимальности системы резания по энергопотребляющим показателям технологического оборудования / Ж. А. Мрочек, Д. В. Адаменко, В. М. Адаменко // Вестник БНТУ, 2010. – № 5. – С. 11–14.
9. Гусарев, В. С. Исследование удельной работы формообразования при точении / В. С. Гусарев, Ю. В. Яровой // Труды Одесского политехнического университета, 2010. Вып. 1 (33) – 2 (34). – С. 61–64.
10. Гусарев, В. С. Экспериментальное исследование зависимости действия технологической системы от режимов формообразования / В. С. Гусарев, Ю. В. Яровой // Авиационно-космическая техника и технология, 2013. – № 7 (104). – С. 12–16.
11. Grobmann, K. Thermo-energetic Design of Machine Tools / K. Grobmann. – Springer International Publishing, 2015. – 261 p.
12. Vijayaraghavan, A. Automated Energy Monitoring of Machine Tools / A. Vijayaraghavan, D. Dornfeld // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2010. Vol. 59. – P. 21–24.
13. Яровой, Ю. В. Обоснование технологического процесса механической обработки на основе энергетических критериев : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Ю. В. Яровой; Одесский нац. политехнический университет. – Одесса, 2014. – 192 с.
14. Мироненко, Е. В. Научные основы создания систем агрегатно-модульных инструментов для тяжелых токарных станков : дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.01 / Е. В. Мироненко; Донбасская гос. машиностроительная академия. – Краматорск, 2003. – 417 с.
15. Мироненко, Е. В. Стратегия определения энергоэффективных технологических параметров токарной обработки деталей тяжелого машиностроения / Е. В. Мироненко, В. В. Калиниченко // Резание и инструмент в технологических системах : Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2016. – Вып. 86. – С. 83–95.
16. Мироненко, Є. В. Аналіз шляхів забезпечення енергоефективності процесів механічної обробки деталей у сучасному машинобудуванні / Є. В. Мироненко, В. В. Калініченко, Д. Є. Гузенко // Сучасні технології в машинобудуванні [Текст] : зб. наук. праць. – Вип. 13 / редкол. : В. О. Федорович (голова) [та ін.]. – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – С. 159–172.
17. Калініченко, В. В. Алгоритми для автоматизованого визначення енергоефективних режимів токарної обробки на важких верстатах / В. В. Калініченко, М. С. Мельник // Інформатика, управління та штучний інтелект. Тези десятої міжнародної науково-технічної конференції. – Харків : НТУ «ХПІ», 2023. – С. 29.

18. Васильченко, Я. В. Основы проектирования тяжелых станков с адаптивным управлением : дис. д-ра техн. наук : 05.03.01 / Я. В. Васильченко; Донбасская гос. машиностроительная академия. – Краматорск, 2017. – 341 с.

19. Общемашиностроительные нормативы режимов резания. Токарные и карусельные работы (выбор инструмента, режимов резания, определение расхода инструмента). – М.: ВНИИТЭМР, 1985. – 75 с.

20. Мироненко, Є. В. Проблеми та перспективи використання твердих сплавів зі зносостійкими покриттями при чорновій токарній обробці деталей важкого машинобудування / Є. В. Мироненко, В. В. Калініченко // Збірник наукових праць (електронна версія) X Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивні технології у машинобудуванні РТМЕ-2022», 1–5 лютого 2022 р. – Івано-Франківськ – Яремче, 2022. – С. 109–112. – Режим доступу: https://drive.google.com/file/d/1Fw5epmBruamKZjUg-1KvhlOSOugU_6Vj/view.

21. Калініченко, В. В. Можливості зниження енерговитрат на перебіг процесу різання при чорновому точінні деталей на важких верстатах за схемою електромеханічної обробки / В. В. Калініченко // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XIX Міжнародної науково-технічної конференції 01–04 червня 2021 року / за заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ : ДДМА, 2021. – С. 53.

22. Калініченко, В. В. Структура та принцип роботи самонавчальної системи для автоматизованого визначення енергоефективних режимів токарної обробки на важких верстатах / В. В. Калініченко, М. С. Мельник // Інформатика, управління та штучний інтелект. Тези восьмої міжнародної науково-технічної конференції. – Харків : НТУ «ХПІ», 2021. – С. 58.

І.Я. Долінська¹, О.О. Свірчевський²

¹Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України

²Львівський національний університет імені Івана Франка

РОЗРАХУНКОВА МОДЕЛЬ ПОШИРЕННЯ ТРІЩИНИ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ПОВЗУЧОСТІ ЗА НЕЙТРОННОГО ОПРОМІНЕННЯ

Застосовуючи енергетичний підхід побудовано розрахункову модель для визначення кінетики і періоду докритичного росту тріщини в тонкостінних елементах конструкцій за дії довготривалого статичного навантаження, підвищених температур і нейтронного опромінення. Модель застосовано до визначення залишкової довговічності платини з наскрізною тріщиною високотемпературної повзучості в умовах нейтронного опромінення. Встановлено, що нейтронне опромінення пришвидшує ріст тріщини повзучості, а відтак знижує залишкову довговічність пластини.

Ключові слова: нейтронне опромінення, тріщина повзучості, енергетичний підхід, математична модель, залишкова довговічність.

I.Ya. Dolinska, O.O. Svirchevskyi

CALCULATED MODEL OF HIGH-TEMPERATURE CREEP CRACK PROPAGATION UNDER NEUTRON IRRADIATION

Using the energy approach, a calculation model was built to determine the kinetics and period of subcritical growth of cracks in thin-walled structural elements under the action of long-term static loading, elevated temperatures, and neutron irradiation. The model is applied to determine the residual life of a plate with a through crack of high temperature creep under neutron irradiation conditions. It was established that neutron irradiation accelerates the growth of creep cracks, and therefore reduces the residual life of the plate.

Key words: neutron irradiation, creep crack, energy approach, mathematical model, residual life.

Постановка проблеми. Проблема забезпечення надійної роботи ядерних реакторів стає дедалі актуальнішою, оскільки старіння обладнання (внутрішні компоненти) значно перевищує темпи технічного переобладнання. Тому для надійного прогнозування виходу з ладу таких об'єктів (можливих аварій) постає проблема визначення їхнього залишкового ресурсу. На підставі енергетичного підходу в механіці руйнування описано методику прогнозування поширення тріщини в конструкційних елементах, які перебувають під впливом високої температури, довготривалого статичного навантаження та нейтронного опромінення. Подаючи швидкість повзучості лінійно залежною від дози опромінення, отримано нове рівняння поширення тріщин високотемпературної повзучості в металах з урахуванням інтенсивного впливу опромінення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Опромінення аустенітних сталей, що зазвичай використовують як структурні елементи у реакторах на легкій воді, призводить до зміни механічних властивостей та мікроструктури цих матеріалів [1]. Дослідженню впливу нейтронного опромінення на механічні властивості аустенітних сталей присвячено досить багато публікацій, зокрема [2–4]. Досить детально вивчено вплив нейтронного опромінення на характеристики міцності і пластичності, запропоновані залежності, що описують вплив параметрів нейтронного опромінення (доза і температура) на міцність і деформаційні характеристики. У меншій мірі вивчено вплив нейтронного опромінення на тріщиностійкість [5, 6] і опір росту втомних тріщин [6, 7]. Встановлено, що нейтронне опромінення призводить до зниження пластичності і тріщиностійкості [3, 4] і до незначної зміни опору росту втомних тріщин [7].

Так, наприклад, у працях [6, 8] проведено низку експериментальних досліджень росту тріщин повзучості за нейтронного опромінення сталі 304 і сталі 316 за температур 562 К. Отримано залежності коефіцієнта в'язкості руйнування від дози опромінення. Побудовано [6] криві швидкості росту тріщини повзучості від коефіцієнта інтенсивності напружень, а також експериментальні залежності росту тріщини повзучості сталі 304 від часу за дії на компактний зразок нейтронного опромінення і без. Теоретичні моделі, що враховують вплив дефектів типу тріщин на залишкову довговічність реакторного устаткування розроблені ще не достатньо [9].

Метою статті є розроблення математичної моделі для дослідження кінетики поширення тріщини високотемпературної повзучості в металевих тонкостінних елементах конструкцій за дії

довготривалого статичного навантаження і нейтронного опромінення і визначення на цій основі їх залишкової довговічності.

Виклад основного матеріалу.

Побудова рівняння росту тріщини високотемпературної повзучості за опромінення.

Розглянемо пластину з криволінійною макроскопічною тріщиною довжини l_0 , що знаходиться під дією розтягувальних, довільно прикладених навантажень p , яка нагріта рівномірно до температури T_0 та опромінюється потоком нейтронів інтенсивністю Φ_0 . Задача полягає у знаходженні періоду $t = t_*$ докритичного росту тріщини.

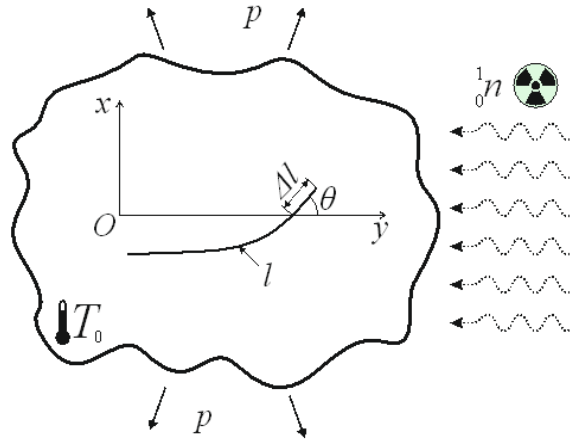


Рис. 1. Схема навантаження пластини з тріщиною.

Оскільки розглядаємо заповільнене руйнування, тобто стрибкоподібний рух тріщини, то задачу розв'язуватимемо на основі енергетичного підходу, запропонованого в [10]. В основу якого покладено перший закон термодинаміки, тобто баланс роботи, викликаній згаданими зовнішніми чинниками і енергетичними складовими процесу для одного стрибка тріщини. У результаті отримаємо

$$A = W + \Gamma. \tag{1}$$

Тут A – робота зовнішніх сил; W – енергія деформування пластини з тріщиною; Γ – енергія руйнування матеріалу пластини.

Оскільки виконується баланс енергетичних складових (1), то і буде виконуватися баланс швидкостей їх зміни, тобто

$$\frac{dA}{dt} = \frac{dW}{dt} + \frac{d\Gamma}{dt}. \tag{2}$$

Для даного випадку енергію деформування запишемо у вигляді

$$W = W_s + W_{pl}^{(1)}(l, \theta) - W_{pl}^{(2)}(t, \theta, \Phi_0), \tag{3}$$

де W_s – пружна складова; $W_{pl}^{(1)}(l, \theta)$ – частина енергії пластичного деформування, що залежить від довжини тріщини l ; θ – кут між напрямком поширення тріщини (Δl) і віссю абсцис Ox локальної декартової системи координат Oxy (рис. 1); $W_{pl}^{(2)}(t, \theta, \Phi_0)$ – частина енергії пластичного деформування, що затрачена на пластичне деформування за сталої довжини тріщини під час інкубаційного періоду $t = t_c$ підготовки її стрибка, залежить від часу t , нейтронного флюенсу Φ_0 і генерується самим тілом.

Підставивши співвідношення (3) в рівняння (2) та вважаючи, що $\frac{dA}{dt} = 0$ (зовнішні зусилля p , прикладені до пластини на значній відстані від тріщини та незмінні з часом) отримаємо

$$\left(\frac{\partial \Gamma}{\partial l} - \frac{\partial A}{\partial l} + \frac{\partial W_s}{\partial l} + \frac{\partial W_{pl}^{(1)}(l, \theta)}{\partial l} \right) \frac{dl}{dt} - \left[\frac{dW_{pl}^{(2)}(t, \theta, \Phi_0)}{dt} \right]_{t=t_c} = 0. \tag{4}$$

Ураховуючи результати праць [10], похідну по l від виразу в квадратних дужках можна подати так:

$$\frac{\partial}{\partial t} [\Gamma - (A - W_s - W_{pl}^{(1)}(l, \theta))] = \gamma_f - \gamma_t, \quad (5)$$

де γ_f – питома енергія руйнування під час поширення тріщини; γ_t – питома енергія пластичного деформування в зоні передруйнування біля вершини тріщини: $\gamma_t = \sigma_t \delta_{tr}(0) + \tau_t \delta_{tr}(0)$, де σ_t і τ_t – усереднені нормальні і дотичні напруження в зоні передруйнування, а $\delta_{tr}(0)$, $\delta_{tr}(0)$ – відповідно нормальне і дотичне розкриття вершини тріщини.

Рівняння (2) для знаходження швидкості поширення тріщини набуде вигляду

$$\frac{dl}{dt} = \left[\frac{dW_{pl}^{(2)}(l, \theta, \Phi_0)}{dt} \right]_{t=t_c} / (\gamma_f - \gamma_t(l, \theta)). \quad (6)$$

Вважаючи, що тріщина поширюється у напрямі $\theta = \theta_*$ максимально можливої швидкості, то з рівняння (6) отримаємо друге кінетичне рівняння для визначення напрямку її поширення

$$\frac{d}{d\theta} \left\{ \frac{dW_{pl}^{(2)}(t_c, \theta, \Phi_0)}{dt} / (\gamma_f - \gamma_t(l, \theta)) \right\}_{\theta=\theta_*} = 0. \quad (7)$$

Для повноти математичної моделі до рівнянь (6), (7) додамо такі початкову і кінцеву умови

$$t = 0, l(0) = l_0; \quad t = t_*, l(t_*) = l_0. \quad (8)$$

Отже, кінетичні рівняння (6), (7) та умови (8) становлять розрахункову модель для визначення періоду $t = t_*$ докритичного росту тріщини високотемпературної повзучості в конструкційних матеріалах за дії нейтронного опромінення.

Симетричний випадок. Розглянемо тепер випадок, коли тріщина в пластині є прямолінійною, розміщеною вздовж осі Ox з початком O у вершині тріщини (рис. 1). Навантаження прикладене симетрично до лінії розміщення тріщини, тоді напружено-деформований стан буде симетричним відносно осі Ox , тобто в околі вершини тріщини описуватиметься лише коефіцієнтом інтенсивності напружень K_I . У цьому разі рівняння (7) матиме розв'язок $\theta_* = 0$. Це означає, що тріщина поширюватиметься вздовж осі Ox .

Оскільки зона передруйнування пластично деформуватиметься під великими напруженнями σ_t , вважатимемо, що під час підготовки стрибка тріщини більшість часу займатиме усталена повзучість, тобто швидкість зміни деформації $\dot{\epsilon}_t = \text{const}$, а отже і швидкість розкриття зони передруйнування $\dot{\delta}_t = \text{const}$. Тоді деформаційні характеристики ϵ , δ_t зони передруйнування біля вершини тріщини запишемо так

$$\epsilon(t, \Phi_0) = \epsilon(0) + \dot{\epsilon}(\Phi_0)t; \quad \delta_t(t, \Phi_0) = \delta_t(0) + \dot{\delta}_t(\Phi_0)t. \quad (9)$$

Тут $\dot{\epsilon}_t(\Phi_0)$ – швидкість зміни деформації в зоні передруйнування, яка залежить від флюенсу Φ_0 ; $\dot{\delta}_t(\Phi_0)$ – швидкість розкриття вершини тріщини в зоні передруйнування, яка також залежить від флюенсу Φ_0 .

Оскільки за довготривалого статичного навантаження і радіаційного опромінення спостерігається заповільнений стрибкоподібний ріст тріщини, то довжину її стрибка Δl визначатимемо аналогічно (4) у вигляді

$$\Delta l \approx \alpha \delta_t(0, \Phi_0), \quad (10)$$

де α – константа, яку визначають із експерименту.

Величини пластичної енергії деформування, враховуючи (9), (10), а також результатів праці [11] можна записати так:

$$W_{pl}^{(2)}(t, \Phi_0) = \alpha \sigma_t [\delta_t(0) + \dot{\delta}_t(\Phi_0)t]^2; \\ \gamma_t = \sigma_t \delta_t(t, \Phi_0), \quad \gamma_f = \sigma_t \delta_c. \quad (11)$$

Підставивши (11) у (6)–(8), одержимо математичну модель для визначення періоду $t = t_*$

докритичного росту прямолінійної тріщини високотемпературної повзучості в пластині з урахуванням впливу радіоактивного нейтронного опромінення

$$\frac{dl}{dt} = \frac{2\alpha(\dot{\delta}_t(0) + \frac{\partial}{\partial t} [\dot{\delta}_t(\Phi_0) \cdot t]_{t=t_c})}{1 - \delta_t(t, \Phi_0)/\delta_c}; \quad (12)$$

$$t = 0, l = l_0; \quad t = t_*, l(t_*) = l_*; \quad \delta_t(l_*) = \delta_c. \quad (13)$$

Високотемпературна повзучість матеріалів, які перебувають під впливом нейтронного опромінення пришвидшується внаслідок дефектоутворення та явища радіаційного розбухання металу [12]. Тому, ґрунтуючись на результатах праць [13], у широкому діапазоні напружень швидкість усталеної повзучості можемо записати такою лінійною залежністю

$$\dot{\epsilon}_t(\Phi) = \dot{\epsilon}(0)(1 + \alpha_\Phi \Phi(t)), \quad (14)$$

де α_Φ – константа, яка визначає ступінь впливу опромінення на повзучість; $\Phi(t) = \Phi_0 t$ – кількість нейтронів, що потрапила до пластини через одиничну поверхню, Φ_0 – значення флюенса в одиничний момент часу.

Оскільки для макротріщини максимальна деформація у зоні переддруйнування біля її вершини пропорційна максимальному розкриттю, то на ділянці усталеної повзучості можна вважати справедливою залежність

$$\dot{\delta}_t(\Phi) = \dot{\delta}_t(0)(1 + \alpha_\Phi \Phi(t)). \quad (15)$$

Тоді друге співвідношення (9) для розкриття тріщини у зоні переддруйнування, урахувавши (15), можна подати так:

$$\delta_t(t, \Phi_0) = \delta_t(0) + \dot{\delta}_t(0)(1 + \alpha_\Phi \Phi_0 t)t. \quad (16)$$

Підставимо співвідношення (16) в (11), отримаємо формулу для визначення величини $W_{pl}^{(2)}(t, \Phi_0)$

$$W_{pl}^{(2)}(t, \Phi_0) = \alpha \sigma_t [\delta_t(0) + \dot{\delta}_t(0)(1 + \alpha_\Phi \Phi_0 t)t]^2. \quad (17)$$

У рівняння (6) входить величина тривалості часу $t = t_c$ інкубаційного періоду підготовки елементарного стрибка тріщини високотемпературної повзучості. Для знаходження цієї величини вважаємо, що подальше поширення тріщини відбувається за досягнення величини $\delta_t(t, \Phi_0)$ максимально допустимого значення розкриття в зоні переддруйнування δ_c , тобто на підставі (16) отримаємо рівняння

$$\delta_c - \delta_t(x, 0) = \dot{\delta}_t(0)t_c [1 + \alpha_\Phi \Phi_0 t_c]. \quad (18)$$

Розв'язуючи його щодо величини t_c , одержимо

$$t_c = \frac{-\dot{\delta}_t + \sqrt{\dot{\delta}_t^2 + 4\dot{\delta}_t \alpha_\Phi \Phi_0 (\delta_c - \delta_t)}}{2\dot{\delta}_t \alpha_\Phi \Phi_0}. \quad (19)$$

Для малих значень α_Φ, Φ_0 , формулу (18) можна записати так

$$t_c = \frac{\delta_c - \delta_t}{\dot{\delta}_t}. \quad (20)$$

Таким чином, маючи значення величини t_c кінцево запишемо математичну модель для визначення періоду докритичного росту $t = t_*$ тріщини високотемпературної повзучості з урахуванням впливу нейтронного опромінення

$$\frac{dl}{dt} = \frac{2\alpha \dot{\delta}_t(0)}{1 - \delta_t/\delta_{IC}} + 4\alpha \alpha_\Phi \Phi_0 \delta_{IC}(\Phi(t)), \quad (21)$$

$$t = 0, l = l_0; \quad t = t_*, l(t_*) = l_*; \quad \delta_t(l_*) = \delta_{IC}. \quad (22)$$

Для випадку, коли тріщина макроскопічна і виконуються рівності $\delta_t = K_I^2/(\sigma_t E)$, $\delta_t/\delta_{IC} = (K_I/K_{IC})^2$, математична модель (21), (22) набуде вигляду

$$\frac{dl}{dt} = \frac{2\alpha\dot{\delta}_t(0)}{1 - (K_I/K_{IC}(\Phi(t)))^2} + 4\alpha\alpha_\Phi\Phi_0 K_{IC}^2(\Phi(t))/(\sigma_t E), \quad (23)$$

$$t = 0, l = l_0; \quad t = t_*, l(t_*) = l_*; \quad K_I(l_*) = K_{IC}. \quad (24)$$

У рівняння (23) входить величина швидкості розкриття $\dot{\delta}_t$ вершини тріщини високотемпературної повзучості. Визначатимемо її аналогічно до

$$2\alpha\dot{\delta}_t(0) = A_{2t}(K_I/K_{IC})^{2m}, \quad (25)$$

де A_{2t}, m – характеристики високотемпературної повзучості матеріалу, які визначають із експерименту.

З урахуванням (25) математична задача (21), (22) набуде вигляду

$$\frac{dl}{dt} = \frac{A_{2t}(K_I/K_{IC}(\Phi(t)))^{2m}}{1 - (K_I/K_{IC}(\Phi(t)))^2} + 4\alpha\alpha_\Phi\Phi_0 K_{IC}^2(\Phi(t))/(\sigma_t E), \quad (26)$$

$$t = 0, l = l_0; \quad t = t_*, l(t_*) = l_*; \quad K_I(l_*) = K_{IC}. \quad (27)$$

Таким чином, визначивши з експерименту необхідні константи для конкретного матеріалу і температури експлуатації можна розрахувати час $t = t_*$ – період докритичного росту тріщини повзучості з урахуванням впливу нейтронного опромінення.

Аналог задачі Гріффітса у випадку поширення тріщини високотемпературної повзучості за дії нейтронного опромінення. Розглянемо металеву пластину, яка знаходиться під дією нейтронного опромінення і високої температури. Вважається, що така пластина в нескінченно віддалених точках зазнає впливу рівномірно розподілених статичних зусиль інтенсивності p , які направлені перпендикулярно до площини розміщення тріщини. Пластина послаблена макроскопічною тріщиною довжиною $2l_0$. Опромінення пластини флюенсом $\Phi(t)$ пошкоджує структуру металу, що своєю чергою призводить до зміни його механічних властивостей. Вважається, що за досягнення тріщиною певного критичного розміру l_* пластина зруйнується. Задача полягає у знаходженні залишкової довговічності пластини t_* .

Для розв'язання задачі використаємо сформульовану вище розрахункову модель (26), (27), яка для значення коефіцієнта інтенсивності напружень $K_I = p\sqrt{\pi l}$ [10] набуде вигляду

$$\frac{dl}{dt} = \frac{A_{2t}(p\sqrt{\pi l}/K_{IC})^{2m}}{1 - p^2\pi l/K_{IC}^2} + 4\alpha\alpha_\Phi\Phi_0 K_{IC}^2/(\sigma_t E). \quad (28)$$

$$t = 0, l = l_0; \quad t = t_*, l(t_*) = l_*; \quad K_I(l_*) = K_{IC}. \quad (29)$$

Інтегруючи рівняння (28) отримаємо шуканий розв'язок

$$t_* = \int_{l_0}^{l_*} \frac{(1 - p^2\pi l/K_{IC}^2) dl}{A_{2t}(\pi l p^2)^m / K_{IC}^2 + 4\alpha\alpha_\Phi\Phi_0 K_{IC}^2(1 - p^2\pi l/K_{IC}^2)/(E\sigma_t)}. \quad (30)$$

Обчислення формули (30) проведено (рис. 2) для пластини зі сталі 304 для фіксованого значення тріщиностійкості $K_{IC} = 350 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, а інші дані матеріалу взяті з праць [6, 8]: $m = 2,2$; $\alpha_\Phi = 4,2 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2/\text{н}$; $\Phi_0 = 0,9 \cdot 10^{21} \text{ н/см}^2$; $A_{2t} = 2,5 \cdot 10^{-7} \text{ м/год}$.

Як видно з рис. 2, залишкова довговічність пластини, що не піддавалась опроміненню (крива 1) є вищою ніж пластини, опроміненої потоком нейтронів (крива 2). Дана графічна залежність також ілюструє те, що зі збільшенням навантаження вплив нейтронного опромінення на залишкову довговічність зменшується. Це можна пояснити зменшенням дози опромінення, оскільки час опромінення пластини до руйнування також зменшується.

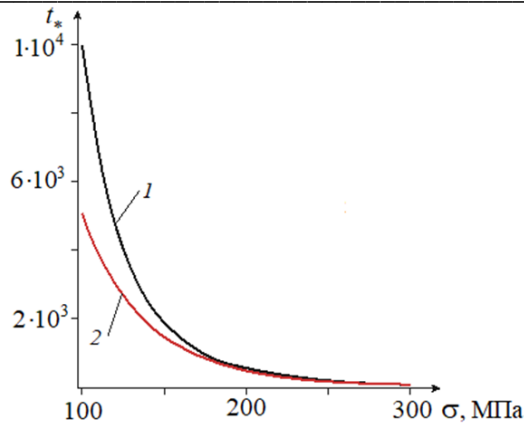


Рис. 2. Довговічність пластини для аналогу задачі Гріффітса: крива 1 – без опромінення; крива 2 – з урахуванням опромінення.

Висновки

Побудовано розрахункову модель для оцінювання впливу нейтронного опромінення (флюенсу) на залишкову довговічність елементів конструкцій з тріщинами високотемпературної повзучості. У випадку пластини зі сталі 304 з наскрізною тріщиною високотемпературної повзучості встановлено, що вплив нейтронного опромінення пришвидшує ріст тріщини, що призводить до зменшення залишкової довговічності пластини.

Список використаних джерел

1. Воеводин В. Н., Неклюдов И. М. Эволюция структурно-фазового состояния и радиационная стойкость конструкционных материалов. К.: Наукова думка, 2006. 378 с.
2. Garner F. A. Radiation Damage in Austenitic Steels (Ed. R. J. M. Konings). *Comprehensive Nuclear Materials*. 2012. Vol. 4. P. 33–95.
3. Chopra O. K. Degradation of LWR Core Internal Materials due to Neutron Irradiation. NUREG CR-7027, ANL-10/11, 2010. 152 p.
4. Назарчук З. Т., Неклюдов И. М., Скальський В. Р. Метод акустичної емісії в діагностуванні корпусів реакторів атомних електростанцій. К.: Наук. думка, 2016. 306 с.
5. Effect of Irradiation on Water Reactors Internals. V. 3: Irradiation Embrittlement of Reactor Internals Materials. AMES Report № 11. CEA TechAtom VTT. ECSC-EECC-EAEC, Brussels-Luxemburg, 1997.
6. Chopra O. K., Shack W. J. Crack growth rates and fracture toughness of irradiated austenitic stainless steels in BWR environments. Argonne: Argonne National Laboratory, 2008. 142 p.
7. Lloyd G. J. Interpretation of the influences of irradiation upon fatigue crack propagation in austenitic stainless steels. *Journal of Nuclear Materials*. 1982. Vol. 110. P. 20–27.
8. Crack Growth Rates of Irradiated Austenitic Stainless Steel Weld Heat Affected Zone in BWR Environments / O. K. Chopra, B. Alexandreanu, E. E. Gruber [et al.]. Washington: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2006. 72 p.
9. Моделирование разрушения материалов при длительном статическом нагружении в условиях ползучести и нейтронного облучения. Сообщение 1. Физико-механическая модель / Б. З. Марголин, А. Г. Гуленко, И. П. Куревич, А. А. Бучатский. *Проблемы прочности*. 2006. № 3. С. 5–22.
10. Андрейків О. Є., Скальський В. Р., Долінська І. Я. Заповільнене руйнування матеріалів за локальної повзучості. Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2017. 400 с.
11. Andreikiv O. E., Dobrovolska L. N., Yavorska N. V. Growth of high-temperature creep cracks in metallic materials under the influence of hydrogen. *Materials Science*. 2014. No 3. P. 558–368.
12. Holt R. A. In-reactor deformation of cold-worked Zr–2,5Nb pressure tubes. *Journal of Nuclear Materials*. 2008. No 372. P. 182–214.
13. Расчетное моделирование радиационного формоизменения теплопроводящей сборки реакторов на быстрых нейтронах / С. А. Исхаков, В. Б. Кайдалов, Д. А. Лапшин, А. В. Рябцов. *Проблемы прочности и пластичности*. 2013. № 5. С. 33–39.

А. В. Рудь

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО МАШИНОБУДУВАННЯ

У цій статті розглянуто сучасний стан сільськогосподарського машинобудування. На основі аналізу сучасного ринку сільгосптехніки визначено проблеми, що уповільнюють розвиток цієї галузі виробництва. Проведене дослідження дало змогу дійти таких висновків: український ринок сільської техніки має великий потенціал зростання, для його реалізації необхідно забезпечити механізм для розвитку інновацій в сфері сільськогосподарської техніки.

Ключові слова: сільське господарство; машинобудування; виробництво; інноваційний розвиток; управління.

A. Rud

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF AGRICULTURAL MACHINERY

The role of agricultural engineering is determined. The current state of agricultural engineering in Ukraine, namely the main types of agricultural machinery in agricultural enterprises throughout Ukraine at the end of 2019, was analyzed. If we analyze the geography of the import of agricultural machinery, we can expect the following situation in terms of product positions: Germany, 33.33% of the machinery is released to the market, and the USA – 18.34%. Turning to the consideration of the import of tractors, as the main category of agricultural machinery, we found that the leading importing countries are Germany - 19.97%, Poland - 12.96% and the Netherlands - 11.76%, other countries - 55.31%

Based on the study of the current state of the agricultural machinery market, the problems slowing down the development of agricultural machinery were analyzed. In recent years, there has been a reduction in the land potential of agriculture. The main reasons for this decrease are: deterioration of natural and climatic conditions, depletion of land, destruction of the technical base, loss of human resources, etc. In the Ukrainian agricultural machinery industry, enterprises of the old type predominate. Domestic production is characterized by a high production cost (about 80%), low sales rates and production volumes. The urgent problem of almost all subjects of agricultural machinery production is the low level of modernization. The main factors limiting investment in the activities of agricultural machinery enterprises of Ukraine are: high total costs, which make up 80% of production, cost price and low marginal profit.

Prospects for the development of agricultural engineering were considered: the development of automation and robotization of agriculture; use of artificial intelligence and data analysis technologies; development and production of environmentally friendly and energy-efficient machines; development of machines supporting sensor technologies and innovative materials.

The conducted research made it possible to draw the following conclusions. The Ukrainian agricultural machinery market has great potential for growth.

Keywords: agriculture; engineering; production; innovative development; management.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Рівень розвитку сільськогосподарського машинобудування свідчить про могутність усього агропромислового комплексу країни в цілому. Стабільний стан цієї гілки промисловості є гарантом забезпечення всіх галузей сільського господарства необхідними обсягами, масштабами виробництва та рентабельністю.

Сільськогосподарське машинобудування є важливою сферою, що забезпечує виробництво продуктів харчування для населення планети. Нині ця галузь стрімко розвивається завдяки інноваціям. Розвиток автоматизації та роботизації, використання технологій штучного інтелекту та аналізу даних, розробка машин з електричним принципом руху, з підтримкою технології використання «сенсорів дотику» та інноваційних матеріалів, а також глобальне зростання сільськогосподарського виробництва є основними перспективами, які формують майбутнє галузі.

Мета статті – розглянути перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування.

Викладення матеріалу та результати

Машинобудування – найбільша комплексна галузь обробної промисловості, яка є однією з провідних в економіці країни та визначає стан усієї народної економіки, забезпечуючи всі її гілки необхідними машинами, устаткуванням, приладами, вузлами та безпосередньо засобами споживання. Важливою підгалуззю є сільськогосподарське машинобудування, яке задовольняє потреби сільського господарства в необхідній техніці, що сприяє підвищенню продуктивності праці, збільшенню обсягів посівів, зменшенню кількості браку, а також скорочує та спрощує всі процеси обробітку землі й посівів, дає змогу знизити залежність від кліматичних умов, унаслідок чого збільшується продовольча безпека країни. Розвинуте сільськогосподарське машинобудування

є показником стану агропромислового комплексу будь-якої країни та передумовою її стабільного розвитку.

Сільськогосподарське машинобудування визначає стан виробничого потенціалу України, стає функціонування провідних сфер економіки. Розвиток цієї галузі промисловості характеризує рівень як науково-технічного потенціалу країни, так і забезпечення її продовольчої безпеки [4, с. 23].

Проаналізуємо сучасний стан сільськогосподарського машинобудування в Україні (табл. 1).

Табл. 1

Основні види сільськогосподарської техніки в сільськогосподарських підприємствах у цілому по Україні на кінець 2019 року [3]

Вид сільськогосподарської техніки	Кількість одиниць техніки, штук
Трактори	130 529
Комбайни	26 524
Сівалки	66 511
Плуги	51 447
Культиватори	71 633
Борони	160 004

Унаслідок розгортання повномасштабної війни на території України у 2022 році імпорт сільгосптехніки скоротився вдвічі. Але згодом іноземні заводи стали більш поблажливими і поставки сільськогосподарської техніки відновилися. Українські дилери були змушені шукати додаткові джерела фінансування й альтернативні шляхи логістики в обхід заблокованих вітчизняних портів.

Якщо проаналізувати географію імпорту сільськогосподарської техніки, то маємо таку ситуацію у товарних позиціях: найбільша частка техніки, випущеної на ринок, припадає на Німеччину (33,33%) та США (18,84%) (рис. 1).

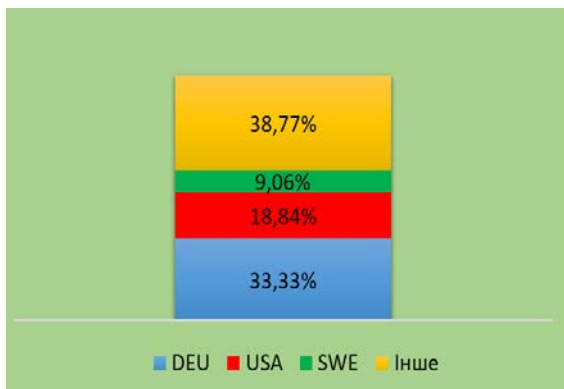


Рис. 1. Імпорт сільськогосподарської техніки

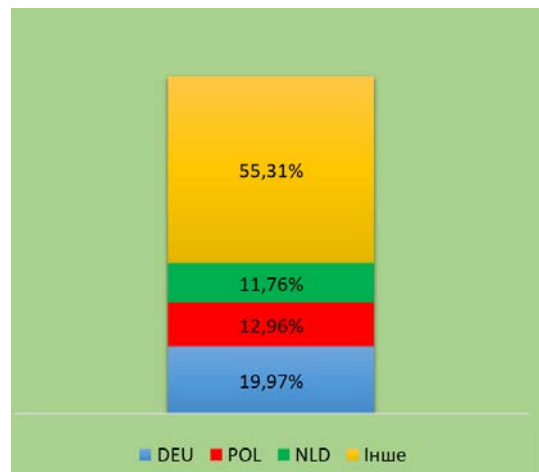


Рис. 2. Імпорт тракторів [12]

Перейдемо до розгляду імпорту тракторів як основної категорії сільськогосподарської техніки. Серед країн-імпортерів лідує Німеччина – 19,97%, за нею йдуть Польща – 12,96% і Нідерланди – 11,76%, інші країни – 55,31% (рис. 2).

Сучасний стан сільськогосподарського машинобудування визначається багатьма факторами. Серед них – скорочення земельного потенціалу, що спостерігається в останні роки, основними причинами чого є:

- погіршення природно-кліматичних умов,
- виснаження земель,
- руйнування технічної бази,
- втрата людських ресурсів тощо [10, с. 30].

В українському сільськогосподарському машинобудуванні переважають підприємства старого типу, з повним спектром основних, допоміжних і обслуговуючих підрозділів або суворо орієнтовані на одних і тих самих постійних постачальників. Така архаїчна структура, успадкована від перших десятиліть ХХ ст., жодним чином не спрямована на гнучку спеціалізацію, міжрегіональну та міжнародну кооперацію, диверсифікацію й інноваційний розвиток.

Вітчизняне виробництво характеризується високою собівартістю продукції (близько 80%), низькими обсягами та повільними темпами реалізації. Як наслідок, така ситуація не дає змоги підприємствам зацікавити інвесторів, а інвестиції є ключем до інноваційного та сталого розвитку.

Актуальною проблемою майже всіх суб'єктів сільськогосподарського машинобудування є низький рівень модернізації. Необхідне оновлення обладнання та структури виробництва, що, у свою чергу, потребує чималих капіталовкладень. Оскільки надії на приватні інвестиції в цьому питанні немає, провідна роль відводиться державним дотаціям [1, с. 64].

Економічне становище сільськогосподарського машинобудування залежить від ряду факторів, недооцінка яких призводить до зниження конкурентоспроможності продукції та послуг, що надаються.

У сучасних умовах українське сільськогосподарське машинобудування характеризується дуже низькою рентабельністю виробництва, що пояснюється низьким попитом на продукцію [2, с. 135].

Основними факторами, які обмежують інвестиції в діяльність підприємств сільськогосподарського машинобудування України, є:

- загальні витрати, частка яких сягає 80% вартості продукції;
- висока собівартість;
- низький маржинальний прибуток.

Прибуток, отриманий від виробництва сільськогосподарської техніки українськими підприємствами, і його обсяги не дають змоги національним компаніям отримувати високий рівень інвестицій, необхідний для сталого розвитку [5].

Підприємства, які виробляють сільськогосподарські машини, повинні використовувати новітні технології. Здатність підприємств упроваджувати інновації – створювати перспективні продукти, проникати в нові сфери бізнесу – в сучасних умовах багато в чому визначила конкурентоспроможність як на внутрішньому, так і на міжнародному ринках. Інновації дають змогу фермерам і сільськогосподарським організаціям запроваджувати справді нові продукти, процеси чи методи організації для підвищення ефективності, конкурентоспроможності та стійкості до зовнішніх шоків з метою вирішення конкретної проблеми [7, с. 12].

Основним завданням держави в інноваційних процесах має бути забезпечення необхідних інституційних й організаційних умов для залучення та захисту інвестицій: розробка відповідної нормативно-правової бази, протекціоністська податкова політика для підтримки вітчизняного виробника тощо [11, с. 76].

Перспективним напрямом сільськогосподарського машинобудування є розвиток автоматизації та роботизації техніки. Завдяки новим технологіям й інноваціям, таким як автономні трактори та дрони для моніторингу посівів, збору врожаю та якості ґрунту, виробництво стає ефективнішим і точнішим. Це також зменшує трудовитрати, а також скорочує час виробництва.

Цей напрям має великий потенціал для підвищення продуктивності та стійкості агропромислового комплексу. Сучасні технології комп'ютеризації техніки дають змогу значно спростити й прискорити багато процесів, наприклад: посів, збір врожаю, обрізку дерев і кущів тощо.

Одним із найбільш поширених видів автоматизації та роботизації в сільському господарстві є автономна технологія. Це обладнання, оснащене датчиками й системами штучного інтелекту, яке здатне самостійно виконувати роботу в полі або в теплицях. Так, автономні трактори можуть планувати свій маршрут полем і самостійно керуватися за допомогою GPS, а також здійснювати різні операції, такі як посів і збір врожаю.

Ще одним прикладом є використання роботів для збирання фруктів і овочів. Роботи, оснащені системами комп'ютерного зору, можуть точно визначити, які плоди мають потрібну ступінь зрілості, і зривати їх не пошкоджуючи.

Крім того, застосування автономної техніки зменшує шкідливий вплив на навколишнє середовище, оскільки уможливають більш точне внесення необхідних вивірених доз добрив і пестицидів.

Слід зазначити, що впровадження роботизованої техніки в аграрному секторі знижує витрати на робочу силу, а це може призвести до істотного скорочення робочих місць. Також занепокоєння викликає й питання рівності доступу до нових технологій. Важливо, щоб ці інновації були доступні індивідуальним фермерам і малим фермерським господарствам, а не тільки великим агропромисловим компаніям.

Загалом автоматизація та роботизація сільському господарстві має великий потенціал. Розвиток сегменту автономних тракторів є одним із найперспективніших для підвищення ефективності роботи. Це зменшить трудовитрати та забезпечить більш точну та ефективну обробку полів.

Однак слід зазначити, що розробка та впровадження автономних тракторів вимагає великих інвестицій і спеціальних знань у сфері інформаційних технологій і систем управління. Також необхідно враховувати можливі проблеми з безпекою та надійністю цих тракторів, тому перед виведенням їх у поле необхідно провести ретельні випробування й перевірки.

Важлива перспектива – технології штучного інтелекту (ШІ) й аналізу даних. Їх використання є одним із найперспективніших напрямів розвитку сільськогосподарської галузі. Ці технології можуть підвищити ефективність і точність різних процесів, пов'язаних із виробництвом і управлінням, а також знизити витрати.

Одним із найпоширеніших видів технологій штучного інтелекту в сільському господарстві є машинне навчання. Це метод обробки та аналізу даних, який дає змогу комп'ютерній системі самостійно отримувати знання з великих обсягів даних. Його можна використовувати для прогнозування врожайності, визначення оптимальних умов вирощування рослин, аналізу погодних умов та інше на певній території.

Іншим прикладом застосування технологій ШІ в сільському господарстві є системи автоматичної ідентифікації та класифікації рослин і тварин на основі аналізу даних комп'ютерного зору. Це може допомогти фермерам точніше оцінити здоров'я своїх посівів, виявити бур'яни та хвороби і вжити заходів для їх усунення.

Ще одним перспективним напрямом використання технологій штучного інтелекту та аналізу даних у сільському господарстві є біотехнології. Їх застосування уможливить розвиток нових культур з покращеними властивостями, такими як підвищена стійкість до посухи, хвороб або комах. Це сприятиме збільшенню врожайності та поліпшенню якості продукції.

Упровадження технологій штучного інтелекту й аналізу даних у сільському господарстві має величезний потенціал для підвищення ефективності, стійкості та конкурентоспроможності галузі. Однак необхідно враховувати потенційні ризики й обмеження, а також продовжувати розвивати та вдосконалювати ці технології [8, с. 59].

Третя перспектива – розробка та виробництво екологічно чистих й енергоефективних машин. Використання альтернативних джерел енергії зменшить витрати на паливо та зменшить шкідливий вплив на навколишнє середовище [9, с. 510].

Загалом вже можна говорити про електротрактори та комбайни й іншу сільськогосподарську техніку, які ще перебувають на стадії розробки й експериментів, але в найближчому майбутньому можна очікувати появу значної кількості виробників таких продуктів і, як перспектива, повний перехід на цю технологію в майбутньому.

Четверта перспектива – розробка машин, що підтримують сенсорні технології, на основі інноваційних матеріалів. Використання сенсорів дасть змогу покращити контроль за роботою в полі та забезпечити точне внесення добрив і пестицидів. А інноваційні матеріали, такі як кераміка, композити та інші, – створювати машини з більшою продуктивністю та меншими витратами на паливо [6, с. 75].

Зауважимо, що застосування сенсорних технологій у сільському господарстві не лише підвищує продуктивність і ефективність, а й допомагає зменшити вплив на навколишнє середовище. Наприклад, використання точного землеробства з GPS-навігацією та датчиками врожайності може зменшити використання добрив і пестицидів на полях, що зрештою сприятиме зменшенню забруднення ґрунту та води.

Сенсорні технології мають великий потенціал для підвищення ефективності та стійкості сільського господарства, але їх впровадження має супроводжуватися надійною політикою безпеки даних і навчанням сільськогосподарських працівників використанню цих технологій. Загалом сенсорні технології можуть стати ключовим елементом сталого розвитку сільського господарства в найближчому майбутньому.

Висновок та напрям подальших досліджень. Не тільки сільськогосподарське машинобудування, а й машинобудування в цілому в нових умовах має бути орієнтоване на технологічне переозброєння, використання прогресивних методів обробки деталей і матеріалів, механізацію й автоматизацію складальних процесів, розробку сучасних методів контролю й діагностики деталей і вузлів у процесі виробництва й експлуатації. Лише за таких умов розвиток сільськогосподарського машинобудування забезпечить суттєві зміни в соціально-економічній сфері та позитивно вплине на економічну безпеку країни, рівень зайнятості та заробітної плати.

Нині сільськогосподарське машинобудування має великі перспективи для активного розвитку, незважаючи на складну економічну ситуацію в країні. Тільки при оперативній мобілізації зусиль українських виробників і держави можлива реалізація досліджуваних напрямів.

У подальшому потребує дослідження питання перспектив управління та розвитку інноваційного потенціалу сільськогосподарського машинобудування, зокрема під впливом активного зростання імпортової техніки.

Список використаних джерел

1. Біловод О. І., Попов С. В. Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування. Полтава: ПДАУ, 2023. 198 с.
2. Вітюк А. В., Сметанюк О. А. Економічний взаємозв'язок розвитку сільського господарства та сільськогосподарського машинобудування. *Економіка та управління підприємствами*. 2020. №4. С. 134-145.
3. Гончар Л. Стандартний звіт з якості державного статистичного спостереження «Наявність сільськогосподарської техніки». Київ, 2022. 16 с.
4. Іщук С. О. Розвиток машинобудування в Україні: проблеми та шляхи їх вирішення: монографія. Львів, 2022. 137 с.
5. Коваленко Г. О. Сучасний стан конкурентоспроможності підприємств сільськогосподарського машинобудування. *Ефективна економіка*. 2021. №3. URL: http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/3_2021/81.pdf (дата звернення: 17.09.2023).
6. Крамаренко І. С., Хмелик О. А. Дослідження та тенденції сучасного стану інноваційного розвитку машинобудівних підприємств України. *Економіка та держава*. 2020. № 1. С. 73–77.
7. Мороз О. В., Карачина Н. П., Вітюк А. В. Розвиток процесів забезпечення інвестування підприємств сільськогосподарського машинобудування. Вінниця: ВНТУ, 2019. 184 с.
8. Навроцький Я. Ф. Забезпечення аграрного виробництва сільськогосподарською технікою: сучасний стан та перспективи. *Міжнародні економічні відносини та світове господарство*. 2019. С. 55-60.
9. Нехай В. Стратегічні напрямки розвитку підприємств сільськогосподарського машинобудування України. *Актуальні проблеми та перспективи розвитку обліку, аналізу та контролю в соціально-орієнтованій системі управління підприємством*. Полтава, 2022. С. 509-512.
10. Редьква О. З. Аналіз основних показників функціонування та розвитку сільськогосподарського машинобудування в Україні. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського*. 2019. № 30. С. 30–36.
11. Сисоліна І. П., Кононенко Л. В. Розвиток сільськогосподарського машинобудування: інноваційний аспект. *Modern engineering and innovative technologies*. 2022. С. 73-77.
12. Складний імпорт–2022: потребували більше агротехніки, ніж отримали. URL: <https://www.growthow.in.ua/skladnyu-import-2022-potrebuvaly-bilshe-ahrotekhniky-nizh-otrymaly/> (дата звернення: 17.09.2023).

V. Faychuk

Lviv Polytechnic National University

RESEARCHING ANONYMOUS ROUTING MODELS

Numerous solutions have been created for online anonymous communication. We do evaluations of security on several systems. We examine features such as Onion Routing, anonymous VPN services, probabilistic anonymity, and deterministic anonymity among different systems. There are also additional forms of anonymous communication that are discussed, including messaging, peer-to-peer communication, using the web, emailing, and using other Internet apps. We then go on to show several attack methods that aim to identify people who communicate anonymously. The objective of the research is to achieve an exact adjust between guaranteeing the adequacy and dependability of message delivery and ensuring customer anonymity. The NIAR model's non-interactive highlight makes it more valuable since it licenses secure communication without requiring nonstop client support. Communication privacy is threatened by an ever-growing volume of data generated by an ever-growing number of networked devices. Because of this, Anonymous Communication Systems (ACSs)—which offer the privacy qualities of anonymity, unsinkability, and observability—are recommended to conceal the relationship between transmitted communications and their senders and recipients. The objective of this essay is to evaluate the literature on Dining Cryptographers Networks (DCNs) in the subject of ACSs. Since the DCN-based techniques offer unconditional guarantees of observability, they are information-theoretically safe. Their computation and communication expense was considered high at the time, and scalability issues arose, which originally impeded their use for anonymous communications. By satisfying these targets, the research improves the state of encrypted communication systems and opens the door to a day when protecting client security will be a best need without sacrificing message delivery's significant dependability and efficiency.

Keywords: Anonymous Routing, Onion Routers, NIAR Model, Privacy-preserving Communication, Network Security

В. О. Файчук

ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ АНОНІМНОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ

Створено багато рішень для анонімного спілкування в Інтернеті. Ми оцінюємо безпеку декількох систем. Ми розглядаємо такі функції, як Onion Routing, анонімні VPN-сервіси, імовірнісна анонімність та детермінована анонімність між різними системами. Також обговорюються додаткові форми анонімної комунікації, включаючи обмін повідомленнями, пірінгове спілкування, використання Інтернету, електронну пошту та інші інтернет-додатки. Далі ми покажемо кілька методів атак, спрямованих на ідентифікацію людей, які спілкуються анонімно. Метою дослідження є досягнення точного балансу між гарантуванням адекватності та надійності доставки повідомлень і забезпеченням анонімності користувачів. Нейнтерактивність моделі NIAR робить її більш цінною, оскільки вона ліцензує безпечну комунікацію, не вимагаючи цілодобової підтримки клієнтів. Конфіденційність комунікації знаходиться під загрозою через постійно зростаючий обсяг даних, що генеруються постійно зростаючою кількістю мережевих пристроїв. Через це анонімні комунікаційні системи (ACS), які пропонують такі якості конфіденційності, як анонімність, непотоплюваність і спостережуваність, рекомендуються як спосіб приховати зв'язок між переданими повідомленнями та їхніми відправниками і одержувачами. Мета цього есе - оцінити літературу про мережі криптографів Dining Cryptographers Networks (DCN) в контексті ACS. Оскільки методи, засновані на DCN, пропонують безумовні гарантії спостережуваності, вони є інформаційно-теоретично безпечними. Їх обчислювальні та комунікаційні витрати на той час вважалися високими, а також виникали проблеми з масштабуванням, що спочатку перешкодило їх використанню для анонімних комунікацій. Задовольняючи ці цілі, дослідження покращує стан зашифрованих систем зв'язку і відкриває двері до того дня, коли захист безпеки клієнтів буде найкращою потребою без шкоди для значної надійності та ефективності доставки повідомлень.

Ключові слова: Анонімна маршрутизація, цибулинні маршрутизатори, модель NIAR, конфіденційність зв'язку, мережева безпека

Problem statement. In many circumstances, people may want strong communication privacy and anonymity when using the Internet. These are situations when individuals must report any knowledge they may have about illicit activity without worrying about reprisals or penalties. Additionally, those who reside in countries where authorities attempt to control what their citizens may say and do online require ways to get around censorship and other limitations on their right to free expression. Furthermore, individuals may desire the freedom to use the internet without third parties tracking their online activities and selling their data to other businesses.

Our goal in writing this study is to analyze open problems and the current state of the art in ACS. Specifically, we have been able to concentrate on any research project whose primary objective is to offer a solution for emerging trends in anonymous systems. Any researcher interested in beginning a study in this field should be aware of the most recent developments and the ACS's current research priorities.

Analysis of recent research and publications. It was suggested that (Lightweight Incentivized Routing for Anonymity) LIRA [1] use a crypto lottery at routers to overcome some of these restrictions. A customer can estimate and receive priority service with a configurable probability if he requests a prioritized

service. Clients can operate as routers and get token from a central bank in return for their bandwidth to receive priority service guarantees. After that, clients can buy "guaranteed winners" tickets to the lottery with those tokens to receive superior support at the routers. LIRA's primary flaw is the fact that disobedient clients can attempt to construct many circuits before receiving a prioritized one. If, in the absence of a "guaranteed winner" ticket, the likelihood of gaining the lottery to get a better service is 20%, for instance, clients will typically receive two prioritized networks out of every ten that they build. This will incentivize clients to keep creating networks to find winners, thereby wasting network resources. Reducing the likelihood of success creates problems with anonymity because the anonymity set might be shrunk by an adversary keeping an eye on a priority circuit. Nevertheless, because LIRA's bank only communicates with ORs rather than with all customers, LIRA handles the scalability concerns associated with BRAIDS.

By spreading the administration of incentives over several semi-trusted parties, like the official directory servers already in use by Tor, TEARS [1] aims to address the scalability issues. The semi-trusted servers communicate with routers via an openly auditable e-cash protocol, which is akin to Bitcoin, to deter misbehavior. In return for bandwidth, they use to transport anonymous traffic, servers provide routers anonymous currency known as Shallots. Priority Passes are router-specific tickets that may be traded for cash to receive network service that is prioritized. To boost the routers' anonymity, set, the trustworthy servers additionally give users Shallots. One problem facing TEARS is that, to do safe bandwidth measurements, it depends on a decentralized procedure, which is not present in the current version of Tor network. Although the Tor network presently uses bandwidth authority, how accurate their measures are in the face of different antagonistic situations is unclear.

According to Kuhn, Christiane, et al., the pairing-based onion routing (PB-OR) protocol, which makes use of a pairing-based non interactive important agreement process, should be used in place of the circuit creation strategy in TOR (the onion router). They employ an identity-based infrastructure to enable their approach to achieve unilateral anonymity, which is the ability of the client to authenticate a router without disclosing the client's identity. A reliable party called the private key generator (PKG) utilizes a master key that is only known to the PKG in conjunction with a router's well-known identification ID to create a secret key d for the router. Conversely, clients have the ability to independently construct an unlimited number of pseudonyms and the private keys associated with each one. Subsequently, the client presents a unique pseudonym to each router to maintain anonymity throughout the key agreement phase; routers utilize their personal keys d to finalize the key agreement. In comparison to Tor, the key agreements protocol greatly minimizes the communication-related cost of circuit building because it is non-interactive, enabling the establishment of a circuit in a single pass. Nevertheless, there is a single point of failure since the PKG may decode any communication that has been encrypted for clients. Additionally, routers must engage in expensive interactions with the PKG to regularly update their identification keys in order to preserve forward secrecy [2].

Based on the idea of onion routing, Tor is a low-latency anonymity network. Today, the network is made up of over 6000 Onion Routers (ORs), which are volunteer-operated routers. Every OR generates a router descriptor and submits it to directory authority with contact details about the router, including its Internet Protocol (IP) address, ports and public keys, and bandwidth capacity. These authorities create a document outlining the network consensus and forward it to directory servers with the descriptors. Before they can interact with their Internet destinations, Tor clients, also known as Onion Proxies (OPs), establish pathways, or circuits, via the network by downloading the consensus and descriptors from the directory servers. Depending on where they are in the circuit, the three ORs, or hops, that make up each circuit are called the entrance guard, middle, and exit ORs. TLS is utilized to offer hop-by-hop authenticity, data integrity, and secrecy when ORs in a circuit are connected via TCP connections. In Tor, data is sent in cells, which are fixed-sized units of 512 bytes [3].

Presentation of the main material. The contemporary information age's tremendous advancements in communication and pervasive computer capabilities, which are collecting ever-increasing amounts of data, are benefiting society greatly. This includes possibilities and revolutionary shifts brought about in a variety of spheres of everyday life, such as social contact, healthcare, transportation, and education. Many of the gathered data, meanwhile, may be delicate or contain personal data. As a result, there are significant privacy problems with their gathering and transmission. These could stop new technologies from being incorporated into daily life on a larger scale [4].

Furthermore, in many circumstances, people may want great communications anonymity and confidentiality on the Internet. These are situations when people must report any knowledge, they may have about illegal activity without worrying about retaliation or penalties. Additionally, those who reside in

countries where authorities attempt to restrict what their people may say and do online require ways to get around censorship and other limitations on their right to free expression. Furthermore, individuals may desire unrestricted access to the internet for personal purposes, free from third-party data collection on their online activities and subsequent sale of their personal data to other businesses [5]. To prevent situations like these and guarantee the security of messages carried across intermediate networks, end-to-end encryption is frequently utilized. After that, the communication may only be read by the designated recipient. Nevertheless, encryption only prevents other parties from accessing data that has been transferred. It is unable to conceal the fact that parties are conversing and exchanging messages [6, 7].

Because they handle the majority of network protocols, popular application-level switches including Virtual Private Networks (VPNs), proxies, mix-based solutions, and onion-based routings like The Onion Router (Tor) [8] have been extensively implemented in practice. However, they typically only provide a restricted level of anonymity protection, and traffic analysis attacks can still be launched by an observer tracing packets in order to violate anonymity assurance. Conversely, an adversary keeping tabs on users cannot discern between messages containing genuine content and random noise when using DCN-based Anonymous communication system (ACSs). These systems do, however, present some difficulties, such as handling interruptions and offering round (or slot) reservation strategies [9]. Furthermore, there was a lack of scalability and significant computation and communications overheads with the first DCN-based ACSs. Because of this, despite the fact that DCN has been around for about thirty years, they were seldom ever used in anonymous real-world communications until fixes were offered to increase their effectiveness and make them more practical [10].

In the framework of circuit-based routing developed onion routing-based approaches as an equivalent of Mix networks. In contrast to mixes, onion routing does not route each packet independently. Rather, the client selects a path then sends the initial message and labels the selected path to start a circuit using the network. Each onion router in a circuit is aware of the previous one and successor, while it is unaware of the other node in the network. Once the circuit is established, each message with a certain label is sent along this pre-planned path. Ultimately, the route can be closed with a message issued [11].

Onion routing-based ACSs offer a socket connection that is independent of application. As a result, several apps (such as web surfing, SSH, and instant messaging) may use them with ease [124]. Onion routing-based ACSs vary, nevertheless, in terms of how the onion router are set up, how encryption techniques are used, how tunnels are created, whether TCP or UDP is used at the transport layer, and whether or not the clients transmit traffic to additional clients. As a result, many ACSs using onion routing as their foundational technique have been put into use. The reduced latency connections provided by these systems have drawn millions of consumers. Based on the onion routing concept [12], Tor is a distributed-trust, low-latency, anonymous communication network that operates on circuits. Overlay networks, like Tor, are built as communication networks on top of other networks [60]. It is made up of a group of servers known as onion routers that are provided voluntarily and are used to construct circuits and send data. Another message-oriented system that provides anonymization services using a peer-to low-latency communication is the Invincible Internet Project (I2P). In actuality, I2P is an additional overlay network that was primarily created to allow for completely anonymous communication within the network between two participants [13].

Broadcasting or multicast-based communication is used by several ACSs. This sort of strategy can also include DCN-based techniques. Nonetheless, it is more appropriate to treat DCN-based ACSs as a primary distinct category because they are primarily developed on Chaum's protocols and offer sender anonymity as well. ACSs that are based on broadcasting or multicasting include Peer-to-Peer Personal Privacy Protocol (P5) [14], K-Anonymity [15], Multicasting Mixes for Efficient and Anonymous Communication (M2) [16], Mutual Anonymous Multicast (MAM) [10], and Broadcast Anonymous Routing (BAR) [17]. For example, P5 establishes a broadcast hierarchy whereby varying hierarchy levels offer varying degrees of anonymity at the expense of communication dependability and bandwidth [18]. In P5, a single up node transmits all messages intended for a specific recipient. As a result, neither the sender nor the recipient are aware of each other's identities or the host or address that the recipient is using.

Rabin presented the initial version of Oblivious Transfer (OT) in [19], which was utilized as a protocol for secret communication between two parties [70]. An OT protocol allows a sender to deliver a record of data to a recipient from a series of records, concealing the other records from the recipient and keeping the sender in the dark regarding which record is chosen. "Chosen one-out-of-two" OT, or OT2 1, is a somewhat more sophisticated type of OT in which the sender provides two private inputs (X1, X2), and the recipient can select to receive only one of them while remaining unaware of the other input. Similar to this, model developed the generalized version of OT under the title of all or nothing disclosure of secrets

(ANDOS). The sender has n private inputs in 1-out-of- n , or OT n 1, and the recipient can select one of them at will without knowing the other inputs or the sender's identity of which input is sent [20].

Similar to OT, Private Information Retrieval (PIR) protocols enable a client to obtain an item from a location inside the client's database without disclosing which record was obtained [21]. Although it can't adapt to shifts in the network structure. Samy, Islam, et al. implements anonymous communication with a respectable privacy guarantee using hybrids mix networks and PIR methods. In a system with numerous servers, Riposte [33] also makes use of PIR methods to allow anonymous message broadcasting [22]. Private Keyword-Based Push and Pull (P3) [23], and Private Information Retrieval for Everyone (XPIR) [24] are other PIR-based anonymous communication systems which let users to send and receive messages without anybody discovering they are part of a discussion by using a key-value store. These techniques show a significant client load, even though good database organization makes them easier to scale to a high number of users. Because of this, PIR approaches need a lot of processing power and bandwidth. They also often offer data anonymity, which means that although the destination is aware of the client, it is unaware of the records that are read or transmitted.

Recently, Shi and Wu offered a very different method to this problem: hiding connection patterns via cryptographic approaches. They specifically offer the Non-Interactive Anonymous Router (NIAR) paradigm, in which all data passes via a central router and a set of N receiving nodes want to receive data from a set of N sending nodes. According to their concept, anonymity is the incapacity to connect any sender to the matching receiver, even in cases where the network router and (up to $N - 2$) different (sender, receiver) pairings are vulnerable to an opponent that is both honest and inquisitive. The NIAR model as previously said has application in several real-world situations. Large messages to be transferred and/or non-ephemeral/indefinite communication channels are crucial components of any such application, as is the desire of several (sender, receiver) pairs to interact anonymously with one another through a central server [25].

Conclusion. We now live in an era of technology where we may speak, share information, connect social networks, amuse ourselves, and more through communications technologies. These conversations can be tracked and overheard to gather useful data about users, including personally identifying information, communication patterns, and other details that make it possible to create user profiles. Systems for anonymous communications have been proposed to protect our privacy.

In the last few years, ACS has built a significant research effort. We conducted this research, which spans a recent period and allows any research dedicated to this topic to know the state of the art to determine the state of the art in this field. Online anonymity is offered by several businesses and applications. The first point to note is that each program and/or service has a designated region where anonymity is offered. A service or software cannot be protected against every potential attack.

A greater level of security and anonymity may be provided by distributed anonymizing systems like TOR and I2P than by centralized services, where identity disclosure occurs at a single location. However, timing, intersection, and cooperative eavesdroppers might jeopardize anonymity.

References

1. Jansen R., Johnson A. On the Accuracy of Tor Bandwidth Estimation. *Passive and Active Measurement*. Cham, 2021. P. 481–498. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-72582-2_28 (date of access: 18.12.2023).
2. Onion Routing with Replies / C. Kuhn et al. *Lecture Notes in Computer Science*. Cham, 2021. P. 573–604. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-92075-3_20 (date of access: 18.12.2023).
3. CRYPTOGRU: Low Latency Privacy-Preserving Text Analysis With GRU / B. Feng et al. *Proceedings of the 2021 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*, Online and Punta Cana, Dominican Republic. Stroudsburg, PA, USA, 2021. URL: <https://doi.org/10.18653/v1/2021.emnlp-main.156> (date of access: 18.12.2023).
4. Bunn P., Kushilevitz E., Ostrovsky R. Anonymous Permutation Routing. *Theory of Cryptography*. Cham, 2023. P. 33–61. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-48621-0_2 (date of access: 18.12.2023).
5. Chauhan M., Singh A. K., Komal. Survey of Onion Routing Approaches: Advantages, Limitations and Future Scopes. *Proceeding of the International Conference on Computer Networks, Big Data and IoT (ICCBI - 2019)*. Cham, 2020. P. 686–697. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-43192-1_76 (date of access: 18.12.2023).
6. Ke Y., Zilin W., Zhanfei D., Xinzheng H., Chunfu J., Yuan H. Anonymous Query Mechanism Construction of Timed-Release Encryption. *Advanced Engineering Science/Gongcheng Kexue Yu Jishu*. 2022. vol. 54. URL: <https://www.gkyj-aes-20963246.com/article/anonymous-query-mechanism-construction-of-timed-release-encryption> (date of access: 18.12.2023).

7. Komlo C. H., Mathewson N., Goldberg I. Walking onions: Scaling anonymity networks while protecting users: *Proceeding of the 29th USENIX Security Symposium (USENIX Security 20)*. 2020. P. 1003-1020. URL: <https://www.usenix.org/conference/usenixsecurity20/presentation/komlo> (date of access: 18.12.2023).
8. Hiller J., Pennekamp J., Dahlmans M., Henze M., Panchenko A., & Wehrle K. Tailoring onion routing to the internet of things: Security and privacy in untrusted environments. *2019 IEEE 27th International Conference on Network Protocols (ICNP)*. 2019. P. 1-12. doi: 10.1109/ICNP.2019.8888033
9. Deep Learning and Onion Routing-based Collaborative Intelligence Framework for Smart Homes underlying 6G Networks / N. K. Jadav et al. *IEEE Transactions on Network and Service Management*. 2022. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/tnsm.2022.3164715> (date of access: 18.12.2023).
10. A Survey on Anonymous Communication Systems with a Focus on Dining Cryptographers Networks / M. Shirali et al. *IEEE Access*. 2023. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2023.3242870> (date of access: 18.12.2023).
11. Dimitriou T. Efficient, Coercion-free and Universally Verifiable Blockchain-based Voting. *Computer Networks*. 2020. Vol. 174. P. 107234. URL: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107234> (date of access: 18.12.2023).
12. Blockchain and Onion Routing-based Secure Message Exchange System for Edge-enabled IIoT / R. Gupta et al. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2022. P. 1-12. URL: <https://doi.org/10.1109/tii.2022.3191444> (date of access: 18.12.2023).
13. Ghazi-Tehrani A. K. Mapping Real-World Use of the Onion Router. *Journal of Contemporary Criminal Justice*. 2023. P. 104398622311575. URL: <https://doi.org/10.1177/10439862231157553> (date of access: 18.12.2023).
14. Design of peer-to-peer protocol with sensible and secure IoT communication for future internet architecture / V. Vijaya Kumar et al. *Microprocessors and Microsystems*. 2020. Vol. 78. P. 103216. URL: <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103216> (date of access: 18.12.2023).
15. Arava K., Lingamgunta S. Adaptive k-Anonymity Approach for Privacy Preserving in Cloud. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2019. Vol. 45, no. 4. P. 2425-2432. URL: <https://doi.org/10.1007/s13369-019-03999-0> (date of access: 18.12.2023).
16. GKMPAN: An Efficient Group Rekeying Scheme for Secure Multicast in Ad-Hoc Networks* / S. Zhu et al. *Journal of Computer Security*. 2006. Vol. 14, no. 4. P. 301-325. URL: <https://doi.org/10.3233/jcs-2006-14401> (date of access: 18.12.2023).
17. Tian C., Zhao S., Cheng Z. AntCom: An effective and efficient anti-tracking system with dynamic and asymmetric communication channel. *Journal of Network and Computer Applications*. 2023. P. 103700. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2023.103700> (date of access: 18.12.2023).
18. Kotzanikolaou P., Chatzisofofroniou G., Burmester M. Broadcast anonymous routing (BAR): scalable real-time anonymous communication. *International Journal of Information Security*. 2016. Vol. 16, no. 3. P. 313-326. URL: <https://doi.org/10.1007/s10207-016-0318-0> (date of access: 18.12.2023).
19. A Survey of Oblivious Transfer Protocol / V. K. Yadav et al. *ACM Computing Surveys*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1145/3503045> (date of access: 18.12.2023).
20. Peer-Communication in Distance Education: Perspectives and Challenges / C. Papi et al. *Ubiquitous Learning: An International Journal*. 2019. Vol. 12, no. 1. P. 13-33. URL: <https://doi.org/10.18848/1835-9795/cgp/v12i01/13-33> (date of access: 18.12.2023).
21. Vithana S., Banawan K., Ulukus S. Semantic Private Information Retrieval. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2022. Vol. 68, no. 4. P. 2635-2652. URL: <https://doi.org/10.1109/tit.2021.3136583> (date of access: 18.12.2023).
22. Asymmetric Leaky Private Information Retrieval / I. Samy et al. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2021. Vol. 67, no. 8. P. 5352-5369. URL: <https://doi.org/10.1109/tit.2021.3085363> (date of access: 18.12.2023).
23. Eskandarian S., Corrigan-Gibbs H., Zaharia M., & Boneh D. Express: Lowering the cost of metadata-hiding communication with cryptographic privacy. In *arXiv [cs.CR]*. 2019. <http://arxiv.org/abs/1911.09215>
24. Mozaffari H., Houmansadr A. Heterogeneous Private Information Retrieval. Proceedings 2020 Network and Distributed System Security Symposium. 2020. <https://www.ndss-symposium.org/wp-content/uploads/2020/02/24363-paper.pdf>
25. Shi E., Wu K. Non-interactive anonymous router. *Annual International Conference on the Theory and Applications of Cryptographic Techniques*, 2021. P. 489-520.

А.О. Поліщук

Хмельницький національний університет

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОДРІБНЕНИХ ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В ЯКОСТІ ВИХІДНОЇ СИРОВИНИ ДЛЯ ШНЕКОВОГО ЕКСТРУДЕРА 3D-ПРИНТЕРА

Описано полімерні відходи, що утворюються у процесі виготовлення готових виробів за допомогою 3D-друку. Розглянуто фактори, які впливають на вибір способу переробки пластмас. Наведено розподіл сипучих матеріалів за розміром часток. Обґрунтовано використання механічного подрібнення відходів полімерів, як найбільш поширеного методу. Описано фізичні ефекти, які використовуються в різних типах подрібнювачів. Наведено типи обладнання для механічного руйнування різних матеріалів. Вибрано шредер для подрібнення полімерних відходів, що утворюються в процесі 3D-друку, наведено його технічні характеристики та описано принцип роботи. Використовуючи даний пристрій для подрібнення проведено подрібнення полімерних матеріалів, а саме пластиків ABS, PLA, TPU. Проведено ситовий аналіз подрібнених полімерних матеріалів. Побудовано криві розподілу подрібнених часток полімерів. Побудовано графіки залежності подрібнених часток пластиків від середнього розміру часток різних фракцій. Отримано регресійні залежності насипної густини залежно від середнього розміру часток полімерних матеріалів. Проведено визначення густини сформованої мононитки з використанням 3D-принтера з шнековим екструдером, що друкує подрібненими частками, отриманими в процесі подрібнення з використанням шредера.

Ключові слова: полімерний матеріал, подрібнення полімерів, шредер, ситовий аналіз, насипна густина, шнековий екструдер, 3D-принтер, 3D-друк

A.O. Polishchuk

EXPERIMENTAL STUDY OF CRUSHED POLYMER WASTE USED AS INITIAL RAW MATERIAL FOR THE SCREW EXTRUDER OF A 3D PRINTER

Polymeric waste generated in the process of manufacturing finished products using 3D printing is described. Factors that influence the choice of a plastic processing method are considered. The distribution of bulk materials by particle size is given. The use of mechanical grinding of polymer waste as the most common method is substantiated. Physical effects used in different types of shredders are described. Types of equipment for mechanical destruction of various materials are given. A shredder for shredding polymer waste generated in the process of 3D printing is selected, its technical characteristics are given and the principle of operation is described. Shredding of polymer materials, namely ABS, PLA, TPU plastics using a shredder, was carried out. Sieve analysis of crushed polymeric materials was carried out. Distribution curves of crushed polymer particles were constructed. Graphs of the dependence of crushed plastic particles on the average particle size of different fractions were constructed. Regression dependences of the bulk density depending on the average particle size of polymer materials were obtained. The density of the monofilament made using a 3D printer with a screw extruder, which prints with crushed particles obtained in the process of grinding using a shredder, was determined.

Keywords: polymer material, polymer crushing, shredder, sieve analysis, bulk density, screw extruder, 3D printer, 3D printing

Постановка проблеми. Потреба в проведенні експериментальних досліджень для визначення властивостей, таких як насипна густина, розмір часток, густина та інших параметрів подрібнених відходів полімерних матеріалів, стає ключовою при використанні цих матеріалів як вихідної сировини для шнекового екструдера в 3D-принтерах. Подрібнені відходи полімерів можуть мати значну варіативність у властивостях. Відсутність стандартизації цих параметрів ускладнює процес їх використання в якості сировини для 3D-друку. Невідомі або непостійні характеристики матеріалу, такі як розмір часток або насипна густина, можуть суттєво вплинути на процес екструзії, включаючи однорідність потоку матеріалу, швидкість плавлення та якість кінцевого продукту. Для досягнення оптимальних результатів друку необхідно точно знати фізичні властивості матеріалів, що використовуються для того щоб правильно налаштувати параметри екструдера, такі як температура, тиск та швидкість подачі. Використання подрібнених відходів полімерів як сировини є важливим для зменшення відходів та підвищення екологічності виробництва. Однак, без точного визначення їх характеристик, ефективне використання цих матеріалів у 3D-друку може бути ускладненим. Експериментальні дослідження є необхідними для визначення зазначених властивостей, а також для розробки методів їх стандартизації та адаптації процесів екструзії під різні типи матеріалів, що піддаються рециклінгу.

Враховуючи вищезазначені аспекти, необхідно провести ґрунтовні дослідження та розробити нові технологічні підходи для використання подрібнених відходів полімерних матеріалів у сфері 3D-друку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивченню проблем подрібнення полімерних матеріалів та дослідженню їх властивостей присвятили свої наукові роботи такі вітчизняні вчені, як Місяць В.П., Бурмістенів О.П., Мікульонік І.О., Скиба М.Є., Михайловський Ю.Б. та інші [1-12]. Наукові праці закордонних вчених також направлені на розробку енергоефективного устаткування для механічного руйнування матеріалів та дослідження як робочих органів, так і самого процесу подрібнення [13-20].

Разом з тим, проблема подрібнення відходів полімерних матеріалів для живлення екструдерів 3D-принтерів та дослідження подрібнених часток залишається частково невирішеною і потребує постійного вдосконалення оскільки з'являються нові полімерні матеріали та постійно зростає кількість відходів 3D-друку, швейної та взуттєвої промисловості.

Виклад основного матеріалу. Потреба в переробці полімерних відходів, що утворюються в процесі виготовлення виробів за допомогою 3D-друку на сьогодні є нагальною. Збільшення виробництва та використання пластикових матеріалів призводить до збільшення об'ємів відходів, що негативно впливає на довкілля. Переробка полімерних відходів допомагає зменшити негативний вплив та зберегти природні ресурси. Полімерні матеріали в процесі виробництва є вартісними ресурсами. Переробка відходів дозволяє їх ефективно використовувати та зменшує витрати на придбання нового матеріалу [21].

Таким чином, переробка полімерних відходів важлива з точки зору екології та економіки і її розвиток є актуальною задачею у сучасному виробництві, зокрема в контексті 3D-друку.

У процесі виготовлення виробів за допомогою 3D-друку утворюються полімерні відходи. Основними типами полімерних відходів, що виникають у цьому процесі, можуть виступати: невдало надруковані деталі через неправильну форму чи друк з дефектами; підтримуючі структури, які необхідні для стабілізації деталей під час друку та які в подальшому видаляються; підложки та краї першого шару, необхідні для виключення деформації та відлипання деталі від платформи 3D-принтера тощо. Відходи пластику ABS, що утворилися в процесі 3D-друку деталей та виробів приведені на рис.1 [22].

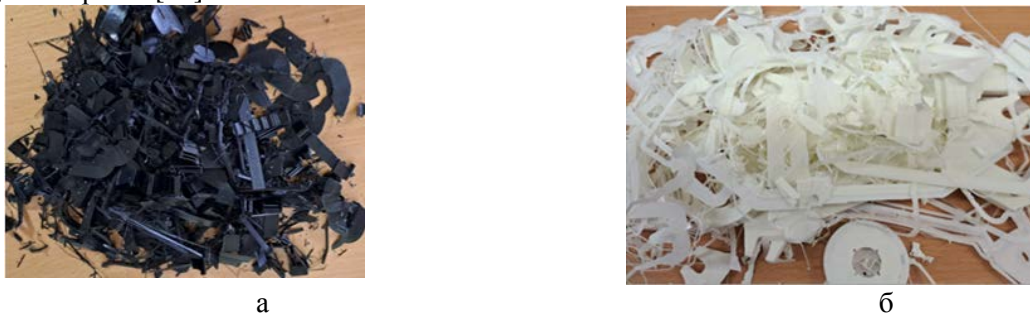


Рис.1. Відходи пластику, що утворилися під час 3D-друку: а-ABS пластик; б-PLA пластик

Переробка полімерних матеріалів охоплює широкий спектр процесів, що перетворюють сировину в продукт із заданими експлуатаційними властивостями для використання. Існує безліч прийомів і способів переробки пластмас, причому вибір конкретного методу залежить від ряду факторів: конструктивних особливостей виробу та умови його експлуатації; властивостей матеріалу, що обробляється, а також економічних факторів, включаючи масовість виробництва та вартість. Існуючі методи переробки полімерів можна класифікувати на три групи: підготовчі, основні та завершальні. Кожен з них має своє специфічне застосування в залежності від потреб виробничого процесу.

Попередня підготовка сировини для шнекового екструдера 3D-принтера є критично важливою, оскільки вона безпосередньо впливає на якість друку, ефективність процесу та довговічність обладнання. Основними факторами, які необхідно враховувати є: розмір та однорідність часток полімеру; вологість матеріалу; температурна підготовка; чистота пластику; контроль якості; ступінь подрібнення та сортування подрібнених часток.

Розмір та однорідність часток полімеру є ключовими характеристиками, які впливають на ефективність і якість процесу екструзії в 3D-принтерах з шнековим екструдером. Однорідний розмір часток забезпечує більш рівномірне плавлення полімеру. Частки неправильної форми

можуть плавитися нерівномірно, викликаючи проблеми зі стабільністю потоку матеріалу в екструдері. Розмір часток впливає на швидкість і тиск, з яким матеріал може бути екструдований. Занадто великі частки можуть призвести до блокування або нерівномірного виходу матеріалу, тоді як занадто маленькі частки можуть викликати проблеми з контролем потоку. Частки неправильної форми можуть призводити до нерівномірності в якості друку, включаючи пористість, недостатню міцність та інші дефекти. Нерівномірний розмір часток може ускладнити розсіювання тепла в матеріалі під час плавлення, що може призвести до перегріву або недостатнього нагріву деяких ділянок. Для забезпечення однорідності часток полімеру може знадобитися додаткова обробка сировини, така як подрібнення, сортування або відсіювання. Це забезпечить більшу однорідність і поліпшить загальну якість екструзійного процесу. Розмір і форма часток мають бути сумісними з конструкцією шнека, щоб забезпечити ефективну подачу і плавлення матеріалу без ризику засмічення або зниження продуктивності.

Таким чином, правильний вибір і підготовка часток полімеру є важливою частиною процесу екструзії, що впливає на якість кінцевого продукту та ефективність виробничого процесу в цілому.

Надмірна вологість у полімерних гранулах може призвести до пароутворення під час процесу плавлення, що спричинить пористість або інші дефекти в друкованому виробі. Сировину потрібно буде попередньо висушити. Для деяких типів матеріалів може знадобитися попереднє нагрівання або витримання в певних температурних умовах перед подачею в екструдер. Забруднення або присутність сторонніх частинок у сировині може спотворити якість друку та пошкодити екструдер. Перед використанням матеріалу необхідно переконатися у його чистоті.

Ступінь подрібнення та сортування подрібнених часток є важливими аспектами в багатьох промислових процесах, включаючи виробництво полімерів, фармацевтику, хімічну промисловість та обробку матеріалів. Ступінь подрібнення характеризується розміром часток. Їх розмір можна оцінити після процесу подрібнення. Він може варіюватися від грубих часток до дрібного порошку.

Сипучі матеріали в залежності від розмірів часток можна розділити на п'ять груп [23]: кускові (більше 10 мм); крупнозернисті (2-10 мм); мілкозернисті (0,5-2 мм); порошкоподібні (0,05-0,5); пилеподібні (<0,5 мм). Оптимальний розмір часток залежить від специфіки процесу та обладнання. Для екструдерів, дрібніше подрібнення може забезпечити кращу переробку та однорідність готового виробу.

Важливою характеристикою сипучих матеріалів являється дисперсність ($1/d$). Дисперсність визначає їх технологічні властивості і може бути виражена функцією розподілення часток (зерен) по крупності.

Сортування часток полягає у відокремленні їх за розміром або іншими властивостями, щоб забезпечити більшу однорідність процесу плавлення в шнековому екструдері. Видалення небажаних часток може покращити якість продукції та запобігти проблемам під час виготовлення готових виробів [24, 25].

Існує багато методів сортування, зокрема:

- просіювання (ситовий аналіз), що використовує сита різних розмірів для розділення часток за розміром;
- повітряна класифікація, яка розділяє частки за розміром та вагою за допомогою потоку повітря;
- гідроциклонування, що використовує вихрові потоки рідини для сортування часток за розміром та густиною;
- оптичне, що застосовує оптичні технології для визначення та відбору часток за розміром, кольором або іншими властивостями;
- магнітне, що використовує дію магнітних полів для відокремлення магнітних часток від немагнітних.

Дані методи можуть комбінуватися або модифікуватися для задоволення специфічних потреб конкретного виробничого процесу.

Вимірювання крупності часток сипучих матеріалів являється одним із важливих методів виробничого контролю процесів, особливо пов'язаних з використанням порошкоподібних і пилеподібних продуктів. В промисловій практиці одним із способів для характеризування сипучого матеріалу по складу є розподілення його часток по розмірам, що визначається ситовим аналізом.

Процес подрібнення знаходить застосування у різних сферах, включаючи домашнє господарство, хімічну промисловість, гірничу справу, легку промисловість та інші галузі [23].

Подрібнення полягає у розділенні одного чи декількох більших шматків матеріалу на менші частини за допомогою механічних або хімічних методів. Хімічне подрібнення може включати розчинення матеріалу з наступним його випадінням у вигляді порошку, як, наприклад, при електролізі металів з утворенням порошку на катоді.

Механічне подрібнення є найбільш поширеним методом і вимагає використання різноманітного обладнання. Вибір устаткування залежить від фізичних та механічних характеристик матеріалу, його початкових розмірів, хімічних властивостей, а також від потреб у дисперсності кінцевого продукту. Важливими характеристиками обладнання для подрібнення є надійність, продуктивність і ефективність витрат на виробництво.

У різних подрібнювачах використовуються певні фізичні ефекти, такі як роздавлювання, стирання, різання, розколювання, а також ультразвукові, температурні та кавітаційні. Ця різноманітність методів призвела до створення широкого асортименту машин для виконання зазначеної операції [23]. Вибір обладнання для подрібнення залежить від розміру шматків первинного матеріалу, його фізично-механічних і хімічних характеристик, а також від необхідної дисперсності кінцевого продукту та продуктивності [1].

За ступенем подрібнення обладнання класифікується на дробарки і млини. Дробарки зазвичай забезпечують грубе, середнє та дрібне подрібнення, а млини виконують грубий, тонкий та надтонкий помел. При грубому подрібненні на дробарках розмір часток після виконання операції складає від 80 до 200 мм, при середньому – від 20 до 80 мм, при дрібному - від 2 до 20 мм. При руйнуванні матеріалу на млинах розмір часток складає при грубому помелі від 0,2 до 2 мм, при тонкому – від 0,01 до 0,2 мм, а при надтонкому – менше 0,01 мм [1].

При виборі обладнання для подрібнення полімерів слід враховувати багато факторів, включно з дисперсністю отриманого продукту, розмірами і механічними властивостями початкового матеріалу, його термічними характеристиками, хімічною реактивністю та її зміною в процесі подрібнення, потенційним забрудненням матеріалу від зносу робочих елементів, ступенем окислення від взаємодії з киснем, вибухонебезпекою та іншими показниками. Ця різноманітність вимог сприяла створенню широкого спектру машин для подрібнення [1].

Відходи полімерних матеріалів можна піддавати подрібненню на спеціалізованому дробильно-помольному обладнанні. Метод, який обирається для подрібнення, залежить від розміру та міцності матеріалу, що обробляється. За принципом дії та конструкцією розрізняють різні типи дробарок, такі як шоккові з різними видами руху шок, конусні з рухомими валами, валкові, молоткові, бігуни, дезінтегратори, а також млини кільцеві, кульові та вібраційні.

Для подрібнення полімерних відходів, що виникають в процесі 3D-друку, було використано подрібнювач від компанії Eро3d [26].

Mini Shredder - це компактний подрібнювач з одним валом, який застосовується для подрібнення пластикових відходів від 3D-друку на частки, що можуть бути знову перероблені в шнековому екструдері 3D-принтера. Він обладнаний однофазним двигуном з редуктором. Одновальна конструкція з низькою частотою обертання забезпечує мінімальний шум при виконанні технологічної операції. Редуктор із зубчастим механізмом створює високий крутний момент і потужність. Виготовлені з загартованої сталі ножі відрізняються високою міцністю і тривалим терміном служби. Використання фільтруючої сітки дозволяє отримувати частки потрібного розміру. Пристрій є зручним в експлуатації та легким у чищенні.

Шредери з одним валом відрізняються простотою конструкції та ефективністю подрібнення, роблячи їх підходящим вибором для подрібнення полімерних відходів, особливо в контексті переробки відходів 3D-друку та інших галузей промисловості.

Технічні параметри міні шредера для подрібнення:

- максимальна частота обертання валу подр. = 15 об/хв;
- розміри бункера для завантаження матеріалу для подрібнення 100x72x100 мм;
- розміри контейнера для подрібненого матеріалу 80x80x40 мм;
- потужність електричного двигуна 180 Вт;
- кількість рухомих ножів 14;
- товщина ножа 3,5 мм;
- діаметр ножа 58 мм;
- діаметр отворів фільтруючої сітки 6 мм.
- матеріал ножа Ст. 45 (загартований та шліфований) [26].

Загальний вигляд міні шредера з його основними елементами приведено на рис. 1.

Шредер з одним валом для подрібнення полімерних відходів працює наступним чином (рис.2). Полімерні відходи завантажуються в бункер 1 шредера (рис.3). Вони можуть бути у вигляді шматків, стрічок, гранул або інших форм, що потребують подрібнення. Всередині шредера знаходиться робочий вал з розміщеними на ньому ножами. Цей вал обертається, забезпечуючи різання, стирання або роздавлювання матеріалу. Під час обертання вала різальні елементи взаємодіють з матеріалом та плитою з пазами, яка розміщена на корпусі пристрою. Коли ножі заходять в пази плити, то відбувається розрізання матеріалу на менші частини. В нижній частині шредера розміщена сітка з отворами певного діаметру, які дозволяють регулювати максимальний розмір часток. Частки меншого діаметра просіваються через решітку, а більшого знову захоплюються ножами і подаються в зону різання. Подрібнені частки, які просіваються через сітку, накопичуються в спеціальному контейнері для подальшої переробки або використання (рис.4).



Рис.2. Міні шредер для подрібнення полімерних відходів: 1-завантажувальний бункер; 2-контейнер для подрібнених часток полімеру; 3-регулятор частоти обертання подрібнюючого органу; 4-полімерний матеріал, що подрібнюється; 5-подрібнені частки полімеру



Рис.3. Завантажувальний бункер з полімерними відходами

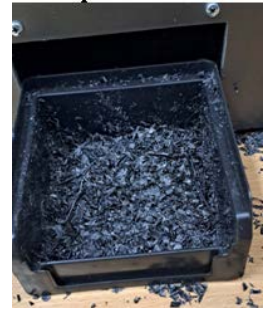


Рис.4. Контейнер з подрібненими полімерними частками

Для виконання операції подрібнення було відібрано відходи трьох видів: ABS, PLA та TPU пластику, що утворилися в процесі 3D-друку. В подальшому вони піддавалися операції механічного руйнування за допомогою вибраного устаткування та просіюванню за допомогою ситового аналізу.

Процес виконання операції подрібнення ABS пластику ножами шредера показано на рис.5.



а



б

Рис.5. Подрібнення пластику ABS ножами шредера: а-куски матеріалу в бункері; б-захоплення кусків матеріалу ножами

У зв'язку з тим, що діаметр отворів в сітці шредера складає 6 мм, для отримання необхідних фракцій подрібненого полімеру 2,5 мм і менше, було встановлено у шредері додаткову сітку з діаметром отворів 3 мм. Куски полімерного матеріалу, що подрібнювалися ножами, просівалися через неї.

Загальний вигляд подрібнених часток ABS пластику показано на рис.6.



Рис.6. Подрібнені частки ABS пластику, що утворилися з відходів 3D-друку: а-частки після першого подрібнення; б-частки після другого подрібнення

Під час виконання операції подрібнення Mini Shredder забезпечив високошвидкісні та високоякісні результати за низького енергоспоживання.

Для проведення експериментальних досліджень із ситового аналізу та насипної густини подрібнених часток, визначення густини надрукованої з полімерних відходів на 3D-принтері з шнековим екструдером мононитки, використовувалося наступне обладнання: мірні ємності різного об'єму; ваги лабораторні; штангенциркуль; вібраційна установка 028-М; комплект сит.

В подальшому подрібнені матеріали піддавалися ситовому аналізу. У процесі ситового аналізу використовували 6 металопробивних сит з діаметром оболонки 200 мм та висотою стінки 50 мм, виготовлених з оцинкованої сталі [27]. Діаметри отворів на ситах склали: 1,0 мм; 1,2 мм; 1,5 мм; 1,8 мм; 2,0 мм; 2,4 мм. Розмір часток фракції матеріалу визначався за розміром отворів сит, розташованих одне над іншим. Наприклад, якщо розмір отвору нижнього сита становить 1,0 мм, а верхнього - 1,2 мм, то частки, що залишаються між цими ситами після просіювання, будуть мати розмір у діапазоні від 1,0 до 1,2 мм.

За допомогою набору сит подрібнені частки матеріалу розділяються на фракції за розміром зерен. Проба матеріалу, що аналізується, поміщається на сито з найбільшими розмірами отворів в наборі, що використовується. Подрібнені частки, що проходять через сито, падають на наступне, більш тонке, сито і так до останнього з найменшим діаметром отворів [23]. При просіюванні сита встановлюються одне на одне (рис.7). Набір сит з подрібненими частками розміщується на лабораторній вібраційній машині 028-М. Через заданий проміжок часу проба матеріалу розділяється на фракції.

Кількість подрібненого матеріалу, що залишається на ситах після процесу просіювання, кількісно оцінювалася, а потім визначалася його частка у відсотках від загальної маси, взятої на аналіз проби (рис.8).



Рис.7. Металопробивні сита



Рис.8. Визначення маси фракції матеріалу на ситі

Фото розподілених по фракціях на ситах після виконання операції просіювання подрібнених часток показано на рис.9, а після кількісного оцінювання – на рис.10.

Результати ситового аналізу зазвичай візуалізуються за допомогою графіка диференціальної кривої розподілу. Ця крива відображає відсоткову частку кожної фракції в загальній масі матеріалу. На графіку кожна точка відповідає фракції з певним середнім розміром зерен, яка визначається як середнє арифметичне між розмірами отворів двох сусідніх сит. Таким чином, фракція, яка пройшла через одне сито і затрималася на наступному, відображається на графіку як точка, що відповідає цьому середньому розміру.

Масова доля подрібнених часток у фракції визначається із співвідношення [23]:

$$M_{\text{ф.}} = \frac{M_i}{M_{\text{заг.}}} \cdot 100 \% \quad (1)$$

де M_i - маса часток на ситі, г; $M_{заг.}$ - загальна маса всіх фракцій, що рівняється початковій масі завантаженого на сито з найбільшими отворами подрібненого полімеру, г.



Рис.9. Розподілені по фракціях подрібнені частки після просіювання

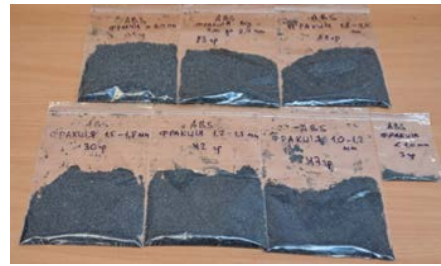


Рис.10. Розподілені по фракціях подрібнені частки після зважування

Визначивши середні розміри зерен між розмірами отворів двох сусідніх сит та за формулою (1) масову долю кожної фракції (рис.7), використовуючи програмне середовище MicroSoft Excel, було отримано криві розподілу подрібнених часток, що піддавалися механічній дії робочих органів шредера. Графіки розподілу подрібнених часток ABS, PLA і TPU пластиків з визначеними поліноміальними регресійними залежностями приведено на рис.11-13.

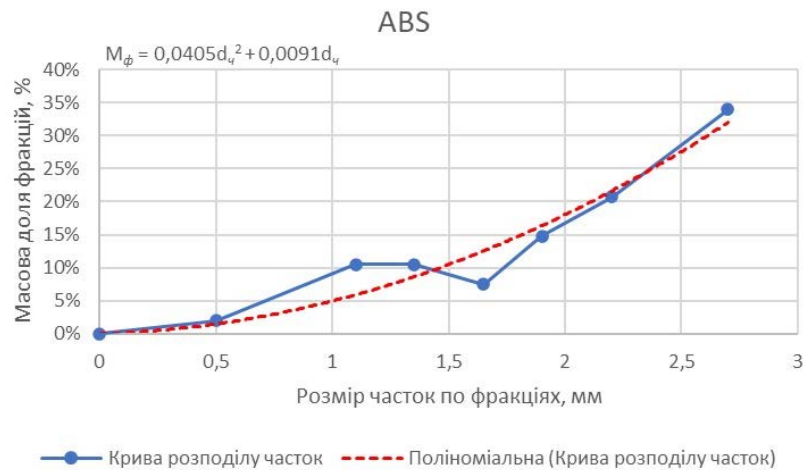


Рис. 11. Крива розподілу подрібнених часток ABS пластику

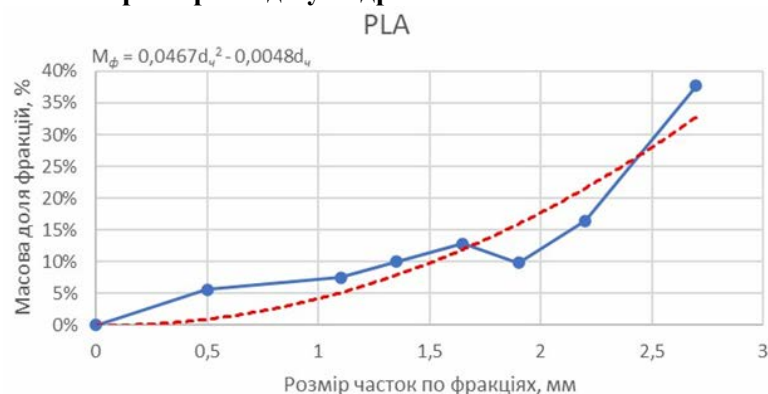


Рис. 12. Крива розподілу подрібнених часток PLA пластику

Далі було проведено визначення насипної густини пластиків, що піддавалися подрібненню. Метою експериментального дослідження було отримання залежностей насипної густини від фракційного складу матеріалу, що подрібнювався.

Насипна густина сипучого матеріалу визначається як маса цього матеріалу на одиницю об'єму, який він займає. Цей параметр є ключовим при визначенні необхідного об'єму бункерів дробарок, змішувачів та при розрахунку енерговитрат на переробку сипучих матеріалів [4]. Значення насипної густини залежить від багатьох факторів, включно з розміром і густиною часток, вмістом вологи та їх взаємним розміщенням у шарі [28].

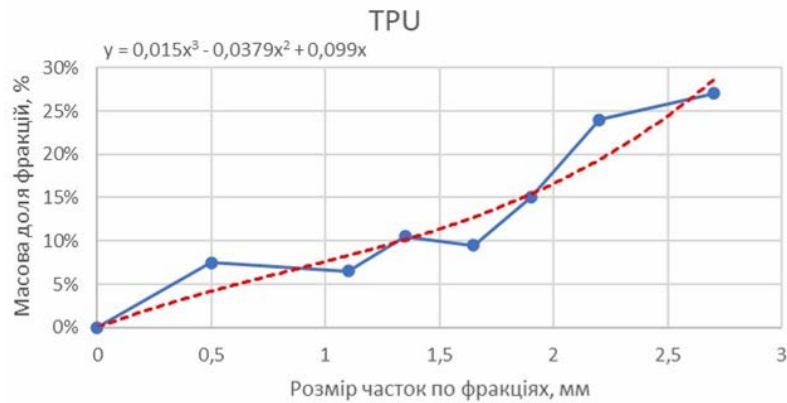


Рис.13. Крива розподілу подрібнених часток TPU пластику

Важливо зазначити, що насипна густина може змінюватися навіть при зберіганні матеріалу в спокої; вона може збільшуватися під впливом вібрацій ємності або зменшуватися при перемішуванні, наближаючись до певного граничного значення. Для деяких матеріалів коефіцієнт насипної густини може досягати 1,52 [29].

За гранулометричним складом сипучого матеріалу оцінюють кількісний розподіл часток, що входять до його складу, вимірюючи лінійні розміри. Більшість сипучих матеріалів мають частки неправильної форми. Для них умовний діаметр d_i , розраховується як середнє арифметичне або середнє геометричне трьох вимірювань лінійних розмірів частки (довжина, висота і ширина).

Сипучий матеріал лише в деяких випадках складається з частинок однакового розміру. Частіше в ньому значення d_i змінюється дискретно від деякого мінімального розміру d_{min} до максимального d_{max} . Відношення d_{min}/d_{max} у деяких сипучих матеріалах може бути дуже великим. Про розподіл часток полідисперсних матеріалів за розміром можна дізнатися за допомогою ряду розподілу дискретної випадкової величини d_i , в якому перераховані значення цієї випадкової величини: $d_1; d_2; d_n$ з відповідною ймовірністю p_1, p_2, \dots, p_n або частотами n_1, n_2, \dots, n_n . Визначення цілого ряду дискретних випадкових значень d_i для полідисперсних матеріалів з великим відношенням d_{min}/d_{max} є складною задачею, тому цей ряд замінюють дискретним рядом класів (часток) значень d_i . Для визначення гранулометричного складу сипучих матеріалів в даних дослідженнях використано методи прямого вимірювання та ситового аналізу [29].

Суміш різних фракцій готувалася у певному співвідношенні. За допомогою мірної ємності та вагів визначалася насипна густина кожної фракції подрібненого полімеру та суміші.

В якості матеріалу для дослідження застосовувалися подрібнені відходи полімерних матеріалів, що використовувалися при ситовому аналізі.

При проведенні досліджень застосовувався метод симплексно-решіткового планування експерименту [29]. Суміші подрібненого ABS-пластику формували трьома просіяними фракціями (табл. 1), масова частка яких змінювалася на чотирьох рівнях: 0; 0,33; 0,66, 1.

Насипну густина сипучого матеріалу, що досліджувався розраховували за формулою:

$$\rho_{н.г.} = \frac{m_{е.м.} - m_{е.}}{V_{м.е.}} \quad (2)$$

де $m_{е.м.}$ – маса ємності з матеріалом; $m_{е.}$ - маса ємності без матеріалу; $V_{м.е.}$ – об'єм ємності.

Експерименти повторювали три рази. Результати експерименту з визначення насипної густини подрібнених полімерних відходів приведені в табл.1.

Табл. 1.

Гранулометричний склад фракцій досліджуваних матеріалів

Розмір часток пластику ABS, мм	1,2	1,8	2,5
Визначення кількісного вмісту	X1	X2	X3

В результаті обробки експериментальних даних встановлено, що насипна густина сумішей фракцій подрібнених матеріалів розміром від 1,2 до 2,4 мм змінюється в межах 15 % (рис.14-16), тому отримані експериментальні дані апроксимовано залежно від середнього розміру часток у суміші матеріалів за формулою [29]:

$$d_{ч.с.} = d_1 \cdot X_1 + d_2 \cdot X_2 + d_3 \cdot X_3 \quad (3)$$

де d_1, d_2, d_3 - розмір часток у фракціях суміші, X1, X2, X3 - кількісний вміст фракцій у суміші.

Результати експерименту по визначенню насипної густини подрібнених часток ABS пластику приведені в табл.2.

Табл.2.

Результати експерименту для ABS пластику

№	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3	Yсер.
1	1	0	0	389,24	392,3	392,27	391,27
2	0	1	0	371,4	370,6	370,4	370,80
3	0	0	1	366,9	365,7	366,42	366,44
4	0,33	0,33	0,33	376,2	376,0	378,2	376,80
5	0,33	0,66	0	371,3	371,9	371,48	371,56
6	0	0,33	0,66	362,9	363,0	363,43	363,11
7	0,66	0,33	0	369,1	369,0	368,57	368,89
8	0,33	0	0,66	367,5	367,9	367,94	367,78
9	0,66	0	0,33	373,2	373,6	373,88	373,56
10	0	0,66	0,33	369,4	369,0	368,93	369,11

Результати обробки даних експериментальних досліджень подрібнених часток ABS пластику від середнього розміру часток сусідніх фракцій приведено на рис.14.

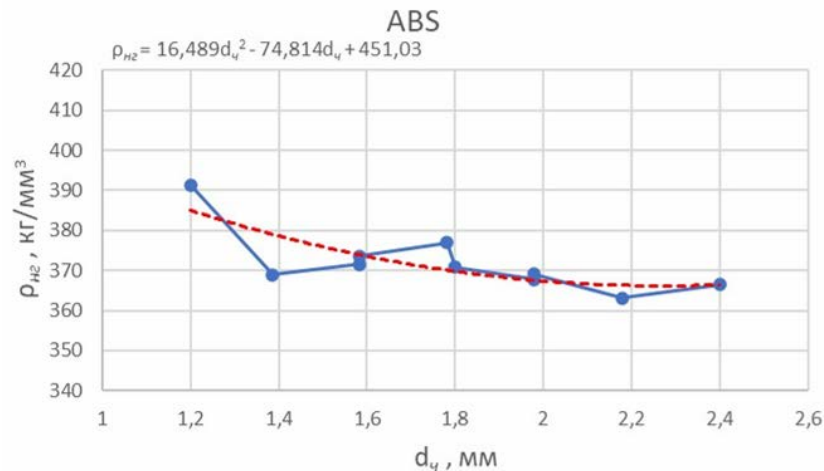


Рис.14. Результати обробки даних експериментальних досліджень подрібнених часток ABS пластику від середнього розміру часток сусідніх фракцій

Результати експерименту по визначенню насипної густини подрібнених часток PLA пластику приведені в табл.3.

Табл.3.

Результати експерименту для PLA пластику

№	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3	Yсер.
1	1	0	0	333,1	333,4	333,49	333,33
2	0	1	0	294,7	294,92	294,84	294,82
3	0	0	1	308,91	308,87	308,68	308,82
4	0,33	0,33	0,33	305,0	305,2	305,13	305,11
5	0,33	0,66	0	292,45	292,5	292,37	292,44
6	0	0,33	0,66	300,22	300,3	300,14	300,22
7	0,66	0,33	0	302,5	302,2	302,62	302,44
8	0,33	0	0,66	306,5	306,65	306,86	306,67
9	0,66	0	0,33	307,9	308,0	307,44	307,78
10	0	0,66	0,33	296,3	296,0	296,36	296,22

Результати обробки даних експериментальних досліджень подрібнених часток PLA пластику від середнього розміру часток сусідніх фракцій приведено на рис.15.

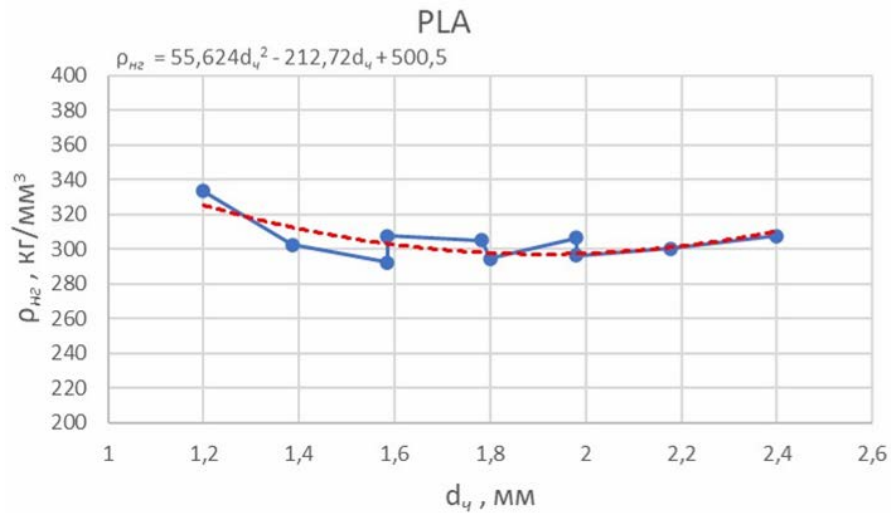


Рис.15. Результати обробки даних експериментальних досліджень подрібнених часток PLA пластику від середнього розміру часток сусідніх фракцій

Результати експерименту по визначенню насипної густини подрібнених часток TPU пластику приведені в табл.4.

Табл.4.

Результати експерименту для TPU пластику

№	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3	Yср.
1	1	0	0	340,4	340,1	339,5	340,0
2	0	1	0	299,7	300,1	300,2	300,0
3	0	0	1	286,6	286,7	287,01	286,77
4	0.33	0.33	0.33	300,64	300,7	300,67	300,67
5	0.33	0.66	0	313,4	313,5	313,09	313,33
6	0	0.33	0.66	286,7	286,8	286,51	286,67
7	0.66	0.33	0	306,5	306,7	306,81	306,67
8	0.33	0	0.66	300,1	300,2	299,7	300,0
9	0.66	0	0.33	319,8	320,2	320	320,0
10	0	0.66	0.33	293,1	293,4	293,49	293,33

Результати обробки даних експериментальних досліджень подрібнених часток TPU пластику від середнього розміру часток сусідніх фракцій приведено на рис.16.

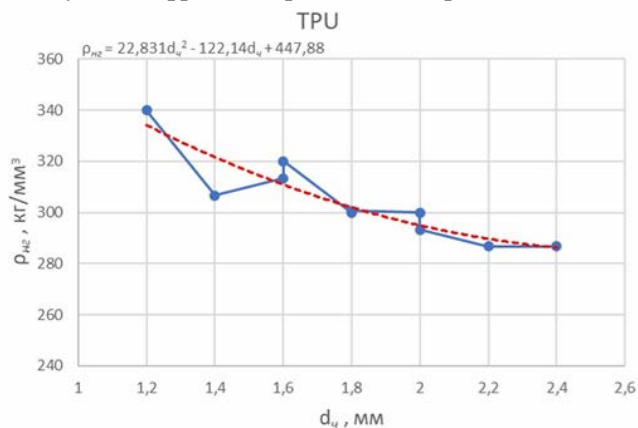


Рис.16. Результати обробки даних експериментальних досліджень подрібнених часток TPU пластику від середнього розміру часток сусідніх фракцій

Для визначення густини сформованої мононитки з подрібнених часток полімерних матеріалів, використовувався 3D-принтер з шнековим екструдером. За допомогою нього друкувалася полімерна нитка (рис.17). Після її остивання брався зразок довжиною 50 см. За допомогою штангенциркуля визначався його діаметр, а за допомогою вагів – маса.



Рис.17. Монітка надрукована з подрібнених часток ABS пластику на 3D-принтері з шнековим екструдером

Об'єм зразка визначався за формулою [30]:

$$V_{n.з.} = \frac{\pi \cdot d_{n.з.}^2 \cdot l_{n.з.}}{4}, \quad (4)$$

де $d_{n.з.}$ - діаметр полімерного зразка;

$l_{n.з.}$ - довжина полімерного зразка.

Для розрахунку густини матеріалу використовувалася формула:

$$\rho_{n.м.} = \frac{m_{n.з.}}{V_{n.з.}}, \quad (5)$$

де $m_{n.з.}$ - маса полімерного зразка; $V_{n.з.}$ - об'єм полімерного зразка.

Провівши розрахунки за формулами (4, 5), було визначено густину полімерних матеріалів, що досліджувалися. Результати розрахунків занесено в табл.5.

Похибка між табличним та експериментальним значеннями густини визначалася за формулою [31]:

$$\varepsilon = \frac{\pm(x_{вим.} - x_{\delta})}{x_{\delta}} \cdot 100\% = \frac{\pm\Delta_x}{x_{\delta}} \cdot 100\% \quad (6)$$

де x_{δ} - дійсне значення вимірюваної величини; $x_{вим.}$ - вимірне значення величини;

Δ_x - відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної величини.

За дійсне значення вимірюваної величини приймалася густина полімерного матеріалу, що наводиться в довідниках.

Найбільша похибка при розрахунку за формулою (6) довідникових та експериментальних значень густини (табл.5) склала 6,95% для пластику TPU.

Проведений аналіз показав, що значення густин ABS, PLA та TPU пластиків, що досліджувалися знаходяться в межах допустимого.

Отримані функції для розрахунку насипної густини полімерних матеріалів в залежності від середнього розміру часток представлені в табл.5.

В роботі [29] було визначено функції розрахунку насипної густини в залежності від середнього розміру часток для наступних полімерних матеріалів: гуми, поліетилену та PVC пластику (табл.6). Отримані залежності можна також використовувати в розрахункових формулах при визначенні об'ємної продуктивності шнекового екструдера 3D-принтера.

Висновки. У ході проведеного експериментального дослідження було вивчено можливість використання подрібнених відходів з ABS, PLA та TPU пластику, що з'явилися в процесі 3D-друку, в якості вихідної сировини для шнекового екструдера 3D-принтера.

1. Обраний шредер з одним валом та розміщеними на ньому ножами, якісно подрібнював вибрані полімерні матеріали до потрібної фракції.

2. Проведений ситовий аналіз з використанням набору сит з різними діаметрами отворів на ситці дозволив побудувати криві розподілу подрібнених часток і на основі них отримати регресійні залежності, які ілюструють зв'язок між масовою долею фракції та діаметром подрібнених часток.

Табл.5.

Функції розрахунку насипної густини залежно від середнього розміру часток

полімерних матеріалів: ABS, PLA та TPU пластиків

№ п/п	Матеріал	Експериментальне значення густини $\rho_{п.м.}$, кг/м ³	Довідникове значення густини $\rho_{п.м.}$, кг/м ³	Насипна густина суміші фракцій 1,2...2,4 мм, кг/м ³
1	Пластик ABS	1110	1050	$\rho_{н.з.} = 22,831d_{ч.}^2 - 122,14d_{ч.} + 447,88$
2	Пластик PLA	1245	1200	$\rho_{н.з.} = 55,624d_{ч.}^2 - 212,72d_{ч.} + 500,5$
3	Пластик TPU	1230	1150	$\rho_{н.з.} = 88,542d_{ч.}^2 - 586,67d_{ч.} + 1303,2$

Табл.6.

Функції розрахунку насипної густини залежно від середнього розміру часток полімерних матеріалів: гуми; поліетилену та PVC пластику

№ п/п	Матеріал	Густина полімеру $\rho_{п.м.}$, кг/м ³	Насипна маса суміші фракцій 10,0...2,0 мм, кг/м ³
1	Пластик PVC	1250	$\rho_{н.з.} = 519 - 423 \exp(0,834d_{ч.})$
2	Гума	1100	$\rho_{н.з.} = 478 - 309 \exp(0,7224d_{ч.})$
3	Поліетилен	950	$\rho_{н.з.} = 398 - 257 \exp(0,6724d_{ч.})$

3. Експериментальні дослідження із визначення насипної густини дали змогу побудувати графіки залежності насипної густини від діаметра часток подрібнених полімерів і на основі них отримати регресійні рівняння. Вони будуть практичне застосування при визначенні об'ємної продуктивності шнекового екструдера 3D-принтера.

4. Проведене визначення густин надрукованих з полімерних відходів на 3D-принтері з шнековим екструдером мононіток дало змогу встановити дійсні величини густин та порівняти отримані значення з довідниковими даними.

В загальному можна підсумувати, що здійснені експериментальні дослідження з подрібнення полімерних відходів дали змогу підібрати устаткування для їх механічного руйнування та отримати фракції часток, які будуть вихідною сировиною для шнекового екструдера 3D-принтера.

Список використаних джерел:

1. Місяць В.П. Розвиток наукових основ проектування обладнання для подрібнення відходів термопластичних і гумових матеріалів легкої промисловості : Дис... д-ра наук: 05.05.10 - 2008. – 365с.
2. Місяць В.П. Моделювання процесу різання гум і термопластичних матеріалів між двома ножами в роторних дробарках // Вісник Хмельницького національного університету. – 2007. - № 5. - С.145-149.
3. Місяць В.П., Бурмістенков О.П., Гладчук О.З. Моделювання процесів руйнування полімерних матеріалів при подрібненні // Вісник КНУТД. – 2007. - №3. - С. 40-45.
4. Рубанка М.М., Місяць В.П. Відходи легкої промисловості, способи переробки та області подальшого використання. Вісник КНУТД. Серія «Технічні науки». №4 (88), 2015. –С.34-39.
5. Мікульонюк І.О., Карвацький А.Я., Лелека С.В., Іваненко О.І. Валкові дробарки і млини (Огляд конструкцій). Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження 2022. №1. – С.30-43.
6. Скиба М.Є. Наукові основи ресурсозберігаючих технологій переробки відходів натуральних шкір у матеріали та вироби взуттєвого виробництва: дис... д-ра техн. наук: 05.19.06 / Київський національний ун-т технологій та дизайну. - К., 2004. – 418с.
7. Скиба М.Є. Обладнання для переробки відходів. – Хмельницький: ПП Ковальський В.В., 2004. – 124 с.
8. Скиба М.С., Михайловський Ю.Б., Золотенко Е.О. Методика розрахунку технологічних та конструктивних параметрів молоткового подрібнювального обладнання//Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки.-Хмельницький. - 2008. - №2 - С. 41-45.
9. Скиба М.Є., Михайловський Ю.Б., Золотенко Е.О. Моделювання процесу руйнування текстильного матеріалу в молоткових подрібнювачах // Вісник Хмельницького національного університету. - 2006. - № 5. - С. 30-34.

10. Скиба М.Є., Михайловський Ю.Б., Головка Г.С. Моделювання процесу подрібнення композиційних матеріалів з використанням методу скінченних елементів // Вісник Технологічного університету Поділля. – 2003. – №6. – С. 7-11.
11. Михайловський Ю.Б., Золотенко Е.О. Визначення факторів які суттєво впливають на ефективність проектування молоткового подрібнювача текстильних матеріалів. Вісник КНУТД. №5, 2010. –С.76-80.
12. Заяць В.В., Михайловський Ю.Б. Визначення оптимальних параметрів основних характеристик подрібнення полімерів у роторних дискових подрібнювачах. Східно-Європейський журнал передових технологій. № 2/3 (50). 2011. С.50-53.
13. Muiywa A. Okusanya, Gbenga W. Ibrahim. Design and Development of Plastic Crusher for a More Efficient Waste Management Practice. International Journal of Innovative Research and Development. August 2020. DOI: 10.24940/ijird/2020/v9/i8/AUG20075.
14. Li-Mei Zhao, Lun-Jun Chen. Modeling and simulation on crushing process of impact crusher. Journal of the China Coal Society. August 2013.
15. Guochen Duan, Boqiang Shi, Jie Gu, Guochen Duan, Boqiang Shi, Jie Gu. Research of Single-Particle Compression Ratio and Prediction of Crushed Products and Wear on the 6-DOF Robotic Crusher. Mathematical Problems in Engineering. March 2021. DOI: 10.1155/2021/6634272.
16. Śiężkowski P., Maciejewski J., Bąk S. Experimental studies on the efficiency of the crushing processes. Publisher: LAP Lambert Academic Publishing, 2018. ISBN: 978-613-9-84936-9.
17. Sokgun Hong, Un Chol Han, Gum Chol Kim. Numerical Simulation of the Collision Breakage Process between the Agglomerate and Hammer in a Hammer Crusher Using DEM. Shock and Vibration. July 2023. DOI: 10.1155/2023/2838179.
18. Dong Gang, Fan Xiumin, Huang Dongming. Analysis and optimization of cone crusher performance. Minerals Engineering. October 2009. DOI: 10.1016/j.mineng.2009.03.020.
19. Yueqing Xing, Sun Deqiang, Sun Deqiang, Meiyun Zhang, Shu Guowei, Shu Guowei. Crushing Responses of Expanded Polypropylene Foam. Polymers. April 2023. DOI: 10.3390/polym15092059.
20. Muiywa Okusanya, Ibrahim Gbenga Design and Development of Plastic Crusher for a More Efficient Waste Management Practice. International Journal of Innovative Research and Development. August 2020.
21. Поліщук А.О., Скиба М.Є., Поліщук О.С. Перспективи розробки обладнання для подрібнення відходів 3D-друку. Мехатронні системи : інновації та інжиніринг: тези доповідей VII Міжнародної наук.-практ. конф. / Київ : КНУТД, 2023. С.115-116.
22. Поліщук А.О. Розробка системи охолодження корпусу шнекового екструдера 3D-принтера. Технології та інжиніринг. 2023. № 6.
23. Хіміко-технологічні процеси в виробництвах легкої промисловості та електропобутової техніки. Лабораторний практикум для студентів спеціальностей «Обладнання легкої промисловості», «Електропобутова техніка»/ О.С. Поліщук, П.Г. Капустенський, А.К. Кармаліта, Д.В. Прибега – Хмельницький: ХНУ, 2004. - с.
24. Білоус О.І. Конспект лекцій з навчальної дисципліни «Процеси та апарати харчового виробництва». – Кам'янське: ДДТУ, 2019р. – 67с.
25. Черевко О.І., Поперечний А.М. Процеси і апарати харчових виробництв: підручник / О.І. Черевко, А.М. Поперечний. - 2-е видання, доп. та випр. — Х.: Світ Книг, 2014. - 495с.
26. Подрібнювач Mini Shredder + [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://epo3d.com/uk/katalog/shredder/razmelchitel-mini-sredder-.html>
27. Сита лабораторні. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://surl.li/oaof>.
28. Рубанка М.М., Місяць В.П. Експериментальні дослідження динаміки роторної дробарки для переробки відходів легкої промисловості / Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки. - 2016. - № 1. - С.27-36.
29. Misiats O., Misiats V., Rubanka M., Polishchuk A., Skyba M. Determination of bulk density of mixtures of fractions of crushed polymeric materials. Actual problems of modern science. Monograph: edited by Matiukh S., Skyba M., Musial J., Polishchuk O. Bydgoszcz (Poland). 2021 2021. pp. 462-466.
30. Бровченко О.М. Геометрія в таблицях і схемах. – К.: ТОВ «ВП Логос-М», 2021. - 125с.
31. Сусліков Л.М., Студеняк І.П. Метрологія та вимірювання: Навчальний посібник. – Ужгород: Видавництво УжНУ, 2014. - 292 с.

А.С. Кушнірчук, В.П. Ткачук, В.О. Харжевський

Хмельницький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ ОТРИМАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ FDM ДРУКУ ІЗ ABS ТА COPET ПЛАСТИКУ

Аддитивні технології є перспективними для машинобудування, вони дозволяють створювати легкі конструкції із заданими характеристиками міцності. Технології 3D-друку, стають все більш популярними через їхню зручність використання та постійне зниження цін на технологічне обладнання і матеріали. Однак зараз доступно мало інформації про механічні властивості деталей, надрукованих за допомогою недорогих 3D-принтерів з відкритим кодом.

Стаття зосереджена на вивченні механічних характеристик деталей, які надруковано FDM технологіями. Показано, що деталі, які виготовлено FDM технологіями з полімерів, здатні витримувати навантаження. Визначено вплив величини внутрішнього заповнення на міцність деталі на розтяг. Побудовано діаграми деформування зразків. З цих діаграм визначено механічні характеристики та характер руйнування. Проводиться порівняльний аналіз механічних характеристик двох матеріалів, а також вплив величини внутрішнього заповнення. В результаті аналізу встановлено, що межа міцності у зразків виготовлених з полімера CoPet вище, ніж у ABS. Зразки з CoPet демонструють пластичну поведінку, тоді як ABS демонструє крихке руйнування. Отримані результати дозволяють конструкторам приймати рішення про друк елементів із заданими характеристиками.

Ключові слова: polymer, FDM printing, tear machine, strength.

S. Kushnirchuk, V. Tkachuk, V. Kharzhevskyi

STUDY OF STRENGTH CHARACTERISTICS OF PARTS OBTAINED BY FDM PRINTING FROM ABS AND COPET PLASTIC

Additive technologies are promising for the field of mechanical engineering as they enable the creation of lightweight structures with specified strength characteristics. 3D printing technologies are becoming increasingly popular due to their user-friendliness and the continual decrease in prices of technological equipment and materials. However, there is currently limited information available regarding the mechanical properties of components printed using inexpensive open-source 3D printers.

The article focuses on studying the mechanical characteristics of components printed using FDM (Fused Deposition Modeling) technologies. It demonstrates that parts manufactured through FDM using polymers are capable of withstanding loads. The influence of infill density on the tensile strength of the components is determined. Deformation diagrams of samples are constructed, from which mechanical properties and the nature of failure are identified. A comparative analysis of the mechanical characteristics of two materials is conducted, along with an examination of the impact of infill density. As a result of the analysis, it is established that the yield strength in samples made from the CoPet polymer is higher than in ABS. CoPet samples exhibit plastic behavior, whereas ABS demonstrates brittle failure. These findings enable designers to make informed decisions regarding the printing of elements with specified characteristics.

Key words: intellectual property, codification, European Union, Code of laws on intellectual property.

Постановка проблеми. Аддитивні технології є перспективними для машинобудування, вони дозволяють створювати легкі конструкції з заданими міцнісними характеристиками. Оскільки інформації про механічні характеристики матеріалів, які використовуються в аддитивних технологіях обмаль, кожний розрахунок повинен бути супроводжений експериментальним визначенням цих характеристик. Пропонується експериментальний підхід до визначення механічних характеристик деталей, які надруковано FDM технологіями. Показано, що деталі, які виготовлено FDM технологіями з полімерів, здатні витримувати навантаження. Визначено вплив величини внутрішнього заповнення на міцність деталі на розтяг. Побудовано діаграми деформування зразків. З цих діаграм визначено механічні характеристики та характер руйнування. Проводиться порівняльний аналіз механічних характеристик двох матеріалів, а також вплив величини внутрішнього заповнення. В результаті аналізу встановлено, що межа міцності у зразків виготовлених з полімера CoPet вище, ніж у ABS. Зразки з CoPet демонструють пластичну поведінку, тоді як ABS демонструє крихке руйнування.

FDM друк, як найбільш доступний і поширений вид аддитивних технологій, знайшов широке застосування в багатьох сферах. Деталі отримані на принтерах використовуються як ремонтні запасні частини, у якості прототипів, а також як повноцінні функціональні деталі в механізмах. Технологія FDM друку значно спрощує процес виготовлення деталей складної форми, а пост обробка, в тому числі обробка різанням на верстатах забезпечує достатню точність. При цьому залишається актуальним питання механічних властивостей виробу, оскільки процес друку передбачає пошарове наплавлення розплавленого матеріалу (філаменту). Таким чином виріб не

© А.С. Кушнірчук, В.П. Ткачук, В.О. Харжевський

можна розглядати як монолітний об'єкт з певного матеріалу. Для визначення максимальних навантажень, а також можливої пластичної поведінки надрукованих деталей, пропонується виконати дослідження на розривній машині УМ-5. Отримані дані дозволять порівняти властивості найбільш популярних і схожих за характеристиками філаментів, ABS і CoPet (PETG), визначити вплив величини внутрішнього заповнення моделі, характер руйнування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Однією з найбільш часто використовуваних у промислових цілях є технологія Fused Deposition Modelling (пошарового наплавлення), яка може бути використана для отримання деталей з термопластичних матеріалів. Найпоширенішим конструкційним матеріалом є акрилонітрилбутадієнстирол (АБС), який забезпечує відносно хорошу міцність і прийнятну термічну усадку. Це також дозволяє подальшу обробку отриманих елементів (шляхом механічної обробки, покриття або склеювання). Машини для моделювання пошарового наплавлення, порівняно з іншими технологіями адитивного виробництва, мають невеликі розміри та прості в обслуговуванні [1, 3].

Кінцевий продукт, виготовлений за технологією Fused Deposition Modelling, можна охарактеризувати деякими коефіцієнтами, на які впливає багато факторів [4]. На відміну від більшості виробничих технологій, значення параметрів процесу адитивного виробництва можуть бути більш значущими, ніж властивості матеріалу деталі – два різні набори параметрів процесу виготовлення, застосовані до однієї і тієї ж геометрії, можуть призвести до отримання двох деталей з абсолютно різними властивостями. Кожен набір параметрів процесу: орієнтація моделі в робочій камері, товщина шару та спосіб заповнення контуру шару, змусить структуру деталі виглядати по-різному, що призведе до різних значень міцності, точності або якості поверхні.

Дотепер багато вчених досліджували вплив параметрів технологічного процесу на механічні властивості виробів, виготовлених за технологією FDM [4, 5]. Деякі дослідники зосереджувалися на оптимізації обраного параметра по відношенню до певного критерію оцінки, наприклад, часу процесу [6], точності зображення форми [7], якості поверхні [8] та механічних властивостей [9]. Параметром процесу, який найбільш істотно впливає на значення властивостей продукту, є просторова орієнтація продукту в робочій камері в процесі виготовлення [4, 5, 6, 7].

Постановка завдань.

Метою даної роботи було узагальнити комплекс експериментальних досліджень, проведених для отримання знань про вплив ключового параметру адитивного виробництва за технологією FDM – орієнтації продукту в робочій камері під час нанесення шару та сітки заповнення на міцність отриманих деталей.

Викладення основного матеріалу.

ABS (Акрилонітрилбутадієнстирол) -пластик є одним з найпопулярніших в світі матеріалів для 3D друку, тому що він досить міцний, і їм відносно легко друкувати. [3] Він може бути використаний для виготовлення функціональних 3D друкованих деталей і для прототипів. Деталі, надруковані ABS пластиком, можна відшліфувати або згладити за допомогою ацетону. Просунуті користувачі виявили, що видимі ступінчастість шарів, утворену при 3D друку ABS пластиком, можна істотно зменшити, впливаючи на готову деталь парами ацетону. Цей метод дозволяє користувачам отримувати гладкі глянцеві прототипи. Температура склування (температура, при якій пластик починає розм'якшуватися) ABS становить 105 °C. Тому при розробці прототипу деталі необхідно враховувати температуру експлуатації готового виробу. Якщо деталь буде використовуватися при температурі більше 105 °C, ABS пластик буде розм'якшуватися і деформуватися. Усадка ABS пластику може привести до розтріскування або розщепленню шарів у міру збільшення висоти об'єкта. Саме з цієї причини обов'язковою умовою є наявність платформи з підігрівом. Також бажано, щоб у приміщенні підтримувалася постійна температура, і не було протягів, які можуть прискорити охолодження, а, отже, і деформацію матеріалу.

Переваги: ABS - міцний і довговічний матеріал. Володіє хорошою стійкістю до нагрівання та ударів. Матеріал буде жолобитися і гнутися перед тим, як зламатися, довговічність АБС також сприяє його використанню для функціональних деталей.

Недоліки: ABS дуже чутливий до змін температури, тому рекомендуються принтери з столом з підігрівом, а також закритим корпусом. Коливання температури можуть призвести до деформації та появи тріщин на деталях. Закритий корпус допоможе підтримувати задану температуру під час друку. Ще один недолік ABS - його чутливість до УФ-випромінювання. З-за

надмірного впливу ультрафіолетового випромінювання ABS стає крихким, що істотно знижує його міцність і довговічність. Так що краще не використовувати ABS для зовнішніх робіт.

CoPet (Поліетилентерeftалат гліколь) являє собою термопласт, властивості якого роблять його гарним претендентом на функціональні об'єкти. [2] В традиційному виробництві його часто використовують для виготовлення пляшок для води й харчових контейнерів.

Переваги: CoPet вважається харчовою ниткою, отже можливо використовувати його для виготовлення речей, які будуть стикатися з їжею, наприклад, кухонних приладів, контейнерів і т. д. Враховуючи його термостійкість, його можна мити в посудомийній машині (при певній температурі). Матеріал також міцний і володіє високою ударостійкістю.

Недоліки: Філамент CoPet схильний додавати додаткові нитки під час друку, що часто призводить до «волохатих» виробів. Це пов'язано з високою температурою, необхідною для друку, яка дозволяє філаменту вільно текти, але змушує пластик залишати тонкі нитки при переміщенні між двома точками.

Для проведення дослідження використано розривну машину УМ-5 (Рис.4) основні характеристики: Точність вимірювань, % від вимірюваного навантаження ± 1 ; Найбільше статичне навантаження на розтяг, стиснення, поперечний вигин та загин - 50кН; Кількість швидкостей навантаження - 5 Швидкість навантаження, мм/хв 2; 4; 10; 20; 50; Кількість швидкостей холостого ходу - 1 Швидкість холостого ходу, мм/хв. на поперечний вигин - 68мм

Для можливості закріплення досліджуваного зразка на машині, підготовлено зразки спеціальної форми, показано на Рис.1, упори на кінцях дозволяють надійно зафіксувати зразок в оснащенні машини (Рис.4), потоншення по центру - формує досліджуваний переріз площею 0,0004м².

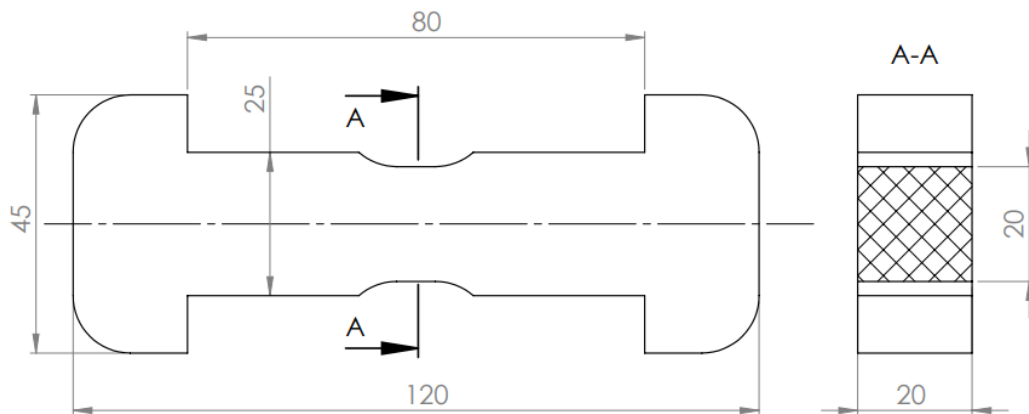


Рис.1. Ескіз зразка

Зразки виготовлено на FDM принтері Artillery sidewinder x1, діаметр сопла - 0,4мм. Режими друку для зразків з CoPet: Температура сопла - 245°C; Температура столу - 90°C; Висота шару - 0,25мм; Швидкість друку - 75мм/с; Кількість зовнішніх шарів - 2. Режими друку для зразків з ABS: Температура сопла - 230°C; Температура столу - 110°C; Висота шару - 0,25мм; Швидкість друку - 80мм/с; Кількість зовнішніх шарів - 2.

Зразки надруковано з кожного матеріалу в трьох варіантах: Заповнення 100%, 50%, 25%, тип заповнення - Rectilinear (шари накладаються з перехрещуванням в 90°).

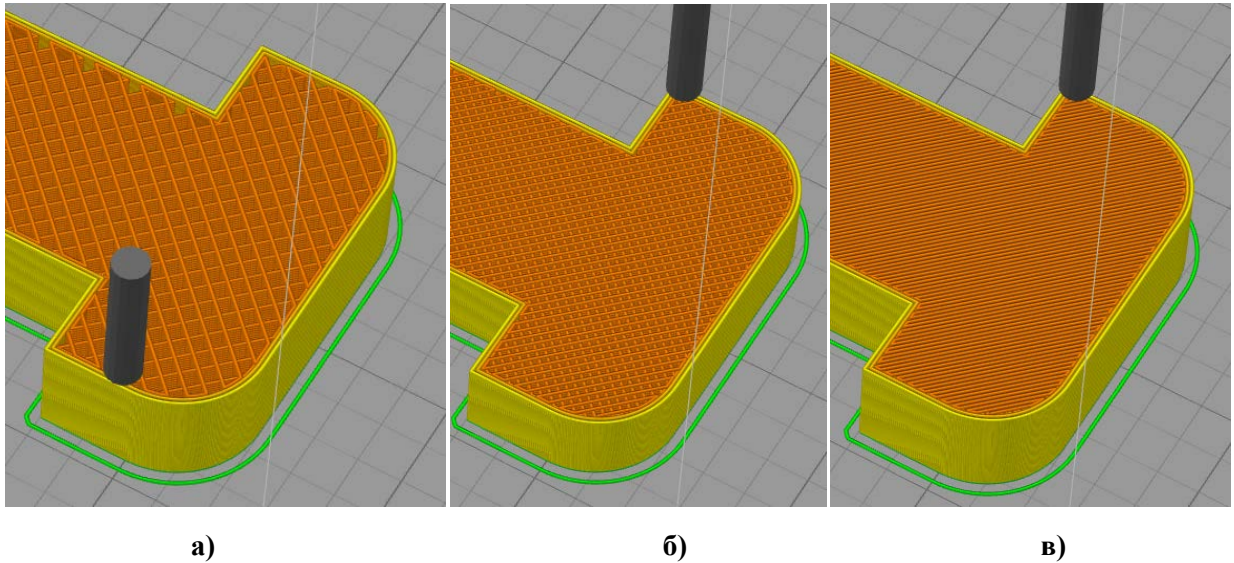


Рис.2. Внутрішня структура досліджуваних зразків при заповненні: а) - 25%; б) – 50%; в) – 100%.

Зразки почергово закріплюються в розривній машині і навантажуються до руйнування. За результатами дослідження формуються діаграми руйнувань для всіх зразків (Рис.6, Рис.7) Діаграми демонструють схожу поведінку зразків з 100% заповненням, на початку навантаження зразки діють за законом Гука, чітко бачимо межу пропорційності, після досягнення межі пружності, помітне незначне збільшення деформації, далі збільшення навантаження і досягнення межі міцності з мінімальною деформацією для ABS (крихке руйнування). Матеріал CoPet з 100% заповненням при досягненні межі міцності, якийсь час опирається руйнуванню, при цьому чітко помітна деформація, зразок демонструє пластичну поведінку. Зразки з внутрішніми пустотами (заповнення 50 і 25%) не демонструють пружних властивостей, з самого початку навантаження помітна деформація зразків. Зразки з ABS з заповненням 50 і 25% при досягненні межі міцності опираються руйнуванню деформуючись.

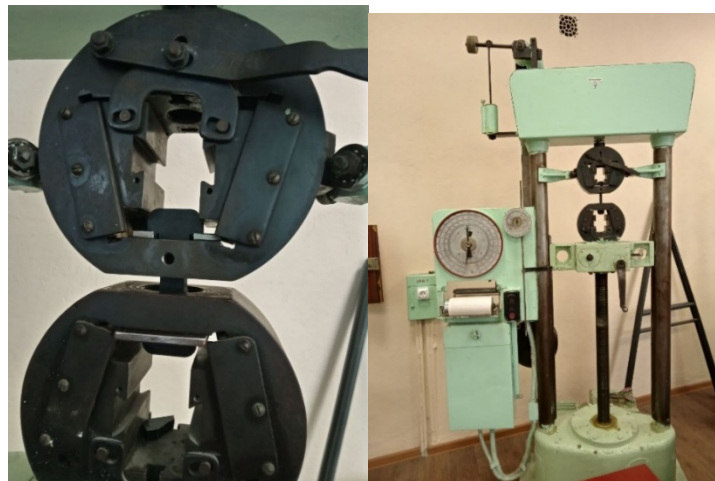


Рис.4. Фіксація зразка в оснащенні машини УММ-5 Рис.5. Розривна машина УММ-5.

Дослідження показало зменшення межі міцності пропорційно зменшенню величини внутрішнього заповнення, при цьому збереження пружних властивостей зразка можливе лише при 100% заповненні для обох досліджуваних матеріалів.

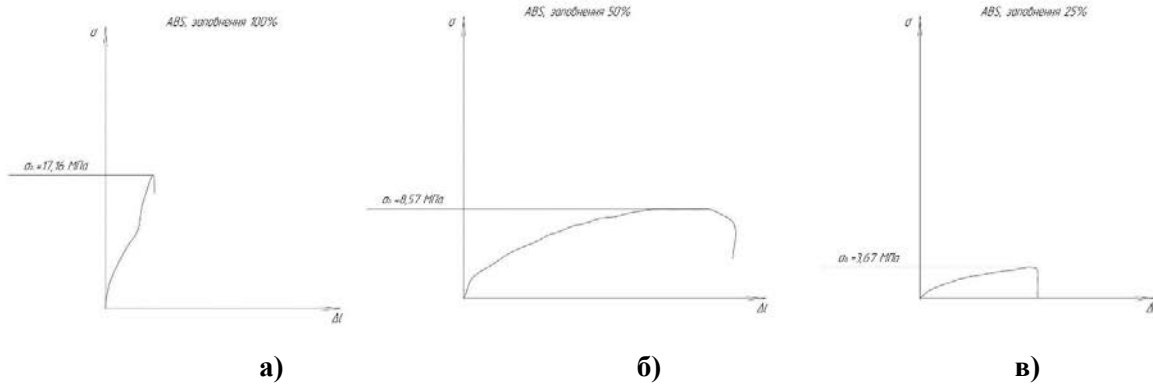


Рис. 6. Діаграми руйнувань зразків з ABS пластику при різних величинах внутрішнього заповнення: а) - 25%; б) – 50%; в) – 100%

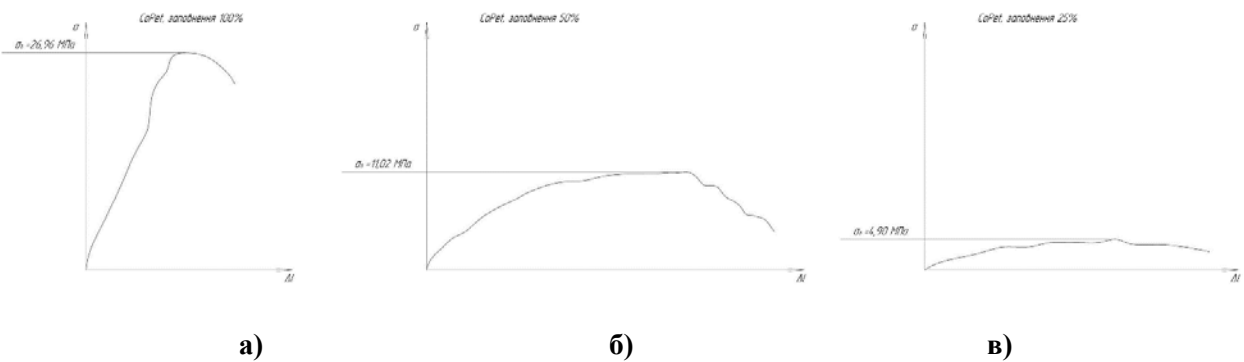


Рис. 7. Діаграми руйнувань зразків з CoPet пластику при різних величинах внутрішнього заповнення: а) - 25%; б) – 50%; в) – 100%

Табл. 1

Максимальне навантаження зразків перед руйнуванням

Матеріал з якого виготовлено зразок	Величина внутрішнього заповнення, %	Максимальне навантаження, кг	Межа міцності, МПа
CoPet	25	200	4,90
ABS+	25	150	3,67
CoPet	50	450	11,02
ABS+	50	350	8,57
CoPet	100	1100	26,96
ABS+	100	700	17,16

Висновки

Наведено методику експериментального аналізу механічних характеристик зразків, надрукованих за допомогою адитивних технологій FDM. Як впливає з експериментальних досліджень, зниження внутрішнього заповнення пропорційно зменшує межу міцності зразка. ABS пластик виявився менш міцним на розрив у порівнянні з CoPet пластиком. При дослідженні діаграм руйнувань помічено пластичну поведінку у зразків з CoPet, тоді як зразки з ABS демонструють крихке руйнування.

Зменшення величини внутрішнього заповнення, знижує витрати часу і матеріалу, що призводить до позитивного економічного ефекту: 100% - час друку 3 год. 20хв, витрата матеріалу 89 грам; 50% - час друку 2 год, витрата матеріалу 51 грам; 25% - час друку 1 год. 20хв, витрата матеріалу 32 грам.

Дослідження допоможе краще підбрати спосіб друку деталей виходячи з вимог міцності. Якщо для деталей висуваються вимоги пружності, дослідження показало, що в такому разі доцільно використовувати лише друк з 100% внутрішнім заповненням.

Список використаних джерел:

1. Gibson I. Additive Manufacturing Technologies. 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker. – New York, 2015. – 498 с. – (Springer).
2. Pająk E., Górski F., Wichniarek R., Dudziak A.: Techniki przyrostowe i wirtualna rzeczywistość w procesach przygotowania produkcji. Promocja 21, Poznań 2011.
3. Górski F., Wichniarek R., and Andrzejewski J., Influence of part orientation on strength of ABS models manufactured using Fused Deposition Modeling technology. Polymer Processing, 9, 2012, 428–435
4. Bellini A., Gucerri S., Mechanical characterization of parts fabricated using Fused Deposition Modeling. Rapid Prototyping Journal, 9, 2003, 252–264.
5. Charles Dapogny, Rafael Estevez, Alexis Faure, Georgios Michailidis. 2019. Shape and topology optimization considering anisotropic features induced by additive manufacturing processes. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 344, 626-665.
6. Hardikkumar Prajapati, Darshan Ravoori, Robert L. Woods, Ankur Jain. 2018. Measurement of anisotropic thermal conductivity and inter-layer thermal contact resistance in polymer fused deposition modeling (FDM). Additive Manufacturing 21, 84-90.
7. Cesar Omar Balderrama-Armendariz, Eric MacDonald, David Espalin, David Cortes-Saenz, Ryan Wicker, Aide MaldonadoMacias. 2018. Torsion analysis of the anisotropic behavior of FDM technology. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 96:1-4, 307-317.
8. PLA, ABS, PETG. В чому різниця? 3D4U.COM.UA. URL: <https://3d4u.com.ua/uk/blog/post/81-pla-abs-petg-v-chomu-riznicya> (Дата звернення 28.10.2023)
9. ABS - пластик для 3D друку. Опис і порівняння. 3D4U.COM.UA. URL:<https://3d4u.com.ua/uk/blog/post/4-abs-plastik-dlya-3d-pechati-opisanie-i-sravnienie> (Дата звернення 22.10.2023)
10. Машина випробувальні [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ukrintech.com.ua/ua/mashynu-vyprobuvalni/> (Дата звернення 2.11.2023)

М.П. Ярошевич, В.С. Пуць, В.Л. Мартинюк, П.П. Мелесь

Луцький національний технічний університет

ОСОБЛИВОСТІ ДИНАМІКИ НЕЗРІВНОВАЖЕНОГО РОТОРА З ВІБРУЮЧОЮ ВІССЮ

Розглядаються стаціонарні (близько стаціонарні) режими обертання незрівноваженого ротора з частотою коливань осі. З позицій вібраційної механіки наводяться пояснення механізму вібраційного захоплення обертання незрівноваженого ротора; продемонстровано, що динамічний (вібраційний) момент, що виникає внаслідок коливань прагне синхронізувати коливальний і обертальний рухи. Показано, що при встановленні стаціонарного режиму обертання ротора можуть збуджуватися значні, відносно повільні коливання його швидкості. Теоретичні результати підтверджуються комп'ютерним моделюванням.

Ключові слова: незрівноважений ротор, вібрація осі, вібраційний момент, нестаціонарний процес, повільні коливання.

M.P. Yaroshevich, V.S. Puts, V.L. Martyniuk, P.P. Meles

FEATURES OF THE DYNAMICS OF AN UNBALANCED ROTOR WITH A VIBRATING AXIS

Stationary (near stationary) rotation modes of an unbalanced rotor with the oscillation frequency of its axis are considered. From the standpoint of I.I. Blekhnman's vibrational mechanics, explanations of the mechanism of vibrational capture of the rotation of an unbalanced rotor are given; it is demonstrated that the vibration moment arising as a result of oscillations tends to synchronize vibrational and rotational movements, that its effect after the establishment of a stationary mode becomes unambiguous – either braking or accelerating. It is shown that when a stationary rotation mode is established, large, relatively slow oscillations of rotor's speed can occur. Theoretical results are confirmed by computer simulation.

Key words: unbalanced rotor, axis oscillations, vibration moment, vibrational capture, slow oscillations.

Постановка проблеми. Потреби розвитку та вдосконалення вібраційної техніки, з одного боку, та необхідність розуміння своєрідних явищ, пов'язаних з дією вібрації на механічні системи роблять актуальними задачі дослідження динаміки незрівноваженого ротора з вібруючою віссю. Суттєво, що ледве помітна вібрація осі незрівноваженого ротора може забезпечувати істотну передачу енергії ротору.

Вібраційне захоплення, а також вібраційна підтримка обертання незрівноваженого ротора під дією коливань осі є важливими нелінійними ефектами, які лежать в основі принципу дії низки вібраційних машин та пристроїв. Ефекти широко використовуються в інерційних дробарках, вібраційних грохотах, млинах та живильниках, а також у вібраційних перетворювачах руху. Крім того, ефекти знайшли успішне застосування у вібромашинах із дебалансними збудниками, що самосинхронізуються. Відомо, також про застосування ефекту вібраційної підтримки обертання незрівноваженого ротора для використання енергії морських хвиль.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Дослідженню вібраційних ефектів присвячена значна кількість існуючих робіт. Мабуть вперше дослідження вказаних ефектів було виконано у роботі М.М. Боголюбова [1]. З використанням асимптотичного методу було отримано умову за якої можлива вібраційна підтримка обертання незрівноваженого ротора при вібрації осі ротора. Дослідження виконано для основного режиму обертання ротора при прямолінійних коливаннях його осі. Найбільш повний виклад та узагальнення основних результатів досліджень наведено у монографіях [2, 3].

Питанням практичного використання ефектів вібраційного захоплення, а також вібраційної підтримки обертання незрівноваженого ротора під дією коливань осі присвяченні статті [4-7]. У роботі [4] аналізуються можливі режими руху незрівноваженого ротора з автобалансуючим пристроєм. Показано, що за заданих параметрах динамічної системи є кілька якісно різних стійких режимів руху ротора. Проведено аналіз діапазонів стійкості всіх можливих режимів руху. У статті [5] було розроблено математичну модель та отримано чисельні результати динамічної поведінки маятника, який з'єднано з генератором постійного струму; при цьому, вісь маятник здійснювала вертикальні гармонічні коливання. Детально проаналізовано неідеальну взаємодію двигуна постійного струму з маятником. Праця [7] присвячена дослідженням коливань механічної системи збуджуваних інерційним віброзбудником, який приводиться в обертання електродвигуном асинхронного типу.

Серед останніх робіт у яких досліджується нелінійні вібраційні ефекти які мають місце при обертанні незрівноваженого ротора (інерційного віброзбудника) з вібруючою віссю слід відзначити статті [8, 9].

У монографії [2] звертається увага на те, що достатньо простий опис ефекту вібраційного підтримки обертання незрівноваженого ротора можна отримати за допомогою підходу вібраційної механіки. З використанням зазначеного підходу в пропонованій роботі отримано інженерну інтерпретацію явища вібраційної підтримки обертання. Для практично важливого випадку, коли опір обертанню ротора обумовлено лише тертям у підшипниках, запропоновано просту умову існування стаціонарного режиму обертання незрівноваженого ротора.

1. Опис динамічної системи та рівняння руху.

Розглянемо незрівноважений ротор (дебалансний віброзбудник), вісь якого здійснює вертикальні гармонічні коливання, що збуджуються ідеальним джерелом енергії за законом (рис. 1). Передбачається, що вісь ротора горизонтальна, а напрямок коливань перпендикулярний до осі. Зауважимо, що вивчений у [2] більш загальний випадок коливань осі у двох взаємно перпендикулярних напрямках, принципово не відрізняється від розглянутого, проте потребує більш громіздких обчислень.

Рівняння руху незрівноваженого ротора з віссю, яка вібрує, має вигляд

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

де I – момент інерції незрівноваженого ротора; φ – кут повороту ротора; $L(\dot{\varphi})$ – обертовий момент електродвигуна; $R(\varphi)$ – момент сил опору обертання ротора; m, ε – маса та ексцентриситет ротора; A, ω – амплітуда та частота коливань осі ротора; g – прискорення вільного падіння.

Вважаємо, що момент $R(\varphi)$ може враховувати як опір в підшипниках ротора, так й корисне навантаження; ротор приводиться у обертання від електродвигуна асинхронного типу. Зважаючи на те, що нижче досліджуються стаціонарні режими руху, момент електродвигуна будемо враховувати за допомогою його статичної характеристики.

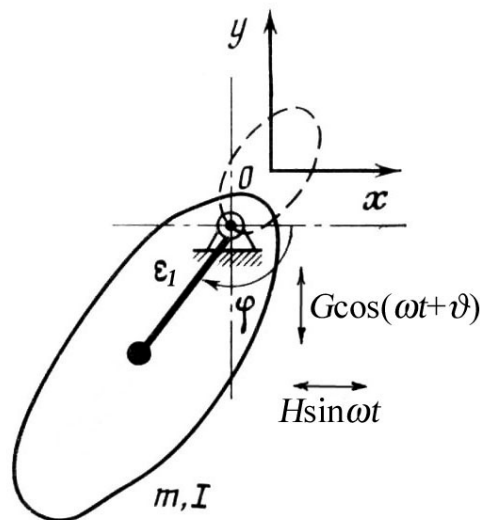


Рис. 1. Незрівноважений ротор з вібруючою віссю

2. Основне рівняння вібраційної механіки

Проаналізуємо основний режим стаціонарного обертання незрівноваженого ротора, тобто, його обертання із середньою кутовою швидкістю $\dot{\varphi}_{cp}$ рівною (близькою) до частоти коливань осі ω . Обмежуючись рухом ротора, який мало відрізняється від рівномірного обертання, подамо рівняння (1) у вигляді

$$I\ddot{\varphi} + k(\dot{\varphi} - \omega) = \mu\Phi(\varphi, \omega t), \quad (2)$$

де $k = k_1 + k_2$ – сумарний коефіцієнт демпфування [2]; $\mu > 0$ – малий параметр;
 $\Phi(\varphi, \omega t) = L_\omega - R_\omega - m\varepsilon(\omega^2 A \cos \varphi \cos \omega t - g \cos \varphi)$.

При одержанні рівняння (2) виконана лінеаризація моментів $L(\dot{\varphi})$, $R(\dot{\varphi})$ поблизу частоти $\dot{\varphi} = \omega$, причому, $k_1 = -(dL(\dot{\varphi})/d\dot{\varphi})_{\dot{\varphi}=\omega} > 0$, $k_2 = (dR(\dot{\varphi})/d\dot{\varphi})_{\dot{\varphi}=\omega} > 0$ [2].

Використовуючи метод прямого розділення рухів, проаналізуємо обертання ротора виду $\varphi = \omega t + \alpha(t) + \psi(t, \omega t)$. При цьому, рахуємо $\alpha(t)$ – повільною, а $\psi(t, \omega t)$ малою швидкою 2π -періодичною по $\tau = \omega t$ функцією, середнє за період значення якої дорівнює нулю $\langle \psi(t, \omega t) \rangle = 0$. Кутові дужки $\langle \dots \rangle$ тут та нижче вказують на усереднення виразу, який в них знаходиться за період $2\pi/\omega$ по швидкому часі τ .

Слідуючи традиційній процедурі використовуваного методу, напишемо рівняння повільних і швидких рухів ротора у вигляді [1]

$$I\ddot{\alpha} + k\dot{\alpha} = \mu[L_\omega - R_\omega + V(\alpha)], \quad (3)$$

$$I\ddot{\psi} + k\dot{\psi} = \mu[m\varepsilon(\omega^2 A \cos \varphi \cos \omega t - g \cos \varphi) - V(\omega)], \quad (4)$$

де $V(\alpha) = -\langle m\varepsilon(\omega^2 A \cos \varphi \cos \omega t - g \cos \varphi) \rangle$.

У (3) вираз $V(\alpha)$ є, так званим, вібраційним моментом [2] – середнє значення додаткового моменту, що діє на незрівноважений ротор внаслідок коливань осі. З використанням зазначеного методу достатньо розв'язувати рівняння швидкого руху приблизно. Тоді, у вихідному наближенні маємо $\psi = \psi^{(0)} = 0$. З урахуванням цього розв'язку отримуємо $V(\alpha) = -V_{\max} \cos \alpha$, де

$$V_{\max} = \frac{m\varepsilon\omega^2 A}{2}.$$

З (3) випливає, що умовою існування стаціонарного режиму обертання ротора з частотою ω буде нерівність $\frac{|L_\omega - R_\omega|}{V_{\max}} \leq 1$, яка у випадку, коли кутові швидкості ω і $\dot{\varphi}$ додатні та не істотно

відрізняються одна від одної, набуває вигляду $\frac{k|\omega_0 - \omega|}{V_{\max}} \leq 1$, де ω_0 – кутова швидкість обертового ротора за відсутності коливань осі (так звана, парціальна швидкість ротора [1]). Для низки практично важливих випадків, коли момент сил опору обертанню ротора обумовлений переважно опором у підшипниках, цій умові можна надати більш практичний вигляд:

$$\frac{2L_{\omega n}|\omega_0 - \omega|}{F A(\omega_c - \omega_n)} \leq 1, \quad (5)$$

де $L_{\omega n}$, ω_n – номінальний момент і номінальна кутова швидкість електродвигуна; ω_c – синхронна швидкість двигуна; $F = m\varepsilon\omega^2$ – амплітуда вимушеної сили, яку розвиває незрівноважений ротор.

Зауважимо, при отриманні умови (6) враховано той факт, що вплив швидкості на обертаючий момент асинхронного електродвигуна виражений дуже стрімко, чого не можна сказати про момент сил опору в підшипниках ротора.

Умову (6) можна використовувати для грубої оцінки можливості існування стаціонарного режиму обертання ротора з частотою коливання осі. Очевидно, що при обертанні ротора зі швидкістю ω_0 , близької до частоти коливань ω , умова існування стаціонарного режиму обов'язково виконується.

При виконанні умови (5) рівняння $L_\omega - R_\omega - V_{\max} \cos \alpha = 0$ допускає два істотно різних розв'язки: $\alpha_{1,2} = \pm \arccos\left(\frac{L_\omega - R_\omega}{V_{\max}}\right)$. Для стійкості режиму, який відповідає розв'язкам $\alpha_{1,2}$, необхідно виконання умови $\sin \alpha_i < 0$. Зауважимо, що ця умова отримується, якщо скласти рівняння у варіаціях для рівняння (3) та розв'язку α_i поклавши $\alpha = \alpha_i + x$, де x – малі збурення: $I\ddot{x} + k\dot{x} - V_{\max} \sin \alpha_i x = 0$.

Загальний розв'язок рівняння (4) відносно швидкості $\dot{\alpha}$ можна подати в вигляді ($t = 0$, $\dot{\alpha} = \dot{\alpha}_0$):

$$\dot{\alpha} = (\dot{\alpha}_0 - \dot{\alpha}_{\text{уст}})e^{-\frac{k}{I}t} + \dot{\alpha}_{\text{уст}}, \quad (6)$$

де $\dot{\alpha}_{\text{уст}} = \frac{L_\omega - R_\omega + V(\alpha)}{k}$.

Таким чином, рівняння (3) описує повільний процес встановлення стаціонарного режиму обертання незрівноваженого ротора; тривалість перехідного процесу визначається величиною $T = I/k$, так званою постійною часу машинного агрегату.

Згідно отриманих виразів, у разі коли парціальна кутова швидкість ω_0 збігається з частотою коливальності осі ω , розв'язками рівняння (5) будуть: $\alpha_{1,2} = \pm \pi/2$; при цьому розв'язок $\alpha_2 = -\pi/2$ є стійким. Як бачимо, дія вібраційного моменту ($V(\alpha) = \pm V_{\max} \cos \alpha$) зводиться до встановлення та подальшого підтримання стійкого зсуву між фазами коливального та обертального рухів.

Якщо частота вібрації ω дещо відрізняється від частоти ω_0 , змінна $\dot{\alpha}$ буде асимптотично прагнути до значення $\dot{\alpha}_{\text{уст}} = \pm \Delta\omega$. У цьому випадку, стійкий розв'язок відрізнятиметься від $\alpha_2 = -\pi/2$. При цьому, коли $\omega_0 > \omega$, зсув фаз $\alpha(t)$ між рухами збільшиться, а при $\omega_0 < \omega$ – зменшиться; до того ж, тим істотніше, чим більша відмінність у частотах. Отже, вплив вібраційного моменту буде зводитися до пригальмовування (випадок $\omega_0 > \omega$, вібраційний момент від'ємний) або прискорювання ($\omega_0 < \omega$, $V(\alpha)$ – додатний) обертання ротора. У результаті забезпечується обертання ротора з частотою, яка дорівнює частоті коливальності осі; до того ж, з певним зсувом фаз. Отже, вібрація, що збуджується ідеальним джерелом енергії, нав'язує свій ритм руху ротору.

Вібраційного захоплення обертання незрівноваженого ротора добре видно на рис. 2 отриманому шляхом комп'ютерного моделювання ефекту. Параметри у рівнянні (1) вибиралися такими: $m = 30 \text{ кг}$; $\varepsilon = 0,03 \text{ м}$; $I = 0,07 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $A = 0,005 \text{ м}$; при цьому, використовувалася динамічна модель трифазного асинхронного електродвигуна з $P = 1,5 \text{ кВт}$ і $n_c = 1500 \text{ хв}^{-1}$ [10]. Зауважимо, що на рис. 2 у момент часу $t = 1,1 \text{ с}$ вісь ротора починає здійснювати вертикальні гармонічні коливання. Результати моделювання непогано збігаються з результатами обчислень згідно з отриманими формулами.

Таким чином, якщо до виникнення стаціонарного режиму руху вібрація і гальмувала, і прискорювала обертання ротора, то при її появі вплив вібрації стає лише гальмуючим або обертаючим (оцінюваний вібраційним моментом). Значить, у стаціонарному режимі руху незрівноважений ротор з віброуючою віссю неодмінно або віддає, або відбирає енергію від джерела коливальності.

Очевидно, що дія вібрації зростає при більшому статичному моменті ротора, а також при більших частотах та амплітудах коливальності. Отже, описувані ефекти можуть мати місце при резонансних явищах у системі.

Зазначимо, що отримані результати поширюються також на режими пуску та вибігу. Так, у разі, коли при розбігу ротора величина вібраційного моменту стає порівнянною з пусковим моментом двигуна, а при вибігу – з моментом сил опору обертання, може відбуватися

«застрягання» швидкості ротора на частоті вібрації. Зазначений факт підтверджується комп'ютерним моделюванням.

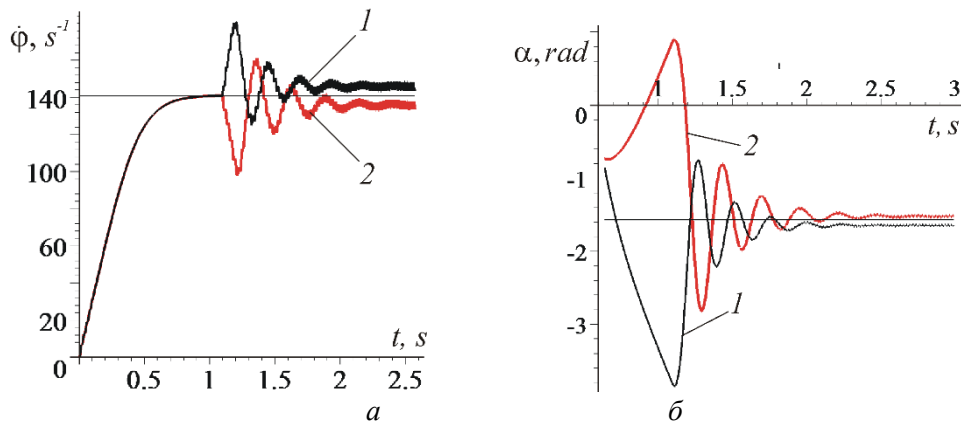


Рис. 2. Зміни у часі а) частоти обертання незрівноваженого ротора;
 б) зсуву фаз між обертальним та коливальним рухами: 1 – $\omega = 146 \text{ c}^{-1}$;
 2 – $\omega = 136 \text{ c}^{-1}$, горизонтальна пряма – $\omega_0 \approx 141 \text{ c}^{-1}$

Як бачимо, вібрація осі незрівноваженого ротора при пуску може призводити до ефекту Зоммерфельда, а в стаціонарному режимі руху – до зміни середньої швидкості обертання ротора і, до того ж, до підвищення амплітуд коливань швидкості.

Очевидно, що у разі довільної періодичної вібрації осі ротора, що подається у вигляді розкладу $y = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega t + \gamma_n)$, також можливе його обертання із середньою кутовою швидкістю

$\dot{\phi}_{cp} = n\omega$, яка дорівнює відповідній гармоніці вібрації.

3. Рівняння швидких рухів незрівноваженого ротора

Розглянемо рівняння швидких рухів (4). За допомогою методики, яка використовується в роботі [11], нескладно подати (4) у вигляді

$$\ddot{\psi} + 2b_{\psi}\dot{\psi} + p_{\psi}^2\psi = \Phi_x \cos 2\omega t, \quad (7)$$

де $b_{\psi} = k/2I$; $p_{\psi}^2 = c_{\psi}/I$; $c_{\psi} = -V_{\max} \sin \alpha$; $\Phi_x = -V_{\max}/I$.

Зазначимо, що вплив моменту сили тяжкості на обертання ротора не враховується.

Як бачимо, (7) набуває вигляду рівняння коливального типу. Коефіцієнт c_{ψ} можна назвати динамічним (вібраційним) коефіцієнтом жорсткості; у стійких стаціонарних режимах він позитивний. Величина p_{ψ} є частотою малих вільних коливань незрівноваженого ротора або відповідно до [11] частотою вільних маятникових коливань ротора поблизу стійкого стаціонарного режиму. Неважко встановити, що з виконанні умови $A < \varepsilon$, частота p_{ψ} значно менше частоти ω [1]. Значить, при встановленні стаціонарного режиму обертання ротора матиме місце явно виражений перехідний процес з великими початковими амплітудами та основною відносно повільною частотою.

Збудження повільних (напівповільних) коливань незрівноважених роторів на вібруючому основі під час встановлення стаціонарних режимів обертання вважатимуться загальної закономірністю [1, 12, 13].

Висновки. У випадку, вібрація осі незрівноваженого ротора або гальмує, або прискорює обертання ротора за довільним законом. При встановленні стаціонарного режиму обертання ротора з частотою коливань осі вплив вібрації (оцінюється вібраційним моментом) стає цілком визначеним. Якщо частота вібрації більше парціальної частоти ротора, буде вібраційне прискорення обертання ротора, і навпаки, при виконанні умови $\omega_0 > \omega$ буде відбуватися вібраційне гальмування. Характер

впливу вібрації визначається, перш за все, зсувом фаз, що встановився, між обертальним і коливальним рухом.

Звісно ж, що отримані результати можна використовувати при вдосконаленні систем управління мехатронними вібраційними установками.

Список використаних джерел

1. Боголюбов Н.Н. Избранные труды в 3-х томах. Т.1.- Киев: Наукова думка, 1969.
2. Blekhman I.I. Vibrational mechanics – Nonlinear dynamic effects, General approach, Applications. Singapore et al.: World Scientific, 2000.
3. Blekhman I.I. Blekhman L.I. Dresig H. and others. Selected Topics in Vibrational Mechanics. World Scientific, New Jersey, London, 2004, 409 p.
4. Filimonikhin G.B., Yatsun V.V. Investigation of the process of excitation of dual-frequency vibrations by ball auto-balancer of Gil 42 screen. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 1, Issue 7 (79), 2016, p. 17–23.
5. Avanzo RH, Tusset AM, Balthazar JM, et al. (2019) Energy harvesting through pendulum motion and DC generators. *Latin American Journal of Solids and Structures* 16 (01).
6. M. Tusset . C.E. Marques. J. M. Balthazar. M. Aparecido, W. B. Lenz. On energy harvesting from ambient vibrations through an oscillating pendulum system fixed to a suspended platform, *Mathematics in Engineering, Science and Aerospace (MESA)* 2020, Vol. 11, No 3.
7. Yaroshevich N., Yaroshevych O., Lyshuk V. (2021) Drive Dynamics of Vibratory Machines with Inertia Excitation. In: Balthazar J.M. (eds) *Vibration Engineering and Technology of Machinery. Mechanisms and Machine Science*, vol 95. Springer.
8. 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.
9. Yaroshevich NP, Lanets OS, Yaroshevych OM (2022) Slow Oscillations in Systems with Inertial Vibration Exciters. In: Balthazar, J.M. (eds) *Nonlinear Vibrations Excited by Limited Power Sources. Mechanisms and Machine Science*, Springer.
10. Blekhman, I.I., Semenov, Y.A., Yaroshevych, M.P. On the possibility of designing adaptive vibration machines with self-synchronizing exciters // *Mechanisms and Machine Science*, 2020, 80, С. 231-236

А. П. Томашко

Національний лісотехнічний університет України

ОРГАНІЗАЦІЯ МОДЕЛІ ЛОГІСТИЧНОЇ МЕРЕЖІ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМНИХ ТА НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ АЛГОРИТМІВ

У роботі досліджено принципи організації моделі логістичної мережі з використанням програмних та нейромережових алгоритмів. Розкрито структуру сучасної логістичної мережі до складу якої віднесено: ланцюг постачання, ланцюг збуту та зберігання. Підкреслено, що сторона ланцюга постачання має найповнішу інформацію про аналіз продукту, а також охоплює послідовність оновлень складу. Наголошується, що ефективність управління інформацією логістичної мережі визначає оновлення продукту на кінці ланцюга постачання, і тільки за допомогою повної інформації про продукт кінцевого ланцюга постачання можна ефективно контролювати ефективність логістики у сфері функціонування. Зазначено, що впровадження технології інтелектуальної мережі дозволяє реалізувати інтелектуальне управління логістикою, а поступове створення вузлів Інтернету речей інтегрує логістичні ресурси, що дозволяє здійснювати процес оптимізації системи управління в інформаційній системі, вирішуючи проблему планування шляху, обороту матеріалів для зберігання, відповідності інформації про продукт і клієнта та недиференційованого розподілу близькості, може вийти на новий рівень. Запропоновано схему графової згорткової нейронної мережі з детальним описом механізму функціонування. У якості модифікації запропоновано використання тензора та наведено детальну структуру мережі з тензором. Наголошено на схемі розрідженої структури загорткового шару з описом функціональної складової. Доведено, що запропонована структура відрізняється від попередньої підвищеним рівнем ефективності за рахунок того, що логістичні дані в реальному часі кожного логістичного вузла збираються, і логістичні дані попередньо обробляються, щоб усунути нестандартні дані в процесі аналізу. У свою чергу, різниця логістичних даних у різних часових вузлах збільшується, і відбувається розділення логістичних даних на піковий період і гладкий період відповідно до рівня часу, але набір логістичних даних на різних двох етапах підкоряється випадковому розподілу.

Ключові слова: нейронна мережа, логістична мережа, аналіз, побудова, ланцюг постачання.

A. P. Tomashko

ORGANIZATION OF A LOGISTIC NETWORK MODEL USING SOFTWARE AND NEURAL NETWORK ALGORITHMS

The work explores the principles of organizing a logistics network model using software and neural network algorithms. The structure of the modern logistics network is disclosed, which includes: supply chain, sales chain and storage. It is emphasized that the supply chain side has the most comprehensive information on product analysis and also covers the sequence of warehouse updates. It is emphasized that the information management efficiency of the logistics network determines the update of the product at the end of the supply chain, and only with the help of complete product information of the end supply chain can the efficiency of logistics in the field of operation be effectively controlled. It is noted that the introduction of intelligent network technology allows for the implementation of intelligent logistics management, and the gradual creation of nodes of the Internet of Things integrates logistics resources, which allows for the optimization of the management system in the information system, solving the problem of route planning, the turnover of materials for storage, the correspondence of information about the product and the client and undifferentiated proximity distribution, can reach a new level. A diagram of a graph convolutional neural network with a detailed description of the functioning mechanism is proposed. As a modification, the use of a tensor is proposed and a detailed structure of a network with a tensor is provided. Emphasis is placed on the diagram of the sparse structure of the wrapping layer with a description of the functional component. It is proved that the proposed structure differs from the previous one by an increased level of efficiency due to the fact that the real-time logistics data of each logistics node is collected, and the logistics data is pre-processed to eliminate non-standard data in the analysis process. In turn, the difference of logistics data at different time nodes increases, and there is a division of logistics data into a peak period and a smooth period according to the time level, but the set of logistics data at different two stages obeys random distribution.

Key words: neural network, logistic network, analysis, construction, supply chain.

Вступ та постановка проблеми. Сучасна логістична мережа має у своєму складі кілька ланцюгів таких як ланцюг постачання, ланцюг збуту та зберігання. Сторона ланцюга постачання має найповнішу інформацію про аналіз продукту, а також охоплює послідовність оновлень складу. Дані ланцюга поставок інтегруються за допомогою цифрових інформаційних технологій. Вузли мережі логістичного постачання збираються відповідно до передачі та зворотного зв'язку потоку даних для кращого моніторингу прогресу логістики. Ефективність управління інформацією логістичної мережі визначає оновлення продукту на кінці ланцюга постачання, і тільки за допомогою повної інформації про продукт кінцевого ланцюга постачання можна ефективно контролювати ефективність логістики у сфері функціонування.

Управління інформацією на кінці ланцюга постачання може забезпечити своєчасність логістики, а крім того, невід'ємною частиною є управління безпекою. Операційні дані на кінці

ланцюга постачання є конфіденційним документом для компанії, і витік даних може спричинити погану конкуренцію в галузі та величезні економічні втрати. Таким чином, управління інформаційною безпекою на кінці ланцюга постачання є важливою частиною загальної роботи системи. Інтеграція між отриманням і доставкою продукту та інформацією про логістику на кінці ланцюга постачання повинна координуватися інтегрованою інтелектуальною системою управління, а всі джерела даних мають бути централізовані з вхідними та вихідними продуктами. Щоб вирішити проблему невідповідності даних між ланкою постачання та логістикою застосовують метод інформаційного відображення, щоб відповідати отриманій інформації про продукт від рівня часу та місця до логістики, що забезпечує точність інтелектуальної логістичної інформації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Формулювання наукової думки у сфері організації моделі логістичної мережі з використанням програмних та нейромережових алгоритмів є різноманітним та масштабним. У сучасній науковій площині з'являються роботи присвячені дослідженням штучних нейронних мереж та алгоритмів їх реалізації у зазначеній сфері.

Є. Кучина, А. Войтюк та М. Котова розкрили тренди вітчизняної логістики [1]. Авторами виділено найбільш важливі інноваційні логістичні тренди такі як управління ланцюжком поставок у режимі реального часу; хмарні рішення, безпека, технології роботизації, штучний та доповнений інтелект.

К. Г. Котляров [2] описав можливу користь та небезпеки застосування нейромереж.

У [3] описано застосування нейромережевого функціоналу в транспортних логістичних системах. О.М. Харламова та М.Ф. Зінченко зазначають, що для оцінки ефективності функціонування логістичної системи й діяльності персоналу логістичного менеджменту транспортного підприємства необхідна наявність процедури оцінки результатів рішень, прийнятих персоналом служби логістики. Оцінка результатів керування логістикою забезпечує зворотний зв'язок, необхідну для ефективного менеджменту.

Низка авторів [4] запропонували прогнозування очікуваного часу прибуття вантажної відправки при слідуванні у поїзді залізничною дільницею. Дані дослідження дозволяють в перспективі розробити автоматизовану систему прогнозування ЕТА вантажної відправки для залізничної системи зі змішаним рухом та відправленням вантажних поїздів без дотримання нормативного розкладу

У [5] обґрунтовано основні тенденції галузі логістики, які активно розвиваються й формують зростання споживчого попиту на них (забезпечення безпечних взаємодій шляхом залучення блокчейн-технологій, удосконалення змістового наповнення бізнес-взаємодії через використання чат-ботів, опрацювання геоінформаційних даних на основі GPS-, GPRS-, GIS-технологій), обґрунтовано основні напрями оптимізації процесів у логістичній сфері. Визначено перспективні логістичні тренди, такі як екологічна стійкість, поширення технології 5G, зміна талантів та компетенцій працівників, зокрема окреслено переваги та недоліки застосування цих технологій і вплив.

Із зарубіжних авторів варто відмітити роботи таких науковців як: Ван Цзяцай [6], Альзахрані Ахмед, Асгар Мухаммад [7], Лю Сун, Гао Сінхуа, Чень Лю, Чжоу Сихуей, Пен Юн, Ю Денніс, Ма Сянтінь, Ван Янь [8], Абдаллах Абдаллах, Даувед Мохаммед, Алі Айман, Фелембан Бассем, Хан Імран, Чой Бонг [9], Му Вей, Дін ХеПінг [10], Ван Явен [11], Ортис Херман, Енгуїкс Джемма, Гомес Адорно Хелена, Амір Ікра, Сидоров Григорі [12], Кмієтік Маріуш [13], Чжан Хуейфен, Цзінь Яньфен [14], Сюй Ю., Чжан С., Хун Ю. [15] та інших.

Однак незважаючи на масштабність наукових досліджень питання актуальності даної роботи не викликає сумнівів.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження принципів організації моделі логістичної мережі з використанням програмних та нейромережових алгоритмів.

Викладення основного матеріалу дослідження. З поступовою інтерналізацією доставки продукції швидкість і відстежуваність логістики поступово стають фундаментальною ознакою ефективності. Впровадження технології інтелектуальної мережі дозволяє реалізувати інтелектуальне управління логістикою. Оскільки нові Інтернет-моделі бізнесу стають популярними, модель логістики не залишається на рівні доставки продуктів. Нова інтелектуальна оптимізована система управління логістикою координує три сфери: розподіл продукції, зберігання матеріалів і адаптивне планування вантажів. Створення вузлів Інтернету речей інтегрує логістичні ресурси, а процес оптимізації системи управління в інформаційній системі, вирішуючи проблему планування

шляху, обороту матеріалів для зберігання, відповідності інформації про продукт і клієнта та недиференційованого розподілу близькості, може вийти на новий рівень.

Найважливішим в інтелектуальному процесі логістики та розподілу є обмін замовленнями та доставка продуктів. Спільне використання замовлення полягає в отриманні вмісту замовлення від клієнта та обміні інформацією з продавцем і логістиком. Доставка продуктів полягає в тому, щоб перевірити та упакувати продукти відповідно до вмісту замовлення, а потім передати етикетки продукту в автоматизовану систему розподілу, яка плануватиме товарну лінію відповідно до об'єму та ваги. Коли замовлення доставляються за звичайним маршрутом, виробничий завод і логістичні вузли використовуватимуть замовлення як основу інформації про дані, збиратимуть усі замовлення трафіку в режимі реального часу та забезпечуватимуть підтримку даних для оптимізації шляхів наступних замовлень на основі цієї інформації. У разі модифікації замовлення швидкість оновлення замовлення може надати (зекономити) час для подальшої упаковки товару. Одночасно з модифікацією замовлення необхідно отримати багатовимірну інформацію в режимі реального часу для аналізу траєкторії руху матеріалу та ємності зберігання найближчого логістичного вузла.

Представлення логістичної інформації зосереджено на візуальній логістичній платформі. Візуальна логістична платформа складається з інтегрованих сенсорних технологій, технологій супутникового позиціонування, комп'ютерного бачення та технологій глибокого навчання. Основні засоби позиціонування логістичних вузлів модернізуються відповідно до новітніх технологій, щоб мати можливість отримувати точні дані позиціонування. Платформа візуалізації логістики може реалізувати наскрізний операційний процес логістики, уточнений у шість конкретних ланок, так що коли проблема виникає в одній ланці, проблему можна вирішити точно, а витрати на транспортування можна максимально знизити. Інтелектуальна логістична система передбачає не лише побудову логістики, а й охоплює процеси вивезення продукції, транспортування, зберігання, розподілу та обробки. Для подальшого вдосконалення логістичної системи необхідна оптимізація кожного процесу та встановлення вузлів моніторингу для формування замкнутого циклу з логістичною системою, щоб забезпечити цілісність інтелектуальної логістичної системи.

Метою логістичної системи є виконання швидкої ітерації складування через складну мережу розподілу продукції. Дистрибуційна мережа складається з багатьох логістичних вузлів, кожен з яких охоплює велику кількість інфраструктури. Кожна з яких дорога в обслуговуваних, має обмежену пропускну здатність і низький динамічний діапазон. Щоб краще координувати кожен логістичний вузол, галузь здебільшого використовує модель нейронної мережі для компонування вузлів, яка підтримується хмарними обчисленнями для формування величезної логістичної нейронної мережі. Інформація про ланцюг постачання для окремого вузла швидко реагує та може швидко створити оптимальний шлях логістики та часовий графік на основі великих даних і забезпечити своєчасність і точність логістики.

Як метод організації моделі логістичної мережі пропонується застосування графової згорткової нейронної мережі як базової мережі, структуру якої показано на рисунку 1. Ця мережа є оновленою версією згорткової мережі графів, яка спрямована на оптимізацію перцептивної області згортки графа та збільшення об'єднання згорткових мереж графів для зв'язків ознак на рівні часу. Основною метою цієї мережі є послідовне кодування логістичних вузлів і прогнозування найкращої траєкторії за просторовими характеристиками та часовими зв'язками між логістичними вузлами. Для отримання характеристик траєкторії логістики використовується алгоритм планування шляху, який використовує згорткову нейронну мережу для аналізу інформації, алгоритм A як маркерну інформацію та, нарешті, контрольоване навчання для прогнозування найкращої траєкторії.

Вдосконалена модель згорткового логістичного вузла графа впливає з двокомпонентної оптимізації просторово-часової згорткової мережі графа. Перша частина полягає в оптимізації рівня згорткової мережі графа; друга частина полягає у додаванні початкового рівня.

У шарі згортки графа вихідна модель спрямована на отримання інформації про просторове розташування між розгалуженими логістичними вузлами для представлення цих вузлів. Він повинен побудувати локальну перцептивну область, починаючи з початкових сусідніх логістичних вузлів, у яких генерується велика кількість вибірових вузлів. Хоча в цей час генерується багато помилкових вибірок, додавання обмежень топологічного кута в подальшому процесі фільтрації послідовності в евклідовому просторі може відфільтрувати помилкові вибірки. Коли всі вузли вибірки знаходяться в евклідовому просторі, на глобальному рівні всі вузли вибірки можна розглядати як точку, а послідовність точок розглядати як одновимірний вектор. У цьому випадку, щоб охопити велику кількість зразків характеристик логістичного вузла, необхідна масштабна сума згортки графа, розмір якої відповідає кількості вузлів. Щоб правильно вирішити цю задачу, є

необхідність застосування стратегії обертання тензора. Модуль обертання тензора додається на початку та в кінці шару згортки графа. Детальна структура мережі показана на рисунку 2.

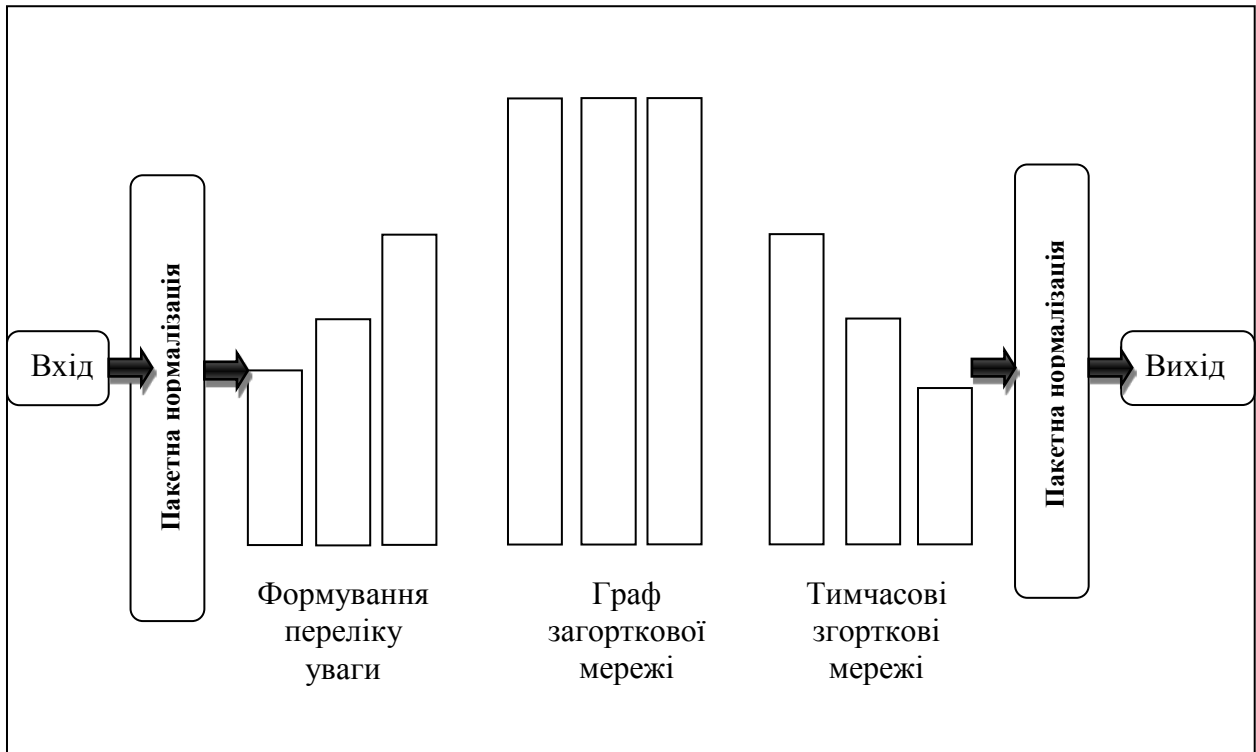


Рис. 1. Схема графової згорткової нейронної мережі

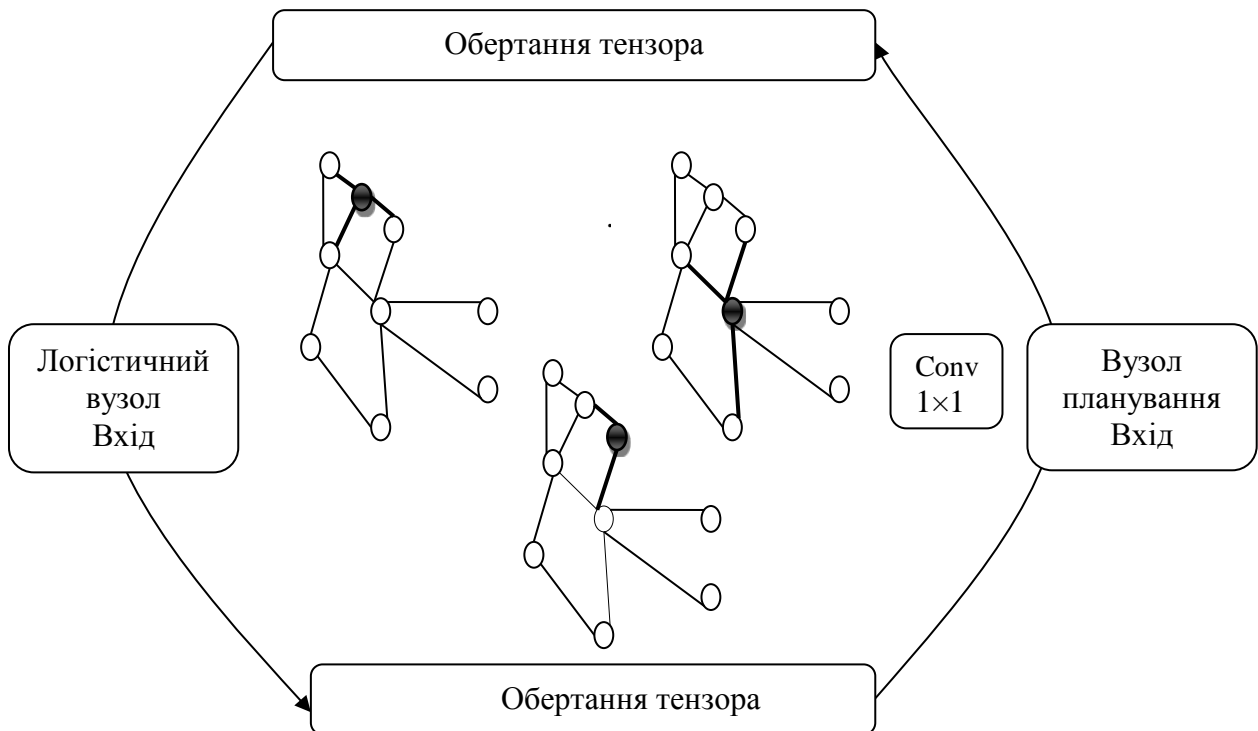


Рис. 2. Детальна структура мережі з тензором

За допомогою модуля обертання тензора кожен логістичний вузол може спільно використовувати один і той же набір ідентичних топологічних матриць, і всі логістичні вузли можуть брати участь у процесі захоплення глобальної інформації. Візьмемо у якості прикладу

логістичний вузол визначення шляху планування, припустимо, що шлях містить 20 логістичних вузлів, у повністю зв'язаному шарі обираємо фільтр розміром 20. Модуль обертання тензора повертає окремий тензор для кожного логістичного вузла, щоб розміри логістичних вузлів узгоджувалися з розмірами каналу. За допомогою обертання тензора попередньо визначена топологічна матриця відкидається, а глобальні характеристики визначаються адаптивно відповідно до одиниці самоциклу для отримання спільних кореляцій. Нарешті, глобальна інформація інтегрується за допомогою зменшення розмірності Conv 1×1 . Такий структурний дизайн може ефективно скоротити використання поліноміальної оцінки вищого порядку для охоплення ознак вищого порядку шар за шаром, таким чином досягаючи зменшення кількості параметрів.

Компонування початкової розрідженої структури дозволяє отримати більше інформації про особливості, уникаючи збільшення кількості параметрів. Наступним кроком є побудова початкової часової згорткової мережі, де розширення параметрів посилюється експоненціально зростаючими факторами розширення в часових згорткових шарах для розширення мережі. Навпаки, початкова мозаїчна структура є інкрементальною за шаром, причому кожній гілці передують зменшення розмірності Conv 1×1 , призначаючи різні параметри розширення для кожної гілки, дозволяючи градувати інформацію шкали часу в початкову гілку та досягаючи інтеграції інформації в різні часові виміри. За допомогою наведеної вище структури призначення коефіцієнтів часу вдається уникнути експоненціального зростання коефіцієнтів і досягти мети зменшення кількості параметрів.

Часовий згортковий рівень зазвичай додається в кінці основної мережі та ділиться на 4 гілки відповідно до принципу розшарування, кожна гілка генерує вихідні дані для відповідної групи, структуру його показано на рисунку 3. Початкове значення коефіцієнта розширення n мережі дорівнює 1. У міру поглиблення мережі одиниці шару поступово збільшуються, а максимальне значення коефіцієнта розширення становить 4. Цей зовнішній зв'язок відноситься до залишкової структури, яку має одно-розмірна згортка з кроком 2. Ця конструкція може уникнути проблеми градієнтної дисперсії. Удосконалення часової згорткової мережі шляхом вставки початкової структури може охопити більше інформації в часовому масштабі, одночасно значно зменшуючи кількість параметрів мережі та зменшуючи витрати на обчислення. Компактна та ефективна мережа виділення тимчасових ознак реалізується шляхом адаптивного вибору найкращої інформації про ознаки за допомогою різних часових фільтрів для оптимізації проблеми класифікації.

Мережа згортки графів прийнята як основа для оптимізації вузла логістики, до неї додано модуль згортки часу, використовуючи попередньо визначений структурний граф як обмеження топології, щоб досягти здатності графів із різними часовими кроками використовувати одну топологію, така структура робить неможливим використання спільного рівня, який повністю відображає відповідні характеристики регіональних вузлів логістики. Щоб вирішити цю проблему, найпоширеніший підхід полягає у створенні регіональної нейронної мережі, починаючи з локального поля та експериментуючи з невеликими графами, схильними до глобального пропуску інформації. Щоб імітувати принцип обчислення пікселів згорткової нейронної мережі, кожен вузол графа та сусідні вузли графа стають ключовими вузлами обчислення згортки графа в завданнях згортання графа.

У запропонованій мережі використано вузлові функції фіксованого розміру для вивчення функцій у часовому вимірі, вибірково ігноруємо розмір кластерних функцій і це надасть можливість захопити більше функцій у часовому вимірі. Тому застосовуємо початкову структуру до деяких мережевих рівнів, щоб зменшити параметри моделі, розширити ширину мережі та підвищити надійність моделі.

Процес оптимізації моделі логістичної мережі з використанням програмних та нейромережевих алгоритмів на основі вдосконаленої графової згорткової мережі ґрунтується на наступному: по-перше, логістичні дані в реальному часі кожного логістичного вузла збираються, і логістичні дані попередньо обробляються, щоб усунути нестандартні дані в процесі аналізу. Різниця логістичних даних у різних часових вузлах збільшується, і відбувається розділення логістичних даних на піковий період і гладкий період відповідно до рівня часу, але набір логістичних даних на різних двох етапах підкоряється випадковому розподілу. Тому спочатку вибираємо пакетний стандартний модуль на першому рівні ієрархічного розподілу мережі, щоб нормалізувати дані логістичного вузла на часовому рівні та на просторовому рівні, щоб зробити вхідні дані логістичного вузла більш стандартизованими, зменшуючи мінливість помилок, і оптимізувати збіжність алгоритму. На другому рівні мережі обираємо механізм, який з'єднає новий обертовий шар згортки тензора з наступним розріджено структурованим шаром часової згортки в мережі.

Повернутий шар згортки тензора покладається на операцію обертання тензора для отримання глобальної інформації, після чого отримані глобальні ознаки подаються в розріджену структуровану часову згортку для аналізу взаємозв'язку вузлових ознак на часовому рівні. Вся мережа повністю фіксується та об'єднується інформацією про особливості графа, потім усереднюється об'єднання, потім функції класифікуються повністю пов'язаним рівнем, і, нарешті, оптимальне планування логістичних ліній виводиться відповідно до класифікаційних ваг.

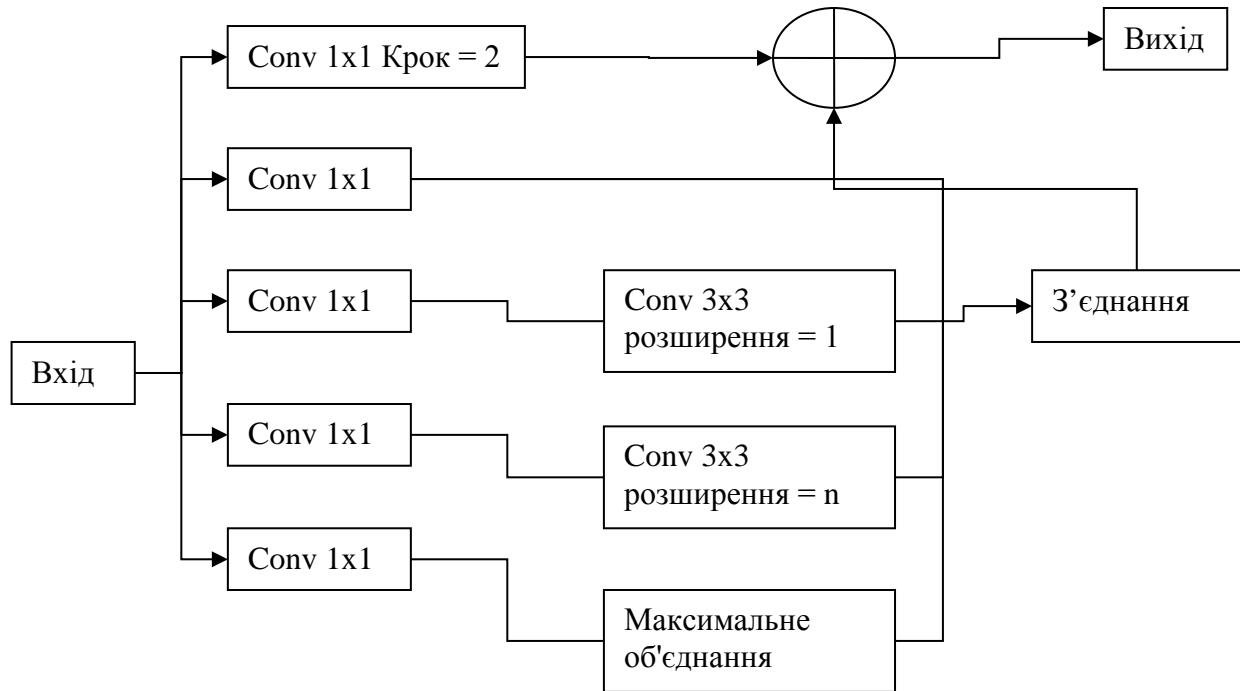


Рис. 3. Схема розрідженої структури загорткового шару

Висновки. У роботу досліджено принципи організації моделі логістичної мережі з використанням програмних та нейромережевих алгоритмів. Запропоновано вдосконалену графову згорткову мережу, яка покращує швидкість доставки продукту та час доставки логістики, що значно підвищує рентабельність інвестицій. Додано модуль обертання тензора до згорткового шару графа, щоб краще відобразити глобальні особливості логістичних вузлів. Додано початкові структури на рівні часової згортки, щоб побудувати багатомасштабні фільтри часової згортки для отримання часової інформації логістичних вузлів у різних доменах з урахуванням часу та зменшення арифметичної потужності.

Перспективами подальших досліджень є розробка програмного забезпечення з подальшим впровадженням на логістичному підприємстві.

Література

1. Тренди вітчизняної логістики / Є. Кучина, А. Войтюк, М. Котова / Логістика майбутнього: ефективні рішення для торгівлі [Електронний ресурс] : тези доп. Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. (Київ, 20 квіт. 2023 р.) / відп. ред. Н. Б. Ільченко. – Київ : Держ. торг.-екон. ун-т, 2023. – С. 172-176.
2. Котляров К. Г. Нейромережі: можлива проблема і прояв небезпеки / К. Г. Котляров // Шлях успіху і перспективи розвитку (до 26 річниці заснування Харківського національного університету внутрішніх справ) : матеріали міжнар. наук.-практ. конф. (м. Харків, 20 листопада 2020 р.) / редкол.: Д. В. Швець (голова), О. М. Бандурка, С. М. Гусаров та ін.; МВС України, Харків. нац. ун-т внутр. справ. – Харків : ХНУВС, 2020. С. 263-264.
3. Харламова О. М. Застосування нейромережевого функціоналу в транспортних логістичних системах / Харламова О.М., Зінченко М.Ф., Харламов П.О./ Тези доповідей 1-ої

міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні транспортні технології», Трускавець – Харків, 24-30 січня 2020 р.: Харків: УкрДУЗТ, 2020. С. 82-83.

4. Прогнозування очікуваного часу прибуття вантажної відправки при слідуванні у поїзді залізничною дільницею / А. В. Прохорченко, А. С. Панченко, Л. О. Пархоменко, Г. І. Нестеренко, М. І. Музикін, Г. О. Прохорченко, А. В. Колісник / DOI: 10.15587/1729-4061.2019.170174
5. Новаківський І.І., Ярмола К.М. Тренди, які змінять логістику в новому десятилітті / Електронний науково-практичний журнал Інфраструктура ринку. 2020. № 48. С. 38-42.
6. Wang Jiakai. Data Mining Method of Logistics Economy Based on Neural Network Algorithm. 2020. 10.1007/978-3-030-43306-2_103.
7. Alzahrani Ahmed, Asghar Muhammad. Intelligent Risk Prediction System in IoT-Based Supply Chain Management in Logistics Sector. Electronics. 2023. №12. P. 2760. 10.3390/electronics12132760.
8. Liu Song, Gao Xinhua, Chen Liu, Zhou Sihui, Peng Yong, Yu Dennis, Ma Xianting, Wang Yan. Multi-Traveler Salesman Problem for Unmanned Vehicles: Optimization through Improved Hopfield Neural Network. Sustainability. 2023. № 15. 15118. 10.3390/su152015118.
9. Abdallah Abdallah, Dauwed Mohammed, Aly Ayman, Felemban Bassem, Khan Imran, Choi Bong. An Optimal Method for Supply Chain Logistics Management Based on Neural Network. Computers, Materials & Continua. 2022. № 73. P. 4311-4327. 10.32604/cmc.2022.031514.
10. Mu Wei, Ding HePing. E-Commerce Intelligent Logistics Data Based on Neural Network Model. Mobile Information Systems. 2022. P. 1-12. 10.1155/2022/8993365.
11. Wang Yawen. Overview of Logistics Demand Forecasting Methods. Frontiers in Business, Economics and Management. 2023. №9. P. 251-255. 10.54097/fbem.v9i2.9293.
12. Ortiz Germán, Enguix Gemma, Gomez Adorno Helena, Ameer Iqra, Sidorov Grigori. Job Offers Classifier Using Neural Networks and Oversampling Methods. 2023. 10.1007/978-3-031-20153-0_18.
13. Kmiecik Mariusz. Supporting of manufacturer's demand plans as an element of logistics coordination in the distribution network. Production Engineering Archives. 2022. №29. 10.30657/pea.2023.29.9.
14. Zhang Huifeng, Jin Yanfeng. Credit system of smart logistics public information platform based on improved neural network. Neural Computing and Applications. 2021. № 33. P.1-14. 10.1007/s00521-020-05547-6.
15. Xu Y., Zhang X., Hong Y. Research on the logistics decision making mechanism based on neural network algorithm. 2016. № 69. P. 437-441.

Chenjian Dong¹, Jianjun Wang², S.P. Robotko³,
O.M. Susak⁴, A.M. Topalov³, V.V. Kolomiets⁵

¹School of Automobile and Transportation, Yancheng Polytechnic College, Yancheng, China

²Yunzhou (Yancheng) Innovation Technology Co., Ltd., China

³Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Ukraine

⁴Design Bureau IMT LLC, Ukraine

⁵ Researcher of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Ukraine

FEATURES OF HUMAN-MACHINE INTERACTION IN THE SYSTEM OF WIRELESS CONTROL OF A MOBILE ROBOT

This paper considers the design features of human-machine interaction in the system of wireless control of a mobile robot. The requirements for user interfaces of computer systems are determined, and the stages and processes of creating a mobile robot control system and an operator's human-machine interface are analyzed. In the process of creating a control system, the choice of electronic components for creating a prototype of a mobile robot is substantiated, and a method for organizing a remote-control system based on Bluetooth technology is chosen. The connection scheme of the system components was developed, as well as the power supply unit of the mobile robot control system was selected. Arduino Nano with the appropriate hardware and software acts as the main microprocessor control device. The Java language and an integrated development environment were chosen for the development of the human-machine interface Android Studio. The developed user interface is a mobile application for controlling a mobile robot with the ability to program certain movement commands.

Keywords: mobile robot, human-machine interaction, application, wireless communication.

Ченьцзянь Донг, С.П. Роботко, Цзяньцзюнь Ванг,
О.М. Сусак, А.М. Топалов, В.В. Коломієць

ОСОБЛИВОСТІ ЛЮДИНО-МАШИНОЇ ВЗАЄМОДІЇ В СИСТЕМІ БЕЗПРОВІДНОГО УПРАВЛІННЯ МОБІЛЬНИМ РОБОТОМ

В даній роботі розглянуто особливості проектування людино-машинної взаємодії в системі безпроводного управління мобільним роботом. Визначено вимоги до інтерфейсів користувачів комп'ютерних систем та проаналізовано етапи і процеси створення системи керування мобільним роботом та людино-машинного інтерфейсу оператора. В процесі створення системи керування обґрунтовано вибір електронних компонентів для створення прототипу мобільного робота та обрано метод для організації системи дистанційного керування на основі технології Bluetooth. Розроблена схема підключення компонентів системи, а також вибраний блок живлення системи керування мобільним роботом. В якості головного мікропроцесорного пристрою керування виступає Arduino Nano з відповідним апаратно-програмним забезпеченням. Для розробки людино-машинного інтерфейсу обрано мову java та інтегроване середовище розробки Android Studio. Розроблений користувацький інтерфейс представляє собою мобільний додаток керування мобільним роботом з можливістю програмування певних команд руху.

Ключові слова: мобільний робот, людино-машинна взаємодія, додаток, безпроводний зв'язок.

Introduction and statement of the problem. The modern development of robotics information technologies is characterized by the development of functionally complex computer systems, which include software and hardware complexes, protection systems, intelligent systems, decision support systems and a number of others [1-2], which make it possible to implement robot management systems with a given level of reliability, quality and efficiency. Remote control systems in combination with human-machine interaction play an important role in reducing the risks that arise during human work. Their use in robotics makes it possible to reduce the degree of physical presence of a person when performing work in dangerous conditions. They allow you to get safe access to hard-to-reach or dangerous areas, to carry out operative intervention of mobile robots in production processes with a high level of danger or to optimize working conditions. The special benefit of using such robots during explosive works (search, transportation, disposal or destruction of explosive objects and ammunition).

A large number of closely interconnected heterogeneous components of computer systems of robotics, the use of flexible and distributed software architectures affects human-machine interaction and requires the development and use of high-quality both software and hardware and user interaction tools [1-5]. Based on this, when designing computer control systems for a mobile robot, it is necessary to integrate

© Chenjian Dong, Jianjun Wang, S.P. Robotko,
O.M. Susak, A.M. Topalov, V.V. Kolomiets

the process of building and evaluating the quality of human-machine interaction at all stages of the life cycle.

Analysis of the research and publications. Alan Kay made an invaluable contribution to the development of the graphical interface. He proposed the Dynabook concept, which defined the conceptual framework for the notebook, tablet computer, and e-book, and is the architecture of the modern windowed graphical interface. At the beginning of 1972, it embodied all the elements of the graphical user interface that we have today: the desktop, folders, windows. Moreover, a number of scientific and practical publications by both Ukrainian and foreign scientists are devoted to the process of ensuring and evaluating the quality of human-machine interaction. In particular, important results in the field of designing and ensuring the quality of human-machine interaction were obtained by such scientists as Lavrishcheva K.M., Kharchenko V.P., Guchenko I.V., Matias E., Dix A. and a number of others. Among mobile robotics, the work with the Micro:bit Smart mobile robot [6] should be singled out, which is the simplest example of a wheeled robot that has three wheels, two of which are leading, and they are also controlled because they are independent. From one, and the third wheel is the supporting wheel. The platform is based on the micro:bit controller, an ARM microcontroller developed by the BBC. Half the size of a credit card, it features Bluetooth, an accelerometer, a compass, three buttons, and a 5x5 LED matrix. The robot is controlled by human-machine interaction from a mobile application by means of wireless control of the power supplied to the collector motor-reducers. Another paper [7] presents a version of a tracked robot with control through a mobile application. The Doit T200 metal tracked transport platform of the factory design was chosen as the basis for the implementation of the experimental model of the robot. The features of this solution are that the body of this model is made of aluminum alloy, which makes it light and strong, as well as the presence of ready-made crawler motors with pressure rollers and light plastic tracks. The main focus is on the architecture of the control system and remote data transmission based on Internet of Things technologies using Arduino Uno and WeMos D1 R2 mini, the Blynk cloud service, and the human-machine interaction of the Android application.

From the review of the literature, it is clear that the development and improvement of modern systems of wireless control of a mobile robot using a human-machine interface is an urgent task.

Purpose work is the development and improvement of a remote control system for a mobile robot using modern approaches to ensure informative human-machine interaction of the operator with the mobile robot.

Presentation of the main material. Today, the analysis of communication options for remote control of a mobile robot is carried out using the Internet of Things (IoT) concept [3]. IoT, or the Internet of Things, is the concept of a computing network of physical objects (that is, actually things) that are equipped with certain technologies to interact with each other. Usually, the interaction of the mobile robot with the operator takes place with the help of an electronic computer, and various communication channels are used to organize the communication lines of the control object and the operator's monitor. For example, such as GSM, Bluetooth and Wi-Fi, which are part of the set of Internet of Things technologies. These technologies are very common, flexible in use, energy-efficient and economical, which simplifies the process of designing and developing a remote control system.

The user interface is the outer shell of any software system that allows the user to interact with the program. In fact, it is a set of means for processing and displaying information, maximally adapted for the convenience of the user [8-11]. In graphic systems, the user interface is implemented by multi-window mode, changes in the color, size, visibility of windows, their location, sorting of window elements, flexible customization of both the windows themselves and their individual elements, the availability of multi-user settings. In other words, the user interface is a type of interface in which, on the one hand, there is a person, and on the other, a machine (device, software).

The user interface provides support for decision-making in a specific subject area and determines the procedure for using the software and its documentation. In fact, the user interface combines all the elements and components of the software that can influence the user's interaction with the software. Such elements include: a set of tasks that the user solves with the help of software; used by the software of a particular shell (for example, "desktop" in the Windows operating system); software control elements; navigation between software blocks; visual (and not only) design of program windows and screen forms and other components (Fig. 1). The style of the user interface is a set of features, methods, methods of activity that characterize the individuality of the user interface, as well as a set of techniques for using software development tools.

The user interface design process is a complex, non-linear, non-deterministic and non-orthogonal process. The complexity of the user interface is determined by a number of uncertainties that significantly affect the development process. The non-linearity of user interface design consists in the absence of a fixed, orderly and straight-line algorithm from the beginning to the end of the design. The design process is uncertain because there is no equation that can produce the same result given the same initial conditions, and it is virtually impossible to produce an identical result. The user interface is non-orthogonal in the sense that any aspect of the design solution can influence other aspects, moreover, the result of this influence is not always positive and acceptable.

The process of designing modern software involves solving a number of tasks, in particular: reducing design costs, shortening design terms, improving the quality of the proposed solutions, providing easy-to-learn and use software, studying and implementing new technologies and tools, achieving better results compared to competitors. User satisfaction with a software product or its ease of use is largely determined by the user interface. In general, user satisfaction is a function of a small number of factors: user interface capabilities; response time; reliability; suitability for installation; information support; adaptability to accompaniment.

User interface capabilities should fully reflect the functionality of the application. The response time of the user interface should be minimal, so that the user does not have to wait longer than necessary for a given action. Reliability of the user interface is the ability to preserve over time within the established limits the values of all parameters that characterize the ability to perform the required functions in the specified modes and conditions of use. User interface maintenance is the process of improving, optimizing and eliminating defects after the software has been put into operation. Other factors include consistency, integration, and cost, which affect user satisfaction with the interface, and thus with the software product as a whole. All factors of user satisfaction and their relative importance should be considered during each stage of the user interface software life cycle.

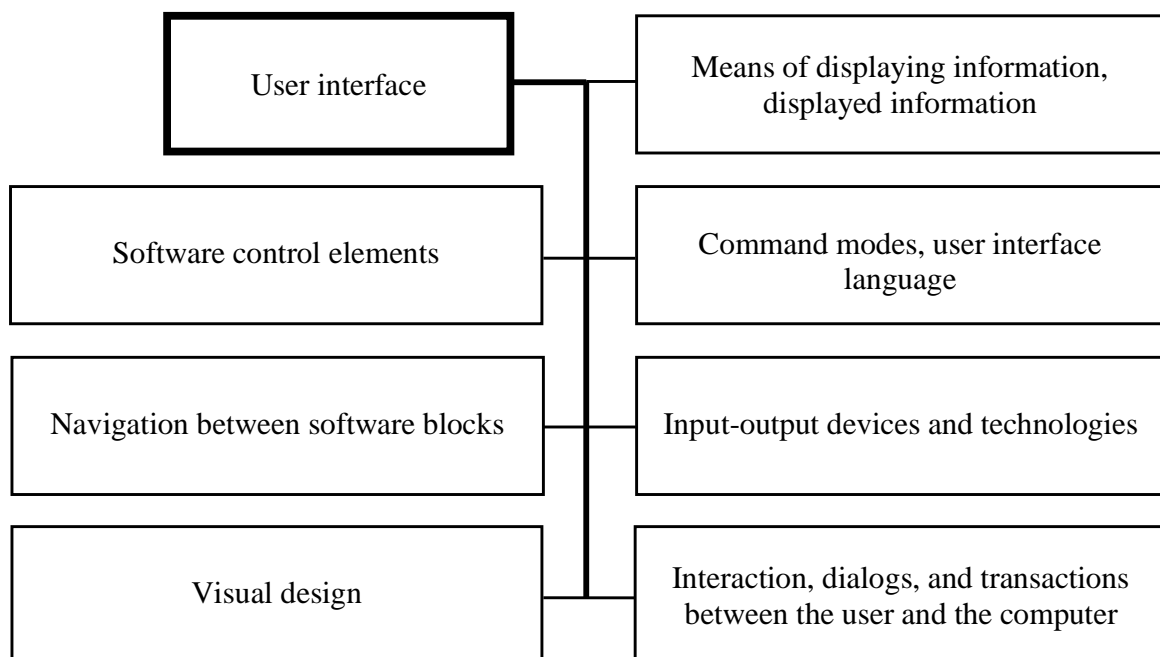


Fig. 1. Components of the user interface

The main task of human-machine interaction is to improve the interaction between a person and a computer, making computers more convenient (usable) and responsive to the needs of users. In particular, human-machine interaction deals with: the methodology and development of interface design (that is, based on the requirements and class of users, designing the best interface within the given framework, optimization for the necessary properties, such as the ability to learn and the efficiency of use); methods of implementing interfaces (for example, software tools, libraries and rational algorithms); methods for evaluating and comparing such interfaces; development of new interfaces and interaction technologies; the development of descriptive and predictive models, and the theory of interaction. The long-term task of

human-machine interaction is to develop a system that will lower the barrier between the human cognitive model of what they want to achieve and the computer's understanding of the tasks set before it.

In this case, the control system of a mobile robot, to be controlled remotely from a mobile phone, is considered. The P2P method will be used to organize the management system, that is, management will be without an intermediate link. Thus, the system will consist of a controller that will work as a server on the mobile robot and a third-party mobile application that will transmit commands directly to the mobile robot. An Arduino Nano is used as a controller, which processes the input data for control and executes the programmed instructions.

After analyzing the sources dedicated to working with Arduino, we conclude that this single-chamber microcontroller needs a DC motor driver to control the drive motor that will drive the robot structure. It is important for the driver to be able to control direction and speed. Among all options, we choose TB6612, which, thanks to its high efficiency, will increase the autonomy time of the mobile robot. Bluetooth wireless communication technology based on the HC-06 module was chosen for communication between the mobile robot and the operator. Because this communication channel allows you to get the ability to transmit commands without additional costs for a more powerful controller for working with network communication channels. This HC-06 module was also chosen because it operates from a 5V supply like the controller and has a sufficient signal range. The schematic diagram of connecting the electronic components of the mobile robot is shown in fig. 2 showing the power battery with the corresponding MT3608 DC-DC module, Arduino Nano, HC-06 Bluetooth module, steering servo motor, TB6612 and DC motor. Servo motor is connected to digital pin 12, Bluetooth module is connected to digital pins 2 and 4, TB6612 is connected to digital pins 7, 8 and digital pin 3 with PWM support.

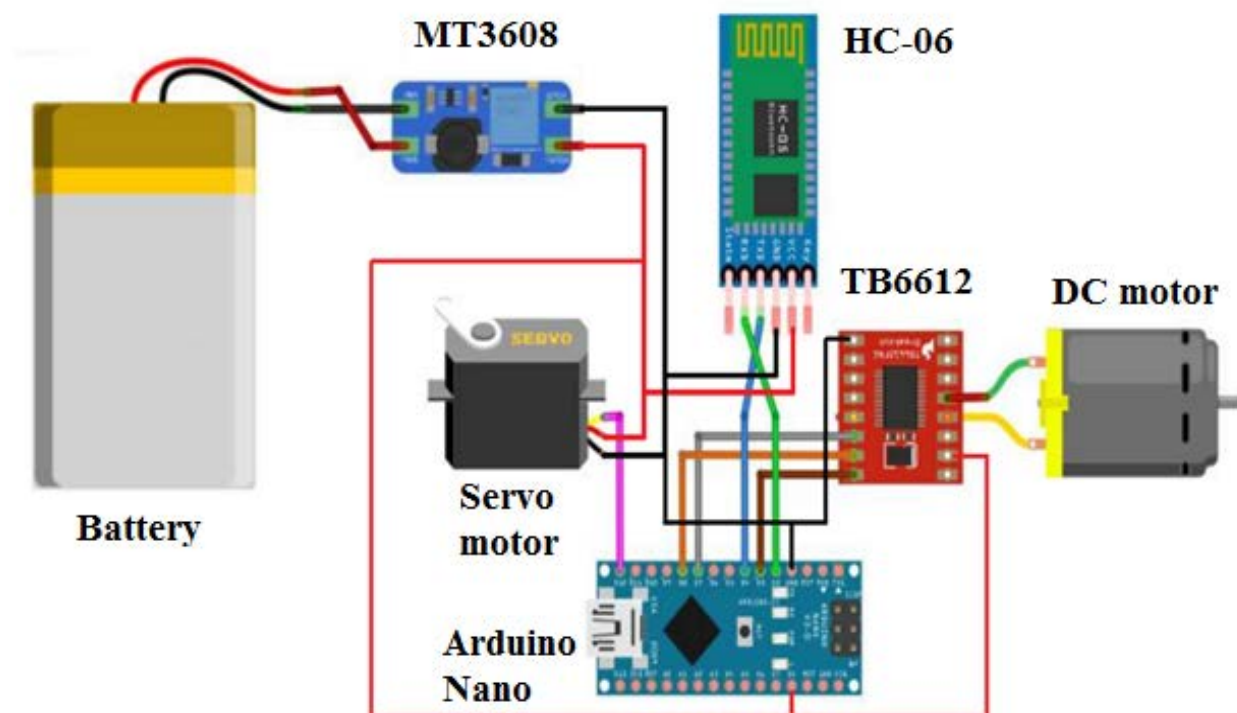


Fig. 2. Mobile robot control system

As a programming language for developing a human-machine interface for wireless control of a mobile robot, Android Studio is used as an official IDE for development on Android [12-14]. Android Studio offers a logically structured environment in which the program and user interface for a robot mobile application are developed in the Java programming language. The developed mobile application guarantees stable and prompt operation with smooth animation. UI design tools include all critical features such as scrolling, navigation, icons and fonts. Moreover, the graphical interface can be written in the form of an XML file.

The mobile application is installed using an installation file in apk format, or from the Google Play application store. To uninstall a mobile app, you need to open the settings on your mobile device and uninstall the mobile app by finding it in the submenu of installed apps. To launch a mobile application,

you need to find the application in the list of installed applications and click on its image. On fig. 3 a) shows the activated application in the vertical position of the screen. On the main window of the application, you can see the controls in the form of a joystick and four programmable buttons for sending commands to the mobile robot required by the user. At the top of the screen are the application controls, namely the button to open the terminal communication page, the button to select the device to connect to, and the button to open the settings page.

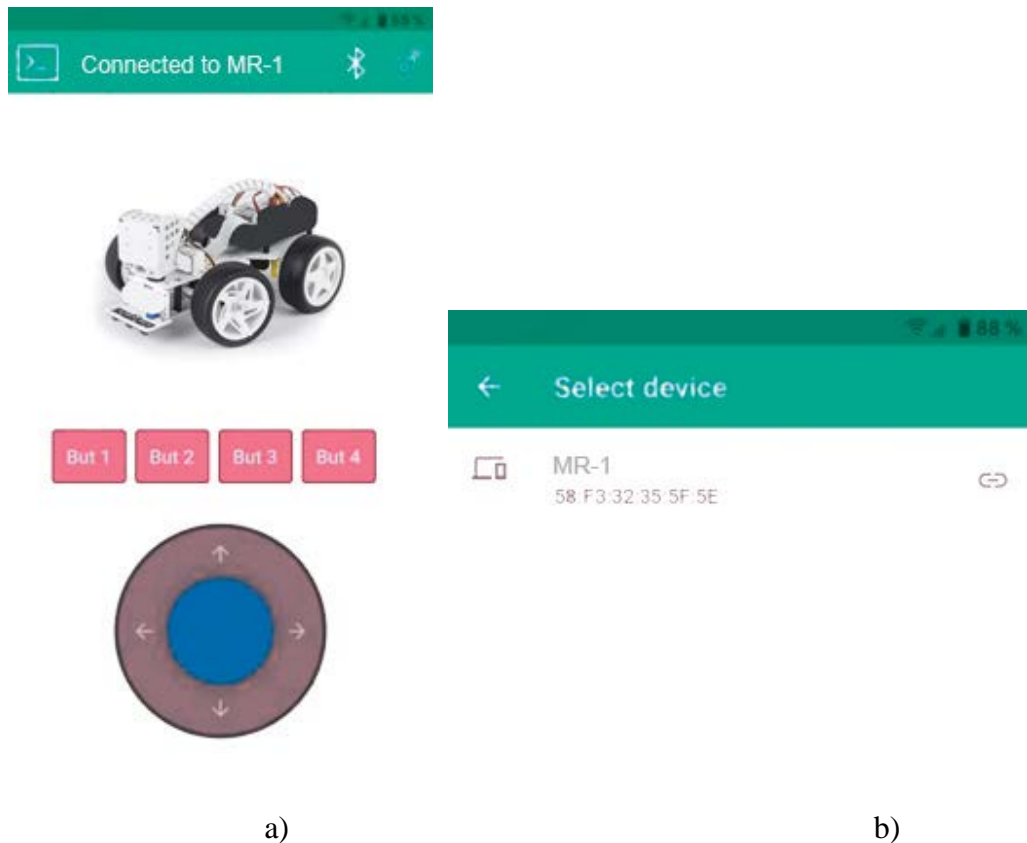


Fig. 3. Human-machine interface for controlling a mobile robot: a) main window with a connected device; b) Bluetooth device selection menu

After launching the mobile application, the user needs to connect the mobile robot. To do this, you need to go to the Bluetooth device connection menu by clicking on the corresponding button at the top of the screen. If the user has not enabled Bluetooth on the device, an error message asking to enable Bluetooth will be displayed. In the figure, fig. 3 b) shows the menu for selecting a control device. After entering this menu, devices available for connection are searched and ready devices have black text.

To select a device for control, click on it (MR 1). The song of this application will return to the main window, and the connection will take place. After the user has connected the control device, he can immediately move the green joystick to control the movement of the robot.

Also, so that the user can send commands to the device, programmable buttons have been created that can be programmed once and send the desired commands again any number of times. To program a button for the desired command, you need to long press the desired button, and its menu will open (Fig. 4). Saving the command and the desired name of the button happens automatically, to exit the button settings menu, press the back button. After opening the settings of the desired button, the user needs to enter the desired name for the button and the desired command, then to confirm the changes, the user needs to press the button called "Apply changes".

Conclusion. Human-machine interaction researchers develop new design methods, conduct experiments with new hardware devices, create prototypes of new software systems, study new paradigms for interaction, and develop interaction theories and models. Creating a high-quality human-computer interface, which can be called a point of contact between a person and a computer, is the ultimate goal of studying human-computer interaction.

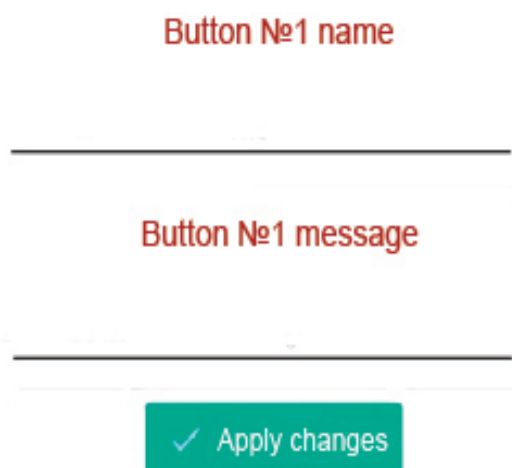


Fig. 4. Programmable button settings

The paper considers the development and improvement of a remote-control system for a mobile robot using modern approaches to ensure informative human-machine interaction of the operator with the mobile robot. Accordingly, the main principles of designing wireless mobile robot control systems and the problems of designing user interfaces were analyzed. Taking into account the requirements for convenience, safety and flexibility, constant technological development and increasing the automation of mobile robot systems, a human-machine interface was developed that provides the following functionality: editing the application in case of changing the robot model; application of technology as a wireless network Bluetooth ; constant monitoring of the movement of the mobile robot; possibility of programming buttons.

Potential users of the software product can be operators of mobile robots. This software product has both advantages and disadvantages over existing analogues and competitors presented on the domestic market. The mobile application together with the robot control system has a chance to develop and be filled with new functionality.

Acknowledgments. This study is financially supported by the National High Level Foreign Experts Introduction Project, China (G2022014116L).

List of sources used:

1. Wang J. Software analysis for mobile robots control programs / J. Wang, C. Dong, K. Wang, Z. Chen, R. Xie, W. Zhu, A. Topalov, O. Povorozniuk // Management of Development of Complex Systems . – 2023. – #53. – P. 111–119.
2. Karpechenko AA Analysis of the tasks of monitoring and automatic control of a mobile robot. Upravlinnia rozvytkom skladnykh system. / AA Karpechenko. – Kyiv, 2021. – #47 – P. 174 – 179.
3. Raj PA 'Internet of Robotic Things based autonomous fire fighting mobile robot' / PA Raj, M. Srivani // IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (IEEE ICCIC 2018). - Madurai, India, 2018. - P. 1-4.
4. Masuda Y. 'Internet of Robotic Things with digital platforms: digitization of robotics enterprise' / Y. Masuda, A. Zimmermann, S. Shirasaka, O. Nakamura // International KES Conference on Human Centered Intelligent Systems, KES-HCIS 2020 - Split; Croatia; 17 June 2020. – #189.
5. Medvediev, AM Analiz stanu system upravlinnia robotyzovanykh systemamy. / AM Medvediev // AVTOMATYZATsIIa TA PRYLADOBUDUVANNIa ("Automation and Development of Electronic Devices" ADED-2020: zbirnyk studentskykh naukovykh statei. – Kharkivskyi natsionalnyi universytet radioelektroniky [edkol.: I.Sh. Nevliudov ta in.]. – Kharkiv : KhNURE, 2020. - #2. - P. 262-265.
6. Micro Smart Bit Robot Car V2 [Electronic resource]. - Download method: <https://arduino.ua/prod3279-microbit-smart-robo-platforma-ot-keyestudio-ks0426>. – (data zvernennia: 14.10.2020). – Name from the screen.
7. Kondratenko Y. Inspection mobile robot's control system with remote IoT-based data transmission / Y. Kondratenko, O. Gerasin, O. Kozlov, A. Topalov, B. Kilimanov // Journal of Mobile

Multimedia. Special issue “Mobile Communication and Computing for Internet of Things and Industrial Automation”, 2021. – #17(4). – P. 499–526.

8. Tidwell, J. *Designing Interfaces* / J. Tidwell – Gravenstein Highway North, Sebastopol: O'Reilly Media, Inc, 2010, – 577 pp.

9. Sezonova IK Avtomatyzatsiia tekhnolohii upravlinnia vyrobnychym protsesom za dopomohoiu mobilnykh dodatki/ IK Sezonova // Vyrobnnytstvo & Mekhatronni Systemy 2019: Prohrama III-oi Mizhnarodnoi konferentsii, Kharkiv, 24-25 zhovtnia 2019 r.: tezy dopovidei / [redkol. I. Sh. Nevliudov (vidpovidalni redaktor)].– Kharkiv: [elektronnyi druk], 2019. – P. 19-21.

10. Tudoran VA Liudyno-mashyna vzaiemodiia / VA Tudoran. - Mykolaiv: NUK, 2013. - 180 p.

11. Babenko LP Osnovy prohramnoi inzhenerii. / LP Babenko, KM Lavryshcheva. - K.: Znannia, 2001. - 269 p.

12. Deitel P. *Android for programmers*. Third edition. / P. Deitel, H. Deitel, A. Wald. - 2016. - 405 p.

13. Meier R. *Professional Android 2: Application Development* Second Edition. / R. Meier. - 2011. - 672 p.

14. Phillips B. *Android Programming: The Big Nerd Ranch Guide*. / B. Phillips, C. Stewart, B. Hardy, K. Marsicano. - 2015. - 529 p.

Reviewer: Kozlov Oleksiy, Doctor of Technical Science, Professor of the Department of Intelligent Information Systems at Petro Mohyla Black Sea National University

O.S. Prykhodko, V.M. Matviychuk

USING A NEURAL NETWORK TO IMPROVE THE COURSE STABILITY OF UAV IN THE GNSS DENIED ENVIRONMENT

This paper is devoted to the development of a concept for improving the accuracy of keeping the course of airplane-type unmanned aerial vehicles in the absence of satellite navigation signals in conditions of unknown wind load using neural networks. The paper describes the results of the development and training of a neural network based on data collected during UAV training flights. The results of the work can be used to modify existing UAV flight controllers in order to improve the accuracy of their autonomous functioning in the conditions of electronic warfare.

Key words: neural networks, data analysis, unmanned aerial vehicle, autonomous navigation system.

О.С. Приходько, В.М. Матвійчук

Луцький національний технічний університет

ВИКОРИСТАННЯ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ КУРСОВОЇ СТАБІЛЬНОСТІ БПЛА ЗА ВІДСУТНОСТІ GNSS

Робота присвячена розробці концепції підвищення точності утримання курсу безпілотних літальних апаратів літакового типу при відсутності сигналів супутникової навігації в умовах невідомого вітрового навантаження за допомогою нейронних мереж. В роботі описано результати розробки та навчання нейронної мережі на основі даних, зібраних під час навчальних польотів БПЛА. Результати роботи можна використати для модифікації існуючих польотних контролерів БПЛА з метою підвищення точності їх автономного функціонування в умовах дії засоби радіоелектронної боротьби.

Ключові слова: нейронні мережі, аналіз даних, безпілотний літальний апарат, система автономної навігації.

Introduction and problem statement. Unmanned aerial vehicles (UAVs) are currently used in many areas of modern life. The most relevant at the moment is the military sector. Reconnaissance and tactical surveillance of the enemy, use as radio-controlled munitions, delivery of payloads to places inaccessible for delivery by other means - this is an approximate list of military applications of UAVs. At the same time, in the face of enemy electronic warfare (EW), the effective use of UAVs becomes extremely difficult due to the inability to use signals from the satellite navigation system (GNSS). Especially dangerous is the so-called spoofing, in which GNSS signals are spoofed, causing the UAV's navigation system to receive incorrect coordinates and lead it in the wrong direction. Without satellite navigation signals, maintaining the correct course can be challenging for UAVs due to wind interference, which tends to push the UAV off course. Therefore, developing alternative navigation methods in the absence of GNSS signals is crucial.

Analysis of the latest research and publications. The issue of reliable navigation in the absence of GNSS can be solved by several methods. For example, a structural approach to dividing navigation tasks into subcomponents was proposed in [1]: Where is the controlled object? Where is it going? What routes can it take to get there? In addition to this, [2] made an exhaustive, detailed review of research on the subcomponents of environment perception, localization, and route planning. It was found that almost 62% of all studies were devoted to UAV location, while only 16% presented a fully implemented navigation system containing all of the above subcomponents. According to their analysis, it is expected that potential future research will utilize more efficient sensors. In particular, miniature radars, cameras recording changes, and sensors using external radio signals (e.g., signals from mobile towers, cell phones, etc.). All of this will necessarily be combined with new, more efficient algorithms, most often based on artificial intelligence methods.

It is also worth highlighting several review articles on computer vision-based navigation. In particular, [3] investigated a computer vision-based navigation system that can work both indoors and outdoors. The paper analyzes the limitations and advantages of the route planning and collision avoidance subcomponents. In [4], navigation strategies were divided into three groups: without using maps, using ready-made maps, and those that create maps during navigation. They also investigated the subcomponents of obstacle avoidance, localization and mapping, and route planning. Paper [5] provides an overview of another navigation system based on computer vision. It was found that the vast majority of implementations that combine mono and stereo cameras with an inertial measurement system (IMU) are faster, require less

power and memory compared to implementations that use a system of simultaneous localization and mapping (SLAM). A group of researchers in [6] considered navigation methods using optical flow as one of the computer vision technologies. They identified and described the problems of quantifying environmental parameters and processing high-resolution images in real time.

Current trends in the research of autonomous navigation of unmanned aerial vehicles indicate a gradual increase in the share of artificial intelligence technologies [7], where the authors classified artificial intelligence-based navigation technologies into optimization-based approaches (e.g., ant and genetic algorithms) and learning-based approaches (e.g., deep learning).

Based on the analysis of the research, it can be assumed that further research will focus not only on improving existing concepts, but also on creating new big data processing systems using artificial intelligence against the background of large computing power and greater energy efficiency.

The aim of the study. To develop a concept for improving the accuracy of aircraft-type UAVs in GNSS-denied environments and in the face of wind loads of unknown direction and intensity, by combining onboard sensors with neural networks.

Experimental methodology. The main methodology of the experiment for this article is to develop a system of additional sensors on the UAV and collect data from them for further training of a neural network, the purpose of which will be to correct the course in the conditions of wind drift of the UAV. In more detail, the experimental methodology can be described as follows:

1. Installing additional sensors on an airplane-type UAV.
2. Setting up the UAV flight controller to collect data from additional sensors.
3. Collecting data from the sensors: performing UAV flights with course keeping by magnetometer in different directions and intensities of wind load.
4. Preparing the collected data for training the neural network.
5. Selection of the neural network architecture and its training.
6. Analysis of the results.

Presentation of the main research material. This article focuses on exploring the potential of neural networks to enhance the course-keeping accuracy of aircraft-type UAVs under the influence of wind with unknown intensity and direction. The UAV is equipped with an onboard magnetometer, which facilitates accurate orientation in the intended direction. However, the presence of lateral wind can cause deviations from the desired course, leading to a Return-To-Home (RTH) Error, as illustrated in Figure 1.

In this paper, we propose to use two additional airspeed sensors (Pitot tubes) (Fig. 2a) installed perpendicularly (Fig. 2b) to the longitudinal axis of the aircraft to analyze the UAV's heading error. To interpret the signals from them, a neural network pre-trained during training flights will be used.

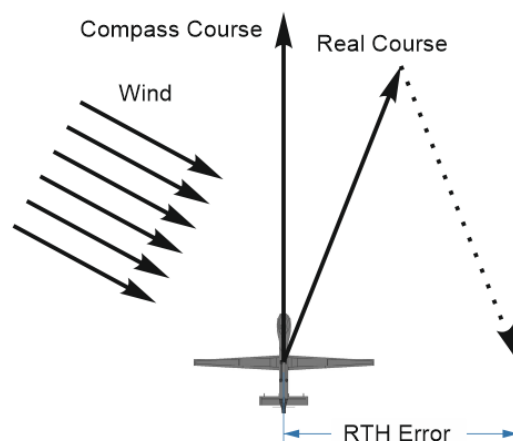


Fig. 1. Illustration of the problem of drifting a UAV off a given course by a wind

For the neural network, a classical full-connection architecture with two hidden layers of 100 and 50 neurons, respectively, was chosen. The following data were fed to the neural network:

- magnetometer course (Compass Course);
- data from three airspeed sensors;
- the position of the UAV's directional rudder.

The output of the neural network should be the value of the UAV's real course. During the training process, the output of the neural network was compared with the UAV heading value obtained using GNSS coordinates collected during training flights. As a result, the weights of the neural network links should be adjusted in such a way that it can then predict the correct course of the UAV based on airspeed sensors with sufficient accuracy without using the GNSS system.

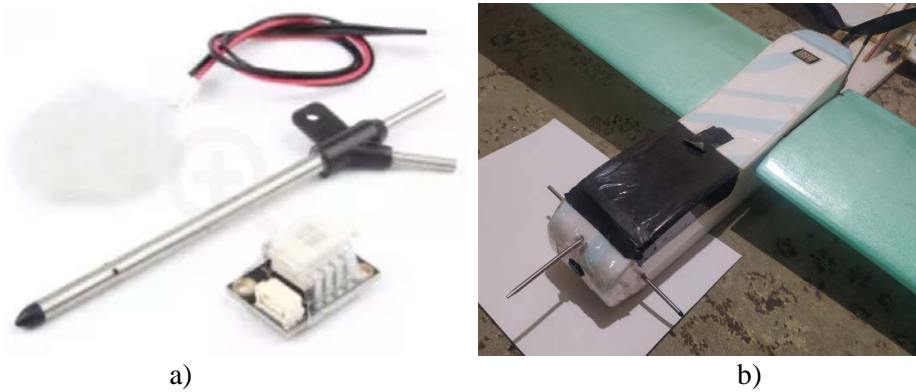
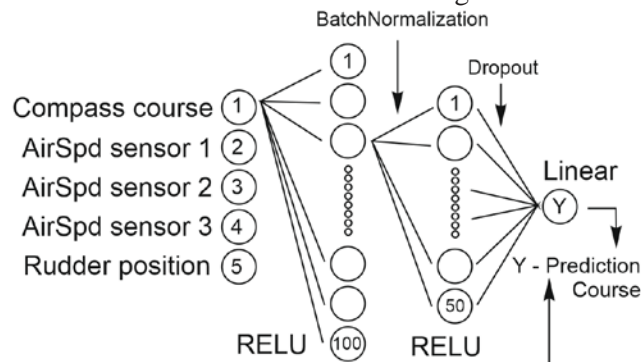


Fig. 2. Installation of airspeed sensors
a) airspeed sensor; b) placement of sensors on aircraft-type UAVs

A diagram of the neural network architecture is shown in Figure 3.



GNSS coordinates -> Real course -> training data

Fig. 3. Architecture of the neural network

The Python interpreter with the Keras framework was used to create and train the neural network. The RELU function was chosen as the activation function for the hidden layers, and a linear activation function was chosen for the output neuron, i.e., the weighted sum of the activations of the previous layer. To eliminate the overfitting process observed during training, Batch normalization and Dropout with standard parameters were applied.

The training dataset consisted of 40,000 samples collected during 12 flights lasting 60-80 minutes. Each sample contained: 1 magnetometer heading value, 3 values from airspeed sensors, 1 UAV directional rudder position value, and 2 geographic coordinates (longitude and latitude) from the GNSS receiver. The data were collected using a recorder built into the Matek H743 Wing flight controller with modified INAV 5.1 firmware.

After adjusting the neural network parameters, the error in calculating the UAV's real course was reduced to 19.2% after 50 epochs. The results are shown in the graph (Fig. 4).

Conclusions. The use of a neural network in combination with additional airspeed sensors allows predicting the real course of an aircraft-type UAV with an error of 19.2% in the face of wind drift of unknown direction and intensity.

Thus, it can be concluded that the proposed methodology is promising for improving the accuracy of autonomous operation without the use of global satellite navigation signals. Further work will focus on combining the developed neural network with a flight controller and testing the resulting navigation system in real-world conditions.

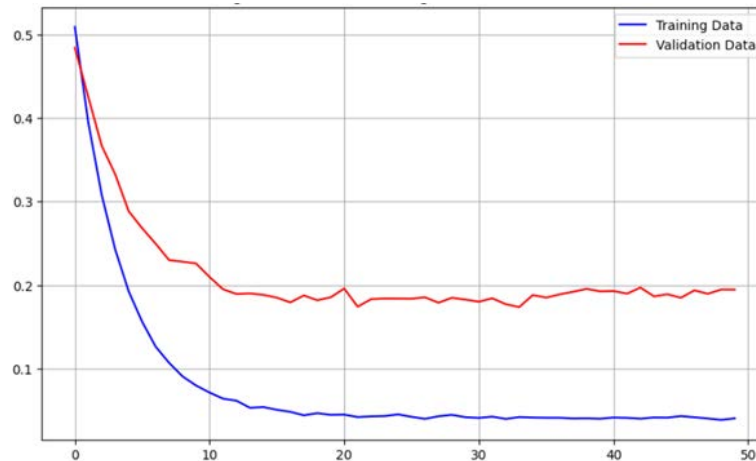


Fig. 4. Results of neural network training

List of references:

1. P. Jiang, Z. Feng, Y. Cheng, Y. Ji, J. Zhu, X. Wang, F. Tian, J. Baruch, F. Hu, A mosaic of eyes, *IEEE Robot. Autom. Mag.* 18 (3) (2011) 104–113, <http://dx.doi.org/10.1109/MRA.2011.942119>.
2. N. Gyagenda, J.V. Hatilima, H. Roth, V. Zhmud, A review of GNSS-independent UAV navigation techniques, *Robot. Auton. Syst.* 152 (2022) 104069, <http://dx.doi.org/10.1016/j.robot.2022.104069>.
3. M.Y. Arafat, M.M. Alam, S. Moh, Vision-based navigation techniques for unmanned aerial vehicles: Review and challenges, *Drones* 7 (2) (2023) <http://dx.doi.org/10.3390/drones7020089>, URL <https://www.mdpi.com/2504-446X/7/2/89>.
4. Y. Lu, Z. Xue, G.-S. Xia, L. Zhang, A survey on vision-based UAV navigation, *Geo-Spatial Inf. Sci.* 21 (1) (2018) 21–32, <http://dx.doi.org/10.1080/10095020.2017.1420509>.
5. G. Balamurugan, J. Valarmathi, V.P.S. Naidu, Survey on UAV navigation in GPS denied environments, in: *2016 International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPEs)*, 2016, pp. 198–204, <http://dx.doi.org/10.1109/SCOPEs.2016.7955787>.
6. H. Chao, Y. Gu, M. Napolitano, A survey of optical flow techniques for UAV navigation applications, in: *2013 International Conference on Unmanned Air- craft Systems (ICUAS)*, 2013, pp. 710–716, <http://dx.doi.org/10.1109/ICUAS.2013.6564752>.
7. S. Rezwan, W. Choi, Artificial intelligence approaches for UAV navigation: Recent advances and future challenges, *IEEE Access* 10 (2022) 26320–26339, <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3157626>.

Reviewer:

Pasternak Yaroslav - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Computer Science and Cybersecurity at Lesya Ukrainka Volyn National University.

Ю.П. Шипелик¹, В.І. Базилюк², О.Є. Крупінський², Л.В. Ящинський³, С.А. Федосов³

¹ТзОВ «Ведіс»

²Луцький медичний інститут

³Луцький національний технічний університет

ІОНІЗАЦІЯ МІНЕРАЛУ І ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ АЕРОЗОЛЮ NaCl

У статті ми провели огляд і ознайомились із передовими результатами і досвідом світових досліджень, які пов'язані з вивченням іонізації мінералу та фізичними властивостями аерозолю NaCl. Ми проаналізували найбільш цитовані публікації світових науковців, встановили країни-лідери за кількісними даними, передові науково-дослідні і науково-виробничі організації, окреслили коло провідних наукових галузей. Це створює розуміння актуальності, умов формування і розвитку цих напрямів у світі і визначення перспектив нових наукових досліджень.

Ключові слова: наукові дослідження, іонізація, мінерал галіт, фізичні властивості, аерозоль NaCl, галузі знань.

Yu. Shypelik, V. Bazyliuk, O. Krupinskyi, L. Yashchynskyy, S. Fedosov

IONIZATION OF THE MINERAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF NaCl AEROSOL

In this paper, we have reviewed and familiarized ourselves with the best results and experience of global research related to the study of mineral ionization and physical properties of NaCl aerosol. We have analyzed the most cited publications of world scientists, identified the leading countries in terms of quantitative data, advanced research and production organizations, and outlined the range of leading subject areas. This creates an understanding of the actuality, conditions of formation and development of these areas in the world and identifies the prospects for new research.

Keywords: research, ionization, halite mineral, physical properties, NaCl aerosol, subject areas.

Постановка проблеми. Усе більшого значення в лікуванні захворювань органів дихання нині набуває інгаляційна терапія, як один з оптимальних способів транспорту необхідних лікарських засобів безпосередньо у дихальні шляхи при різноманітних ураженнях бронхолегеневого апарату. Розвиток інгаляційної терапії, її впровадження в практику, призводить до зниження захворювань. Погіршення екологічної ситуації, часті стреси та інші фактори, змушують людей шукати все нові методи лікування з хворобами та недугами. Одним з таких методів є солетерапія: різновидами якої є спелеотерапія та галотерапія.

Головним лікувальним фактором спелеотерапії є найдрібніші частинки (1-5 мкм) NaCl. Саме ці частинки солі проникають у різні найвіддаленіші відділи бронхіального дерева та надають бронходренажну, протизапальну, імуномодулюючу дію на респіраторний тракт, що покращує загальний захист організму. Головним лікувальним чинником існуючих підземних соляних печер є повітря, що містить сольовий аерозоль. Тому в приміщеннях призначених для лікування (соляна кімната) перш за все, повинно відтворюватися повітряне середовище, що містить частинки солі. Фактично застосування відтвореного мікроклімату в приміщенні є методом аерозольної терапії з використанням природного фактора.

Основною проблемою проведення лікування у соляних кімнатах є поступове зменшення концентрації аерозолю під час процедур. Позитивне вирішення даної проблеми звелось до розробки соляних кімнат облицьованих соляною оболонкою – методом нашарування на стіни дрібної солі, товщиною шару від 6 мм чистої 100 % солі, або монтажем капсули з мінералу галіт. З лікувальною метою необхідно було встановлювати додаткові джерела іонізації. Поєднання пристрою-розпилювача (галоіонізатора чи галогенератора) і приміщення, що містить мінерал галіт, принесли позитивний результат – галокамери придатні для лікування. А це потребує додаткового вивчення процесів іонізації мінералу галіт і вивчення фізичних властивостей високодисперсного аерозолю NaCl.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивченню іонізації NaCl присвячена значна кількість робіт. Зокрема, у базі Scopus за період 1912-2024 рр., відображено майже 2 тис. наукових публікацій. Зокрема, в [1] обговорюється природа хімічного зв'язку в кристалах. Особлива увага приділяється бінарним кристалам формули ANB8-N, які включають більшість тетраедрично координованих напівпровідників, а також кристали родини кам'яної солі (NaCl). Обговорюється широкий спектр фізичних властивостей, включаючи кристалічну структуру, енергетичні зони, пружні константи, енергії іонізації та стани домішок. Аналіз енергетичного розкладання [2] надає інформацію про утворення ковалентного зв'язку H₂, метану C-H і етану C-C, бар'єр внутрішнього обертання CH₃ CH₃, водневий зв'язок води, аміаку, амонію та фтористого водню, взаємодію Ван-

дер-Ваальса, утворення пари основ DNA, утворення координатного зв'язку $\text{BH}_3 \cdot \text{NH}_3$ і $\text{BH}_3 \cdot \text{CO}$, взаємодія Cu-ліганд, а також іонні взаємодії LiF, LiCl, NaF і NaCl.

Ультратонкі ізоляційні плівки NaCl були використані авторами [3] для електронного відокремлення окремих молекул пентацену від металеві підкладки. Це дозволяє зберігати та вивчати притаманну електронну структуру вільної молекули за допомогою низькотемпературної сканувально-тунельної мікроскопії. Таким чином отримують прямі зображення незбурених молекулярних орбіталей окремих молекул пентацену. Розрахунки квантової хімії пружного розсіювання обґрунтовують експериментальні результати. У роботі [4] описуються особливості вимірювання концентрації заряджених частинок у повітрі (іонів). Розглядається використання аспіраційного конденсатора в якості модельного датчика для вимірювання розподілу іонізованих частинок. Запропоновано технічні рішення побудови приладу та шляхи коректного обрахунку результатів розподілу іонів різної рухливості, встановлено переваги та недоліки.

Причому, якщо зростання активності досліджень іонізації NaCl спостерігається з 1970-их років (рис. 1) і зберігається до сьогодні, то як і вивченню іонізації мінералу NaCl (1972-2023 рр.), так і фізичних властивостей аерозолі NaCl (1960-2023 рр.) приділено значно менше уваги (46 і 71 публікацій відповідно), хоча результати є вагомими і популярними ($h=24$ і 22) та лежать в основі роботи сучасних галокамер.

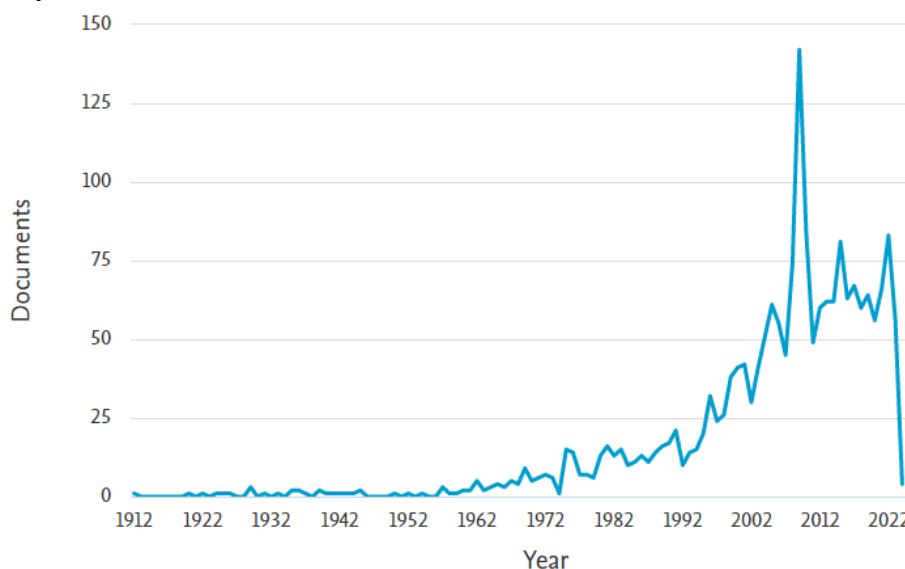


Рис. 1. Публікації за роками

Постановка завдань. В роботі поставлено мету – ознайомитись із передовими результатами і досвідом світових досліджень, пов'язаних з вивченням іонізації мінералу та фізичними властивостями аерозолі NaCl.

Викладення основного матеріалу. Із 46 наукових робіт, пов'язаних з дослідженнями іонізації мінералу NaCl, майже 90 % з усіх публікацій припадає на високорозвинуті країни, які є лідерами по впровадженню інноваційних технологій (рис. 2): США, Франція, Австралія, Китай тощо. Наявний високий науковий потенціал і сучасна матеріально-технічна база у цих країнах зосереджені у науково-виробничих центрах: *CNRS Centre National de la Recherche Scientifique, Géosciences Environnement Toulouse* (Франція); *Iowa State University, Illinois State Water Survey, Oak Ridge National Laboratory* (США); *The University of Queensland, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation* (Австралія); *University of Bern* (Швейцарія), та створюють передумови для передових наукових досліджень.

У статті [5] досліджували піроліз лігніну кукурудзяної печі за допомогою мікропіролізера, поєднаного з GC-MS/FID (flame ionization detector = полум'яно-іонізаційний детектор). Крім того, досліджувався вплив мінералів (NaCl, KCl, MgCl₂ і CaCl₂) і температури на розподіл первинного продукту піролізу. Дослідження дає уявлення про фундаментальні механізми піролізу лігніну та основу для розробки більш описових моделей піролізу біомаси.

Великі зразки (200-400 мкм) хімічно однорідного та неметаміктного бразильського кристала монациту були [6] гідротермально оброблені при різних температурах з розчинами різного складу. Продукти монацитів аналізували за допомогою скануючого електронного мікроскопа (SEM),

електронного мікрондана (EMP), мас-спектрометра вторинних іонів (SIMS) і мас-спектрометра ізотопного розведення-термічної іонізації (ID-TIMS). Для всіх циклів проходження EMP не виявили профілів дифузії Pb. Значні розростання новоутвореного монациту задокументовано аналізом SEM. В експерименті з CaCl_2 можна було виділити дві зони всередині кристала: ядро, що має початковий склад монациту, і обідок, що складається з новоутвореного монациту, отриманого розчиненням/осадженням, який був збагачений Ca та Pb. ID-TIMS датування окремих зерен, оброблених розчинами SrCl_2 і CaCl_2 при 1000°C , значно суперечить. Жоден із продуктів реакції не містив виявленого профілю дифузії. Єдиний механізм скидання, який виявлено, включав розчинення/осадження. Ступінь процесу розчинення/осадження залежить від складу рідини та є більш ефективним механізмом, ніж дифузія, для контролю відновлення монациту в природних породах.

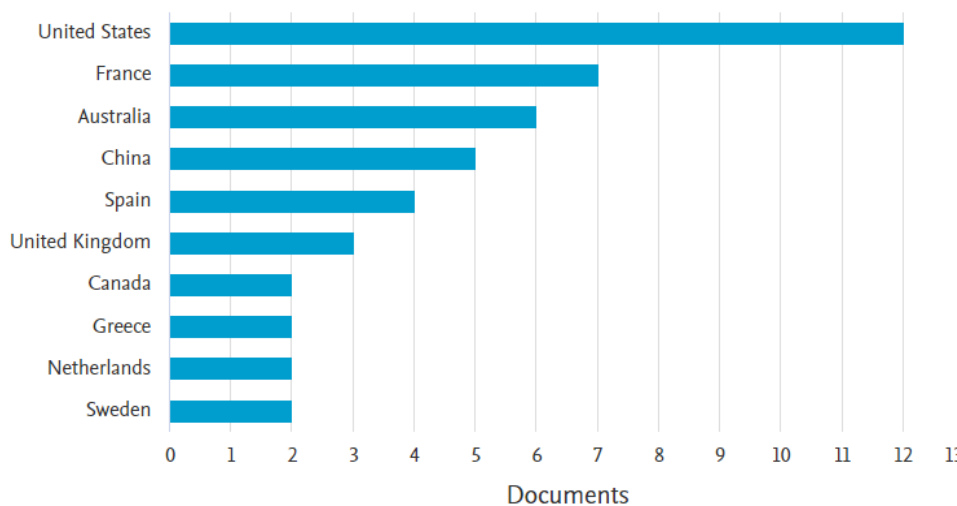


Рис. 2. Діаграма країн із найбільшою кількістю публікацій по вивченню іонізації мінералу NaCl

Багатошарові структури, утворені натрієвою сіллю полі(4-стиролсульфонату) (PSS) і полі(діалілдиметиламоній) хлориду (PDADMAC), були побудовані [7] шляхом електростатичної самозбірки з водних розчинів поліелектролітів різної іонної сили. Зростання багатошаровості відслідковували за допомогою дисипативного кристалічного мікроваги кварцу та еліпсометрії. Дані нейтронної рефлектометрії та XPS показують, що шари PSS і PDADMAC взаємопроникають, і це призводить до майже однорідної полімерної плівки. Результати показують, що при збільшенні $[\text{NaCl}]$ процес росту змінюється з лінійного на нелінійний режим. Порівняння значень товщини, отриманих за допомогою QCM та еліпсометрії, дозволило розрахувати вміст води в полімерній плівці. Аналіз даних QCM дав значення комплексного модуля зсуву, типові для гумоподібної полімерної системи. Аналіз адсорбованої маси, розрахованої за допомогою еліпсометричних вимірювань, показав, що механізм компенсації заряду змінюється від внутрішнього при низькій іонній силі до переважно зовнішнього при високій іонній силі. Було також виявлено, що реакція полімерної плівки на зміну $[\text{NaCl}]$ досить різна для плівок, вирощених при низькій або високій іонній силі.

У документі [8] монодисперсні наночастинки магнетиту, модифіковані полі(етиленгліколем) (PEG), були синтезовані з використанням функціоналізованого силаном PEG, отриманого шляхом взаємодії 3-амінопропілтриетоксисилану з карбоною кислотою-метокси PEG (mPEG-COOH) за допомогою амідних реакцій. Просвічуюча електронна мікроскопія (ТЕМ), динамічне розсіювання світла (DLS) і вимірювання зета-потенціалу показують, що частинки є монодисперсними ($\sigma_{\text{gv}} \sim 0,2$) і стабільними у воді за рН 3-9 та іонної сили до $0,3 \text{ M NaCl}$. Термогравіметричний аналіз у поєднанні з ТЕМ і DLS вказує на утворення щільного прищепленого шару на поверхні частинок. Аналіз енергії міжчастинкової взаємодії показує, що частинки стабілізовані сильним стеричним відштовхуванням між ланцюгами PEG на їх поверхні.

У роботі [9] було успішно синтезовано новий тип суперпарамагнітного наносорбенту — наночастинки Fe_3O_4 з політіофеновим покриттям ($\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{PTh NPs}$). Синтезовані NPs були охарактеризовані методами скануючої електронної мікроскопії (SEM), інфрачервоної Фур'є-спектроскопії (FT-IR) і термогравіметричного аналізу (TGA). Синтезовані $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{PTh NPs}$ застосовано як ефективний сорбент для екстракції та попереднього концентрування кількох типових сполук пластифікаторів (ди-н-бутилфталат (DBP), ді-(2-етилгексил) фталат (DEHP),

діоксиладипат (DOA)) із проб навколишньої води. Відокремлення $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{PTh}$ NPs від водного розчину було досягнуто просто шляхом застосування зовнішнього магнітного поля. Розділення та визначення екстрагованих пластифікаторів проводили за допомогою газової хроматографії з полум'яно-іонізаційним детектуванням (GC-FID). Були досліджені та оптимізовані декілька змінних, що впливають на ефективність екстракції аналітів, тобто кількість сорбенту НЧ, концентрація солі, час екстракції та умови десорбції.

Більше третини публікацій по вивченню фізичних властивостей аерозолу NaCl опубліковано науковцями з США (рис. 3). Значний доробок мають представники Китаю, Німеччини тощо. Усі ці дослідження проведено в потужних науково-виробничих центрах: *Pacific Northwest National Laboratory, Drew University, Purdue University, Environmental Molecular Sciences Laboratory, University of Maryland, College Park*, тощо (США); *Chinese Academy of Sciences, University of Chinese Academy of Sciences*, (Китай), які володіють передовою матеріально-технічною базою.

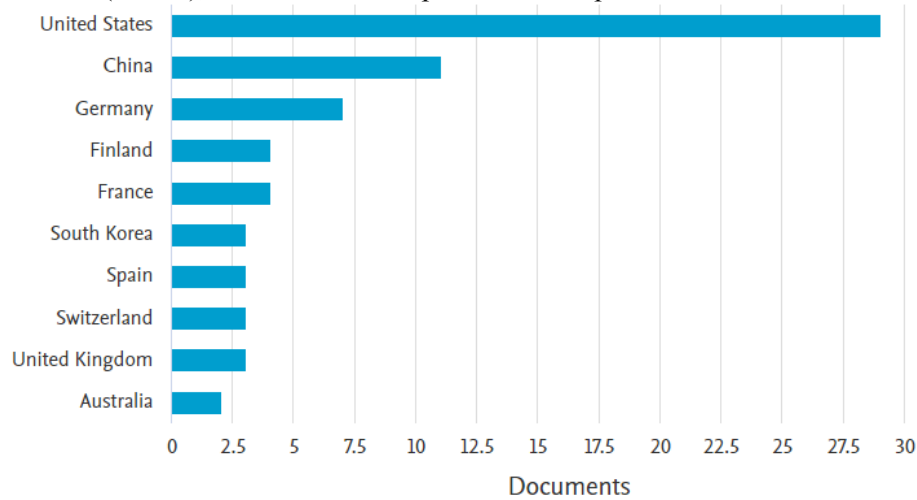


Рис. 3. Діаграма країн із найбільшою кількістю публікацій по вивченню фізичних властивостей аерозолу NaCl

Метою роботи [10] є дослідження впливу відносної вологості (=relative humidity (RH)) на фізико-хімічні характеристики крапель модельних дихальних рідин. Під впливом постійного зниження RH краплі різних модельних респіраторних рідин мали різну морфологію. Втрата води викликала розділення фаз, а також індикацію зниження рН. Присутність поверхнево-активної речовини перешкождала швидкій регідратації нелетких компонентів. Підвищення кислотності та солоності у випаровуваних респіраторних краплях може вплинути на структуру вірусу, хоча при достатньо низькій RH кристалізація компонентів крапель може усунути їх шкідливий вплив.

Представлені у [11] експерименти, досліджують фазу та поведінку частинок NaNO_3 при різних відносних вологостях, важливі для з'ясування ролі, яку ці частинки відіграють у хімії та радіаційних властивостях морських регіонів. Зміни в частинках NaNO_3 під час гідратації вивчали за допомогою скануючої електронної мікроскопії навколишнього середовища (ESEM) і звичайного SEM у поєднанні з енергодисперсійним рентгенівським аналізом (SEM/EDX). Комбінація цих методів показує, що частинки NaNO_3 існують як незвичайні метастабільні, аморфні тверді речовини при низькій відносній вологості, які зазнають безперервного гігроскопічного росту зі збільшенням відносної вологості.

Розподіл аерозолу за розміром вимірювали у [12] за допомогою каскадного імпактора MOUDI. Індуковане рентгенівським випромінюванням (PIXE) використовувалося для вимірювання концентрації до 20 елементів. Також було проведено аналіз на вміст чорного вуглецю (=Black carbon (BC)) та гравіметричний аналіз маси. Інструментальний нейтронно-активаційний аналіз (INAA) визначив концентрації близько 15 елементів на тefлонових фільтрах. Електронно-зондовий рентгенівський мікроаналіз (EPMA) використовувався для аналізу окремих аерозольних частинок. Розподіл аерозолу за розміром показує, що на тонку моду припадає 78 % маси аерозолу з центром в аеродинамічному діаметрі 0,33 мкм. На грубу форму припадає 22 % маси з центром приблизно 3,2 мкм. Розподіл сажі за розміром показує послідовну картину з середнім масовим діаметром, зосередженим на аеродинамічному діаметрі приблизно 0,175-0,33 мкм.

У роботі [13] вивчено вплив вологості, гігроскопічності та розміру частинок на масову навантажувальну здатність високоефективних повітряних фільтрів із скловолокна. Вище точки розрідження перепад тиску на фільтрі збільшувався нелінійно з щільністю площі навантаження (зібрана маса/площа фільтрації) аерозолу NaCl, таким чином значно знижуючи масову навантажувальну здатність фільтра порівняно з навантаженнями маси сухих гігроскопічних або негігроскопічних частинок. Виявлено, що K_2 зменшується зі збільшенням вологості для негігроскопічних частинок оксиду алюмінію та для гігроскопічних частинок NaCl (при вологості нижче точки розрідження). Було виведено формулу для прогнозування K_2 для логарифмічно нормально розподілених аерозолів (параметри отримані з даних імпактора).

У роботі [14] синтезовано плоский оксид графену (GO) і п'ять фізично зім'ятих GO (CGO, з різним ступенем термічного відновлення та, отже, кисневою функціональністю) за допомогою аерозольного методу та охарактеризували еволюцію хімії та морфології поверхні за допомогою набору спектроскопічних (UV-vis, FTIR, XPS) і мікроскопічних (AFM, SEM і TEM) методів. Для кожного з цих матеріалів визначено критичні концентрації коагуляції (ККК) для електролітів NaCl, CaCl₂ та MgCl₂. ККК корелювали з матеріальними ζ -потенціалами ($R^2 = 0,94-0,99$), які, як виявилось, математично узгоджувалися з класичною теорією DLVO. У сукупності результати фізичного та хімічного аналізів чітко вказують на те, що як форма GO, так і функціональність поверхні є критично важливими для розуміння фундаментальної поведінки матеріалу у воді.

Очевидною є різниця у внеску науковців різних галузей знань до розв'язання задач пов'язаних з вивченням іонізації мінералу NaCl (рис. 4а) і фізичними властивостями аерозолу NaCl (рис. 4б). Пріоритетними для дослідження ці напрямки є для хіміків, фахівців з наук про Землю, екологів. Крім цих фахівців, якщо дослідженнями іонізації мінералу NaCl займаються матеріалознавці і фізики та астрономи, то фізичними властивостями аерозолу NaCl – хімічні технологи та інженери. Саме на фахівців цих галузей припадає майже 70 % усіх публікацій.

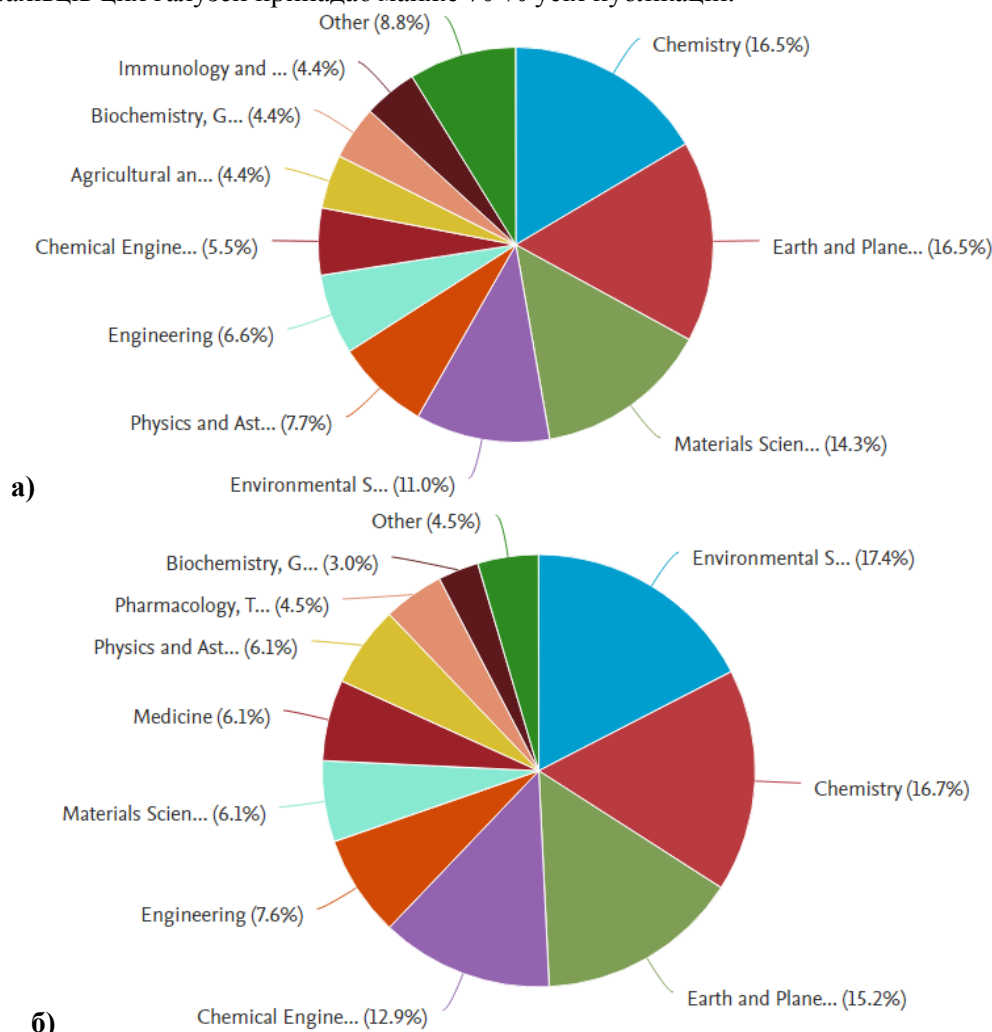


Рис. 4. Переважаючі галузі знань публікацій

Висновки. Проведений аналіз дозволяє стверджувати про актуальність і маловивченність тематик, а отже, в потребі подальших комплексних наукових дослідженнях. Основна увага світових науковців зосереджена на фундаментальних аспектах. Для вирішення прикладних задач необхідне залучення фахівців з фізики та інженерії, використання сучасних експериментальних методик, зокрема, скануючої електронної мікроскопії (SEM), SEM у поєднанні з енергодисперсійним рентгенівським аналізом (SEM/EDX), електронного мікрзонда (EMP) і мас-спектрометра вторинних іонів (SIMS) тощо.

Список використаних джерел:

1. Phillips J.C. Ionicity of the chemical bond in crystals. *Reviews of Modern Physics*. 1970. Vol. 42, № 3. P. 317–356.
2. Su P., Li H. Energy decomposition analysis of covalent bonds and intermolecular interactions. *Journal of Chemical Physics*. 2009. Vol. 131, № 1. 014102.
3. Repp J., Meyer G., Stojković S.M., Gourdon A., Joachim C. Molecules on insulating films: Scanning-tunneling microscopy imaging of individual molecular orbitals. *Physical Review Letters*. 2005. Vol. 94, № 2. 026803.
4. Шипелик Ю. П., Федосов С. А. Методики та техніки вимірювання іонізації та їх проблематика. *Перспективні технології та прилади*. 2019. № 14. С. 159–164.
5. Patwardhan P.R., Brown R.C., Shanks B.H. Understanding the fast pyrolysis of lignin. *ChemSusChem*. 2011, Vol. 4, № 11. P. 1629–1636.
6. Seydoux-Guillaume A.-M., Paquette J.-L., Wiedenbeck M., Montel J.-M., Heinrich W. Experimental resetting of the U-Th-Pb systems in monazite. *Chemical Geology*. 2002. Vol. 191, № 1-3. P. 165–181.
7. Guzmán E., Ritacco H., Rubio J.E.F., Rubio R.G., Ortega F. Salt-induced changes in the growth of polyelectrolyte layers of poly(diallyl-dimethylammonium chloride) and poly(4-styrene sulfonate of sodium). *Soft Matter*. 2009. Vol. 5, № 10. P. 2130–2142.
8. Barrera, C., Herrera, A.P., Rinaldi, C. Colloidal dispersions of monodisperse magnetite nanoparticles modified with poly(ethylene glycol). *Journal of Colloid and Interface Science*. 2009. Vol. 329, № 1. P. 107–113.
9. Tahmasebi E., Yamini Y., Moradi M., Esrafil A. Polythiophene-coated Fe₃O₄ superparamagnetic nanocomposite: Synthesis and application as a new sorbent for solid-phase extraction. *Analytica Chimica Acta*. 2013. Vol. 770. P. 68–74.
10. Vejerano E.P., Marr L.C. Physico-chemical characteristics of evaporating respiratory fluid droplets. *Journal of the Royal Society Interface*. 2018. Vol. 15, № 139. 20170939.
11. Hoffman R.C., Laskin A., Finlayson-Pitts B.J. Sodium nitrate particles: Physical and chemical properties during hydration and dehydration, and implications for aged sea salt aerosols. *Journal of Aerosol Science*. 2004. Vol. 35, № 7. P. 869–887.
12. Artaxo P., Fernandes E.T., Martins J.V., ...Longo K.M., Castanho A. Large-scale aerosol source apportionment in Amazonia. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*. 1998. Vol. 103, № D24. P. 31837–31847.
13. Gupta A., Novick V.J., Biswas P., Monson P.R. Effect of humidity and particle hygroscopicity on the mass loading capacity of high efficiency particulate air (hepa) filters. *Aerosol Science and Technology*. 1993. Vol. 19, № 1. P. 94–107.
14. Jiang Y., Raliya R., Fortner J.D., Biswas P. Graphene Oxides in Water: Correlating Morphology and Surface Chemistry with Aggregation Behavior. *Environmental Science & Technology*. 2016. Vol. 50, № 13. P. 6964–6973.

М.С. Півницький, С.П. Шимчук

Луцький національний технічний університет

РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ШВИДКОРОЗБІРНОГО ЛАНЦЮГА ДЛЯ РОБОТИ ЗА НЕВЕЛИКИХ ШВИДКОСТЕЙ ОБЕРТАННЯ

В науковій статті розглядається розробка спрощеної конструкції швидкокорозбірного ланцюга для роботи за невисоких швидкостей обертання. Такий ланцюг можна виготовляти з круглого чи фасонного прокату методом штампування. Запропонована спеціальна конструкція ланцюга робить його швидкокорозбірним, недорогим у виготовленні та таким, що може передавати достатньо великі обертові моменти. Виготовляти ланцюг можна різних розмірів, що дозволяє мати досить широку область використання. Крім цього, технологія дозволяє виготовлення такого ланцюга з різних за властивостями конструкційних матеріалів, що забезпечує можливість мати необхідну зносостійкість та використання його за високих температур, наприклад в конвеєрах, що використовуються при виготовленні мінеральної вати.

Ключові слова: ланцюг, ланка, конструкція, гак.

N.S. Pivnytskyi, S.P. Shymchuk

DEVELOPMENT OF A QUICK-RELEASE CHAIN DESIGN FOR OPERATION AT LOW ROTATIONAL SPEEDS

The scientific article deals with the development of a simplified design of a quick-disassembly chain for operation at low rotation speeds. Such a chain can be made from round or shaped rolled products by stamping. The proposed special chain design is quick to disassemble, inexpensive to manufacture, and capable of transmitting sufficiently large torques. You can make a chain of different sizes, which allows you to have a fairly wide area of use. In addition, the technology allows the production of such a chain from structural materials with different properties, which provides the opportunity to have the necessary wear resistance and use it at high temperatures, for example, in conveyors used in the production of mineral wool.

Keywords: chain, link, construction, hook.

Вступ. Ланцюгова передача складається з ланцюга та зірочок, по яких рухається ланцюг. Ці передачі відносять до замкнених передач зі гнучким зв'язком. Ланцюгові передачі мають найрізноманітніше використання. Наприклад їх дуже широко використовують для передачі обертового моменту та забезпечення руху в:

- автомобільній та автотракторній техніці;
- мотоциклах та велосипедах;
- різного роду транспортерах;
- машинах гірничої промисловості;
- різного роду обладнанні галузевого машинобудування (машинах сільськогосподарського та лісотехнічного призначення, легкої промисловості, металорізальних верстатах та ін.);
- машинах та обладнанні будівельної галузі.

Ланцюгові передачі мають достатньо високий коефіцієнт корисної дії (ККД ланцюгових передач становить 0,96...0,97) та за відповідними ознаками поділяють на передачі з:

- роликівими ланцюгами;
- втулковими ланцюгами;
- зубчастими ланцюгами.

Ланцюгові передачі можуть бути з двома чи кількома зірочками, постійною чи регульованою відстанню між зірочками, з постійним чи регульованим натягом. Ці передачі поділяють на відкриті та закриті, які працюють в умовах сухого тертя та, що працюють зі змащенням. Тому триботехнічні дослідження таких передач зводяться до досліджень на тертя та зношування матеріалів, з яких виготовлено контактуючі ланки зубчастої передачі, з урахуванням умов контактування, навантаження та виду тертя [1 – 2].

На рівні з зірочками важливими, складними у виготовленні та дорогими є ланцюги. Тому розробка конструкцій, раціональний підбір зносостійких матеріалів та технологій виготовлення відносно недорогих швидкокорозбірних ланцюгів, які мають широку область використання – є досить актуальною науково-практичною задачею.

Аналіз спеціальної літератури за тематикою дослідження. Аналітичний огляд сучасної спеціальної наукової та довідникової літератури показує, що, в основному, дослідження різного роду ланцюгів ланцюгових передач базуються на використанні відпрацьованих та неодноразово перевірених в дослідних та виробничих умовах методів та методик розрахунків [3 – 4]. Проте є

випадки, коли потрібно розробляти спеціальні конструкції ланцюгів, наприклад зі швидкорозбірними ланками [5], які будуть дешевшими у виготовленні, порівняно з аналогами, та які досить легко можна адаптувати до різних складних умов роботи (зокрема за високих температур, без змащення чи в умовах агресивних середовищ). В цьому випадку задача зводиться до раціонального підбору матеріалу для ланцюга, практично не змінюючи технологію виготовлення.

Досить поширеним напрямком досліджень є заміна матеріалів ланок ланцюгів ланцюгових передач, що передбачає використання різного роду полімерних матеріалів. Такий підхід при проектуванні роликів ланцюгів дозволяє суттєво зменшити витрати на виготовлення, покращити їх зносостійкість та інші експлуатаційні характеристики, зокрема можливість використовувати для передачі руху за значних швидкостей [6 – 7]. Проте, для таких ланцюгів є обмеження роботи за високих температур. Зазвичай дослідження в цьому напрямі виконуються з використання програмних продуктів типу SolidWorks [8].

Постановка завдань дослідження. Розробити спрощену конструкцію швидкорозбірного ланцюга для роботи за невисоких швидкостей обертання.

Результати дослідження. Конструкцію швидкорозбірного ланцюга доцільно розробити у вигляді фасонних ланок, що з'єднуються між собою проміжними ланками за допомогою крюків (гаків). Гак можна розглянути, як брус з великою кривизною (рис. 1). Для такого випадку умову міцності можна записати як [9]:

$$\sigma_{max} = \frac{M \cdot y}{F \cdot e(R_0 - y)} + \frac{N}{F} \leq [\sigma],$$

де M – згинальний момент ланки;

N – допустиме навантаження ланки на розрив;

F – площа поперечного перерізу;

R_0 – радіус центру ваги перерізу;

y – відстань від центру ваги до точки, в якій перевіряється умова міцності;

e – зміщення нейтральної лінії згину від геометричного центру перерізу

При цьому необхідно врахувати, що висота перерізу h та радіус гака R знаходяться у співвідношенні:

$$\frac{h}{R} \geq \frac{1}{5}.$$

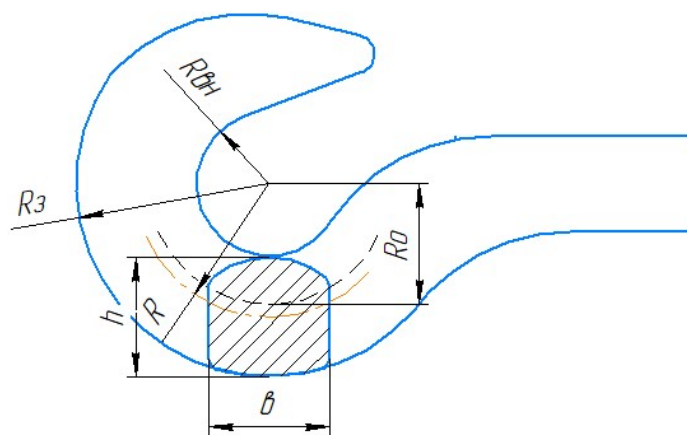


Рис. 1. Розрахункова схема гака

Запас міцності гака, при однаковій геометрії ланки, досліджували в середовищі SolidWorks для сталі 35 та сталі 40X. Залежність коефіцієнту запасу міцності гака від матеріалу приведено на (рис. 2).

З рис. 2 чітко видно, що змінюючи матеріал, можна значно покращити міцнісні та інші механічні й експлуатаційні характеристики ланцюга. Наприклад, змінюючи матеріал зі сталі 35 на сталь 40X, запас міцності гака покращується майже вдвічі.

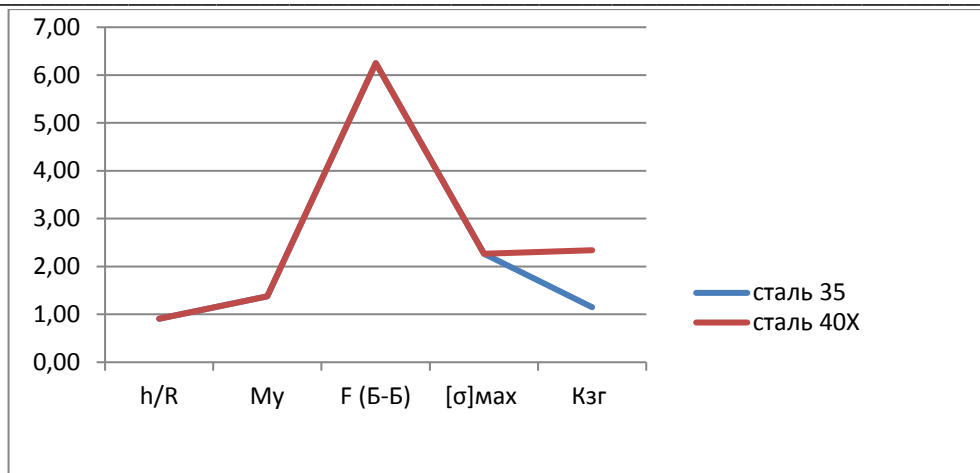


Рис. 2. Залежність коефіцієнту запасу міцності гака від матеріалу

Для того, щоб гак не виходив з зачеплення при зменшенні натягу, запропоновано покращену конструкцію гака (рис. 3). Така конструкція відрізняється від так званої «класичної» конструкції тим, що зверху кріпиться фіксуюча штанга. Таку штангу можна кріпити будь-яким механічним способом кріплення (наприклад запресуванням, зварюванням та ін.).

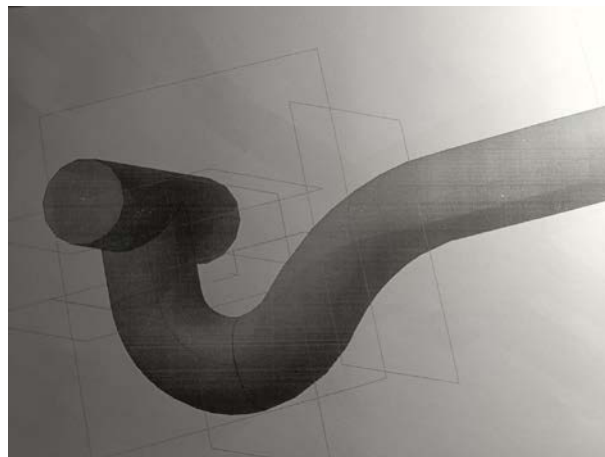


Рис. 3. Покращена конструкція гака

Конструкція швидкозбірного ланцюга для роботи за невисоких швидкостей обертання зображена на рис. 4.

Вона складається з двох ланок, що подібні до ланок круглolanкового ланцюга, які з'єднані між собою проміжною ланкою, що має вигляд сполучених між собою двох гаків. Ланки такого ланцюга можна виготовляти різних типорозмірів і з різних конструкційних матеріалів [10], що дозволяє використовувати таку передачу за високих температур, в різних агресивних середовищах, без та зі змащенням. В якості заготовок можна використовувати круглий чи фасонний прокат. Ланцюг такої конструкції можна виготовляти різної довжини та використовувати для передачі руху через дві чи більше зірочки.

Запропонована конструкція ланцюга є набагато економічно ефективнішою, порівняно з більшістю інших конструкцій ланцюгів. Найбільшим недоліком такої ланцюгової передачі є складність її використання за високих швидкостей обертання (більше 15 м/с).

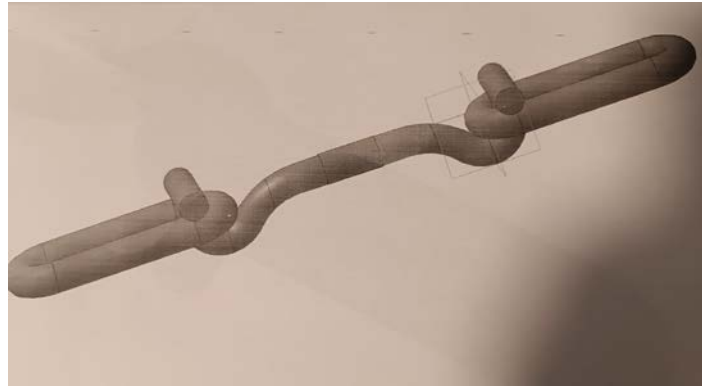


Рис. 4. Конструкцію швидкокорозбірного ланцюга для роботи за невисоких швидкостей обертання

Висновки.

1. Запропоновано конструкцію ланцюга, що є відносно простою та недорогою у виготовленні.
2. Такий ланцюг можна використовувати за невеликих швидкостей обертання.
3. Ланцюгова передача з ланцюгом такої конструкції має хорошу ремонтоздатність, оскільки ланцюг є швидкокорозбірним (елементи ланцюга швидко замінюються на нові без особливих труднощів та додаткового обладнання, при цьому має бути лише трохи підрегульованим натяг ланцюга).
4. Ланцюг такої конструкції може бути виготовленим різних типорозмірів без зміни технології виготовлення.
5. Використовуючи різні конструкційні матеріали можна впливати на вартість виготовлення та міцнісні показники ланцюга.

Список посилань:

1. Стельмах О.У. Особливості зношування сталі ШХ15 в режимі граничного тертя: монографія / О.У. Стельмах, Р.Є. Костюнік, С.П. Шимчук, Н.П. Зайчук. – Луцьк : Вежа-Друк, 2013. – 160 с.
2. Стельмах О.У. Розвиток адгезійно-гідродинамічної моделі тертя та зношування: експериментально-методологічні підходи. Монографія / П.П. Савчук, О.В. Стельмах, С.П. Шимчук. – Луцьк : РВВ Луцького НТУ, 2015. – 240 с.
3. Павлище В. Основи конструювання та розрахунок деталей машин: Підручник. Львів: Афіша, 2003. – 560 с.
4. Коновалюк Д.М., Ковальчук Р.М. Деталі машин: Підручник. – Вид. 2-ге. – К.: Кондор, 2004. – 584 с.
5. С.П. Шимчук, М.С. Півницький, Н.П. Зайчук. Використання ланцюгових передач в різних галузях сучасного машинобудування // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. - Луцьк: Луцький НТУ - 2021. – Випуск 72, с. 170-174.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Писаренко Г.С. Опір матеріалів / Г.С. Писаренко, О.Я. Квітка, Е.С. Уманський. – К.: Вища школа, 2004. – 635 с.
10. С.П. Шимчук. Проблема імпортозаміщення матеріалів конструкційного призначення машинобудівними підприємствами України / С.П. Шимчук, Н.П. Зайчук, М.С. Півницький, І.В. Орловський, Яцек Щот // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. - Луцьк: Луцький НТУ - 2023. – Випуск 75, с. 92-94.

УДК 678.027.3

DOI 10.36910/775.24153966.2023.75.27

С.А. Федосов¹, О.В. Замуруєва², Л.І. Никируй³, В.С. Федосов², А.В. Трофімчук¹¹Луцький національний технічний університет²Волинський національний університет імені Лесі Українки³Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника**ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В АВТОМОБІЛЬНОМУ ТРАНСПОРТІ**

У статті проаналізовано публікації авторитетних світових науковців пов'язані з інноваційними технологіями для автомобільного транспорту. Це створює розуміння формування підтримки та розвитку цього напрямку у світі і в Україні, визначення перспектив нових досліджень. Окреслено коло провідних публікацій у науковій галузі, проаналізовано фактори впливу вчених різних країн на розвиток цієї галузі, розглянуто особливості міжнародної співпраці. Сформульовано деякі пропозиції для поширення результатів українських вчених у світовій науковій спільноті за цим напрямком.

Ключові слова: технології, автотранспорт, наукові дослідження, публікації, галузі знань.

S. Fedosov, O. Zamurujeva, L. Nykyruy, V. Fedosov, A. Trofymchuk

INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN MOTOR VEHICLES

The article analyzes the publications of reputable world scientists related to innovative technologies for motor vehicles. This creates an understanding of the formation of support and development of this direction in the world and in Ukraine, and determining the prospects for new research. 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, and the peculiarities of international cooperation are considered. Some proposals have been formulated for the distribution of the results of Ukrainian scientists in the world scientific community in this direction.

Keywords: technologies, motor vehicles, scientific research, publications, subject areas.

Постановка проблеми. Розвиток технологій безпосередньо пов'язаний із станом та розвитком науки, а саме актуальністю проблем, зацікавленістю науковців до їх вирішення і наявністю матеріально-технічної бази для реалізації досліджень. Відображенням результатів цих досліджень є наукові публікації у провідних світових фахових виданнях. Саме такі публікації і формують розвиток даного напрямку чи проблем у певній галузі. Такі тенденції є справедливими для різних виробничих сфер. Не винятком є прикладні дослідження у галузі автомобільного транспорту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У наукометричній базі Scopus на жовтень 2023 року відображено понад 12 тис. наукових публікацій пов'язаних з технологіями в автомобільному транспорті (англ. *Technologies in motor vehicles*). Їх щорічна кількість (рис. 1) суттєво залежить від впровадження у виробництво інноваційних результатів наукових досліджень. Швидше за все кількісне зростання публікацій у період 1965-2000 рр., пов'язане з стрімким розвитком напівпровідникової електроніки, а значне збільшення у 2000-их рр. із впровадженням цифрових технологій і широким використанням компонентів на їх основі у різних електронних системах автомобілів [1].

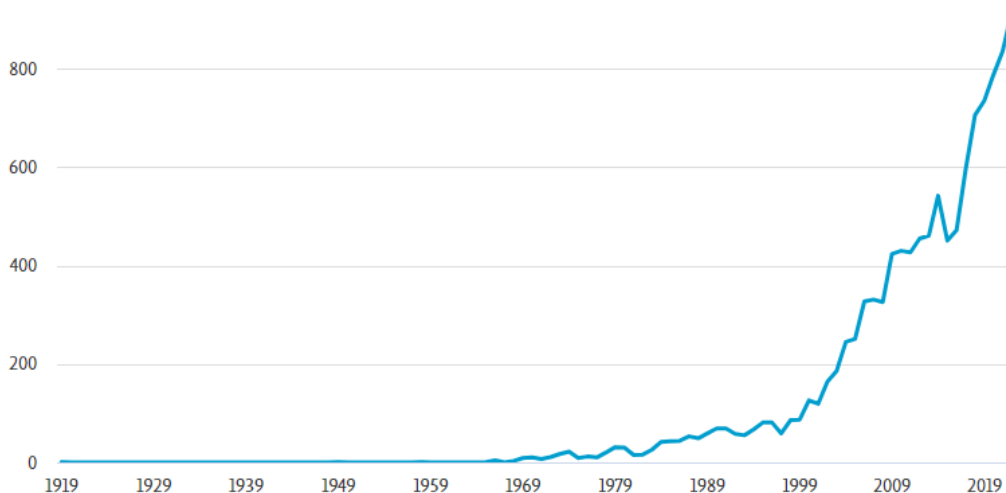


Рис. 1. Публікації за роками

Вирішенням проблем і впровадженням нових технологій у галузі автомобільного транспорту займається велика кількість світових науковців. Актуальність і популярність таких досліджень підтверджено великою кількістю і високою цитованістю публікацій у наукометричній базі даних Scopus. А незначна кількість статей українських вчених є ознакою необхідної популяризації і розвитку цього наукового напрямку в українських наукових центрах.

Постановка завдань. В роботі поставлено мету – виконати аналіз досліджень, які стосуються сучасних технологій в автомобільному транспорті, зокрема з використанням напівпровідникових матеріалів, зробити спробу визначити особливості реалізації даної тематики у світі для пошуку шляхів ефективного розвитку цього необхідного напрямку в Україні.

Викладення основного матеріалу. Більше половини з усіх публікацій припадає на країни у яких на високому рівні розвинена автомобільна промисловість і, які є однозначними лідерами по впровадженню інноваційних технологій в автомобільні вузли та системи. Серед передових країн (рис. 2): США, Китай, Індія, Великобританія тощо. Тоді як внесок українських науковців становить усього 30 публікацій.

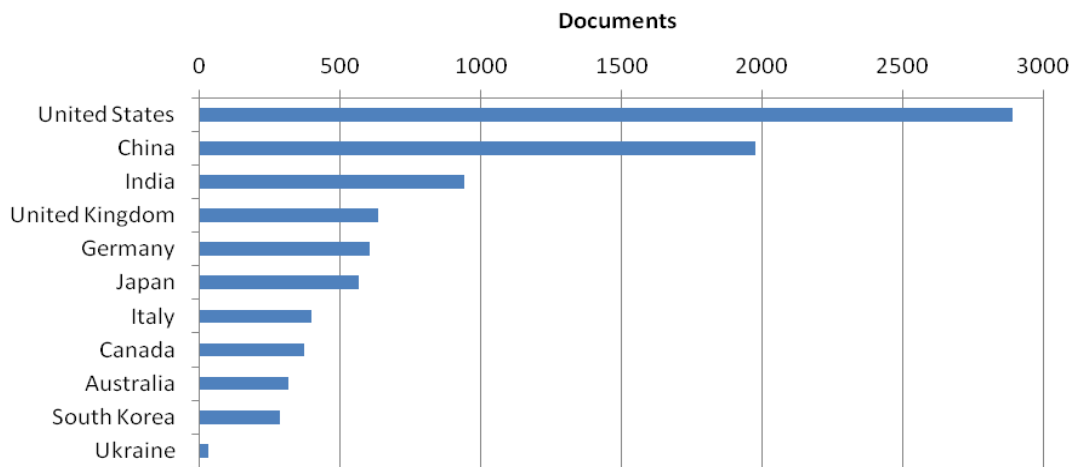


Рис. 2. Діаграма країн із найбільшою кількістю публікацій та України

Велика кількість публікацій фахівців передових країн зумовлена наявними високим науковим потенціалом і сучасною матеріально-технічною базою, які зосереджені у відомих науково-виробничих центрах (табл. 1, стовпець 1).

Табл. 1.

Передові організації світових досліджень

Науково-виробничі центри	Організації, що фінансують дослідження
<i>Tsinghua University, China</i>	<i>National Natural Science Foundation of China</i>
<i>General Motors, US</i>	<i>China</i>
<i>Beijing Institute of Technology, China</i>	<i>National Science Foundation</i>
<i>Ford Motor Company, US</i>	<i>National Key Research and Development Program of China</i>
<i>Jilin University, China</i>	<i>Horizon 2020 Framework Programme</i>
<i>Tongji University, China</i>	<i>European Commission</i>
<i>Chinese Academy of Sciences, China</i>	<i>U.S. Department of Energy</i>
<i>Toyota Motor Corporation, Japan</i>	<i>Fundamental Research Funds for the Central Universities</i>
<i>Ministry of Education of the People's Republic of China, China</i>	<i>Engineering and Physical Sciences Research Council</i>
<i>Massachusetts Institute of Technology, US</i>	<i>National Research Foundation of Korea</i>
	<i>Seventh Framework Programme</i>

Необхідним фактором для проведення досліджень є їх фінансова підтримка. Основними світовими організаціями, що фінансують дослідження в даній галузі – здебільшого організації з Китаю, США і країн ЄС (табл. 1, стовпець 2): *National Natural Science Foundation of China, National Science Foundation, Horizon 2020 Framework Programme, U.S. Department of Energy* тощо. Тому для успішної реалізації досліджень українським науковцям слід шукати шляхи для їх фінансової

підтримки саме серед цих потужних організацій. Як один із варіантів для українських вчених – виконання своїх досліджень в закордонних центрах, які вже мають таку підтримку.

У [2], яка цитувалася 3 113, показано, що батареї, які отримують високу густину енергії за рахунок зберігання заряду в об'ємі матеріалу, також можуть досягати надвисокої швидкості розряду, порівнянної з показниками суперконденсаторів. Автори реалізували це в LiFePO_4 , матеріалі з високою об'ємною рухливістю літію, шляхом створення швидкої іонопровідної поверхневої фази через контрольовану відхилення від стехіометрії. Можливе досягнення швидкості, еквівалентної повному розряду акумулятора за 10-20 с.

Короткий огляд поточних тенденцій і майбутніх стратегій транспортних засобів, а також функції силових електронних підсистем розглянуто в [3] (1 145 цитувань). Також наведено вимоги до компонентів силової електроніки та електроприводів для успішного розвитку таких автомобілів.

У широкомасштабній книзі [4] (1 008 цитувань) автори спираються на свій значний досвід, щоб представити як вступ до матеріалів, пристроїв і застосувань SiC, так і детальну довідку для вчених та інженерів, які працюють у цій швидкозмінній галузі. Основи технології карбіду кремнію охоплюють основні властивості матеріалів SiC, технологію обробки, теорію та аналіз практичних пристроїв, а також огляд найважливіших застосувань систем.

У документі [5] (980 цитувань) викладено ключові характеристики автодорожньої автоматизованої системи IVHS (Intelligent Vehicle/Highway System), показано, як покращуються основні рішення водія, запропоновано базову архітектуру системи керування IVHS та запропоновано дизайн деяких підсистем керування. Автор також підсумовує деякі експериментальні роботи та сподівається, що стаття стимулюватиме інтерес до IVHS серед інженерів з управління.

Саме поява і розвиток напівпровідникового матеріалознавства призвело до суттєвого прогресу та інновацій у електронних системах автомобільного транспорту [6]. Починаючи з 1959 р. розпочато широке впровадження наукових результатів в області напівпровідникової електроніки і їх використання стрімко зростає щороку. Найбільш актуальні і вагомні результати цих доробок відображено в понад як 1 200 працях (1959-2024 рр.) у найцитованіших роботах наукометричної бази даних Scopus.

У такому розвиненому бізнесі, як ринок ламп, нові функції ламп, такі як зменшення споживання ртуті, можуть призвести до конкурентної переваги і нових програм досліджень люмінофору. Нові багатообіцяючі розробки, такі як електролюмінесцентні повноколірні дисплеї або синій (лазерний) діод, викликали потреби та численні дослідницькі зусилля в лабораторіях по всьому світу. Пряме перетворення електроенергії на світло кидає виклик поточним концепціям і може врешті змінити спосіб освітлення приміщень, фар автомобілів чи світлофорів, а також спосіб відображення відеоінформації. Глибоке розуміння взаємодії світла та матерії разом із передовою хімією матеріалів є ключем до покращених і нових продуктів освітлення та дисплеїв [7] (1 174 цитувань).

Розвиток методів обробки сигналів разом із прогресом у технології напівпровідників міліметрового діапазону (mm-wave) відіграє ключову роль в автомобільних радарних системах. Розроблено різні методи обробки сигналів, щоб забезпечити кращу роздільну здатність і продуктивність оцінки в усіх параметрах вимірювання: дальності, кутах азимута місця та швидкості цілей, що оточують транспортні засоби. У статті [8] (597 цитувань) узагальнено різні аспекти техніки обробки сигналів автомобільних радарів, включаючи дизайн сигналу, можливі архітектури радарів, алгоритми оцінки, компроміс між складністю і роздільною здатністю реалізації та адаптивну обробку для складних середовищ, а також унікальні проблеми, пов'язані з автомобільними радарними, наприклад виявлення пішоходів.

Окрім графену все більше уваги дослідників зараз звертається до «інших 2D-матеріалів», таких як MoS_2 , і NbSe_2 . Більшість досліджень цих матеріалів зосереджено на їх трибологічному застосуванні: MoS_2 найбільш відомий сьогодні як високоефективне сухе мастило для застосувань у надвисокому вакуумі та в автомобільних двигунах. У звіті [9] (390 цитувань) авторами описано останні досягнення в галузі одношарових пристроїв на основі MoS_2 і пов'язаних із ним напівпровідників TMD (Transition Metal Dichalcogenide), які можуть мати електричні властивості на тому ж рівні, що й інші, більш відомі напівпровідникові матеріали. Це дозволило швидко просунути в цій галузі та супроводжувалося демонстраціями основних цифрових схем і транзисторів, що працюють у технологічно релевантному гігагерцевому діапазоні частот, показуючи, що рухливість матеріалів MoS_2 і TMD є достатньо високою, щоб забезпечити роботу

пристрою на таких високих частотах. Усі результати [9] показують, що MoS₂ і TMD є перспективними матеріалами для електронних та оптоелектронних застосувань.

Напівгетслери були б важливими термоелектричними матеріалами через їх високу температурну стабільність і велику кількість, якби їхню безрозмірну термоелектричну добротність (ZT) можна було зробити досить високою. За допомогою нанокompозитного підходу з використанням кульового млину та гарячого пресування авторами [10] (357 цитувань) досягнуто піку ZT 0,8 при 700 °С, що приблизно на 60 % вище, ніж найкраще зареєстроване значення 0,5, і може бути достатньо для розгляду при рекуператії відпрацьованого тепла у вихлопних системах автомобіля. Поліпшення відбувається за рахунок одночасного збільшення коефіцієнта Зеєбека і значного зниження теплопровідності завдяки наноструктурам. Подальше покращення ZT очікується, коли середні розміри зерен будуть меншими за 100 нм.

Для вирішення проблем безпеки в системах автономного водіння нещодавно розроблено набір методів тестування для автоматичної генерації штучних сцен водіння, щоб збагатити набір тестів, наприклад, генерувати нові вхідні зображення, перетворені з вихідних. Однак цих методів недостатньо через два обмеження: по-перше, багатьом таким синтетичним зображенням часто бракує різноманітності сцен водіння, і, отже, це ставить під загрозу результативність і надійність. По-друге, для систем, заснованих на машинному навчанні, невідповідність між навчанням і областю застосування може різко погіршити точність системи, так що необхідно перевіряти вхідні дані для підвищення надійності системи. Авторами [11] (338 цитувань) впроваджено DeepRoad, щоб протестувати три добре відомі системи автономного водіння на основі DNN (Deep Neural Networks) у змаганні з безпілотними автомобілями Udacity. Експериментальні результати демонструють, що DeepRoad може виявляти тисячі неузгоджених дій цих систем і ефективно перевіряти вхідні зображення, щоб також потенційно підвищити надійність системи.

Найвагоміші результати досліджень світових науковців опубліковано у авторитетних виданнях (табл. 2). Найбільшу кількість опубліковано у журналах (табл. 2, стовпець 1): *SAE Technical Papers*, *Environmental Science and Technology Letters*, *Applied Mechanics and Materials*, *Transportation Research Record* тощо. Найбільш цитовані ж статті опубліковані у топових Q1 (з високим SJR) журналах (табл. 2, стовпець 2): *Nature*, *Angewandte Chemie - International Edition*, *Accounts of Chemical Research* тощо. Окрім публікацій виданих у журналах, велика їх кількість опублікована у матеріалах конференцій, таких як: *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *IEEE Signal Processing Magazine*, *ASE 2018 : Proceedings of the 33rd ACM/IEEE International Conference on Automated Software Engineering*, що вказує на важливість участі науковців у таких заходах, зокрема представлення на них своїх наукових результатів.

Табл. 2.

Характеристика джерела публікацій світових досліджень	
Найпоширеніші, країна (SJR)	Найцитованіші, країна (SJR)
<i>SAE Technical Papers</i> , US (0,24)	<i>Nature</i> , UK (Q1 20,96)
<i>Environmental Science and Technology Letters</i> , US (Q1 2,91)	<i>IEEE Transactions on Industrial Electronics</i> , US (Q1 3,19)
<i>Applied Mechanics and Materials</i> , Germany	<i>Angewandte Chemie - International Edition</i> , UK (Q1 5,57)
<i>Transportation Research Record</i> , US (Q2 0,62)	<i>IEEE Signal Processing Magazine</i> , US (Q1 3,94)
<i>Advanced Materials Research</i> , Germany	<i>Accounts of Chemical Research</i> , US (Q1 6,38)
<i>VDI-Berichte</i> , Germany (Q4 0,14)	<i>Nano Letters</i> , US (Q1 3,54)
<i>Accident Analysis and Prevention</i> , UK (Q1 1,96)	<i>ASE 2018 : Proceedings of the 33rd ACM/IEEE International Conference on Automated Software Engineering</i> , US
<i>Automotive Industries AI</i> , US (Q4 0,1)	
<i>Lecture Notes in Electrical Engineering</i> , Germany (Q4 0,15)	
<i>Journal of Physics: Conference Series</i> , UK (0,18)	

Важливим аспектом сучасних досліджень є формування наукових колективів із підбором і залученням фахівців з різних галузей знань. Тому цікавими і важливими є результати аналізу за галуззю знань, з якою позиціонуються публікації. Для світових публікацій пов'язаних з

технологіями в автомобільному транспорті переважаючими є галузі: «Інженерія», «Комп'ютерні науки», «Екологія», «Енергія», «Соціальні науки» (рис. 3) і майже 28 % на інші галузі.

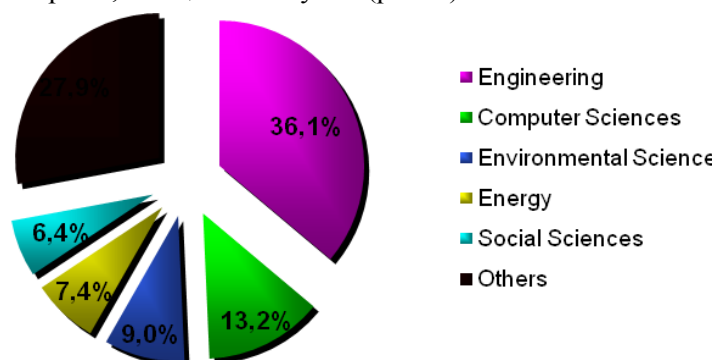


Рис. 3. Переважаючі галузі знань публікацій

Загалом, більше третини усіх публікацій в напрямку розвитку технологій в автомобільному транспорті (Technologies in motor vehicles) є результатом плідної роботи науковців усього світу у галузі інженерії. Однак, чималу зацікавленість до розв'язання проблем у цьому напрямі відображено у статтях провідними фахівцями і інших галузей, зокрема, комп'ютерних наук, екології, енергії, а також суспільних наук. Це є результатом комплексного і міжгалузевого підходу до розв'язування глобальних проблем, пов'язаних з технологіями і перспективами розвитку автомобільного транспорту.

Висновки. Проведений аналіз дає можливість зрозуміти, які сучасні виклики стоять перед науковцями і які можливі шляхи їх подолання. Однозначно, дана тематика є актуальною і потребує подальших комплексних наукових досліджень, як у фундаментальному так і прикладному аспектах. Наведена інформація і деякі надані пропозиції будуть корисним для українських фахівців для більш ефективного спрямування своєї науково-технічної діяльності і шляхів популяризації та розвитку цього напрямку, а також розв'язання дослідницьких проблем на рівні світових.

Список використаних джерел:

1. Трофімчук А., Федосов С. Передові інноваційні технології в автомобільному транспорті. *Інноваційні технології в транспорті та механічній інженерії* : III студ. наук.-техн. конф., 16 лист. 2023 р., м. Луцьк, Україна : тези доп. Луцьк : ЛНТУ, 2023. С. 73–76.
2. Kang B., Ceder G. Battery materials for ultrafast charging and discharging. *Nature*. 2009. Vol. 458, № 7235. P. 190–193.
3. Emadi A., Lee Y.J., Rajashekara K. Power electronics and motor drives in electric, hybrid electric, and plug-in hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008. Vol. 55, № 6. P. 2237–2245.
4. Kimoto T., Cooper J.A. *Fundamentals of Silicon Carbide Technology: Growth, Characterization, Devices and Applications* (book). John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2014. 538 p.
5. Varaiya P. Smart Cars on Smart Roads: Problems of Control. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1993. Vol. 38, № 2. P. 195–207.
6. Федосов В., Трофімчук А., Замуруєва О. Напівпровідникові матеріали в автомобілях. *Інноваційні технології в транспорті та механічній інженерії* : III студ. наук.-техн. конф., 16 лист. 2023 р., м. Луцьк, Україна : тези доп. Луцьк : ЛНТУ, 2023. С. 71–73.
7. Jüstel T., Nikol H., Ronda C. New developments in the field of luminescent materials for lighting and displays. *Angewandte Chemie - International Edition*. 1998. Vol. 37, № 22. P. 3084–3103.
8. Patole S.M., Torlak M., Wang D., Ali M. Automotive Radars: A review of signal processing techniques. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2017. Vol. 34, № 2. P. 22–35, 7870764.
9. Lembke D., Bertolazzi S., Kis A. Single-layer MoS₂ electronics. *Accounts of Chemical Research*. 2015. Vol. 48, № 1. P. 100–110.
10. Yan X., Joshi G., Liu W., et al. Enhanced thermoelectric figure of merit of p-type half-heuslers. *Nano Letters*. 2011. Vol. 11, № 2. P. 556–560.
11. Zhang M., Zhang Y., Zhang L., Liu C., Khurshid S. Deeproad: GaN-based metamorphic testing and input validation framework for autonomous driving systems. *33rd ACM/IEEE International Conference on Automated Software Engineering (ASE 2018)* : Proceedings. 2018. P. 132–142.

УДК 537.312

DOI 10.36910/775.24153966.2023.75.28

Yu.V. Koval, S.A. Fedosov, D.A. Zakharchuk, L.V. Yashchynskyy, L.I. Panasyuk

Lutsk National Technical University

TEMPERATURE DEPENDENCIES OF FERMI LEVEL IN SINGLE CRYSTALS OF CADMIUM ANTIMONIDE WITH DEEP ENERGY LEVELS

The article calculates and analyzes the dependence of Fermi level for temperature 77 – 300 K in CdSb single crystals with deep energy levels $E_c - 0.12$ eV, $E_c - 0.16$ eV and $E_c - 0.3$ eV which are brought about, correspondingly: in the first case – by doping with tellurium, in the second case – by γ -irradiation a dose $\Phi \sim 10^{18}$ γ -quant/cm² of doped with tellurium crystals by and in the third case – by γ -irradiation a dose $\Phi \sim 4 \cdot 10^{18}$ γ -quant/cm² of doped with indium crystals by. It is shown at temperature rise Fermi level decreases in the direction from the conduction band to the middle of forbidden band on account of the fact that charge carriers concentration increases in conduction band and decreases on the deep levels, i.e., they become exhausted.

Keywords: Fermi level, single crystal, CdSb, deep energy level, γ -irradiation, doping.

Ю.В. Коваль, С.А. Федосов, Д.А. Захарчук, Л.В. Ящинський, Л.І. Панасюк

ТЕМПЕРАТУРНІ ЗАЛЕЖНОСТІ РІВНЯ ФЕРМІ В МОНОКРИСТАЛАХ АНТИМОНІДУ КАДМІЮ З ГЛИБОКИМИ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ РІВНЯМИ

У статті розраховано і проаналізовано залежності рівня Фермі для температури 77 – 300 К в монокристалах CdSb з глибокими енергетичними рівнями $E_c - 0,12$ eV, $E_c - 0,16$ eV та $E_c - 0,3$ eV, які отримані відповідно: у першому випадку – легуванням телуром, у другому випадку – γ -опроміненням дозою $\Phi \sim 10^{18}$ γ -квант/см² легованих телуром кристалів і в третьому випадку – γ -опроміненням дозою $\Phi \sim 4 \cdot 10^{18}$ γ -квант/см² легованих індієм кристалів. Показано, що при підвищенні температури рівень Фермі знижується в напрямку від зони провідності до середини забороненої зони внаслідок того, що концентрація носіїв заряду збільшується в зоні провідності і зменшується на глибоких рівнях, тобто вони виснажуються.

Ключові слова: рівень Фермі, монокристал, CdSb, глибокий енергетичний рівень, γ -опромінення, легування.

Statement of the problem. The presence of various defects which develop in semiconductor volume in consequence of doping with certain impurities in the process of crystal growing or on account of irradiation leads to the formation of deep energy levels in the forbidden band. Determination of Fermi level position in dependence on temperature is of interest when studying the band structure of semiconductors with deep levels so long as it gives useful information concerning the distribution of charge carriers in energy bands.

Analysis of the latest research and publications. The study of CdSb band structure has been carried out in works [1-4]. In particular, authors [4] investigated the position of Fermi level for crystal of cadmium antimonide doped with cooper at low temperatures (4.2 – 50 K). The article [5] the influence of large doses of ⁶⁰Co gamma-rays on the electrical properties of cadmium antimonide crystals with different electrical conductivity has been investigated. It is revealed that radiation defects of both donor and acceptor types are introduced into the lattice of the material with gamma-irradiation. Their influence depends on the level of doping and the type of conductivity of the starting material. The effect of radiation defects in specially non-doped and tellurium-, indium-doped cadmium antimonide crystals before and after high doses of ⁶⁰Co γ -quanta irradiation was studied on the basis of measurements and analysis of temperature dependences of electrical conductivity, Hall effect in the temperature range (78 – 295) K [6]. Gamma-irradiation with high doses leads to significant changes in electrophysical properties. The mechanisms responsible for these changes are established and a theoretical explanation of these effects is given.

Goals of the article. Investigate the temperature effect on the position of the Fermi level for the range 77 – 300 K in CdSb single crystals with deep energy levels.

Presentation of the main material. We have investigated dependencies of Fermi level for temperature interval 77 – 300 K in CdSb single crystals with deep energy levels $E_c - 0.12$ eV, $E_c - 0.16$ eV and $E_c - 0.3$ eV which are brought about, correspondingly: in the first case – by doping with tellurium, in the second case – tellurium-doped crystals are γ -irradiation with a dose $\Phi \sim 10^{18}$ γ -quant/cm² and in the third case – indium-doped crystals are γ -irradiation with a dose $\Phi \sim 4 \cdot 10^{18}$ γ -quant/cm².

According to [7], the equation expressing the condition of electroneutrality and enabling the determination of Fermi level position in semiconductors with deep levels may be written down in the form:

$$n + N_a + n_d = p + N_d, \quad (1)$$

where n and p is, correspondingly, concentration of free electrons and holes; N_d is concentration of deep level centers; N_a is concentration of shallow acceptors which compensate deep level centers; n_d is concentration of unionized donors which is determined as follows:

$$n_d = \frac{N_d}{1 + g \cdot \exp\left(\frac{E_f - E_d}{kT}\right)}, \quad (2)$$

where g is spin degeneracy factor; E_f is Fermi level energy; E_d is energy of deep level activation.

Taking into account the relations $n_i^2 = np$ (n_i is charge carriers own concentration) and $n = N_c \exp\left(-\frac{E_f}{kT}\right)$ we obtain cubic equation with respect to n :

$$n^3 + n^2(N_a + N'_c) - n(N'_c(N_d - N_a) + n_i^2) - n_i^2 N'_c = 0, \quad (3)$$

where $N'_c = \frac{1}{2} N_c \exp\left(\frac{\alpha}{k}\right) \exp\left(-\frac{E_d}{kT}\right)$ and N_c is states effective density in conduction band; α is coefficient that takes into account the dependence of deep level activation energy on temperature.

The analysis of Eq. 3 shows that at low temperature, when $n \ll N_a < N_d$, its solution coincides with expression describing temperature dependency of free electrons concentration in case of partially compensated donor level:

$$n = g N_c (1/K - 1) \exp(\alpha/K) \exp(-E_d/kT), \quad (4)$$

where $K = N_a/N_d$.

Holes concentration at low temperatures is:

$$p = \frac{n_i^2}{n} \sim \exp(-E_d^*/kT), \quad (5)$$

where $E_d^* = E_g - E_d$; E_g is forbidden band with.

At high temperatures ($N_a \ll n \ll N_d$) smoothly come nearer to n_i and at further temperature rise a region of intrinsic semiconductor at which $n_i = n = p$ ensues.

It is known [7] that equilibrium concentration of electrons for non-degenerate semiconductor equals:

$$n = N_c \exp\left(\frac{E_f - E_c}{kT}\right). \quad (6)$$

Taking into account that the solution of Eq. 3 at low temperatures ($n \ll N_a < N_d$) has the form Eq. 4 we shall obtain expression for determination of Fermi level position:

$$E_f = E_d + kT \ln\left(\frac{N_d - N_a}{2N_a}\right). \quad (7)$$

Accordingly, at high temperatures:

$$E_f = E_c + kT \ln\left(\frac{n}{N_c}\right). \quad (8)$$

Temperature dependencies of Fermi level position $E_f(T)$ for CdSb single crystals with deep energy levels in forbidden band have been determined with the use of experimentally obtained dependences of charge carriers concentration on temperature (Fig. 1).

As Figure 1 indicates, the obtained dependences $E_f(T)$ may be conditionally divided into low temperatures region, impurity exhaustion region and high temperatures region. At low temperatures average energy of lattice thermal vibrations cannot afford substantial excitation of valence band electrons and their transition to conduction band. However, it should be noted that this energy is sufficient enough for excitation the charge carriers from deep energy levels and their transition to conduction band. Therefore, only impurities charge carriers are practically exited at low temperatures.

Conclusions. At temperature rise the concentration of charge carriers increases in the conduction band and decreases on the deep levels. i.e., they are being exhausted. At full exhaustion of impurity the concentration of charge carriers in the conduction band becomes practically equal to donor impurity concentration. At further rise of temperature more intensive excitation of proper carriers begins and Fermi level moves in the direction to the middle of forbidden band. It should also be noted that after irradiation

the lowering velocity of Fermi level for crystals with deeper radiation level $E_c - 0.3$ eV is greater (Figure 1, c) than that for crystals with shallower level $E_c - 0.16$ eV (Figure 1, b).

The obtained results are of practical value, in particular, for various calculations with the use of Fermi level value in dependence on temperature.

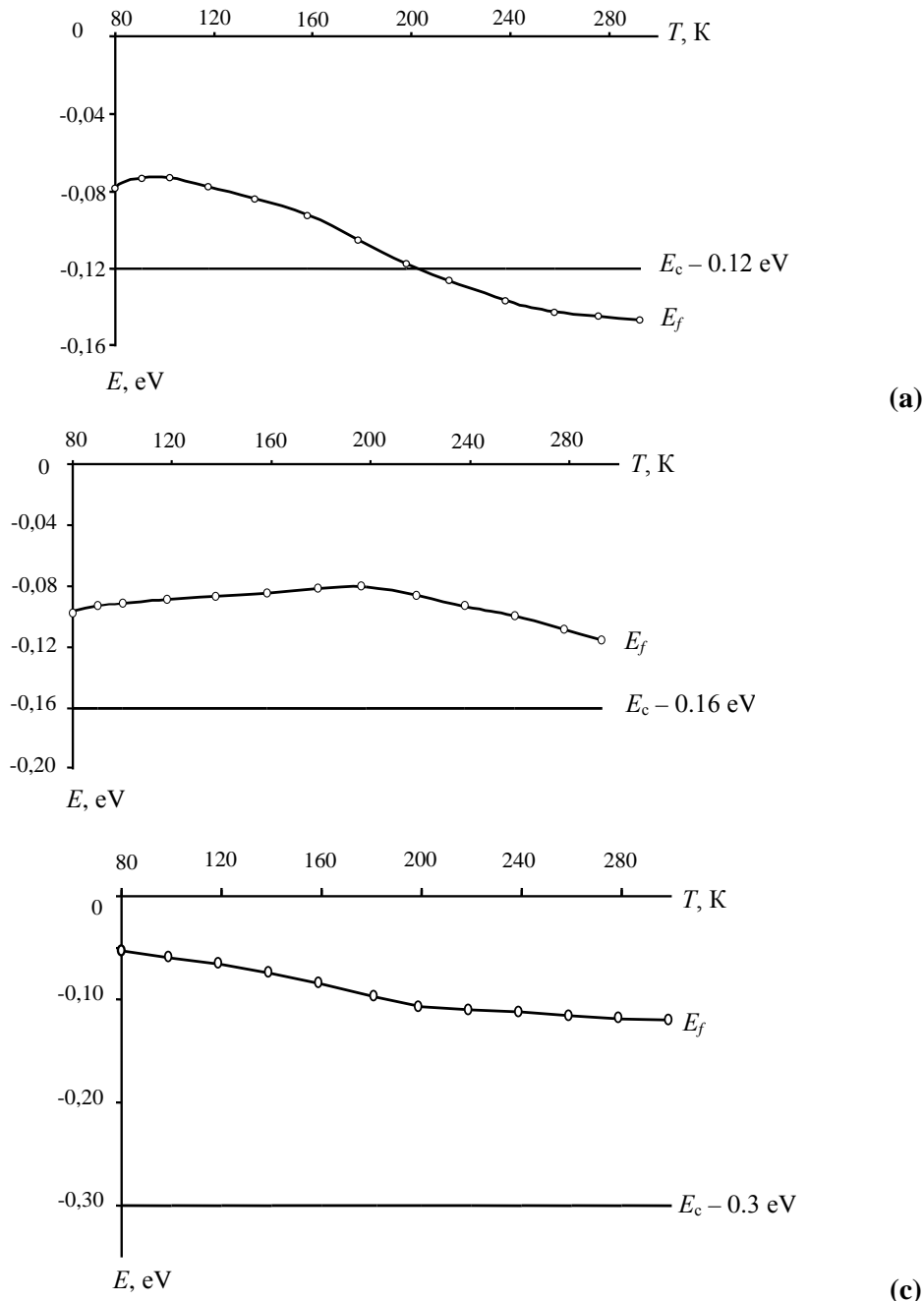


Fig. 1. Temperature dependencies of Fermi level for CdSb single crystals:

(a) doped with tellurium;

(b) doped with tellurium and γ -irradiated by a dose $\Phi \sim 10^{18}$ γ -quant/cm²;

(c) doped with indium and γ -irradiated by a dose $\Phi \sim 4 \cdot 10^{18}$ γ -quant/cm²

References:

1. Bercha D. M., Mitin O. B., Rarenko I. M., Gritsyuk B. N. Zonnaya struktura CdSb i ZnSb. *Ukr. Fiz. Zhurn.* 1983. Vol. 28. P. 1523–1527.
2. Manik O. N., Rarenko I. M. Issledovaniye zonnoy struktury CdSb. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov.* 1986. Vol. 20, №9. P. 1706–1709.

3. Bercha D. M., Slipukhina I. V., Sznajder M., Rashchanskii K. Z. Elementary Energy Bands in the Band Structure of the Narrow-band-gap Semiconductor CdSb. *Phys. Rev. B*. 2004. Vol. 70, №23. P. 235206-1–235206-8.
4. Andronik I. K., Arushanov E. K., Yemel'yanenko O. V., Nasledov D. N. Elektricheskiye svoystva legirovannykh kristallov CdSb pri nizkikh temperaturakh. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*. 1968. Vol. 2, № 9. P. 1248–1252.
5. Fedosov S. A., Zakharchuk D. A., Koval Yu. V., Yashchynskiy L. V., Urban O. A. Kinetic Effects in Cadmium Antimonide Crystals Before and After Gamma-Irradiation. *Phys. Chem. Solid State*. 2020. Vol. 21, № 2. P. 266–271.
6. Fedosov S. A., Zakharchuk D. A., Zamuruyeva O. V., Sakhnyuk V. E. Features of Changes in Electrophysical Properties of Cadmium Antimonide when Irradiated with ^{60}Co Gamma-quanta. *Mater. Today: Proc.* 2022. Vol. 62, № 9. P. 5749–5752.
7. Kittel C. Introduction to Solid State Physics, 7th Ed. New York : Wiley, 1996. 673 p.

УДК 539.3

DOI 10.36910/775.24153966.2023.75.29

С.Л. Куцик, О.А. Мікуліч

*Луцький національний технічний університет,¹ кафедра прикладної математики та механіки***ОСНОВНІ КОНЦЕПЦІЇ ТА ПІДХОДИ ДО СТВОРЕННЯ МЕТАМАТЕРІАЛІВ**

У роботі здійснено огляд основних концепцій та підходів до розробки геометрії метаматеріалів, що є основним типом штучно сконструйованих матеріалів, які мають властивості, що не можна отримати природним шляхом. При цьому внутрішня архітектура таких матеріалів дозволяє забезпечити їх унікальні та поряд з цим контрольовані ефективні властивості. Проведено аналіз впливу мікроархітектури таких матеріалів до поширення мікрохвильових процесів у метаматеріалах. Такі матеріали є надзвичайно важливими при розробці метапристроїв. Огляд також здійснено у напрямку вивчення впливу розвитку метаматеріалів для розробки різних пристроїв та девайсів (мікрохвильових датчиків, фотонних пристроїв, антен, збору енергії та надпровідних квантових інтерференційних пристроїв).

Ключові слова: метаматеріали, ефективні характеристики.

S.L. Kutsyk, O.A. Mikulich

BASIC CONCEPTS AND APPROACHES TO THE CREATION OF METAMATERIALS

The paper reviews the main concepts and approaches to the development of the geometry of metamaterials, which are the main types of artificially constructed materials that have properties that cannot be obtained naturally. At the same time, the internal architecture of such materials allows to ensure their unique and at the same time controlled effective properties. The influence of the microarchitecture of such materials on the spread of microwave processes in metamaterials is analysed. Such materials are extremely important in the development of meta-devices. The review is also carried out in the direction of studying the impact of the development of metamaterials on the development of various devices and devices (microwave sensors, photonic devices, antennas, energy harvesting and superconducting quantum interference devices).

Keywords: metamaterials, effective characteristics.

Постановка проблем. Сучасний розвиток технологій зумовлює частіше застосування у виробництві нових матеріалів задля вирішення нестандартних задач. Для цього використовують різноманітні матеріали, що мають як природні, так і штучне походження: полімери, кераміка, композити, сплави та суперсплави, і т.д. Для вирішення нестандартних задач слід використовувати чи розробляти матеріали, що володіють деякими наперед заданими властивостями. Для цього слід змінити або модифікувати їх природні властивості шляхом зміни мікроструктури матеріалів. Під час таких перетворень отримуються матеріали, що також називаються технічними.

Останнім часом технічні матеріали привернули велику увагу дослідників, оскільки такі матеріали демонструють кращі характеристики у порівнянні з класичними: великий життєвий цикл, широкий діапазон експлуатаційних температур, легка вага тощо. До таких слід також віднести і інженерні матеріали такі як, металоматричні композити, композити на полімерній основі, п'єзоелектричні матеріали, метаматеріали, тощо. Зацікавленість цими матеріалами і їх висока продуктивність відкривають широкі можливості до їх застосування в науці та інженерії.

Метою дослідження є аналіз основних концепцій та підходів до розробки метаматеріалів з урахуванням їх геометрії. Об'єктом дослідження є вивчення впливу внутрішньої архітектури таких матеріалів задля забезпечення їх унікальних контрольованих ефективних характеристик.

Огляд літературних джерел. Уже сама назва «метаматеріали», що з грецької означає «поза межами», характеризує цей новий клас інженерних матеріалів, які виявляють незвичайні властивості, яких немає в природних матеріалів. Загалом, природні матеріали такі як алмаз, скло, тощо, мають додатні значення ефективних характеристик: додатній індекс заломлення, магнітну проникність і електричну/діелектричну проникність. Тоді як нові розроблені матеріали демонструють від'ємний значення ефективних характеристик або значення, що не є можливим для природних матеріалів.

Метаматеріали також називаються лівосторонніми матеріалами або зворотньохвильовими чи матеріалами з від'ємним індексом (NIM) або подвійно від'ємним індексом (DNG). Крім того, метаматеріали мають деякі спеціальні властивості, такі як ідеальне лінзування [2], класична електромагнітно-індукована прозорість [3], здатність до маскуванню [4], висока частота магнетизму

[5], динамічна модуляція з Терагерц (ТГц) випромінювання [6], зворотний ефект Доплера та зворотний ефект Черенкова [7]. Ці унікальні властивості метаматеріалів дають можливість модифікувати та перемикаєти їхні властивості в залежності від потреб та можливостей [8].

Крім того, на основі діелектричної проникності та проникності метаматеріали поділяються на як м'яко-негативний матеріал (MNG), епсилон негативний матеріал (ENG), подвійний позитивний матеріал (DPS) і подвійний негативний матеріал (DNG) [9]. MNG та ENG називаються як одиничний негативний матеріал. Тоді як подвійно негативні і подвійний позитивні матеріали можуть бути розроблені в певному діапазоні частот.

У 1968 році фізик В. Веселаго вперше теоретично запропонував метаматеріали [10]. Він теоретично дослідив електродинаміку матеріалів з від'ємними значеннями магнітної проникності (μ) і відносної діелектричної проникності (ϵ). Крім того, в цих матеріалах йдеться про поширення електромагнітних хвиль. Тим не менш Smith D.R. та інші практично вперше представили структуру, яка демонструє від'ємне заломлення в мікрохвильовій області [9]. Також J.V. Pendry та інші [11] розробили прототип першого метаматеріалу за допомогою двох взаємопроникаючих підсистем. Зокрема, за допомогою масиву тонких металевих (мідних) дротів та кілець, вони виготовили кільцеві резонатори (SRR), які забезпечують від'ємні значення діелектричної проникності [11].

У метаматеріалах розривні кільця відіграють роль атомів у природних матеріалах і діють як електрично малі резонансні частинки, які сприяють від'ємній проникності. Тут мідний дріт створює від'ємну діелектричну проникність. На рис. 1 представлено графічне зображення метаматеріалу [32].

Ziolkowski R.W. [12] було отримано інший метаматеріал, який складається з підкладки, закріпленої емнісними смугами (CLS) і квадратними SRR. У цьому матеріалі емнісно навантажені смужки дають сильну реакцію на електричні поля та дають від'ємне значення, а SRR взаємодіє з магнітними полями та створює від'ємне значення μ .

Подальші дослідження науковців у цій галузі були спрямовані на розробку та виготовлення різних метаматеріалів. Крім того, на основі наявності SRR метаматеріали доступні в різних формах. Це означає, що метаматеріали, що складаються з SRR, доступні в одному, двох і трьох вимірах [13]. Крім того, ці метаматеріали без SRR (наприклад, ажурна структура) доступні у двох, квазідвох і трьох вимірах [14].

Таким чином, завдяки своїм унікальним властивостям і структурі, метаматеріали знаходять своє застосування в різних пристроях, таких як датчики [15], суперлінзи [16], антени [17], надпровідники [18], поглиначі [19], збирачі енергії [20] тощо.

Класифікація метаматеріалів. Змінені ефективні характеристики визначають властивості метаматеріалів. Ці характеристики залежать від властивостей вихідних матеріалів та визначають макроскопічні параметри, наприклад, діелектричної проникності ϵ та проникності μ матеріалів [21]. На основі діелектричної проникності ϵ та проникності μ метаматеріали класифікуються на наступні чотири групи, як показано на рис. 2.

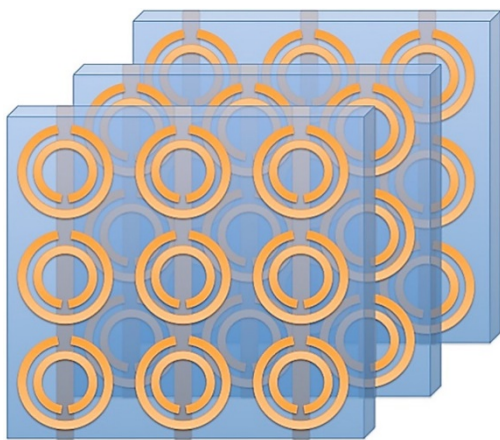


Рис. 1. Графічне зображення метаматеріалу



Рис. 2. Класифікація метаматеріалів

Подвійно позитивні (DPS) матеріали - це матеріали, які мають як діелектричну, так і проникну здатність більше нуля ($\epsilon > 0$, $\mu > 0$) називають подвійними позитивними (DPS) матеріалами [21].

Більшість поширених середовищ (наприклад, діелектриків) підпадають під це позначення.

Матеріал є епсилон негативний (ENG), якщо він має діелектричну проникність, меншу за нуль, і проникність, більшу за нуль ($\epsilon < 0$, $\mu > 0$) [21]. У певних частотних режимах багато плазм демонструють ці характеристики.

μ -негативний (MNG) матеріал має діелектричну проникність, більшу за нуль, і проникність, меншу за нуль ($\epsilon > 0$, $\mu < 0$) [21]. Деякі гіротропні матеріали у певних частотних режимах виявляють ці характеристики.

Подвійно негативний матеріал (DNG) – це матеріал, що має діелектричну проникність і проникність менше нуля ($\epsilon < 0$, $\mu < 0$) [21]. Цей клас матеріалів можна отримати тільки штучно.

Види метаматеріалів. Класифікація метаматеріалів у цій роботі проведена на основі аналізу їх застосування. Відповідно до описаного критерію, метаматеріали можна розділити на такі групи.

Електромагнітні метаматеріали. (EM) – це матеріали, які мають нові (або відмінні від класичних) електромагнітні характеристики рис. 3. EM використовується для оптичних і мікрохвильових застосувань, таких як смугові фільтри, лінзи, мікрохвильові з'єднувачі, направляючі промені та обгінники антен. Метаматеріали менше впливають на електромагнітні хвилі порівняно з довжиною хвилі електромагнітного випромінювання. Серед таких матеріалів виділяють наступні чотири групи метаматеріалів.

Одиничні негативні метаматеріали (SNG) мають або від'ємну діелектричну проникність ϵ або від'ємну проникність μ . Поєднання двох шарів SNG в один створює іншу форму метаматеріалів DNG [22]. Для проведення експериментів з відображенням хвилі були з'єднані плити з матеріалів MNG та ENG [22]. Як метаматеріали DNG, SNG змінюють свої параметри, такі як показник заломлення n , діелектрична проникність ϵ та проникність μ , зі зміною частоти через їх дисперсійний характер.

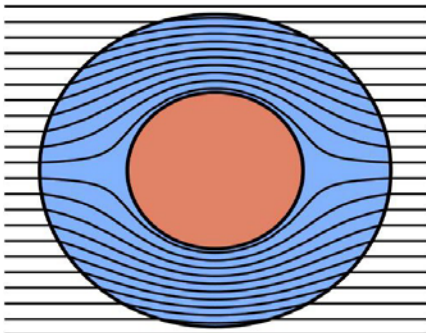


Рис. 3. Електромагнітний метаматеріал

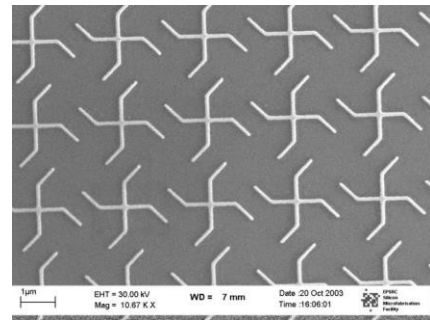


Рис. 4. Хіральный метаматеріал

Подвійні негативні метаматеріали (DNG) – це метаматеріали, які мають як діелектричну проникність, так і проникну здатність із від'ємним показником заломлення. Вони також відомі як метаматеріали з від'ємним індексом (NIM) [23]. Інші назви DNG – лівосторонні середовища, середовища з від'ємним показником заломлення та «середовища зі зворотною хвилею» [24].

Метаматеріали електромагнітної забороненої зони (EBG) контролюють поширення світла [22-24]. Це досягається або фотонними кристалами (PC), або лівосторонніми матеріалами (LHM). Обидва класи мають штучні структури, які контролюють і маніпулюють поширенням електромагнітних хвиль.

Бі-ізотропні та бі-анізотропні метаматеріали – це такий клас матеріалів, який на основі незалежних електричних і магнітних реакцій, що описуються параметрами діелектричної та магнітної проникності, можуть бути як одинарні або подвійно негативні [24]. Однак у багатьох прикладах електромагнітних метаматеріалів електричне поле викликає магнітну поляризацію, а магнітне поле індукує електричну поляризацію, тобто магнітоелектричний зв'язок. Таке середовище позначається як бі-ізотропне середовище, оскільки воно демонструє магнітоелектричний зв'язок, який є анізотропним, і також називається бі-анізотропним [24].

Хіральні метаматеріали складаються з масивів діелектричних гаммадіонів або плоского металу на підкладці на рис. 4 [25]. Коли лінійно поляризоване світло падає на масив, воно стає еліптично поляризованим під час взаємодії з гаммадіонами з тією ж швидкістю, що й сам гаммадіон.

Терагерцеві метаматеріали – це комбінація штучних матеріалів рис. 5, які взаємодіють на частотах терагерців (ТГц) [25]. Такі матеріали все ще знаходяться в стадії розробки. З від'ємними значеннями проникності ці метаматеріали можуть досягти бажаної магнітної реакції. Ці метаматеріали також називають пасивними матеріалами. Такі ефекти досягаються шляхом

виготовлення нового матеріалу, що має дещо змінні розміри для створення нової реакції. Терагерцові хвилі знаходяться безпосередньо перед початком мікрохвильового діапазону до далекого кінця інфрачервоного діапазону. Діапазон частот терагерцових метаматеріалів становить від 0,1 до 10 ТГц для досліджень або інших застосувань.

Фотонні метаматеріали – це тип електромагнітних метаматеріалів, які призначені для взаємодії з оптичними частотами, відомі як оптичні метаматеріали рис. 6 [26].

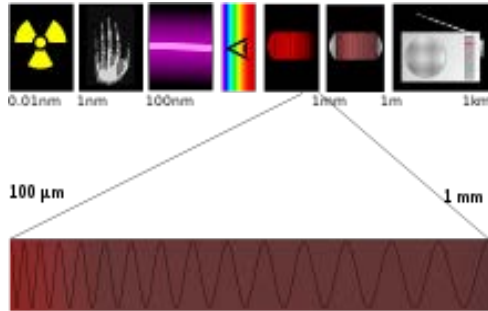


Рис. 5. Утворення хвиль терагерцевих метаматеріалів

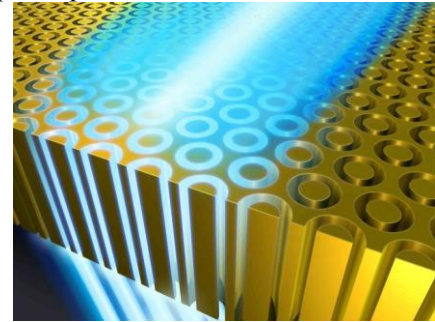


Рис. 6. Фотонні метаматеріали

Фотонні метаматеріали випромінюють джерело на оптичних довжинах хвиль. Крім того, субперіод довжини хвилі відрізняє фотонні метаматеріали від фотонної структури забороненої зони. Це пояснюється тим, що оптичні властивості виникають не через фотонні заборонені зони, а через субхвильову взаємодію зі спектром світла. Метаматеріали з можливістю нульового показника заломлення (ZIMs) і від'ємних значень показника заломлення (NIMs) є активною областю досліджень оптичних матеріалів.

Налаштовувальні метаматеріали – це матеріали, які мають здатність випадковим чином змінювати частоту показника заломлення рис. 7 [27]. Падаюча електромагнітна хвиля дає змінну реакцію цих метаматеріалів, оскільки така хвиля взаємодіє з метаматеріалами під час дистанційного керування. Структура налаштовувальних метаматеріалів змінна в реальному часі, що дає можливість реконфігурувати пристрій під час роботи [27]. Налаштування в ближньому інфрачервоному діапазоні досягається шляхом зміни діелектричної проникності нематичного рідкого кристала. Метаматеріали можна налаштувати від від'ємних значень індексу до нульового індексу або додатних значень індексу. Крім того, від'ємні значення індексу можна збільшити або зменшити.

Метаматеріали на основі частотно-селективної поверхні (FSS) є заміною метаматеріалів із фіксованою частотою зі статичною геометрією та відстанню в елементарних комірках рис. 8, які використовуються для визначення частотної характеристики даного метаматеріалу [27]. Метаматеріали на основі FSS мають можливість змінювати частоти в одному середовищі, але при фіксованій частотній характеристиці це неможливо. Вперше такий матеріал був розроблений для контролю характеристик пропускання та відбиття хвилі падаючого випромінювання [27]. FSS певної геометричної форми можуть бути складені у вигляді періодичних масивів з елементами двовимірної площини. Метаматеріали на основі FSS мають взаємозамінну термінологію High Impedance Surface (HIS) або Artificial Magnetic Conductor (AMC). HIS або AMC має штучну металеву електромагнітну структуру. Розроблені конструкції існуючих прототипів з виділенням опорних поверхневих хвильових струмів відрізняються від консервативних металевих провідників.

Нелінійні метаматеріали – це штучні матеріали, в яких існує нелінійність [27]. Це пояснюється тим, що макроскопічне електричне поле електромагнітного джерела є меншим, ніж мікроскопічне електричне поле включень [27]. Проникність і діелектрична проникність матеріалу описує реакцію на електромагнітне випромінювання. Він також може бути виготовлений з певного типу нелінійних метаматеріалів, які мають властивості змінювати потужність падаючої хвилі.

Переваги метаматеріалів. До основних переваг зазначеного класу матеріалів слід віднести:

I) покращення спрямованості: метаматеріали мають притаманну властивість, яка контролює напрямок електромагнітного випромінювання, щоб збирати вихідну енергію в невеликій кутовій області навколо нормалі до поверхні [28]. Матеріал DNG покращує спрямовані властивості антени.

II) розширення пропускну здатності: антена з метаматеріалів збільшує досягнуту пропускну здатність порівняно зі звичайною патч-антеною [29]. Це досягається використанням суперстрату метаматеріалу поверх звичайної антени або завантаженням LHM.

III) посилення випромінюваної потужності: невелика антена може збільшити потужність випромінювання за рахунок застосування метаматеріалів DNG [30]. Невелика дипольна антена, покрита метаматеріалами DNG, використовується для збільшення потужності випромінювання набагато більше порівняно зі звичайною антеною.

IV) зміна ширини променя: антени з метаматеріалів зменшують ширину променя та співвідношення бічних пелюсток [31] і таким чином підвищують спрямованість і зменшують зворотні втрати антен.

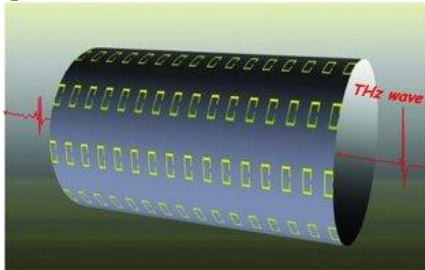


Рис. 7. Налаштовувальні метаматеріали

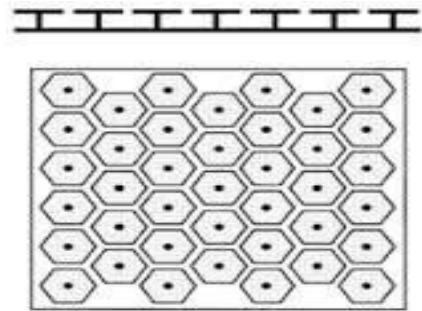


Рис. 8. Структура FSS

Висновки. Метаматеріали – це нова галузь досліджень, яка, без сумніву, стає надзвичайно актуальною сферою досліджень. Науковців з багатьох сфер приваблюють метаматеріали через їх унікальні ефективні характеристик. Застосування метаматеріалів дозволило отримати дивовижні покращень у функціях електромагнітного відгуку, які можуть запропонувати набагато ширші можливості для майбутнього проектування пристроїв, компонентів і основних властивостей метаматеріалів.

Список використаних джерел:

1. Mikulich, O., Shvabyuk, V., Sulym, H. Dynamic Stress Concentration at the Boundary of an Incision at the Plate under the Action of Weak Shock Waves. // Acta Mechanica et Automatica. — 2017. —11(3).— PP. 217-221.
2. Pendry, J.B.: Negative refraction makes a perfect lens. Phys. Rev. Lett. 2000.
3. Papasimakis, N. Fedotov, V.A., Zheludev, N.I., Prosvirnin, S.L.: Metamaterial analog of electromagnetically induced transparency. Phys. Rev. Lett. 2008.
4. Schurig, D., Mock, J.J., Justice, B.J., Cummer, S.A., Pendry, J.B., Starr, A.F., Smith, D.R.: Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies. Science 2006, 314, 977–980 p.
5. Linden, S., Enkrich, C., Dolling, G., Klein, M.W., Zhou, J., Koschny, T., Soukoulis, C.M., Burger, S., Schmidt, F., Wegener, M.: Photonic Metamaterials: Magnetism at Optical Frequencies. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2006, 12, 1097–1105 p.
6. Li, C., Wu, J., Jiang, S., Su, R., Zhang, C., Jiang, C., Zhou, G., Jin, B., Kang, L., Xu, W.: Electrical dynamic modulation of THz radiation based on superconducting metamaterials Appl. Phys. Lett. 2017.
7. Shelby, R.A., Smith, D.R., Schultz, S.: Experimental verification of a negative index of refraction. Science 2001, 292, 77–79 p.
8. Zheludev, N.I.: The road ahead for metamaterials. Science 2010, 328, 582–583 p.
9. Smith, D.R., Padilla, W.J., Vier, D.C., Nemat-Nasser, S.C., Schultz, S.: Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity. Phys. Rev. Lett. 2000.
10. Veselago, V.G.: The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of ϵ and μ . Usp. Fiz. Nauk. 1967, 92, 517–526 p.
11. Pendry, J.B., Holden, A.J., Robbins, D.J., Stewart, W.J.: Magnetism from Conductors, and Enhanced Non-linear Phenomena. IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 1999.
12. Ziolkowski, R.W.: Design, Fabrication, and Testing of Double Negative Metamaterials. IEEE Trans. Antennas Propag. 2003.
13. Shamonina, E., Solymar, L.: Magneto-inductive waves supported by metamaterial elements: components for a one-dimensional waveguide. J. Phys. D: Appl. Phys. 2004, 37, 362–367 p.
14. Kafesaki, M., Tsiapa, I., Katsarakis, N., Koschny, T., Soukoulis, C.M., Economou, E.N.: Left-handed meta-materials: The fishnet structure and its variations. Phys. Rev. B 2007.

15. Abdulkarim, Y.I., Deng, L., Altintas, O., Unal, E., Karaaslan Physica, M. Low-Dimens, E.: Metamaterial absorber sensor design by incorporating swastika shaped resonator to determination of the liquid chemicals depending on electrical characteristics. Syst. Nanostruct. 2019.
16. Fang, N., Zhang, X.: Rapid growth of evanescent wave by a silver superlens. Appl. Phys. Lett. 2003, 82, 161–163 p.
17. Zhu, J., Eleftheriades, G.V.: Dual-band metamaterial-inspired small monopole antenna for WiFi applications. Electron. Lett. 2009.
18. Aydin, K., Bulu, I., Ozbay, E.: Subwavelength resolution with a negative-index metamaterial superlens. Appl. Phys. Lett. 2007.
19. Tao, Hu, Nathan I. Landy, Christopher M. Bingham, Xin Zhang, Richard D. Averitt, and Willie J. Padilla.: A metamaterial absorber for the terahertz regime: design, fabrication and characterization. Optics express 2008.
20. Bagmanci, M., Karaaslan, M., Unal, E., Özaktürk, M., Akgol, O., Karadag, F., Bhadauria, A., Bakir, M.: Wide band fractal-based perfect energy absorber and power harvester. Int. J. RF Microw. Comput. Aided Eng. 2019.
21. D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz.: Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. Phys. Rev. Lett. 2000.
22. S. Zhang, W. Fan, N. Panoiu, K. Malloy, R. Osgood, and S. Brueck.: Experimental demonstration of near-infrared negative-index metamaterials. Phys. Rev. Lett., Sep. 2005.
23. E. Nader and R. W. Ziolkowski.: A positive future for double-negative metamaterials, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2005, vol. 53, pp. 1535-1556.
24. R.W. Ziolkowski and A. Kipple.: Causality and double-negative metamaterials. Phys. Rev. E, Aug. 2003.
25. Jaggard, D. L., Mickelson, A. R., Papas, C. H.: On electromagnetic waves in chiral media. Applied Physics 18 (2): 211. Bibcode1979.
26. Rüdiger Paschotta (2008-18): Photonic Metamaterials Encyclopedia of Laser Physics and Technology I & II Wiley-VCH Verlag. p. 1. Retrieved 2009.
27. Y. S. Kivshar, Nonlinear and Tunable Metamaterials, in: Metamaterials: Fundamentals and Applications II, edited by M. A. Noginov, N. I. Zheludev, A. D. Boardman, and N. Engheta Proc. SPIE 7392, 739217 (2009).
28. H. Zhou et al.: A novel high-directivity microstrip patch antenna based on zero-index metamaterial. IEEE Antennas and Wireless Propagat. Lett. 2009, vol. 8, no. 6, pp. 538–541.
29. Jui Han Lu.: Bandwidth Enhancement Design of Single layer Slotted Circular Microstrip Antennas. IEEE Transactions on Antenna and propagation. May 2003, vol.51, pp 1126-1129 No.5.
30. R.W. Ziolkowski and A. Kipple.: Application of double negative metamaterials to increase the power radiated by electrically small antennas. IEEE Trans. Antennas Propagation, Oct. 2003, vol.51, pp.2626–2640.
31. Enoch S.et.: A metamaterial for directive emission. Phys Rev. Letters 2002.
32. Manufacturing Disruption, Available online: <https://manufacturingdisruption.com/2014/12/31/metamaterials-ultimate-composites/> (accessed on 4 May 2021)

Рецензент: Делявський Михайло Володимирович, доктор технічних наук, професор

УДК 633.522

DOI 10.36910/775.24153966.2023.75.30

**В.О. Шейченко¹, С.П. Коропченко², І.А. Дудніков¹, В.В. Шевчук³,
М.М. Толстушко⁴, Ю.Б. Скоряк¹, Д.В. Шейченко¹**

*Полтавський державний аграрний університет¹
Інститут луб'яних культур НААН України²
Уманський національний університет садівництва³
Луцький національний технічний університет⁴*

ОСНОВНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ ЗБИРАННЯ КОНОПЕЛЬ

Багаторічними дослідженнями та спостереженнями доведено перспективність застосування технологій збирання промислових конопель двобічного використання обґрунтованим комплексом машин в процесах як одержання насіння, так і сировини для виробництва волокна. Запропоновані нові технології збирання промислових конопель, поряд із добре відомими класичними, уможливають одержувати як насіння, так і сировину у вигляді соломи для виробництва довгого або однотипного лубу, тресту для виробництва довгого або однотипного волокна.

Ключові слова: технічні коноплі, технології збирання, збирання насіннєвої частини, зернозбиральний комбайн, збирання стебел, рулон, волокно.

**V. Sheichenko, S. Koropchenko, I. Dudnikov, V. Shevchuk,
M. Tolstushko, Y. Skoriak, D. Sheichenko**

MAIN DIRECTIONS OF DEVELOPMENT OF HEMP HARVESTING TECHNOLOGIES

Many years of research and observation have proved the prospects of applying industrial hemp harvesting technologies for dual-use by a reasonable set of machines in the processes of both obtaining seeds and raw materials for fibre production. It has been established that the implementation of the developed technology for harvesting industrial hemp, based on the use of general-purpose agricultural machinery, in comparison with classical harvesting technologies, reduces labour costs per 1 ha by 87.5%, production costs by 13.5%, while increasing the level of profitability by 32%. The proposed new technologies for harvesting industrial hemp, along with the well-known classical ones, make it possible to obtain both seeds and raw materials in the form of straw for the production of long or uniform bast, and trust for the production of long or uniform fibre.

Keywords: industrial hemp, harvesting technologies, harvesting of the seed part, combine harvester, harvesting of stems, bale, fibre.

Постановка проблеми. Розвиток сучасних технологій первинної та вторинної переробки усіх складових рослини промислових конопель став основним стимулюючим чинником суттєвого розширення напрямків їх використання [1]. За таких умов подальше динамічне збільшення обсягів виробництва конопляної продукції широкого спектру використання потребує відповідних техніко-технологічних рішень, направлених на підвищення якості сировини [2]. Ця сировина повинна володіти широким спектром споживчих властивостей та відповідним діапазоном їх кількісних і якісних характеристик. Такі обставини обумовлюють пошук більш системних рішень щодо обґрунтування відповідних енергоощадних технологій збирання, первинної переробки та технічних засобів для їх здійснення [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо декілька основних базових технологій збирання, якими враховано особливості наступних напрямків використання складових рослини конопель в тому числі і технологій перероблення [1-5].

В основу так званих класичних технологій, пік поширення яких співпав із кінцем минулого століття, покладено принцип отримання максимальної кількості довгого волокна, як кінцевого продукту. Відмічені технології в основному спрямовували на збирання зеленцю та посівів двобічного використання (рис. 1).

Паралельність стебел на всіх етапах збирання та перероблення культури є визначальною умовою отримання довгого волокна.

Технологічні рішення одержання сировини на довге волокно базуються в основному комплексі спеціальної коноплезбиральної техніки, що включає: жатку ЖК-1,9 (скошування стебел у розстил, або їх в'язання у снопи), обертач ОЛК-1; коноплепідбирач ПКВ-1 (в'язання снопів із стрічки), молотарку МЛК-4,5, коноплекомбайн ККУ-1,9, тюковочний пристрій ТК-1, прес підбирач ПРП-1,9 модернізований внаслідок збільшення пресувальної камери,

пристрій ТК-1 для навантаження тюків, пристосування ППУ-0,5 для навантаження рулонів. Зазначений комплекс машин було розроблено Інститутом луб'яних культур в останні десятиріччя минулого століття [1, 2, 6, 7].



Рис. 1. Схематичне зображення сутності класичних технологій збирання конопель

До недоліків використання відміченого комплексу коноплезбиральної техніки відносять низьку продуктивність основних машин, яка коливається в межах 5-7 га, велику трудоемність технологічних процесів, що обумовлює залучення значної кількості людської праці (рис. 2), складність конструкцій, вузько спеціалізовану орієнтацію техніки, сезонність її використання, що призводить до суттєвого погіршення показників техніко-технологічної ефективності виробництва коноплепродукції.

За класичними технологіями збирання одержують насіння і тресту, перероблення якої направлено на отримання довгого волокна.

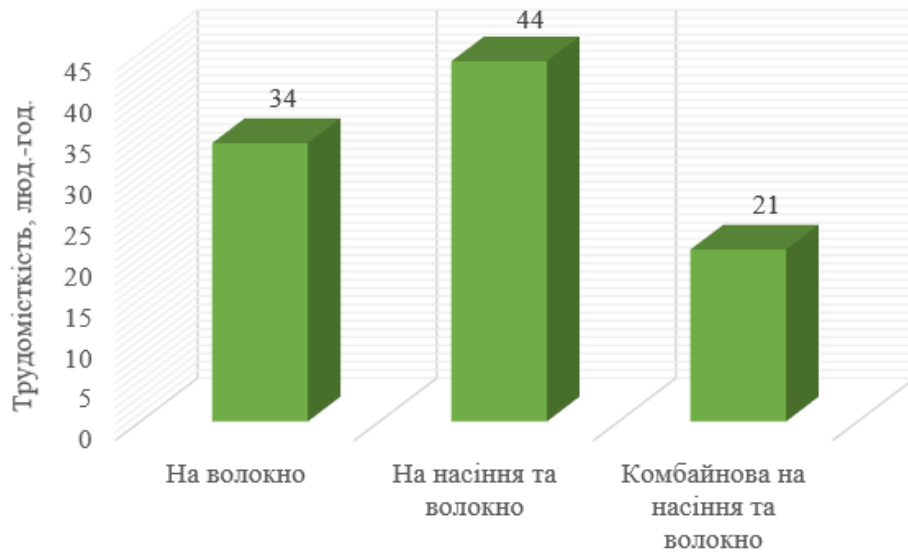


Рис. 2. Витрати праці затрачені в процесі збирання конопель різними технологіями на 1 год робочого часу

Постановка завдань. Метою досліджень є підвищення ефективності виробництва коноплепродукції, завдяки удосконаленню методів одержання конопляної сировини за параметрами, визначеними переробною галуззю.

Викладення основного матеріалу. Промислові коноплі – цінна технічна культура, джерело натуральної сировини. Завдяки своїм високим споживчим властивостям коноплі широко використовується у харчовій, будівельній, автомобільній, біоенергетичній, текстильній, целюлозно-паперовій та інших галузях виробництва (рис. 3).

Підвищений інтерес та зростаючий попит на продукцію з складових рослин конопель зумовлений революційними досягненнями селекціонерів, зусиллями яких створено новітні сорти різних напрямів використання культури. До найбільш поширених і привабливих віднесено одномому безнаркотичну форму промислових конопель, створену селекціонерами ІЛК НААН України. Розширення сортових властивостей конопель спонукало відповідні новації у технологіях збирання та перероблення всіх складових рослин, що в сукупності забезпечило необхідні умови сталого розвитку галузі коноплевиробництва.

Сучасні сорти промислових конопель української селекції поєднують високу продуктивність, низький вміст/повна відсутність ТГК, скоростиглість, високий вміст волокна тощо (табл. 1).

Табл. 1.

Характеристика сортів конопель за ознаками продуктивності

Сорт	Вегетаційний період, дів	Висота стебел, см	Урожайність, т/га		Вміст волокна, %
			соломи	трести	
Гляна	115-120	220-250	7,5-8,0	1,1-1,3	30,0
Вікторія	115-120	220-250	7,0-7,5	1,0-1,2	31,0
Глесія	115-120	230-270	8,0-8,5	1,9-2,2	30,0
Ніка	130-135	280-300	9,5-11,5	0,7-0,8	29,0

За результатами багаторічних досліджень і спостережень відмічено перспективність застосування технологій збирання промислових конопель, що базуються на використанні високопродуктивних сільськогосподарських машин загального призначення. Запропоновані технології відносять до технологій збирання посівів промислових конопель двобічного використання (рис. 4).

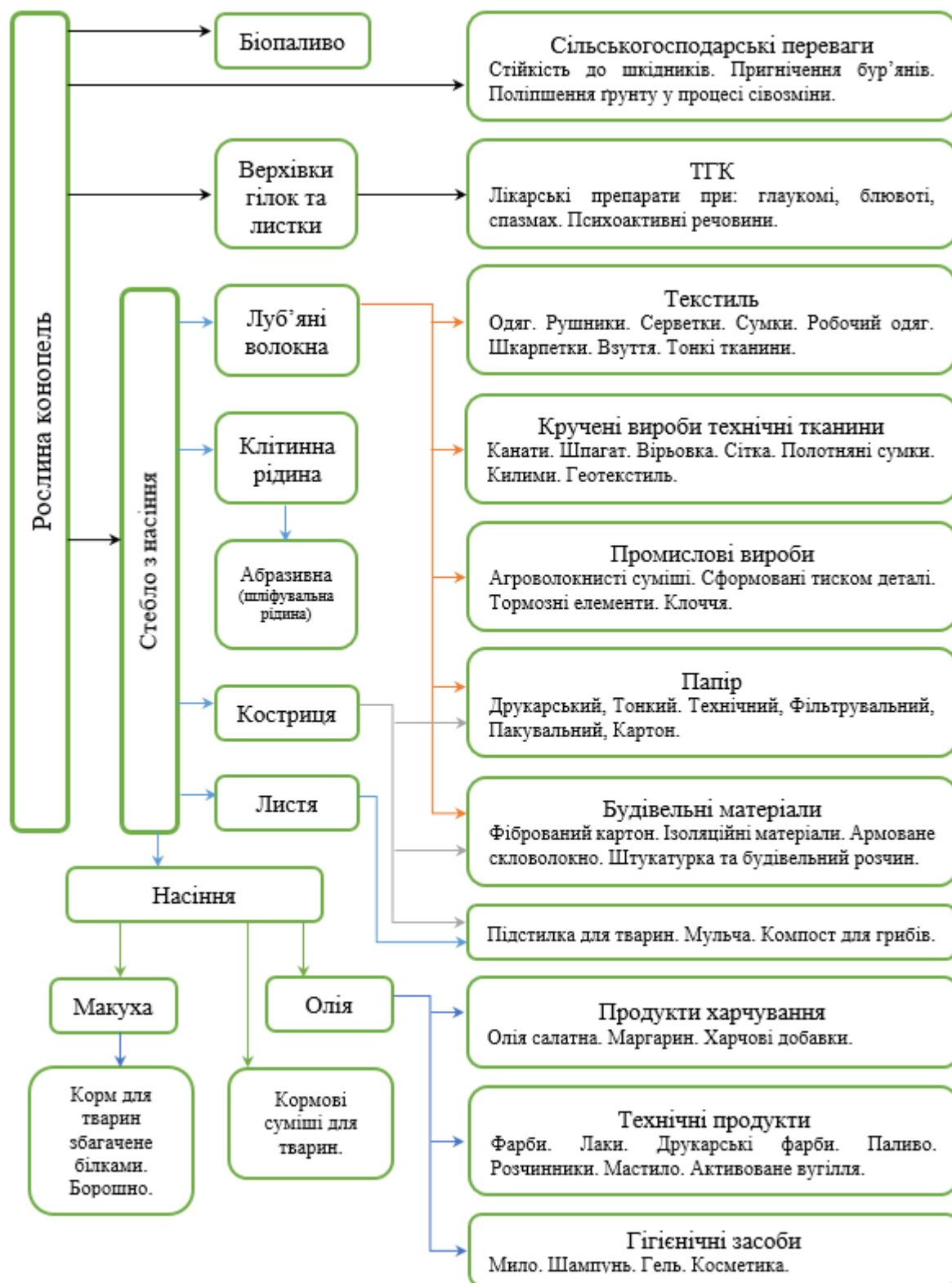


Рис. 3. Напрями використання рослини конопель

Серед чинників, що визначають стабільність і високу ефективність виробництва технічних конопель у промислово розвинутих державах, відмітимо досконалість нормативно-законодавчої бази та належний рівень розвитку техніко-технологічного забезпечення збиральних та переробних процесів.

Впровадження відмічених технологій не виключає використання класичних. Навпаки, їх гармонійне поєднання уможливило розширення меж технологічних прийомів збирання, що в сукупності обумовлює відповідне підвищення конкуренто спроможності культури.

© В.О. Шейченко, С.П. Коропченко, І.А. Дудніков, В.В. Шевчук,
М.М. Толстушко, Ю.Б. Скоряк, Д.В. Шейченко



Рис. 4. Схематичне зображення технологій збирання промислових конопель

Згідно до запропонованої технології (рис. 4) процес збирання передбачає одержання насіння зернозбиральними комбайнами. Зрізану ріжучим апаратом на регламентованій висоті підйому жатки насінневу частину стебел обмолочують молотаркою комбайна.

Виділене насіння очищають робочими органами комбайна. Із його бункера насіння перезавантажують у транспортні засоби та переміщують до пунктів первинного очищення. Очищене насіння сушать до нормованих значень, сортують та закладають на зберігання. Варто зазначити, що крім зернових жаток для збирання насінневої частини конопель застосовують і жатки обчісувального типу.

До останнього часу залишені після збирання насіння стебла, переважно, не використовували. Це суттєво погіршувало економічну привабливість культури, викликало додаткові витрати на подрібнення та глибоке зароблення у ґрунт частинок стебел конопель.

Розвиток первинних технологій перероблення уможливив розширити варіанти збирання усїєї біологічної маси, в тому числі і стеблової частини конопель. За таких умов паралельність стебел, що забезпечувалося спеціальними технічними засобами, не є умовою, яку необхідно суворо дотримуватися. Відхід від класичних, роками перевірених, апробованих способів збирання конопель, обумовлено розширенням функціональних властивостей сучасних сільськогосподарських машин загального призначення. Акценти у таких технологіях зміщено у напрямку широкого використання універсальних, більш продуктивних сільськогосподарських машин. До основних

переваг від використання таких машин віднесено зменшення обсягу ручної праці, досягнення високого рівня механізації та автоматизації технологічних операцій, що уможливило суттєво покращити техніко-економічні показники операцій збирання. Проте варто звернути увагу на особливості характеристик стеблового фону, не стандартний вигляд якого вимагав пошуку оригінальних техніко-технологічних рішень. Відзначимо, що нестандартний стан стеблостою є наслідком попереднього етапу збирання насінневої частини зернозбиральними комбайнами, або іншими способами.

За таких умов, основну частину стеблостою можливо представити у вигляді стебел висотою близько 1,5 м (табл. 2): прямо стоячих, зламаних і частково прим'ятих колесами комбайнів стебел, обмолоченої комбайнами та хаотично розкиданої волокнистої маси, що нерівномірно розташована по висоті стебел, а також безпосередньо на ґрунті.

Табл. 2.

**Аналіз стану стебел конопель після збирання
зернозбиральним комбайном насінневої частини**

Стан стебел	Кількість
У вертикальному положенні, %	63,8
Прикоткованих колесами комбайнів, %	19,7
Обмолочена волокниста маса, %	16,5
Висота розміщення обмолоченої маси, см	15-57

Означену вище стеблову масу запропоновано збирати за двома технологіями: осінньою та/або весняною.

Осіньня технологія збирання стебел конопель включає операції скошування стебел в покіс або в розстил з подальшим формуванням валків. Після природного висушування солону збирають. За умов одержання трести застосовують додаткові добре відомі і вивчені операції. Після одержання трести здійснюють підбирання та формування поковок з подальшим складуванням в місцях перероблення (табл. 3).

Погодно-кліматичні умови відносять до ключових чинників, які визначають ефективність застосованих прийомів і технічних засобів. Проте рясні дощі або їх відсутність, раннє настання холодів і випадання снігу, призводять до зміщення очікуваних термінів приготування трести, а в деяких випадках і до повної втрати сировини. Також однією із проблемних ланок у зазначеній технології є операція зрізання стебел, що вимагає застосування потужних косарок.

Весняна технологія передбачає збирання стеблової маси, що залишилася після осіннього збирання насінневої частини зернозбиральними комбайнами. На період початку збирання вся стеблова маса перетворюється у тресту.

Процес приготування трести відбувається в осінньо-зимовий період, що суттєво зменшує вплив погодно-кліматичних ризиків, як на протікання процесу одержання трести, так і якісні показники одержаного волокна. Протягом перетворення стебел у тресту внаслідок мікробіологічних процесів відбувається суттєве послаблення зв'язків комлевої частини та самого стебла. Зазначений чинник уможливорює у весняній технології збирання стеблової маси змінити витратний енергетичний процес зрізування більш економічним процесом зламування стебел. Процес збирання відбувається за вологості трести 16%. За таких умов із зламаних модернізованими котками стебел трести за допомогою граблів формують валки. Зазначені валки характеризуються хаотичним розташуванням стебел і нерівномірними показниками висоти.

З метою поліпшення характеристики якості валків і забезпечення протікання процесу формування поковок запропоновано додаткову операцію доведення характеристик валка до нормованих значень після якої формують поковки трести та складування в місцях перероблення (табл. 3).

До переваг зазначеної вище весняної технології збирання стебел конопель відносять її відносну незалежність від погодно-кліматичних чинників, що визначають показники якості трести. Проте затягування за різних обставин термінів проведення збиральних робіт створює негативні передумови проведення подальших наперед визначених технологічних операцій. За таких умов посів запланованих культур відбувається у не завжди сприятливі терміни, що призводить до відповідного зменшення ефективності їх виробництва.

Табл. 3.

Характеристика сировини, одержаної за різними технологіями збирання стебел

№	Найменування показника	Осінь		Весняна
		Треста	Солома	Треста
1	Вміст волокна (лубу), %	31	(36)	34
2	Всього костриці у волокні, %	63	58	60
3	з них: невідокремленої від волокна, %	46	52	37
4	відокремленої від волокна, %	17	6	23

Мінімізувати негативні чинники зазначених вище технологій можливо завдяки високому рівню організації збиральних робіт, наявності всього комплексу необхідних для цього машин.

Відмітимо, що запропоновані нові технології збирання промислових конопель, поряд із добре відомими класичними, уможливають одержувати як насіння, так і сировину у вигляді соломи для виробництва довгого або однотипного лубу, тресту для виробництва довгого або однотипного волокна (рис. 5).



Рис. 5. Схематичне зображення можливих сценаріїв одержання сировини із стеблової частини рослини конопель

Проведення всього комплексу технологічних операцій збирання стебел конопель передбачає використання високопродуктивної сільськогосподарської техніки:

- скошування стебел – брусовими та/або роторними косарками;
- зламування стебел, формування валка та його обертання – роторними граблями або граблями іншого типу;
- надання еластичності валку – модернізованими котками;
- формування рулонів – прес-підбирачами як рулонного так і тюкового типу;
- проведення вантажно-розвантажувальних робіт – будь-якою сільськогосподарською технікою, що призначена для даних робіт.

Узагальнюючи результати проведених досліджень відмітимо, що впровадження розробленої технології збирання промислових конопель, базисними положеннями якої є використання сільськогосподарських машин загального призначення, у порівнянні з класичними технологіями збирання, зменшує трудові витрати з розрахунку на 1 га на 87,5 %, виробничі - на 13,5 % за умов підвищення рівня рентабельності на 32%.

До переваг розробленої технології відносять і те, що на переробку надходить сировина, в якій костриця вже частково відділена від волокна і знаходиться в зламаному та вільному стані. Вироблене з даної сировини волокно характеризується низькою закростриченістю, показник якої в залежності від якості сировини коливається в межах 1-5% та відповідає другому або третьому сорту пеньки короткої (табл. 4).

Табл. 4.

Показники якості волокнистого матеріалу виробленого з досліджуваної сировини

Сировина	Розривне навантаження скрученої стрічки, даН	Масова частка, %		Сорт
		костриці	лапи	
Треста	18,7	1,0	1,6	3
Солома	26,4	2,1	4,3	2

Серед перспективних напрямків подальших наукових досліджень виділимо доцільність збільшення висоти регулювання зрізування насінневої частини жаткою (понад 1,5 м), а також використання альтернативних джерел енергії з метою створення нових та переоснащення існуючих виробничих потужностей сушіння бункерної маси підвищеної (до 50%) вологості.

Висновки. За результати багаторічних досліджень і спостережень відмічено перспективність застосування технологій збирання промислових конопель двобічного використання, що базуються на використанні запропонованих комплексів машин в процесах як одержання насіння, так і сировини для виробництва волокна, що в сукупності уможливить підвищити рівень механізації процесів збирання, об'єднати та скоротити кількість технологічних операцій, підвищити показники якості одержаної сировини. Встановлено, що впровадження розробленої технології збирання промислових конопель, базисними положеннями якої є використання сільськогосподарських машин загального призначення, у порівнянні з класичними технологіями збирання, зменшує трудові витрати з розрахунку на 1 га на 87,5 %, виробничі - на 13,5 % за умов підвищення рівня рентабельності на 32%. Запропоновані нові технології збирання промислових конопель, поряд із добре відомими класичними, уможливають одержувати як насіння, так і сировину у вигляді соломи для виробництва довгого або однотипного лубу, тресту для виробництва довгого або однотипного волокна.

Список використаних джерел

1. Довідник конопляра / [Маринченко І.О., Мохер Ю.В., Лайко І.М. та ін.]. - Глухів: ІЛК НААН, 2018. - 32 с.
2. Коноплярство: наукові здутки і перспективи : монографія / [Вировець В.Г., Лайко І.М., Мигаль М.Д. та ін.]; за ред. І.О.Маринченка, Guo Chunjing. – Суми : ФОРМІЩЕРБИНА І.В., 2018. – 158 с.
3. Sheichenko, V., Marynchenko, I., Shevchuk, V., Zadosnaia, N. Development of technology for the hemp stalks preparation (Book Chapter) Modern Development Paths of Agricultural Production: Trends and Innovations, 2019, <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57217024503>.
4. Пат.47837 Україна, МПК А 01 Д 91/00. Спосіб збирання стебел конопель після збирання насіння зернозбиральним комбайном / Голобородько П.А., Гілязетдінов Р.Н., Рябченко О.П., Лук'яненко П.В., Макаєв В.І., Примаков О.А.; заявник і патентовласник Інститут луб'яних культур НААН.-№U200909179; заявл.07.09.2009; опубл.25.02.2010, Бюл.№4.
5. Патент 150973 Спосіб збирання конопель
6. Мохер Ю. В., Жуплатова Л. М., Дудукова С.В. Промислові коноплі для цілей сталого розвитку. Луб'яні та технічні культури. Вип.8. 2020. С. 66-75. DOI: 10.48096/btc.2020.8(13).66-75.
7. Sheichenko, V., Shevchuk, V., Dudnikov, I., Koropchenko, S., Dnes, V., Skoriak, Y., Skibchuk, V., (2022). Development of harvesting technologies with belt accessories. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, (№1(115).2022). doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.244903>.

Рецензент Дідух Володимир Федорович, доктор технічних наук, професор кафедри аграрної інженерії імені професора Г.А. Хайліса Луцького національного технічного університету, Заслужений діяч науки і техніки України.

УДК 536.24+621.184.5

DOI 10.36910/775.24153966.2023.75.31

А. П. Чиркова

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МЕТОДИКА ЧИСЛОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ АЕРОДИНАМІКИ І ТЕПЛООБМІНУ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМУ ОБТІКАННІ КРУГЛОГО ЦИЛІНДРА

У роботі розглянуто зовнішню аеродинаміку та теплообмін одиночного круглого циліндра при поперечному перерізі. Проаналізовано вплив початкових та граничних умов, вплив навколишньої інфраструктури на характер та швидкість набігаючого потоку. Оскільки димова труба теплової електростанції має незначну конусність, дане дослідження можна розглядати як перше наближення до дослідження зовнішньої аеродинаміки та теплообміну одиночної вертикальної димової труби ТЕС.

Ключові слова: круглий циліндр, аеродинаміка, теплообмін, димова труба, набігаючий потік, дискретизація.

A. Chyrkova

METHOD OF NUMERICAL MODELING OF AERODYNAMICS AND HEAT EXCHANGE IN TRANSVERSE FLOW OVER A ROUND CYLINDER

The paper considers the external aerodynamics and heat exchange of a single round cylinder with a cross section. The influence of the initial and boundary conditions, the influence of the surrounding infrastructure on the nature and speed of the oncoming flow is analyzed. Since the chimney of a thermal power plant has a slight taper, this study can be considered as a first approach to the study of the external aerodynamics and heat transfer of a single vertical chimney of a TPP.

Keywords: round cylinder, aerodynamics, heat exchange, chimney, oncoming flow, discretization.

Вступ. Енергетика України в наш час має важливе значення для забезпечення реалізації багатьох технічних, виробничих та споживчих процесів. Важливу ланку в енергетиці займає теплова енергетика, що забезпечується тепловими електростанціями. За даними, наведеними в [1], на початок 2022 року теплові електростанції забезпечували 29,3% від загальної структури енергетики України. Особливо відчутним значення теплових електростанцій стало під час обстрілів країною – агресором. Теплові електростанції (ТЕС) представляють собою складний механізм в роботі якого в цілому залежить від технічного стану кожного з її елементів. Проте, нажаль більшість з ТЕС на території нашої держави знаходяться в незадовільному стані.

Димова труба є одним із важливих елементів ТЕС. За її допомогою здійснюється вивід в атмосферу продуктів горіння палива. В наш час більшість димових труб ТЕС України працюють в не розрахункових умовах без уточнення навантаження станції (повна, часткова), виду спалюваного палива, зовнішніх граничних умов, що призводить к випадку хімічного конденсату всередині труби, що сприяє її руйнуванню та викиду шкідливих речовин в атмосферу. За таких умов питання дослідження зовнішньої аеродинаміки та теплообміну димових труб теплових електростанцій має важливе значення для досягнення кращих показників та продовження задовільного стану димових труб в цілому. Проте, в цьому напрямку в наш час майже відсутні фундаментальні і практичні дослідження.

Обґрунтування числового методу. При зовнішній аеродинаміці та теплообміні димої труби спостерігається ламінарні та турбулентні типи потоку, що набігає на неї, відривом потоку позаду труби, впливом інфраструктури навколишнього та інфраструктури ТЕС. Експериментальні дослідження вимагають великих фінансових внесків та займатимуть великий проміжок часу, тому для проведення дослідження доцільно використовувати метод комп'ютерного моделювання з числовим розв'язком системи диференціальних рівнянь збереження енергії та імпульсу разом з граничними умовами. Проаналізовано декілька програмних пакетів, що дозволяють реалізувати такі фізичні процеси (SpaceClaim Engineer, Autodesk AutoCAD, SolidWorks, ANSYS) та обрано ліцензійну версію ANSYS 2020-R1, яка часто використовується для проведення такого роду досліджень [2]. Суть числового методу полягає в дискретизації області розрахунку, що буде досліджуватися та перетворенні системи диференціальних рівнянь в систему лінійних алгебраїчних рівнянь за числом вузлів обчислювальної сітки.

Мета. Метою даної статті є дослідження зовнішньої аеродинаміки та теплообміну одиночного круглого вертикального циліндра, як першого наближення до вертикальної димової труби теплової електростанції.

Геометрична модель, рівняння та граничні умови. Враховуючи невелику конусність димової труби в першому наближенні для вибору то обґрунтування параметрів сіткової моделі можливий розгляд поперечного обтікання круглого безкінечного циліндра в області великих значень чисел Рейнольдса ($Re > 1\,000\,000$), що характерні для димових труб ТЕС.

Геометрична модель області розрахунків представлена у вигляді паралелепіпеда з наступними геометричними параметрами: ширина – 20 000 мм, довжина – 120 000 мм, висота – 40 000 мм. В даній області розміщено одиночний круглий циліндр, що показано на рисунку 1. Циліндр знаходився від початку розрахункової області на відстані від лівого краю 29774 мм та з правого краю – 28525 мм. Відносно ширини досліджуваної області циліндр знаходився по середині. Циліндр було розділено на 40 секцій по висоті (1 секція – 1 м), кожна з яких визначає локальні периметри потоку та труби.

За умови великих значень чисел Рейнольдса область ламінарного потоку, за умови набігання потоку з переду циліндра, достатньо мала, тому нижче розглянемо турбулентний режим, для якого система визначальних рівнянь включає в себе наступні рівняння:

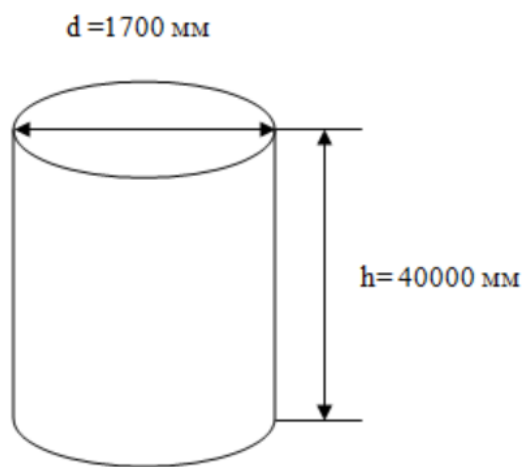


Рис. 1. Геометрична модель вертикального круглого циліндра

1. Рівняння збереження енергії:

$$\frac{\partial(\rho h_t)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho h_t)}{\partial x_i} = \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i \tau_{ij} + \lambda \frac{\partial T}{\partial x_i}), \quad (1)$$

2. Рівняння збереження імпульсу

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad (2)$$

3. Рівняння нерозривності

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0, \quad (3)$$

4. Рівняння стану

$$p = \rho RT, \quad (4)$$

При проведенні дослідження важливе значення мають правильно задані початкові умови. Тобто для стаціонарного випадку необхідно задати геометричні (описано вище), фізичні та граничні умови однозначності. Важливими також є значення швидкості та температури потоку на межах досліджуваної області. Важливе значення має навколишня інфраструктура, що знаходиться поряд з досліджуваною областю. Певні перешкоди впливатимуть на швидкість повітря, що набігає на циліндр. Швидкість набігаючого потоку описується наступним рівнянням [3]:

$$w_z = w_0 \cdot k(z), \quad (5)$$

В рівнянні (5): w_z – швидкість потоку на висоті z від поверхні Землі; w_0 – середня швидкість навігаючого потоку (вітру); $k(z)$ – коефіцієнт, що враховує зміну швидкості вітру з висотою z . В свою чергу величина $k(z)$ розраховується за формулою:

$$k(z) = k_{10} \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha, \quad (6)$$

В формулі (6) k_{10} і α залежать від типу навколишнього інфраструктури середовища [3].

Дискретизація області розрахунку, метод розв'язку алгебраїчних рівнянь. У дослідженні використано метод дискретизації розрахункової за методом контрольних об'ємів. Такий метод застосовується при розрахунках в програмному пакеті ANSYS 2020-R1. При застосуванні методу контрольних об'ємів область що визначається розбивається на тетраедри, які повинні перекривати всю досліджувану область. Контрольний об'єм представляє собою грань тетраедра, що має межі тільки з одним сусіднім контрольним об'ємом [4]. Отримані контрольні об'єми – це рівняння збереження енергії (енергії, кількості руху, маси) для кожного вузла сітки [5] На рисунку 2 показано розрахункову сітку, на яку було розбито досліджувану область після дискретизації. При використанні ANSYS 2020-R1 для розв'язування задач комп'ютерної гідродинаміки використовується пакет Fluent, що дозволяє використовувати різні методи розв'язування системи лінійних алгебраїчних рівнянь, що буде отримано після дискретизації.

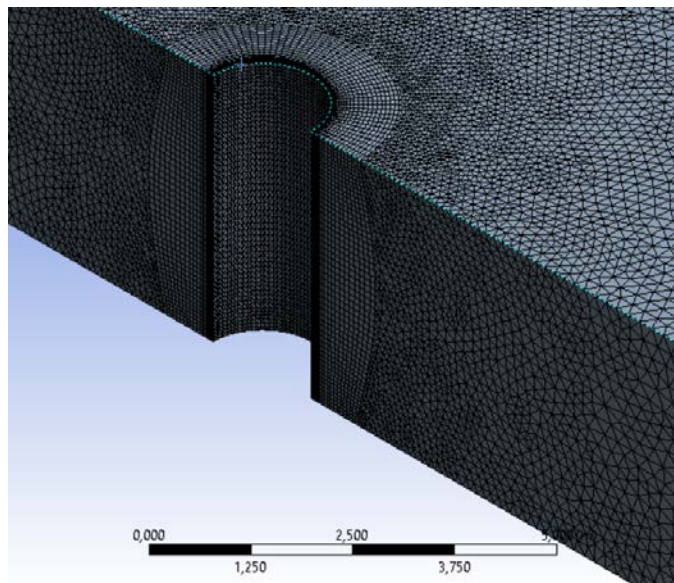


Рис. 2. Розрахункова сітка досліджуваної області.

Критерії порівняння, результати аналізу. При виборі сіткової моделі основними критеріями для вибору варіанту, який найкраще підходить для розрахунку поперечного обтікання циліндра були: кількість вузлів, параметри, що впливають на відстань від вузла до стінки циліндра, розмір елементів сітки. На поверхні труби задано граничні умови першого роду.

З проведеного варіювання параметрів [6] було помічено, що при відстані між першим вузлом та стінкою циліндра та досліджуваної області більше 8 мм починає з'являтися нестабільність отриманих результатів (більше 20%) та середнього значення коефіцієнта тепловіддачі розрахованих за формулою [3], що широко застосовується в практичних розрахунках.

$$\alpha_0 = 7.3 \cdot w_x^{0.66}, \quad (7)$$

Отже після аналізу варіантів сітки, що описано в роботі [6], було обрано варіант з наступними параметрами: відстань від першого вузла до стінки циліндра та досліджуваної області становила 8 мм, приріст (Growth rate) – 1.1.

Висновки. В роботі в якості першого наближення комп'ютерної моделі використано круглий циліндр, розташований вертикально на поверхні землі. Дослідження зовнішньої аеродинаміки та теплообміну виконані числовим методом розв'язання системи диференціальних рівнянь за допомогою програмного пакету ANSYS 2020-R1. В методиці розрахунку враховуються особливості розподілу швидкості вітру по висоті труби, обумовлені впливом інфраструктури навколишнього простору. В результаті аналізу вибрано варіант сітка з відстань від першого вузла до стінки циліндра та досліджуваної області становила 8 мм та приростом 1.1. Отримані результати було використано при розрахунку зовнішньої аеродинаміки і теплообміну конічної димової труби [6].

Список використаних джерел

1. Особливості вітчизняного виробництва електроенергії. [електронний ресурс].
Доступно: <https://www.ueex.com.ua/presscenter/news/osoblivosti-vitchiznyanogo-virobnitstva-elektroenergii/>
2. Д. О. Малахова, «Моделі та методи комп'ютерної підтримки рішень в інформаційних системах підготовки вантажних операцій на танкерах», дис....ст. док. філос.: 004.514, Державний університет "Одеська політехніка", Одеса, 2020, 179 с.
3. А. П. Манеев и В. И. Терехов, *Аэродинамика и теплообмен дымовых труб*. М.: АНО Издательский Дом «Научное обозрение», 2017, 226 с.
4. Hrvoje Jasak, "OpenFOAM: Open source CFD in research and industry", *Int. J. of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Vol. 1, Is. 2, Pages 89–94, 2009.
5. С.В. Патанкар, *Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости* / Пер. с англ. — М.: Энергоатомиздат, 1984. - 152 с.
6. А. П. Чиркова, А. А. Халатов, В. С. Олійник, О. В. Шихабутінова. «Аеродинаміка та теплообмін одиночної конічної труби при зовнішньому обтіканні» (фаховий журнал категорії Б). *Теплофізика та теплоенергетики* 43(4), с. 25-31, 2021.
<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2021.3>

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 або англійською мовою.** Стаття повинна бути набрана у текстовому редакторі не нижче MS WORD 97/03 і надрукована тільки на лазерному або струйному принтері на білих листах формату А4 (297x210 мм). Нумерацію сторінок не виконувати. Обсяг статті від 4-9 сторінок.
2. Параметри сторінки: верхнє, нижнє та ліве поле – 2 см, праве поле 2,5 см. Від краю до колонтитула верхнього – 1,25 см, нижнього – 1,25 см.
3. Шапка статті: індекс УДК, ініціали та прізвища авторів розміщується на один абзац нижче шрифтом 11 пт, назва організації – набираються з нового рядка шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюються по центру. Назва статті розміщується на один абзац нижче назви організації, набирається шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з напівжирним виділенням і вирівнюється по центру.
4. **Анотації** українською 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 (*Табл. 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.***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 line. 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:****ПБ, 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 28 грудня 2023 р.

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

ISSN: 24-15-39-66

Відділ іміджу та промоції Луцького національного технічного університету
43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75

© Луцький національний технічний університет, 2023 р.