

ISSN 2411-5363 (print)
ISSN 2519-4569 (online)

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЧЕРНІГІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**



ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

№ 4(30)

Чернігів 2022

Друкується за рішенням вченої ради Національного університету «Чернігівська політехніка» (протокол № 2 від 13.02.2023 р.). Науковий журнал «Технічні науки та технології» внесено до переліку наукових фахових видань України, затвердженого Наказом Міністерства освіти і науки України від 11.07.2019 р. № 975, відповідно до якого журналу надано категорію «Б».

Технічні науки та технології : науковий журнал / Національний університет «Чернігівська політехніка». – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2022. – № 4(30). – 214 с.

У журналі вміщено статті, присвячені теоретичним та експериментальним дослідженням у науковому напрямі «Технічні науки» за спеціальностями: прикладна механіка, матеріалознавство, машинобудування, інформаційно-комп'ютерні технології, електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, хімічні та харчові технології, будівництво та геодезія. Статті прорецензовані провідними вченими у відповідних галузях знань.

Журнал «Технічні науки та технології» буде корисним для науковців, науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та студентів технічних спеціальностей закладів вищої освіти.

УДК 62:67.05

Головний редактор:

Казимир В. В., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка».

Заступник головного редактора:

Сапон С. П., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка».

Члени редакційної колегії:Прикладна механіка, матеріалознавство та машинобудування

Бойко С. В., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Болотов Г. П., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Дмитрієв Д. О., доктор технічних наук, професор, Херсонський національний технічний університет;

Єрошенко А. М., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Кальченко В. В., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Кальченко В. І., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Марков О. Є., доктор технічних наук, професор, Донбаська державна машинобудівна академія;

Новомлинцев О. О., доктор технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Пилипенко О. І., доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник, Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки.

Повстяной О. Ю., доктор технічних наук, доцент, Луцький національний технічний університет;

Сіра Н. М., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Федориненко Д. Ю., доктор технічних наук, професор, Tohoku University, Японія;

Ющенко С. М., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка».

Інформаційно-комп'ютерні технології

Азаров О. Д., доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет;

Дорош М. С., доктор технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Єременко В. С., доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського»;

Зайцев С. В., доктор технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Казимир В. В., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Криворучко О. В., доктор технічних наук, професор, Київський національний торговельно-економічний університет;

Мелешко С. В., доктор технічних наук, доцент, Центральноукраїнський національний технічний університет;

Павленко П. М., доктор технічних наук, професор, Національний авіаційний університет;

Семенов С. Г., доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;

Щоцюра С. В., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури.

Енергетика, електротехніка та електромеханіка

Вінніков Д., доктор технічних наук, професор, Таллінський університет технологій (Естонія);

Волков І. В., доктор технічних наук, професор, Інститут електродинаміки НАН України;

Галкін І., доктор технічних наук, професор, Ризький технічний університет (Латвія);

Гусев О. О., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Денисов Ю. О., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Приступа А. Л., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Ромеро-Кадавал Е., доктор технічних наук, професор, Університет Естремадури (Іспанія);

Степенко С. А., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка».

Хімічні та харчові технології

Антонюк І. Ю., кандидат технічних наук, доцент, Державний торговельно-економічний університет;

Буяльська Н. П., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Гуменюк О. Л., кандидат хімічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Дударев І. М., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Звірко О. І., доктор технічних наук, професор, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України;

Плаван В. П., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну;

Самохвалова О. В., кандидат технічних наук, професор, Харківський державний університет харчування та торгівлі;

Сиза О. І., доктор технічних наук, професор, Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка;

Трус І. М., кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського»;

Цибуля С. Д., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Челябієва В. М., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Будівництво та геодезія

Білик С. І., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури;

Крячок С. Д., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Михайловський Д. В., доктор технічних наук, доцент, Київський національний університет будівництва і архітектури;

Паляниця Б. Б., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Львівська політехніка»;

Савенко В. І., кандидат технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури;

Терещук О. І., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Шульц Р. В., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури;

Юрченко В. В., доктор технічних наук, доцент, Київський національний університет будівництва і архітектури.



ISSN 2411-5363 (print)
ISSN 2519-4569 (online)

**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
CHERNIHIV POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY**



TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

SCIENTIFIC JOURNAL

ISSUE № 4(30)

Chernihiv 2022

UDC 62:67.05

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-4(30)

Published by the decision of the Academic Council of the Chernihiv Polytechnic National University (protocol № 2 dated 13.02.2023). Scientific journal "Technical sciences and technologies" is included into the list of scientific specialized editions of Ukraine, approved by the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine dated July 11, 2019 № 975, according to which magazine is assigned a category «B».

Technical sciences and technologies : scientific journal / Chernihiv Polytechnic National University. – Chernihiv : Chernihiv Polytechnic National University, 2022. – № 4(30). – 214 p.

This journal contains articles devoted to theoretical and experimental research in the scientific direction "Technical Sciences" by specialties: applied mechanics, materials science and machine building, information and computer technologies, electric power engineering, electrical engineering and electromechanical engineering, chemical and food technologies, construction and geodesy. The articles are reviewed by leading scientists in relevant fields of knowledge.

Journal "Technical sciences and technologies" will be useful for the scientific and technical workers, postgraduates, master students and students of higher technical educational establishment.

UDC 62:67.05

Editor in chief:

Kazymyr V.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chernihiv Polytechnic National University.

Deputy Editor in chief:

Sapon S.P., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University.

Members of the Editorial Board:

Applied mechanics, materials science and machine building

Boyko S.V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Bolotov H.P., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Dmytriiiv D.O., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kherson National Technical University;

Yeroshenko A.M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Kalchenko V.V., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Kalchenko V.I., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Markov O.Ye., Doctor of Technical Sciences, Professor, Donbaska derzhavna mashynobudivna akademiia;

Novomlynets O.O., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Pilipenko O.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, leading scientific coworker, State Research Institute of Tests and Certification of Armament and Military Technique;

Povstianoi O.Yu., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Lutsk National Technical University;

Sira N.M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Fedorynenko D.Yu. Doctor of Technical Sciences, Professor, Tohoku University, Japan;

Yushchenko S.M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University.

Information and computer technologies

Azarov O.D., Doctor of Technical Sciences, Professor, Vinnytsia National Technical University;

Dorosh M.S., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Yeremenko V.S., Doctor of Technical Sciences, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»;

Zaitsev S.V., Doctor of Technical Sciences, Chernihiv Polytechnic National University.

Kazymyr V.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Kryvoruchko O.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Trade and Economics;

Meleshko Ye.V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Central Ukrainian National Technical University;

Pavlenko P.M., Doctor of Technical Sciences, Professor, National Aviation University;

Semenov S.H., Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»;

Tsiutsiura S.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture.

Power engineering, electrical engineering and electromechanical engineering

Vinnikov D., Doctor of Science, Senior Researcher, Head of Power Electronics R&D Group, Tallinn University of Technology, Tallinn, Estonia;

Volkov I.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine;

Galkin I., Doctor of Science, Professor, Riga Technical University, Riga, Latvia;

Husev O.O., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Denysov Yu.A., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Prystupa A.L., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Romero-Cadaval E., Doctor of Science, Professor, University of Extremadura, Badajoz, Spain;

Stepenko S.A., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University.

Chemical and food technologies

Antoniuk I.Yu., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, State University of Trade and Economics;

Buialska N.P., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Gumeniuk O.L., PhD in Chemical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Dudarev I.M., Doctor of Technical Science, Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Zvirko O.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine;

Plavan V.P., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Technologies and Design;

Samokhvalova O.V., PhD in Technical Sciences, Professor, Kharkiv State University of Food Technology and Trade;

Syza O.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, Taras Shevchenko National University «Chernihiv Collegium»;

Trus I. M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»;

Tsybulia S.D., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Cheliabiieva V.M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University.

Construction and geodesy

Bilyk S.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture;

Kriachok S.D., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Mykhailovskiy D.V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture;

Paliyansia B.B., PhD in Technical Sciences, PhD in Technical Sciences, Lviv Polytechnic National University;

Savenko V.I., PhD in Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture;

Shults R.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture;

Tereshchuk O.I., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University

Yurchenko V.V., Doctor of Technical Sciences, PhD in Technical Sciences, Kyiv National University of Construction and Architecture.



ЗМІСТ

РОЗДІЛ I. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО
ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

<i>Пилипенко О., Ночвай В., Симон Р., Погорильчук В.</i> Підвищення адгезійної міцності покриттів при ультразвуковому шліфуванні.....	7
<i>Пуховський Є., Фролов В., Сапон С., Бецко Ю.</i> Оптимізація режимів різання на верстатах гнучких виробничих систем.....	14
<i>Тулунов В., Онищук С.</i> Використання енергозберігаючих технологій у важкому машинобудуванні.....	24
<i>Деркач О., Кобзар В.</i> Дослідження впливу підвищеної температури на дисипативні властивості односпрямованого вуглепластику.....	31
<i>Larkovsky S., Danylova L., Frolov V., Prykhodko V., Gladskyi M.</i> Geometric aspect of choosing models of basic technological equipment.....	40
<i>Ланковський С., Фролов В., Данилова Л., Приходько В., Гладський М.</i> Технологічність – невід’ємна складова якості виробу.....	50
<i>Макруха Т., Дубовий О.</i> Сучасний стан та перспективи розвитку наноструктурування деформованих металів і сплавів та напилених покриттів.....	58
<i>Романенко В., Блощицин М., Жегет І., Юрченко Ю.</i> Конструктивні та технологічні вдосконалення процесу лазерної різки металів.....	71
<i>Сапон С.</i> Концепція створення моделі цифрового двійника інтелектуального шпіндельного вузла.....	80

РОЗДІЛ II. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП’ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Ткаченко К., Божок А.</i> Розширена реальність та її роль у соціальних медіа.....	91
<i>Корнієнко С., Корнієнко І., Тристан А., Геращенко М., Солодчук М.</i> Аналітична модель системи випробування з пріоритетними заявками.....	98
<i>Berloh Ye., Rohovenko A., Dvynych H.</i> Research of methods of automated search of "SQL injection" type vulnerabilities in web applications.....	113
<i>Мураховська О.</i> Особливості оцінювання ефективності виявлення наземних об’єктів безпілотним літальним апаратом цивільного призначення.....	121
<i>Волокита А., Гергега Б.</i> Порівняльний аналіз алгоритмів машинного навчання для систем прогнозування серцево-судинних захворювань.....	130

РОЗДІЛ III. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Воробйова В., Васильєв Г., Трус І., Скиба М., Гнатко О.</i> Екстракція поліфенольних сполук із продуктів переробки винограду низькотемпературним евтектичним розчинником бетаїн-молочна кислота.....	140
<i>Пристинський С., Будаш Ю., Плаван В., Шуляк Р.</i> Вплив основних технологічних параметрів на стабільність процесу лиття під тиском мультикомпонентних відходів полімерних композицій.....	148
<i>Рибчук Л.</i> Оптимізація рецептурного складу цукрових паст багатофункціонального призначення шляхом математичного моделювання.....	158
<i>Коваль М., Романенко Н.</i> Принцип повторного використання стічних вод у процесах фарбування текстильних матеріалів.....	169

РОЗДІЛ IV. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

<i>Данилюк І., Романовська О.</i> Ризики в інжинірингу будівель: сутність, причини, напрямки вирішення.....	180
<i>Барбаш М.</i> ArchiCAD в інженерно-будівельній графіці будівельників та архітекторів.....	187
<i>Квашиук Ю.</i> Структура антропогенних ландшафтів міста Новгород-Сіверський.....	195
<i>Гуцул Т., Жежера І., Ткач В.</i> Особливості класифікації та методів вибору БПЛА.....	201
ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ СТАТЕЙ.....	213

CONTENT

**SECTION I. APPLIED MECHANICS, MATERIALS SCIENCE
AND MACHINE BUILDING**

Pylypenko O., Nochvai V., Symon R., Pohorilchuk V. Increasing the adhesion strength of coatings during ultrasonic grinding7

Pukhovskiy E., Frolov V., Sapon S., Betsko Iu. Optimization of cutting modes on machines of flexible manufacturing systems14

Tulupov V., Onyshchuk S. Use of energy saving technologies in heavy engineering24

Derkach Oleh¹, Kobzar V. Study of the influence of elevated temperature on the dissipative properties of unidirectional CFRP31

Lapkovsky S., Danylova L., Frolov V., Prykhodko V., Gladskyi M. Geometric aspect of choosing models of basic technological equipment40

Lapkovsky S., Frolov V., Danylova L., Prykhodko V., Gladskyi M. DFM – an inalienable component of product quality50

Makrukha T., Dubovyy O. Current status and development prospects of nanostructuring of deformed metals and alloys and sprayed coatings58

Romanenko V., Bloschchysyn M., Zheget I., Yurchenko Yu. Design and technological improvements of the process of laser cutting of metals71

Sapon S. The concept of creating of a digital twin model of an intelligent spindle unit80

SECTION II. INFORMATION AND COMPUTER TECHNOLOGIES

Tkachenko K., Bozhok A. Augmented reality and her role in social media91

Korniienko S., Korniiienko I., Trystan A., Herashchenko M., Solodchuk M. Analytical model of the testing system with priority requests98

Berloh Ye., Rohovenko A., Dyvnych H. Research of methods of automated search of "SQL injection" type vulnerabilities in web applications113

Murahovska O. Features of detection efficiency assessment of ground objects by unmanned flight apparatus by civil purpose121

Volokita A., Hereha B. Comparative analysis of machine learning algorithms for cardiovascular diseases prediction systems130

SECTION III. CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGIES

Vorobyova V., Vasyliiev G., Trus I., Sciba M., Gnatko O. Extraction of polyphenolic compounds from grape processing products by low-temperature eutectic solvent betaine-lactic ACID 140

Prystynskiy S., Budash Yu., Plavan V., Shuliak R. The influence of the main technological parameters on the stability of injection molding process of multicomponent waste polymer compositions 148

Rybchuk L. Optimization of the recipe composition of multifunctional sugar paste by mathematical modeling 158

Koval M., Romanenko N. The principle of reuse of wastewater in the processes of dyeing textile materials 169

SECTION IV. CONSTRUCTION AND GEODESY

Danyiuk I., Romanovska Ol. Risks in construction engineering: essence, causes, solution directions 180

Barbash M. Archicad in engineering and construction graphics of builders and architects 187

Kvashuk Yu. The structure of anthropogenic landscapes of Novhorod-Siverskyi 195

Hutsul T., Zhezhera I., Tkach V. Features of UAV classification and selection methods 201

**BASIC REQUIREMENTS FOR EXECUTION AND SUBMISSION
OF MANUSCRIPTS OF SCIENTIFIC ARTICLES213**

РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-4(30)-7-13

УДК 621.923

**Олександр Пилипенко¹, Володимир Ночвай²,
Роман Симон³, Володимир Погорильчук⁴**

¹доктор технічних наук, професор кафедри автомобілів та технологій їх експлуатації
Черкаський державний технологічний університет (Черкаси, Україна)

E-mail: chura.pilipenko255@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1200-0385>

²кандидат технічних наук, доцент кафедри механічної інженерії

Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)

E-mail: nochvajvm@ztu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3742-0837>

³аспірант кафедри механічної інженерії

Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)

E-mail: romansymon@ztu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4965-2603>

⁴аспірант кафедри механічної інженерії

Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)

E-mail: vovan479dd@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3559-2814>

ПІДВИЩЕННЯ АДГЕЗІЙНОЇ МІЦНОСТІ ПОКРИТТІВ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМУ ШЛІФУВАННІ

Газотермічне напилення покриттів є одним з ефективних методів відновлення та зміцнення деталей машин. Однією з причин появи макродефектів при механічній обробці у вигляді мікротріщин і припалів, а при експлуатації деталей – у вигляді відшаруванні покриттів, є недостатня адгезійна міцність та значні залишкові напруження. Взаємодія адгезійної міцності та залишкових внутрішніх напружень визначає працездатність покриття. Ефективним методом зменшення залишкових внутрішніх напружень у покриттях є дія ультразвукових коливань. Заміна статичного шліфування на вібраційне суттєво збільшує (на 15-20 %) адгезійну міцність.

Ключові слова: активація; газотермічне покриття; макродефект; мікротріщина; залишкові внутрішні напруження.
Табл.: 1. Рис.: 2. Бібл.: 8.

Актуальність теми дослідження. Існує багато різних технологічних методів відновлення спрацьованих деталей. Одним з ефективних методів відновлення та зміцнення деталей машин є газотермічне напилення. Забезпечення достатньої адгезійної міцності газотермічних покриттів та недопущення залишкових напружень, які приводять до появи макродефектів при механічній обробці у вигляді мікротріщин (МТ) і припалів, є актуальним завданням.

Постановка проблеми. Одним з ефективних методів відновлення та зміцнення деталей машин є газотермічне напилення самофлюсуючих, керамічних та інших порошкових матеріалів. Методи газотермічного напилення мають спільний принцип формування з окремих часток порошку, нагрітих і прискорених за допомогою високотемпературного струменя. Структура покриття має шаруватий вигляд і утворена окремими дискретними частками з чіткими границями розділу. Температурно-кінематична характеристика струменя зумовлює основні експлуатаційні параметри напиленого покриття (див. табл.) [1].

Таблиця – Характеристика методів газотермічного напилення

№ п/п	Тип газотермічного покриття	Температура струменя, °С	Швидкість витікання газу, м/с	Швидкість польоту часток, м/с	Адгезія МПа	Поруваність, %	Коефіцієнт використання порошку, %
1.	Газополуменеве	3000-3200	150-160	20-80	5-25	2-25	2-12
2.	Плазмодугове	5000-5500	1000-1500	50-200	10-50	2-15	0,5-0,7
3.	Детонаційно-газове	2200-5500	2000-4000	600-1000	10-160	0,5-1	1,2-2,8

Нестабільність структури та фізико-механічних властивостей покриттів, а також недостатня адгезійна міцність (у 8-10 разів менша міцності гомогенних матеріалів аналогічного хімічного складу) та значні залишкові напруження приводять до появи макродефектів при механічній обробці у вигляді мікротріщин і припалів, а при експлуатації деталей – у вигляді відшаруванні покриттів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Перед нанесенням покриття на деталь виконують активацію і формують шорсткість поверхні [2]. Для активації використовуються різні методи: дробо- або піскоструменеву обробку, напилення підшару, формування «рваної» різи. Всі вони мають різну результативність. Так, основним недоліком дробо- або піскоструменевої обробки є залишки в порах частинок металу, окислів, піску. Профіль мікрорельєфу поверхні має вершини з закругленою формою і невеликою (40-50 мкм) висотою. Максимальна адгезійна міцність покриття після піско- або дробоструменевої обробки становить 20 - 30 МПа. Напилення підшару матеріалу, наприклад молібдену, що має достатній кут змочування основного матеріалу, дозволяє не проводити попередню механічну підготовку. Хороші результати як підшар показали нікельалюмінієві сплави ПН70Ю30, ПН85Ю15 [1] та інші, що забезпечують адгезійну міцність 35-50 МПа. Для керамічних покриттів доцільно використовувати як підшар нікельтитановий сплав ПН55Т45. Суттєвим недоліком цього методу є зменшення втомної міцності покриття на 20-30 %.

Нанесення на поверхню основного матеріалу «рваної» різи дозволяє отримати високу активацію поверхні з висотою мікрорельєфу 120-250 мкм. Адгезійна міцність при такій активації поверхні досягає 100-120 МПа, але нерівності «рваної» різи підвищують радіальне биття деталі з покриттям.

Висока результативність активації поверхні основного матеріалу забезпечується, розробленим в Українській академії друкарства, принципово новим методом [3]. Сутність методу полягає у формуванні мікрорельєфу поверхні голкофрезою з накладанням вібрацій. Виступи і кратери різної висоти, що утворюються таким методом, дозволяють забезпечити високу активацію поверхні й адгезійну міцність покриття після напилення 90-120 МПа.

Аналіз методів активації поверхні деталі перед напиленням показує, що основними чинниками, які впливають на адгезійну й когезійну міцність, є:

- неповне з'єднання частинок, що формують покриття між собою та підвищений вміст оксидів у вигляді оболонок частинок, пор та домішок, що не проплавились;
- структура покриття, що обумовлюється фазовими перетвореннями з великою часткою аморфної фази, як результат взаємодії струменя транспортуючого газу з перегрітим розплавом часток;
- залишкові внутрішні напруження (ЗН) покриття.

З відомих теорій, що пояснюють адгезію плівок та покриттів [4], найбільше заслуговує увагу, щодо газотермічних покриттів, мікрореологічна теорія. Адже формування цього типу покриттів здійснюється при нанесенні розплавлених частинок, які при охолодженні перетворюються у тверду фазу з попереднім заповненням виїмок шорсткої поверхні, що збільшує фактичну площу контакту.

Взаємодія адгезійної міцності та залишкових внутрішніх напружень визначає, в кінцевому підсумку, працездатність покриття. ЗН виникають через зіступання при охолодженні напилених частинок. Коефіцієнт зіступання визначається за формулою:

$$K_3 = \frac{(V_1 - V_2)}{V_2} \cdot 100,$$

- де V_1 – об'єм розпавленої частинки в момент її контакту з поверхнею деталі;
 V_2 – об'єм частинки після охолодження.

Зіступання самофлюсуючих покриттів на основі Ni-Cr-B-Si (ПГ-CP2, ПГ-CP3, ПГ-CP4, СНГН) становить -2,1 %, а керамічних покриттів на основі Al_2O_3 , TiO_2 , Cr_2O_3 та ін. – 0,9 % [5]. Цей параметр має декілька компонентів: зіступання, що визначається термічним процесом – K_3^T ; зіступання що визначається кристалізацією та фрагментацією часток – K_3^Φ ; від’ємне зіступання, що визначається релаксаційними процесами – K_3^P . Таким чином, формула для визначення ЗН буде мати такий вигляд:

$$\sigma_{\text{вн.}} = \frac{E_y(K_3^T + K_3^\Phi - K_3^P)}{(1 - \mu)}, \quad (1)$$

де E_y – уніфікований модуль Юнга для гетерогенної системи покриття, Па;
 μ – коефіцієнт Пуассона.

Енергію, що обумовлює появу ЗН можна визначити за формулою:

$$W_{\text{вн.}} = \left(\frac{\sigma_{\text{вн.}}^2}{2E_y} \right) Sh,$$

де S – площа контакту з урахуванням виїмок поверхні, m^2 ; h – товщина покриття, м.

Прирівняння роботи адгезії і енергії, що чинить опір адгезійній взаємодії, дає можливість визначити мінімальну товщину працездатного шару покриття.

$$h_{\text{min}} = \left(\frac{4\sigma_{\text{нн}}}{\sigma_{\text{вн}}^2} \right) E_y,$$

де $\sigma_{\text{нн}}$ – напруження поверхневого натягіння покриття, Па.

Зі збільшенням ЗН спостерігається зменшення адгезійної міцності. Одним з ефективних методів зменшення ЗН у покриттях є дія УЗ-коливань [6], Застосування інших методів зменшення ЗН є неефективним або недоцільним. Так, введення в склад порошку для напилення різних пластифікаторів погіршує фізико-механічні властивості покриття, або пластифікатор взагалі вигорає у високотемпературному струмені. Використання багатошарових покриттів з метою взаємокомпенсації ЗН не завжди є економічно доцільним. Релаксація ЗН, з відповідним збільшенням K_3^P під дією УЗ-коливань, здійснюється під впливом декількох механізмів загальної схеми ультразвукового шліфування. Розглянемо деякі з них.

Робота різання одиночним абразивним зерном витрачається на пластичну деформацію зрізаної мікроструктури й на зовнішнє тертя на його гранях. УЗ-коливання впливають на обидві складові роботи різання:

- прискорюється швидкість руху дислокацій та їх утворення (ефект Франка-Ріда);
- здійснюється періодичний поворот векторів сил тертя на гранях абразивного зерна.

Періодична зміна напружень та інтенсифікація кінетики дислокацій забезпечують умови пластичної деформації при більш низьких напруженнях та зменшують абсолютне значення ЗН. Фізична природа цього явища може пояснюватись одним з таких механізмів дислокаційного поглинання: резонансним, амплітудозалежним гістерезом, дислокаційною релаксацією. Детальний аналіз впливу механізмів дислокаційного поглинання на напружено деформований стан покриттів розглядається в попередніх роботах автора.

Ультразвукове шліфування дозволяє також зменшити крихкість покриттів (особливо керамічних) через зміни їх фізико-механічних властивостей. Специфічність структури, гетерогенність і обмеженість товщини покриттів обумовлюють імовірність появи мікротріщин (МТ) на границі розділу з основним матеріалом. Поступове підростання технологічно спадкоємних МТ до критичної довжини $l_{\text{кр}}$ може здійснюватися, як на етапі механічної

обробки під дією імпульсних сил різання, так і на етапі експлуатації під дією періодичного силового навантаження. Необхідно визначити ресурс експлуатації деталі до моменту досягнення МТ параметра $l_{кр}$, при якому відбудеться її стрибкоподібне зростання зі швидкістю 0,2-0,5 швидкості звуку й подільше відшарування покриття. Згідно з концепцією енергетичного балансу А. Гріффітса можна визначити критичне напруження $\sigma_{кр}$, при якому відбудеться часткове або повне руйнування без додаткової роботи зовнішніх сил

$$\sigma_{кр} = \left[\frac{2E_y v}{\pi \cdot l_{кр} (1 - \mu^2)} \right], \quad (2)$$

де v – густина поверхневої енергії, яка визначається експериментально для різних матеріалів.

За даними авторів [7] $\sigma_{кр}$ виникають не при народженні МТ, а при досягненні нею величини $l_{кр}$. Перехід МТ з безпечного стану, коли її повільне зростання може продовжуватись 90 % терміну експлуатації деталі, до небезпечного, коли її збільшення є миттєвим, можливий під дією зовнішнього фактора (збільшення крихкості або ін.). Отже, змінюючи технологічними методами фізико-механічні властивості матеріалу можна зменшити $\sigma_{кр}$ і забезпечити відповідний допуск на $l_{кр}$, здійснивши запас втомної міцності при змінному навантаженні. Зовнішній вплив на матеріал покриття при шліфуванні призведе до порушення енергетичного балансу

$$\delta(\Gamma + W) = 0,$$

де Γ – поверхнева енергія покриття; W – потенційна енергія деформації покриття після виникнення МТ.

Метою статті є підвищення адгезійної міцності покриттів при ультразвуковому шліфуванні.

Виклад основного матеріалу. Експериментальні дослідження впливу амплітуди УЗ-коливань при постійній частоті 18 кГц на адгезійну міцність проводились на плоских зразках розміром 60×40×8 мм із сталі 45 з плазмовими покриттями оптимальною товщиною 450-500 мкм, визначеною по формулі (4). Напилення зразків здійснювалось двома типами порошоків: керамічним порошоком М28 ($Al_2O_3 + 3\% TiO_2$) і самофлюсуючим ПГ-СР4. Загальмувати накопичення потенційної енергії деформації для утворення одиниці нової поверхні і тим самим зменшити імовірність приросту довжини МТ можна методом введення в технологічну систему примусових УЗ-коливань. Періодичне, імпульсивне навантаження на покриття з частотою 18-20 кГц і амплітудою 8-15 мкм приводить до зменшення концентрації напружень в околі пор та МТ. При цьому збільшується пластичність покриття. Механізм цього явища пояснюється збільшенням швидкості руху дислокацій (ефект Блага-Лангенеккера).

Плоске шліфування здійснювалось алмазним кругом АС-20-100/80-М1-01-100 % т на таких постійних режимах різання: $V_{кр} = 24$ м/с; $S_{поп} = 1,2$ мм/дв.хід; $S_{поз.} = 5,5$ м/хв $t = 0,02$ мм. Використовувалась мастильно-охолоджувальна рідина типу ОСМ-1. УЗ-коливання здійснювались електрострикційним приводом, на якому встановлювались зразки. Адгезійна міцність визначалась методом відриву конічного штифта, а розрахунки проводились за формулою:

$$\sigma_{ад} = \frac{P_{max}}{\pi R^2 \left[1 - \pi h / R \sqrt{E_y h \pi / 6(1 - \mu^2) \cos \phi} \right]},$$

де P_{max} – максимальна сила відриву;

R – радіус штифта; ϕ – кут змочування.

Графічна залежність $\sigma_{ад} = 1(P)$ при різних значеннях амплітуди коливань представлена на рис. 2 (шліфування керамічного покриття).

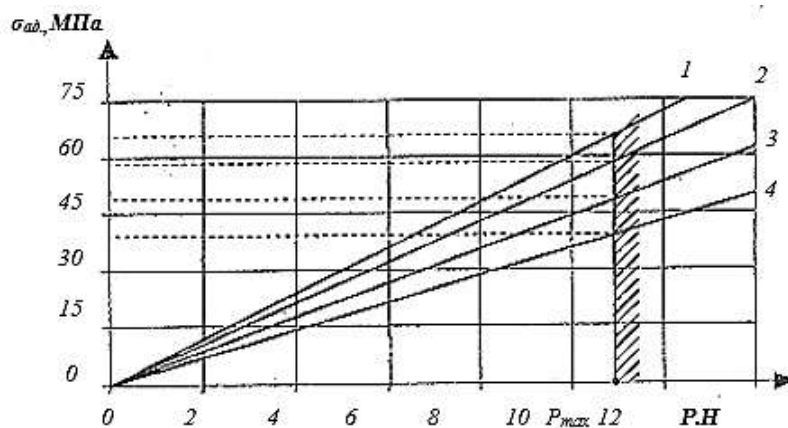


Рис. 2. Залежність адгезійної міцності від навантаження:

1 – без УЗ-коливань; 2 – амплітуда 8 мкм; 3 – амплітуда 10 мкм; 4 – амплітуда 14 мкм
Джерело: розроблено авторами.

Аналіз результатів експерименту показав, що заміна статичного шліфування на вібраційне суттєво збільшує (на 15-20 %) адгезійну міцність. Механізм цього явища обумовлюється головним чином дією двох факторів: 1 – зниженням рівня пошкоджуваності покриття; 2 – зменшення межі текучості гетерогенного матеріалу покриття і відповідно перехід матеріалу з крихкого в квазікрихкий стан. Щодо останнього фактору, то необхідно зауважити, що можливість такого переходу обумовлена зменшенням критерію крихкості [8] t_k до значень менше 1. Це пояснюється зменшенням опору зсуву під дією УЗ-коливань. Визначення t_k для крихких та квазікрихких покриттів можна здійснювати за формулою:

$$t_k = \frac{\tau_p}{\sigma_p} = 0,61 \left(4 + \frac{l^2}{d_p} \right) \left(\frac{1-2\mu}{1+2\mu} \right),$$

де τ_p – опір зсуву;

σ_p – опір відриву;

l – довжина МТ;

d – довжина діагоналі відбитка алмазної піраміди з кутом при вершині 136° на мікротвердомірі ПМТ-3.

На рис. 3 представлена залежність адгезійної міцності від критерію крихкості, яка має нелінійний характер. Під впливом УЗ-коливань обидва типи покриттів набувають властивостей пластичності з відповідним збільшенням адгезійної міцності. Причому для керамічного покриття крива має більш пологий вигляд і перетинає межу крихкості ($t_k=1$) при більшій адгезійній міцності. Це пояснюється, на наш погляд, переходом кераміки у квазікрихкий стан. Внутрішні залишкові напруження при оптимальній товщині покриттів можуть спричинити миттєве зростання МТ і відшарування при умові рівності критичному напруженню.

З умови рівності (1) і (2) можна визначити довжину критичної МТ за формулою:

$$l_{кр} = \frac{2\nu}{\pi K_3^2} \frac{(1-2\mu)^2}{(1+2\mu)}.$$

Знаючи $l_{кр}$, є можливість здійснювати діагностику покриттів, наприклад методом акустичної емісії, на предмет їхньої працездатності.

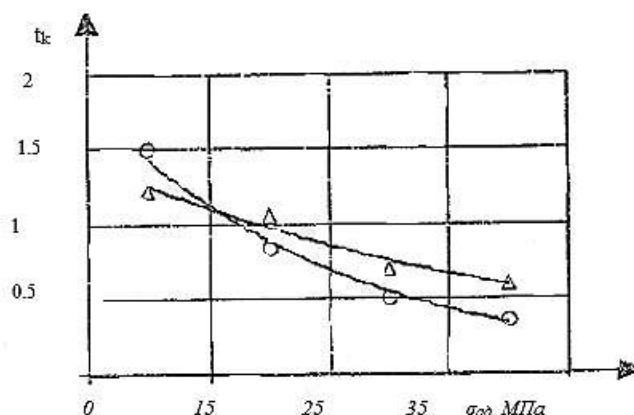


Рис. 3 Залежність адгезійної міцності від зміни крихкості:

○ - самофлюсуюче покриття ПГСП-4; △ - керамічне покриття $\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\% \text{TiO}_2$.

Джерело: розроблено авторами.

Висновки. Існує кореляція рівня активації поверхні деталі перед напиленням та адгезійної міцності. Вибір метода активації визначається залежно від температурно-кінематичної характеристики високотемпературного струменя.

Залишкові внутрішні напруження є функцією коефіцієнта зіступання і їх рівень необхідно зменшувати технологічними методами (релаксаційний відпуск, ультразвукове шліфування, оптимальна товщина покриттів).

Ультразвукове шліфування є ефективним методом не тільки забезпечення геометричної точності і шорсткості поверхні, але й переводу нестійких мікротріщин у безпечний стійкий стан із гарантованим запасом тріщиностійкості.

Експериментальне підтвердження ефективності ультразвукового шліфування газотермічних покриттів дозволяє використовувати основні теоретичні положення роботи у виробничій практиці.

Розрахунок величини $l_{кр}$ дозволяє методами діагностики покриттів прогнозувати їхню працездатність.

Список використаних джерел

1. Газотермические покрытия из порошковых материалов : справочник / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко, Б. И. Ардатовская. – К. : Наукова думка, 1987. – 544 с.
2. Ночвай В. М. Рішення задачі надійності в процесі ремонту пластин коробок преса силікатної цегли / В. М. Ночвай // Вісник ЖДТУ. Серія: технічні науки. – 2017. – № 1 (79). – С. 36–40.
3. Гриньов В. Ф. Надійність отримання газотермічних покриттів при вібраційному методі підготовки поверхонь деталей під напилення / В. Ф. Гриньов // Машинознавство. – 1998. – № 2. – С. 20–22.
4. Зимон А. Д. Адгезия пленок и покрытий / А. Д. Зимон. – М. : Химия, 1977. – 352 с.
5. Пилипенко А. М. Остаточные напряжения в плазменных покрытиях после шлифования / А. М. Пилипенко, В. В. Мироненко, Ю. Д. Юрченко // Сверхтвердые материалы. – 1993. – № 4. – С. 40–42.
6. Петров Ю. Н. Влияние ультразвуковых колебаний на внутренние напряжения хромовых покрытий / Ю. Н. Петров, В. Н. Нудага // Вестник машиностроения. – 1966. – № 8. – С. 50–52.
7. Стащук М. Г. Застосування теорії катастроф у дослідженні стійкості тріщини у пружному тілі / М. Г. Стащук, В. Г. Горопацький, В. М. Стащук // Машинознавство. – 1998. – № 3. – С. 2–7.
8. Ужик Г. В. Сопротивление отрыву и прочность материалов / Г. В. Ужик. – М. : Машиностроение, 1954. – 240 с.

References

1. Borisov, Ju.S., Harlamov, Ju.A., Sidorenko, S.L., & Ardatovskaja, B.I. (1987). *Gazotermicheskie pokrytiia iz poroshkovyh materialov [Gas-thermal coatings from powder materials]*. Naukova dumka.
2. Nochvai V.M. (2017). Rishennia zadachi nadiinosti v protsesi remontu plastyn korobok presa sylikatnoi tsehly [The solution to the problem of reliability in the process of repairing plates of silicate brick press boxes]. *Visnyk ZhDTU, Seria «tekhichni nauky» – Bulletin of ZHTU. Series: technical sciences, 1(79)*, 36–40.

3. Hrynov, V.F. (1998). Nadiinist otrymannia hazotermichnykh pokryttiv pry vibratsiinomu metodi pidhotovky poverkhon detalei pid napylenia [Reliability of obtaining gas-thermal coatings with the vibration method of preparing the surfaces of parts for spraying]. *Mashynoznavstvo – Mechanical engineering*, 2, 20-22.

4. Zimon, A.D. (1977). *Adgeziia plenok i pokrytij [Adhesion of films and coatings]*. Khimiia.

5. Pilipenko, A.M., Mironenko, V.V., Jurchenko, Ju.D. (1993). Ostatochnye napriazheniia v plazmennykh pokrytiah posle shlifovaniia [Residual stresses in plasma coatings after grinding]. *Sverhtverdye materialy – Superhard Materials*, 4, 40-42.

6. Petrov, Ju.N., Nudaga, V.N. (1966). Vliianie ultrazvukovykh kolebani na vnutrennie napriazheniia khromovykh pokrytii [Influence of ultrasonic vibrations on internal stresses of chrome coatings]. *Vestnik mashinostroeniia – Bulletin of mechanical engineering*, 8, 50-52.

7. Stashchuk, M. H., Horopatskyi, V. H., Stashchuk, V. M. (1998). Zastosuvannia teorii katastrof u doslidzhenni stiikosti trishchyny u pruzhnomu tili [The application of the theory of catastrophes in the study of the stability of a crack in an elastic body]. *Mashynoznavstvo – Machine Science*, 3, 2-7.

8. Uzhik, G.V. (1954). *Soprotivlenie otryvu i prochnost materialov [Tear resistance and strength of materials]*. Mashinostroenie.

Отримано 21.10.2022

UDC 621.923

Oleksandr Pylypenko¹, Volodymyr Nochvai², Roman Symon³, Volodymyr Pohorilchuk⁴

¹Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automobiles and Technologies of their Operation
Cherkasy State Technological University (Cherkasy, Ukraine)

E-mail: chura.pilipenko255@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1200-0385>

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering
State University «Zhytomyr Polytechnic» (Zhytomyr, Ukraine)

E-mail: nochvajvm@ztu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3742-0837>

³PhD in student of the department of mechanical engineering
State University «Zhytomyr Polytechnic» (Zhytomyr, Ukraine)

E-mail: romansymon@ztu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4965-2603>

⁴PhD in student of the department of mechanical engineering
State University «Zhytomyr Polytechnic» (Zhytomyr, Ukraine)

E-mail: vovan479dd@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3559-2814>

INCREASING THE ADHESION STRENGTH OF COATINGS DURING ULTRASONIC GRINDING

Gas-thermal spraying of self-fluxing, ceramic and other powder materials is one of the effective methods of restoring and strengthening machine parts. The paper describes the gas-thermal spraying methods. The reason for the appearance of macrodefects during mechanical processing in the form of microcracks and burns, and during the operation of parts - in the form of delamination of coatings, is the instability of the structure and physical and mechanical properties of coatings, as well as insufficient adhesive strength and significant residual stresses. In turn, the adhesion strength of coatings depends on the level of surface activation of the base material. The analysis of methods of activation of the surface of the part was performed. Different methods are used: shot blasting or sandblasting, spraying the sublayer, forming a "torn" cut. They all have different performance. The main factors that affect the adhesive and cohesive strength are the incomplete connection of the particles forming the coating, the structure of the coating and the residual internal stresses of the coating. The interaction of adhesion strength and residual internal stresses determines the workability of the coating. As the residual internal stresses increase, the adhesive strength decreases. One of the effective methods of reducing residual internal stresses in coatings is the action of ultrasonic vibrations. The paper presents the results of experimental studies of the influence of the amplitude of ultrasonic vibrations on the adhesion strength of coatings. Adhesive strength was determined by the method of breaking off a conical pin. The authors gave a formula for calculating the adhesion strength of coatings. The analysis of the results of the experiment showed that the replacement of static grinding with vibration significantly increases (by 15-20%) the adhesive strength. This phenomenon is determined by the action of two factors: a decrease in the level of damage to the coating; reducing the yield point of the coating material. It should be noted that the possibility of such a transition is due to the reduction of the fragility criterion to values less than 1. The paper provides a formula for calculating the value of the fragility criterion of coatings, as well as a formula for calculating the length of a critical microcrack. Knowing the length of the critical microcrack makes it possible to diagnose coatings for their performance.

Keywords: activation; gas thermal coating; macro defect; microcrack; residual internal stresses.

Table: 1. Fig.: 2. References: 8.

Євген Пуховський¹, Володимир Фролов², Сергій Сапон³, Юрій Бецко⁴

¹доктор технічних наук, професор кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: puhovskij50@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7843-0922>. ResearcherID: HDN-2044-2022

²кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: v.k.frolov@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3697-286x>. ResearcherID: ACH-0071-2022

³кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій машинобудування та деревообробки
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: s.sapon@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1082-6431>. ResearcherID: G-7764-2014

⁴старший викладач кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: betsko.uri@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7283-2207>. ResearcherID: ABT-9861-2022

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ НА ВЕРСТАТАХ ГНУЧКИХ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ

Досягнення високих показників точності і якості обробки деталей у сучасних технологічних системах потребує дослідження специфічних особливостей гнучкого виробництва. В умовах гнучких виробничих систем (ГВС) змінність номенклатури оброблюваних деталей зумовлює виникнення цілого комплексу змінних факторів, які визначають розсіювання вихідних параметрів точності і якості оброблюваних деталей. При обробці на взаємопов'язаних верстатах ГВС оптимальними вважаються режими різання, які забезпечують стабільну роботу всього обладнання ГВС протягом тривалого часу. Стабілізація показників точності і якості обробки досягається шляхом адаптивного управління процесом. В статті на прикладі дослідження токарної обробки на взаємопов'язаних верстатах з ЧПК представлена методика розрахунку та оптимізації режимів різання, яка дає можливість підвищити ефективність використання обладнання та знизити собівартість оброблення деталей у груповому циклі.

Ключові слова: оптимізація; гнучка виробнича система; собівартість; режим різання; точність оброблення.
Рис.: 3. Бібл.: 16.

Актуальність теми дослідження. При досягненні високих показників якості й точності деталей в умовах гнучкого автоматизованого виробництва, крім традиційних, додаються труднощі, пов'язані з повною автоматизацією технологічного процесу: автоматичне базування та закріплення заготовок, інструмента, передача й переорієнтування деталей для обробки на різних верстатних модулях, накопичення похибок при базуванні заготовок із застосуванням технологічного оснащення супутникового типу, розгалуженість розмірних зв'язків багатопільових верстатів, похибки автоматичного налагодження та позиціонування інструмента, необхідність активного контролю оброблюваної поверхні та стану різального інструмента, забезпечення зворотного зв'язку між реальною та заданою точністю, автоматичне підтримання теплових характеристик верстатного обладнання, забезпечення оптимальних для всіх верстатів ГВС режимів різання [1; 2; 3]. З метою забезпечення ефективності групових технологічних процесів механічної обробки комплексних деталей або комплексного поєднання елементів поверхонь деталі в процесі їх розробки необхідно вирішити задачу оптимізації параметрів механічної обробки відповідно до прийнятих критеріїв оптимальності й з урахуванням основних технічних обмежень [3; 4; 5]. При цьому розглядається як оптимізація постійно заданих режимів обробки для конкретного інструментального групового налагодження з використанням методів математичного моделювання та автоматизованої обробки інформації, так і безперервна оптимізація за допомогою систем управління технологічним обладнанням, які входять до складу ГВС [6; 7; 8]. Тому надзвичайно актуальною постає проблема розрахунку та оптимізації режимів різання на верстатах з ЧПК, що входять до складу ГВС.

Постановка проблеми. Режими різання на взаємопов'язаних верстатах ГВС повинні забезпечувати не найвищу продуктивність окремого верстата, а стабільну роботу обладнання ГВС протягом тривалого часу. При цьому оптимальними вважаються не максимально інтенсивні режими обробки, а саме такі, що забезпечують сталу роботу ГВС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Японські виробники свідомо занижують інтенсивність режимів різання та отримують безперебійну роботу ГВС протягом всієї зміни [2; 10]. Такий підхід оснований на адаптивному управлінні верстатами, застосуванні сучасних засобів активного контролю та діагностики обладнання [8; 10; 11]. Проектування оптимального технологічного процесу у змінних умовах гнучкого виробництва є дуже складним завданням, що зумовлено багатоваріантністю технології оброблення деталей, які входять до групи. Тим часом, у теорії групового виробництва є методи, що дозволяють оптимізувати процеси вибору технологічних рішень [12; 13; 14]. У роботі [15] представлено стратегію оптимізації, програмне забезпечення для вибору економічних режимів різання при однопрохідній токарній обробці з використанням детермінованого підходу. Оптимізація заснована на критеріях максимальної продуктивності та включає безліч практичних обмежень.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Незважаючи на велику кількість робіт, що описують ГВС, їх проектування та оптимізацію, існує потреба в наявності структурованих, практично орієнтованих методик оптимізації та розрахунку режимів різання для обробки на взаємопов'язаному обладнанні, яке складає гнучкі виробничі системи.

Метою статті є розробка методики розрахунку та оптимізації режимів різання на взаємопов'язаному обладнанні гнучких виробничих систем, яка дає можливість підвищити ефективність використання обладнання та знизити собівартість оброблення деталей у груповому циклі.

Виклад основного матеріалу. Оптимізацію режимів обробки можна розглянути на прикладі ГВС обробки тіл обертання, у комплекс основною обладнання якої включені токарні верстати з ЧПК. Одною з найважливіших умов оптимізації технологічних процесів є наявність математичного забезпечення, яке базується на математичній моделі процесу. У загальному випадку математична модель процесу являє собою сукупність цільових функцій та обмежуючих умов, які описують статичні та динамічні зв'язки між елементами об'єкта або цілими технологічними об'єктами.

Основна особливість процесу токарної обробки полягає у взаємопов'язаності явищ, які супроводжують процес обробки та впливають на вибір компонентів математичної моделі. До таких процесів, зокрема, належать: силові процеси, процеси тертя і теплоутворення, пов'язані з процесом різання та пластичними деформаціями в зоні різання; електро- та гідродинамічні процеси у приводах робочих органів верстата; зношування різального інструмента, пружні деформації елементів верстата тощо.

Найбільш суттєвими факторами, що впливають на показники точності, продуктивності, економічності механічної обробки є нерівномірності припуску оброблюваної заготовки і твердості оброблюваного матеріала, флуктуації деформацій пружної системи верстатів, а також швидкість зношування та різальні властивості інструментів.

Оскільки процес токарної обробки на верстатах з ЧПК нестационарний, тобто обробку виконують зі змінними режимами різання, показники оптимальності необхідно представляти у вигляді функцій собівартості обробки та продуктивності обладнання.

Собівартість обробки:

$$C = ET + \mathcal{E} / \left(\int_0^T v(\tau) s(\tau) t(\tau) dt \right), \quad (1)$$

де $E = BC_1$; $\mathcal{E} = \pi D h_n (BT_{zm} + I) K_c$; $C_1 = \pi D h_n$.

Продуктивність обладнання

$$P = \int_0^T v(\tau) s(\tau) t(\tau) dt / \left(C_1 (T + T_{zm} K_c) \right), \quad (2)$$

де T – стійкість різального інструмента, хв;

v – швидкість різання, м/хв;

s – подача, мм/хв;

t – глибина різання, мм;

τ – поточний час, хв;

B – собівартість однієї верстато-хвилини, грн;

D – діаметр заготовки, мм;

h_n – припуск на обробку, мм;

$T_{зм}$ – час на заміну та підналадку інструмента, хв;

I – сума витрат за період стійкості, зв'язаних з експлуатацією інструмента, грн;

K_c – коефіцієнт рівня технологічного забезпечення, який відбиває особливості багатоінструментальної групової наладки верстата з ЧПК.

Стійкість різального інструмента T визначається швидкістю його зношування v_{zn} , яка залежить від режимів різання, таких як швидкість v та подача s , а також якості виготовлення інструмента та вихідних параметрів заготовки. Швидкість зношування різального інструмента:

$$v_{zn} = \frac{dh}{d\tau} = F(v, s, t, C_v), \quad (3)$$

де h – поточне зношування інструмента, мкм;

C_v – коефіцієнт, який залежить від умов обробки.

При цьому T визначається граничними умовами $h(0) = 0$ та $h(T) = h_0$, де h_0 – допустиме зношування інструмента.

Динаміку процесу зношування описують диференціальним рівнянням. Серед усіх допустимих значень, які переводять об'єкт зі становища $h_0 = 0$ у становище $h(T) = h_0$, необхідно знайти таке, при якому права частина цільових функціоналів (1) та (2) приймає екстремальне значення. Таким чином, задачею оптимізації режимів різання є вибір та підтримка на протязі обробки параметрів режимів різання, які доставляють мінімум функціонала (1) або максимум функціонала (2), за умови забезпечення основних технологічних обмежень.

Процес токарної обробки відбувається або при превалюючому впливі на нього зміни глибини різання, що характерно при чорновій обробці заготовок, які мають значну дисперсію розмірів, або при превалюючому впливі зміни зношування інструмента, що характерно при експлуатації верстатів з ЧПК в умовах ГВС, коли виконанням організаційних заходів забезпечується незначна зміна припуску і властивостей оброблюваного матеріалу.

В умовах переважаючого впливу зміни глибини різання на процес обробки впливом зміни зношування різального інструмента на силу різання нехтують. Ефективність різання оцінюють по собівартості C і продуктивності Π обробки:

$$C = ET + \frac{\mathcal{E}}{vstT}; \quad (4)$$

$$\Pi = \frac{vstT}{C_1(T + T_{cm}K_c)}. \quad (5)$$

Період стійкості інструмента T , що входить в вирази (4) і (5), є функцією режимів різання. Для інженерних розрахунків він визначається за емпіричною залежністю:

$$T = m \sqrt{\frac{C_v}{vt^{x_v} s^{y_v}}}, \quad (6)$$

де m , x_v , y_v – показники степені.

Для розчленування впливу різних факторів коефіцієнт C_v розглядають як добуток декількох коефіцієнтів:

$$C_v = K_1 K_2 K_3 K_4.$$

Оптимальне значення швидкості різання і подачі, при яких собівартість обробки буде мати мінімальне, а продуктивність максимальне значення, визначаються виразами:

$$v_0 = \frac{C_v}{B s^{y_v} t^{x_v}};$$

$$s_0 = \frac{\frac{1}{v} C_v^{y_v}}{B_1 v^{y_v} t^{x_v}}, \quad (7)$$

де $B = \left(\frac{1}{m} - 1\right)^m \left(T_{cm} + \frac{I}{B}\right)^m K_c^m$; $B_1 = \left(\frac{y_v}{m} - 1\right)^{y_v} \left(T_{cm} + \frac{I}{B}\right)^{\frac{m}{y_v}} K_c^{\frac{m}{y_v}}$ – для визначення собівартості обробки;

$B = \left(\frac{1}{m} - 1\right)^m T_{cm}^m K_c^m$; $B_1 = \left[\left(\frac{y_v}{m} - 1\right) T_{cm} K_c\right]^{\frac{m}{y_v}}$ – для визначення продуктивності обладнання.

Графічно цільові функції (1) і (2) інтерпретуються у тривимірному просторі поверхнями, які являють собою об'ємну модель залежності собівартості (рис. 1, а) та продуктивності (рис. 1, б) від параметрів режиму різання v і s .

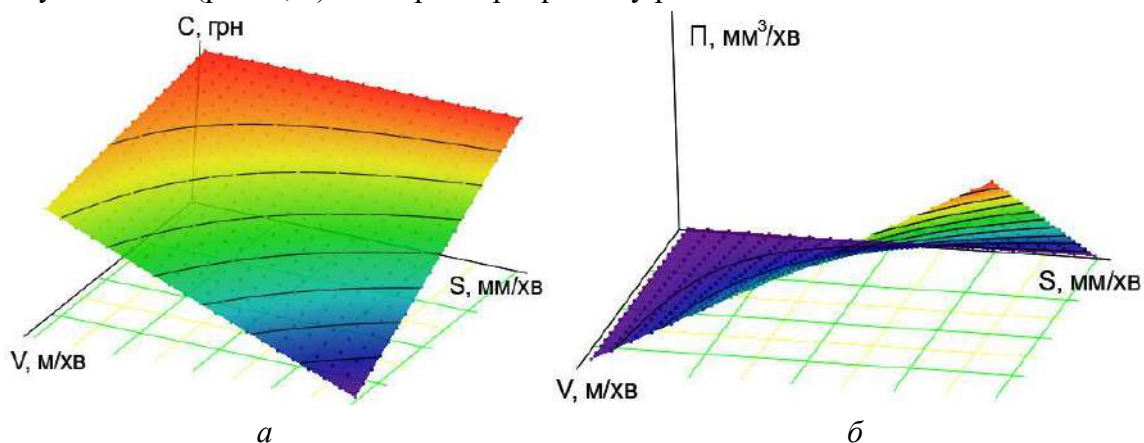


Рис. 1. Графіки залежностей собівартості (а) та продуктивності (б) від швидкості різання v і подачі s

Джерело: розроблено авторами.

Рішення задачі оптимізації можна представити системою рівнянь:

$$s = s_{доп};$$

$$t = t_{доп};$$

$$v = \frac{C_v}{\left(\frac{1}{m} - 1\right)^m \left(T_{cm} + \frac{I}{B}\right)^m K_c^m s_{доп}^{y_v} t_{доп}^{x_v}}. \quad (8)$$

Для оптимізації процесу токарну обробку необхідно вести з максимально допустимими глибиною різання і подачею, а швидкість різання вибирати відповідно до системи рівнянь (8).

Основні обмеження на режими різання накладаються необхідною точністю розмірів, заданою шорсткістю обробленої поверхні, енергетичними можливостями приводів верстата, областю стійкості пружної системи.

Спільне рішення рівнянь, що описують обмеження на параметри режиму різання, дозволяє отримати залежності $v = f(s)$ і $v = f(t)$, що визначають умови оптимізації за обраним показником оптимальності.

На рис. 2 представлена область управління в площинах v, s і v, t , що характеризує режим токарної обробки на верстаті з ЧПК, і системою оптимального управління, що забезпечує виконання отриманих умов оптимізації режиму. Криві $a-b-d-e-f-g-k-l$ і, відповідно, $a'-b'-d'-e'-f'-g'-k'-l'$ являють собою геометричне місце розташування оптимальних параметрів режиму різання при випадковому характері зміни глибини різання. Криві 1, 1', 2, 3, 3', 4, 4', 5, 5', 6 і прямі 2', 7, 7', 8, 9, 10 обмежують область оптимальних режимів різання.

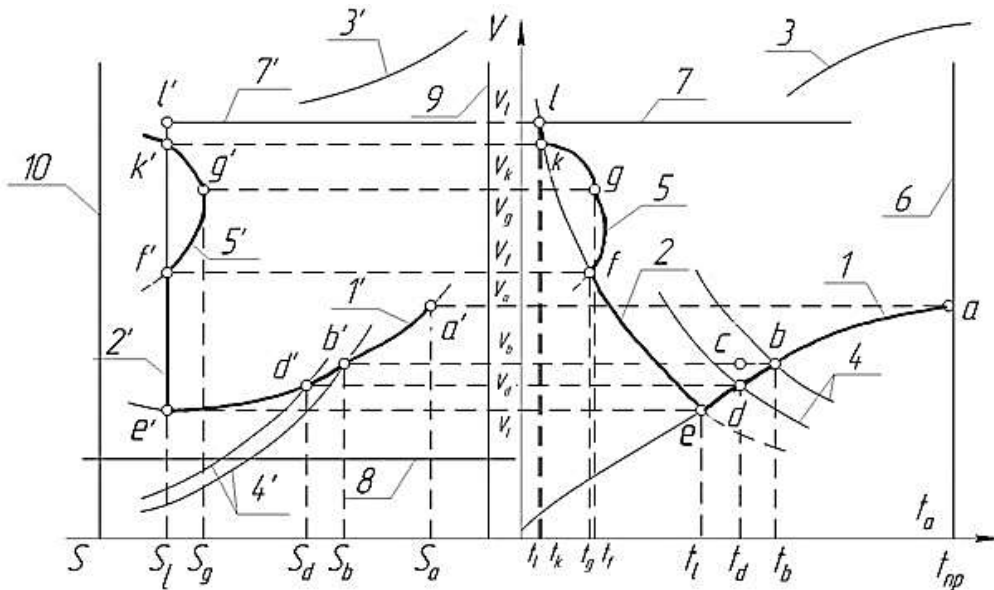


Рис. 2. Область оптимізації режимів токарної обробки

Джерело: розроблено авторами.

На основі отриманих областей оптимізації розробляють алгоритми розрахунку й оптимального управління параметрами режимів різання. У зв'язку з різними умовами обробки при чорновому й чистовому точінні доцільна розробка двох алгоритмів розрахунку режимів різання.

Обмеженнями при побудові алгоритму чорнкової обробки є максимальна по міцності різальної частини інструмента складова сили різання, максимальна по жорсткості оброблюваної заготовки складова сили різання, гранична по стійкості пружної системи верстата глибина різання, максимальні по енергетичних можливостях приводів верстата швидкість різання і подача, максимальна по потужності швидкість різання. У базу даних системи автоматизованого програмування токарної обробки включають характеристики матеріалу й геометрію різальної частини інструмента, динамічні характеристики пружної системи, розміри заготовки і властивості її матеріалу, способи закріплення заготовки, відомості про верстат, систему ЧПК, техніко-економічні вимоги.

Алгоритм розрахунку режимів різання при чистовій обробці використовують в тому випадку, коли обробку виконують за один робочий хід, або на останньому проході при багатопрохідній обробці. При цьому основним є обмеження по точності. У базу даних системи автоматизованого програмування, крім перерахованих для чорнкової обробки вихідних величин, включають діапазони хвилинних подач, на яких проявляються

динамічні властивості приводу подачі, а також величини, що характеризують шорсткість поверхні оброблених деталей і граничні за енергетичними можливостями приводів значення подачі і швидкості різання.

Для визначення кількісних співвідношень між параметрами режимів різання і побудови областей оптимізації при різних поєднаннях оброблюваного матеріалу й різального інструмента алгоритми розрахунку оптимальних режимів різання реалізують при розробці групових технологічних процесів обробки комплексних деталей.

На рис. 3 наведені отримані розрахунковим шляхом області оптимальних режимів різання, відповідно, при обробці сталі марки 45 різцем Т5К10 (криві 1 і 1'), сталі марки 30ХГСА різцем Т15К6 (криві 2 і 2') і сталі марки Х18Н9Т різцем ВК8 (криві 3 і 3').

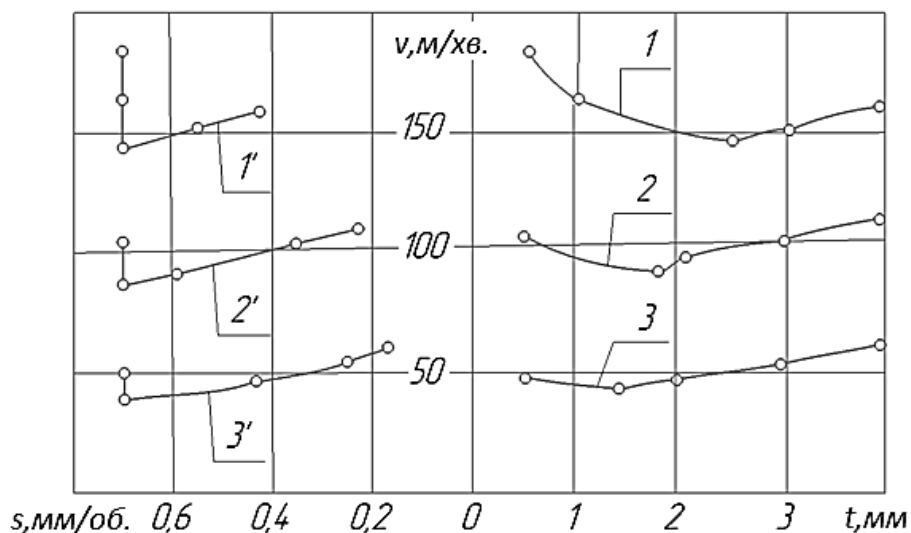


Рис. 3. Область оптимальних режимів різання:

1 – сталь 45; 2 – сталь 30ХГСА; 3 – сталь Х18Н9Т

Джерело: розроблено авторами.

Алгоритми розрахунку входять як функціональні модулі в технологічну частину процесора системи автоматизованого програмування токарної обробки комплексних деталей.

При побудові алгоритмів оптимального управління процесом токарної обробки як стабілізуючий параметр приймають радіальну складову силу різання P_y .

У випадку, якщо область зміни збурюючих факторів обмежується інтервалом $t_{пр} - t_d$ (див. рис. 2), що характерно для чорнової обробки, метою управління є стабілізація сили різання P_y , шляхом зміни подачі s і обчислення в кожній точці оптимальної швидкості різання.

Якщо зміна величини t визначається інтервалом $t_{пр} - t_l$, що має місце при чистовій обробці, алгоритм управління роботою пристрою ускладнюється через необхідність обліку областей, де можливе відхилення від заданої шорсткості обробленої поверхні.

Як датчик зворотного зв'язку використовують динамометричні пристрої, виконані у вигляді змінного різцевого блоку або різцевої вставки.

В умовах превалюючого впливу зношування інструмента на процес обробки при різанні зі змінними параметрами режиму з урахуванням силових обмежень значення показника оптимальності (технологічної собівартості обробки) представляють у вигляді функції:

$$C = \int_0^{h_0} \frac{\left[\frac{EC_p^{\alpha_2/y_p}}{C_v v^{\alpha_1} (P_g - K_{II} h)^{\alpha_2/y_p} + \frac{\mathcal{E}}{h_0}} \right] dh}{\int_0^{k_0} \frac{C_p^{(\alpha_2-1)/y_p} dh}{C_v v^{\alpha_1-1} (P_g - K_{II} h)^{(\alpha_2-1)/y_p}}}. \quad (9)$$

де P_g – максимально допустима сила різання;

C_p – коефіцієнт, що залежить від умов обробки;

K_{II} – коефіцієнт, що визначає крутизну нахилу прямих залежно від сили різання і зношування інструмента по задній грані;

α_1, α_2, y_p – показники ступеня.

Задача оптимального управління сформульована як задача досягнення мінімуму функціонала (9), представленого в загальному вигляді таким виразом:

$$I = \int_0^{x_0} F \left(x, y, \int_0^{x_0} \Phi(x, y) dx \right) dx. \quad (10)$$

Методом варіаційного обчислення знаходять необхідну умову його екстремуму:

$$F_y + \Phi_y \int_0^{x_0} F_s dx = 0. \quad (11)$$

Застосування умови (11) до виразу (9) дозволяє визначити функцію $v(h)$, що забезпечує мінімальну собівартість обробки за весь період стійкості різального інструмента:

$$v = \frac{A^{\frac{1}{\alpha_1}}}{(P_g - K_{II} h)^{\frac{1}{y_p}}}, \quad (12)$$

де $A = \frac{EC_p^{\alpha_2/y_p} [P_g^\gamma - (P_g - K_{II} h_0)^\gamma]}{(\alpha_1 - 1) \mathcal{E} C_v K_{II}^\gamma}$; $\gamma = \frac{\alpha_1 - \alpha_2 + y_p}{y_p}$.

Для доведення достатності умови (11) для мінімуму функціонала (10) використовують метод, заснований на вивченні знаку другої варіації. Доведено, що умова Лежандра гарантує збереження знаку другої варіації функціонала (9), отже, є достатньою умовою для його мінімуму.

При отриманні додаткової умови, достатньої разом з умовою Лежандра для сильного мінімуму виразу (10), використовують функцію Веєрштрасса:

$$E \left(x, y, \int_0^{x_0} \Phi(x, y) dx, p \right) = \left[p - \int_0^{h_0} \frac{C_p^{\frac{\alpha_2-1}{y_p}} dh}{C_v v^{\alpha_1-1} (p_g - K_{II} h)^{\frac{\alpha_2-1}{y_p}}} \right]^2 > 0. \quad (13)$$

Як видно з цього виразу, функція Веєрштрасса позитивна при будь-якому p .

Реалізацію отриманих умов екстремуму показника оптимальності для токарної обробки здійснюють таким чином.

Визначають хвилинну подачу інструмента:

$$s_{xg} = ns = \frac{1}{\pi D} \left\{ \frac{E \left[P_g^\gamma - (P_g - K_{II} h_0)^\gamma \right]}{(\alpha_1 - 1) \mathcal{E} C_v \nu K_{II} \gamma C_p^{(\alpha_2 - 1)/y_p}} \right\}^{1/\alpha_1}, \quad (14)$$

де n – частота обертання заготовки.

Хвилинну подачу в процесі обробки залишають незмінною, а силу різання, зміна якої зумовлена зношуванням інструмента, стабілізують, змінюючи частоту обертання заготовки. У таких випадках вже на стадії попереднього визначення режимів різання враховують умову забезпечення екстремуму показника оптимальності.

Система управління, що реалізує цей спосіб управління обробкою, забезпечує підтримку максимально допустимої сили різання і мінімуму технологічної собівартості або максимуму продуктивності обладнання одним контуром управління, що здійснює регулювання частоти обертання заготовки.

Висновки. На основі дослідження токарної обробки на верстатах із ЧПК показані шляхи оптимізації режимів різання на взаємопов'язаному обладнанні ГВС. Доведено, що шляхом стабілізації деяких параметрів процесу обробки оптимізуються режими різання, що забезпечує стабільну роботу обладнання ГВС протягом тривалого часу, за рахунок чого підвищуються економічні показники гнучкого виробництва. Приведена методика розрахунку та оптимізації режимів різання, яка дозволяє побудувати алгоритми програмного керування верстатами з ЧПК у складі ГВС.

Список використаних джерел

1. Ямпольский Л. С. Оптимизация управления процессами металлообработки резанием / Л. С. Ямпольский, Е. С. Пуховский, М. Н. Полицук // Адаптивные системы автоматического управления: міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2008. – № 12(32). – С. 152–159.
2. Гибкие производственные комплексы Японии / пер. с япон. А. Л. Семенова; под. ред. Ю. Л. Лищинского. – М.: Машиностроение, 1987. – 232 с.
3. Tolio T. Design of flexible production systems: methodology and tools / T. Tolio. – Berlin: Springer, 2009. – 310 p. – DOI: 10.1007/978-3-540-85414-2.
4. Manesku N. Flexibility and efficiency analysis of a flexible manufacturing system / N. Manesku, A. Nedelcu, Romania // Review of the Air Force Academy. – 2015. – № 1 (28).
5. Пуховський Є. С. Проектування технологічних процесів в умовах гнучкого автоматизованого виробництва / Є. С. Пуховський / Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування: збірник наукових праць. – 2010. – № 59. – С. 267–270.
6. Управління точністю обробки в гнучких виробничих системах / Є. С. Пуховський, В. К. Фролов, В. П. Приходько, Ю. М. Бецко / Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів». – 2022. – № 2(48). – С. 56–60.
7. Flexible versus efficiency? A case study of modern changeover in the Toyota Production System / P. Adler, B. Goldoftas, D. Levine // Organisation Science. – June, 1999. – Vol. 10, № 1. – Pp. 43-68.
8. Flexible Manufacturing System Simulation and Optimization / Monka P.P., Monkova K., Jahnátek A., Vanca J. // Experimental and Computational Investigations in Engineering. CNNTech 2020. Lecture Notes in Networks and Systems / Mitrovic, N., Mladenovic, G., Mitrovic, A. (eds). – 2021. – Vol 153. – Springer, Cham. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-58362-0_4.
9. Пуховський Є. С. Проектування верстатних систем гнучкого виробництва / Є. С. Пуховський. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 226 с.
10. Matta A. Design of advanced manufacturing systems / Matta A., Samerato Q. – Springer, The Netherlands, 2005.
11. Shivanand H. Flexible manufacturing system / Shivanand H., Benal M., Koti V. – Banglador: New Age International Publishers, 2006.
12. Кибальченко А. В. Оптимизация режимов резания в условиях гибкого производства / А. В. Кибальченко, С. П. Бабак, Г. А. Жигарев. – М.: Машиностроитель, 1989. – Вып. 4. – С. 21-25.

13. Manufacturing Systems – Theory and Practice / By G. Chryssolouris. – 2nd edition. – New York, NY: Springer Verlag, 2005. – 233 p.

14. Rezail K. Mathematical Model for optimal and phased implementation of flexible manufacturing systems / Rezail K., Ostadi B. A. // Applied Mathematics and Computation. – 2007. – Vol. 184(2). – Pp. 729-736.

15. Optimization of cutting conditions for single pass turning operations using a deterministic approach / J. Wang, T. Kuriyagawa, X.P. Wei, D. M. Guo // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2002. – Vol. 42/9. – Pp. 1023-1033.

References

1. Yampolskyi, L.S., Pukhovskiy, E.S., Polyshchuk, M.N. (2008). Optymyzatsiya upravleniya protsesamy metalloobrobokoy rezanyem [Optimization of control of metalworking processes by cutting]. *Adaptivni systemy avtomatyzovano upravlinnia: mizhvidomchyi naukovo-tekhnichnyi zbirnyk – Adaptive systems of automatic control: interdepartmental scientific and technical collection*, (12(32)), 152–159.

2. Lyshtynskiy, Yu.L. (1987). *Gybkye proyzvodstvennye komplekxy Yaponii [Flexible production complexes of Japan]*. Maschynostroenye.

3. Tolio, T. (2009). *Design of flexible production systems: methodology and tools*. Springer. doi:10.1007/978-3-540-85414-2.

4. Manescu, N., Nedelcu, A., Romania. (2015). Flexibility and efficiency analysis of a flexible manufacturing system. *Rewiew of the Air Forse Academy*, 1(28).

5. Pukhovskiy, E.S. (2010). Proektuvannia tekhnolohichnykh protsesiv v umovakh hnuchkoho avtomatyzovanoho vyrobnytstva [Designing technological processes in the conditions of flexible automated production]. *Visnyk NTUU «KPI». Mashynobuduvannia – Bulletin of NTUU "KPI". Mechanical engineering*, (59), 267–270.

6. Pukhovskiy, Ye.S., Frolov, V.K., Prykhodko, V.P., Betsko, Yu.M. (2022). Upravlinnia tochnistiu obrobky v hnuchkykh vyrobnychykh systemakh [Processing precision management in flexible production systems]. *Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. Seriya «Mekhanizatsiia ta avtomatyzatsiia vyrobnychykh protsesiv» – Bulletin of the Sumy National Agrarian University. "Mechanization and automation of production processes" series*, (2(48)), 56–60.

7. Adler, P., Goldoftas, B., Levine, D. (June 1999). Flexible versus efficiency? A case study of modern changeover in the Toyota Production System. *Organisation Science*, 10(1).

8. Monka, P.P., Monkova, K., Jahnátek, A., Vanca, J. (2021). Flexible Manufacturing System Simulation and Optimization. In Mitrovic, N., Mladenovic, G., Mitrovic, A. (Eds.), *Experimental and Computational Investigations in Engineering. CNNTech 2020. Lecture Notes in Networks and Systems*, 153. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58362-0_4.

9. Pukhovskiy, E.S. (2021). *Proectyvannia verstatnykh system gnutchkoho vyrobnytstva [Design of machine tool systems of flexible production]*. KPI im. Igoria Sykorskogo.

10. Matta, A., Samerato, Q. (2005). *Design of advanced manufacturing systems*. Springer, The Netherlands.

11. Shivanand, H., Benal M., Koti, V. (2006). *Flexible manufacturing system*. New Age International Publishers.

12. Kybaltchenko, A.V., Babak, S.P., Gygarev, G.A. (1989). Optimizatsiia rezhimov rezaniia v usloviakh gibkogo proyzvodstva [Optimization of cutting conditions in flexible production]. *Maschynostroitel*, 4, 21-25.

13. Chryssolouris, G. (Ed.). (2005). *Manufacturing Systems – Theory and Practice*. 2nd ed. NY: Springer Verlag.

14. Rezail, K., Ostadi, B. (2007). A Mathematical Model for optimal and phased implementation of flexible manufacturing systems. *Applied Mathematics and Computation*, 184(2), 729-736.

15. Wang, J., Kuriyagawa, T., Wei, X.P., Guo, D.M. (2002). Optimization of cutting conditions for single pass turning operations using a deterministic approach. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42/9, 1023-1033.

Отримано 19.12.2022

Evgen Pukhovskiy¹, Volodymyr Frolov², Serhii Sapon³, Iurii Betsko⁴

¹Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: puhovskije50@gmail.com. ORCID <https://orcid.org/0000-0001-7843-0922>. Researcher ID: [HDN-2044-2022](https://orcid.org/HDN-2044-2022)

²PhD in Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: v.k.frolov@gmail.com. ORCID <https://orcid.org/0000-0002-3697-286x>. Researcher ID: [ACH-0071-2022](https://orcid.org/ACH-0071-2022)

³PhD in Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Wood Technology
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: s.sapon@gmail.com. ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1082-6431>. Researcher ID: [G-7764-2014](https://orcid.org/G-7764-2014)

⁴Senior Lecturer of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: betsko.uri@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7283-2207> Researcher ID: [ABT-9861-2022](https://orcid.org/ABT-9861-2022)

**OPTIMIZATION OF CUTTING MODES ON MACHINES
OF FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEMS**

The main problem of manufacturing products in conditions of flexible automated production is the achievement of high quality indicators of parts, such as accuracy characteristics, surface roughness and surface layer condition. Obtaining of high quality parts in modern technological systems requires the study of specific features of flexible production. Frequent readjustment of equipment, replacement of tools, redistribution of characteristics of the elastic system of machine tools, the production of parts from materials of different workability determine the variable nature of the accuracy parameters of products manufactured in flexible manufacturing systems (FMS). In addition, the difficulties associated with the full automation of the technological process are added: automatic basing and fixing of workpieces and tools, transfer and reorientation of parts for processing on various machine modules, accumulation of errors when basing blanks on satellites, branching of dimensional connections of multipurpose machines, inaccuracies of automatic adjustment and positioning of the tool, the need for active control of the treated surface and the condition of the cutting tools, providing feedback between real and specified accuracy, automatic maintenance of thermal characteristics of machine equipment, ensuring optimal cutting modes for all FMS machines. The solution of most of these problems is achieved through adaptive management of the processes in order to obtain specified indicators of processing quality. Designing the optimal technological process under changing conditions of flexible production is a very difficult task, due to the multivariate technology of processing parts included in the group. Meanwhile, in the theory of group production there are methods to optimize the process of choosing the right technological solution. With the optimization of group technologies, it is necessary to be able to specialize in real production. On the first stage on the basis of advanced technological processes, it is necessary to create a type for the development of technological processes. The cost of developing such processes is insignificant, so that the technology is widely implemented. In the process of developing group technological processes of machining complex parts or a complex combination of surface elements of a part in order to ensure the efficiency of the process, it is necessary to solve the problem of optimizing machining parameters in accordance with accepted optimality criteria and taking into account the main technical limitations. At the same time, it is considered as the optimization of constantly set, for a specific instrumental group adjustment, processing modes using the methods of mathematical modeling and automated information processing, and continuous optimization with the help of control systems for technological equipment, which are part of the FMS. Therefore, the problem of calculating and optimizing cutting modes on interconnected FMS machines is extremely urgent. At the same time, not the most intense modes are considered optimal, but just those that ensure the stable operation of the FMS for a long time.

Keywords: optimization; flexible manufacturing system; cost price; mode of cutting; accuracy of the processing.

Fig.: 3. References: 15.

Володимир Тулупов¹, Сергій Онищук²

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри інноваційних технологій і управління
Донбаська державна машинобудівна академія (Краматорськ-Тернопіль, Україна)

E-mail: wladimir.tulupov@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3951-364X>

²кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інноваційних технологій і управління
Донбаська державна машинобудівна академія (Краматорськ-Тернопіль, Україна)

E-mail: onishchuk65@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8157-6869>

**ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ
У ВАЖКОМУ МАШИНОБУДУВАННІ**

Досліджено використання енергозберігаючих технологій у важкому машинобудуванні. Для оптимізації процесу механічної обробки запропоновано використовувати кількісні показники питомої енергоємності різання. Визначено доцільність використання технологічних методів оброблення деталей машин із застосуванням електричного струму, зокрема точіння зі змінним струмом та точіння з електроімпульсним нагріванням. Доведено, що використання енергозберігаючих технологій забезпечує зменшення трудомісткості та тривалості виробничого циклу.

Ключові слова: енергоефективність; технологічний процес; питома енергоємність різання; електричний струм; точіння.

Табл.: 1. Рис.: 1. Бібл.: 7.

Актуальність теми дослідження. Конкуренентоспроможність продукції сучасного машинобудування залежить від вартості енерговитрат на механічну обробку деталей машин. Питома частка вартості енерговитрат у загальній собівартості виготовлення продукції може досягати від 15 до 25 % [1]. У зв'язку з постійним зростанням вартості енергетичних ресурсів виникає необхідність використання енергозберігаючих технологій. Особливої ваги використання енергозберігаючих технологій набуває для виготовлення продукції важкого машинобудування.

Постановка проблеми. Однією з енергоємних операцій у технологічному процесі виготовлення деталей машин є термічна операція. Крім того, використання термічної обробки потребує переривання технологічного процесу, що суттєво збільшує виробничий цикл виготовлення деталей машин. Тому постає завдання дослідження енергоефективних способів механічної обробки деталей, зокрема таких, що дозволять суттєво зменшити енерговитрати на виробництво продукції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання енергоефективності процесів механічної обробки розглядаються в роботах [2], [3] та [4]. Як критерії оптимізації процесу механічної обробки пропонується використовувати кількісні показники питомої енергоємності різання. Перевагами цих показників, що зумовлюють перспективність їх використання в оптимізаційних моделях процесів механічної обробки, є їхній чіткий фізичний зміст, універсальність, простота визначення за допомогою як теоретичних, так і експериментальних методів.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Незважаючи на достатньо високий рівень енергетичних витрат при механічній обробці в умовах важкого машинобудування енергетичні критерії оптимізації мають обмежене використання. До того ж потрібний аналіз доцільності використання методів зміцнення в технологічних процесах механічної обробки.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження використання енергозберігаючих технологій при виготовленні деталей машин у важкому машинобудуванні.

Виклад основного матеріалу. Важке машинобудування є галуззю промисловості України, яка забезпечує отримання значної частини валового національного продукту. Особливостями механічної обробки деталей важкого машинобудування, що зумовлюють великі енергетичні витрати на обробку, є такі [1]:

– великі значення потужності електродвигуна головного привода руху (ПГР) верстата, що зумовлюють високий рівень абсолютних витрат (втрат) енергії за заданого значення питомих витрат (втрат);

– великі припуски на обробку деталей, що зумовлюють високі силові навантаження в зоні різання;

– великі втрати електроенергії під час роботи електродвигуна ППР верстата на холостому ході під час зміни різальної пластини (різцевого) блока внаслідок відмови, що відбулася.

Для підвищення енергоефективності процесів механічної обробки деталей важкого машинобудування автори роботи [1] пропонують як один із напрямів вирішення завдання зменшення витрат енергії на протікання фізичних процесів у зоні різання за рахунок оптимізації технологічних параметрів обробки.

Загальна структура математичної моделі для визначення оптимальних технологічних параметрів енергоефективних процесів механічної обробки деталей важкого машинобудування передбачає рішення оптимізаційної задачі виду [2]:

$$Q = \text{extr}\{f(x, w) | x \in D\}, \quad (1)$$

із системою обмежень виду:

$$g(x, w) \leq 0;$$

$$f(x) \leq 0;$$

$$a_i \leq x_i \leq b_i,$$

де $f(x, w)$ – цільова функція (критерій оптимізації);

x – керовані (варійовані) параметри обробки;

w – постійні параметри обробки;

D – область допустимих значень керованих параметрів x ;

$a_i = \text{const}$, $b_i = \text{const}$.

Рівень енергозатрат у зоні різання, які витрачається на знімання заданого об'єму матеріалу шару заготовки, що зрізається, найкращим чином відображається питомою енергоємністю різання [3]:

$$e = \frac{A_{\text{різ}}}{V} = \frac{N_{\text{еф}}}{P_{\text{різ}}} = \frac{N}{vSt}, \quad (2)$$

де $A_{\text{різ}}$ – робота різання;

V – обсяг зрізаного шару матеріалу, що перетворюється на стружку;

$N_{\text{еф}}$ – ефективна потужність різання;

$P_{\text{різ}}$ – продуктивність різання (знімання стружки в одиницю часу);

v – швидкість різання;

S – подача різця;

t – глибина різання.

Питома енергоємність різання не пов'язана з розмірами заготовки, безпосередньо не залежить від часу обробки, і отже, може використовуватися як критерій для порівняння енергетичної ефективності альтернативних процесів обробки, а також параметрів окремих операцій. Після перетворення залежності (2) на цільову функцію виду $e \rightarrow \min$ її можна використовувати як критерій оптимізації для встановлення параметрів обробки різанням, які дозволяють мінімізувати енергетичні витрати без втрати продуктивності [5].

Вирішення завдання щодо зменшення витрат енергії на протікання фізичних процесів у зоні різання здійснюється використанням додаткових джерел тепла. Вимоги до штучних джерел тепла під час вибору методу оброблення такі [6]:

- джерело тепла повинне мати високий ступінь локалізації тепла. Найбільший ступінь локалізації ($10^6 \dots 10^8 \text{ Вт/см}^2$) мають лазерне, плазмове й електричне джерела, найменший ступінь локалізації в дуги побічної дії, навіть при обтисканні її плазмотроном, а також у газового полум'я;

- джерела за виглядом поділяються на внутрішні та зовнішні. Внутрішнє джерело тепла виникає в зоні деформації металу і виходить переважно від електричних джерел за допомогою електроопору. До переваг внутрішнього джерела належить його широке застосування незалежно від форми оброблюваних заготовок, а також від виду оброблення;

- потужність. Найбільшу потужність мають електричне, лазерне та плазмове джерела;

- ККД джерел, або ефективне введення тепла в оброблювану заготовку. Найбільший ККД (0,7...0,8) має електричне і найменший (0,4...0,5) – лазерне і плазмове джерела;

- джерела за відстанню до зони деформації поділяються на ті, працюють в зоні деформації, наприклад електричні, та поза зоною деформації – плазмові й індукційні;

- швидкість нагрівання. Найбільші швидкості нагрівання у електричного, лазерного й індукційного джерел. Швидкість нагрівання може досягати 10^5 – 10^6 °C/c;

- форма джерел може змінюватися в широких межах, але найбільш поширені круглі, прямокутні, еліпсні або зони деформації, що мають форму, коли джерело виникає в цій зоні;

- за безпекою для обслуговуючого персоналу найбільш переважні внутрішні джерела, до яких застосовні звичайні заходи електробезпеки. Під час роботи із лазерними та плазмовими джерелами необхідно застосування спеціальних екранів.

Ідеальне штучне джерело тепла, що застосовується у технологічному методі поверхневого зміцнення, повинно забезпечувати швидкісне нагрівання металу, піддаватися контролю та регулюванню в строго нормованих дозах в одиницю часу, забезпечувати широкий діапазон температур. Під час вибору методу оброблення велике значення мають питомі витрати енергії на нагрівання одиниці об'єму металу (рис. 1) [6]. Питома енергоємність є універсальним критерієм, величина якого залежить від властивостей оброблюваного матеріалу, параметрів інструменту та режиму оброблення і не залежить від характеру виробництв, на відміну від економічних критеріїв.

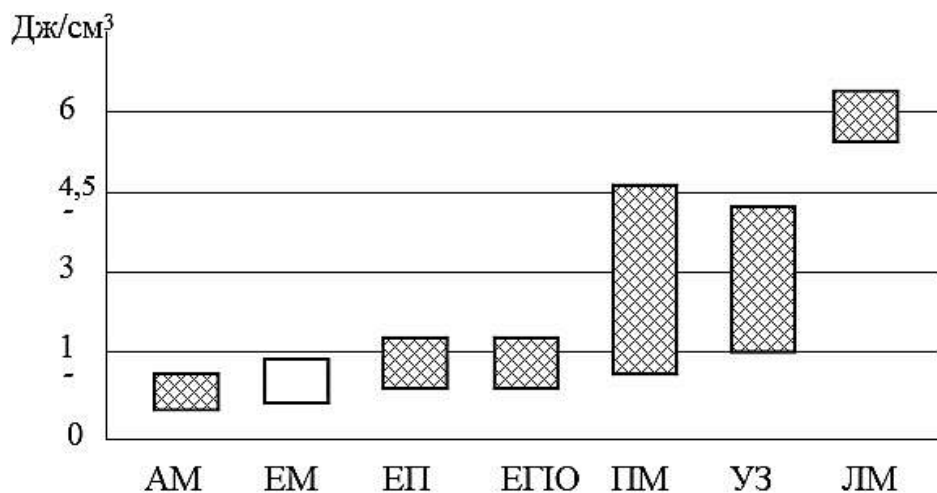


Рис. 1. Питомі витрати енергії на нагрівання об'єму металу технологічних методів:

1 – анодно-механічне оброблення (АМО); 2 – електромеханічне оброблення (ЕМО);

3 – електронно-променево оброблення (ЕПО); 4 – електрогідропульсне оброблення (ЕГПО); 5 – плазмове-механічне оброблення (ПМО); 6 – ультразвукове оброблення (УЗО); 7 – лазерно-механічне оброблення (ЛМО)

Найменші витрати енергії (питома енергоємність різання) спостерігаються при застосуванні електричних джерел тепла, а найбільші – плазмове-механічних і лазерно-механічних.

У зв'язку з вищезазначеними вимогами авторами запропоновано використання електричного струму як джерела тепла [7]. Реалізацією є два технологічних способи – електромеханічне точіння та чистове точіння з електроімпульсним нагріванням.

Перший спосіб заснований на використанні електричного струму при точінні, що супроводжується одночасним силовим та тепловим впливом на оброблювану поверхню. Особливістю способу є те, що в зону різання вводиться змінний електричний струм, що пропускається через головну задню поверхню різальної кромки з нульовим заднім кутом, що значно збільшує пластичну зону. Живлення відбувається від джерела змінного струму при робочій напрузі 3-6 В та силі струму $I = 150-200$ А.

Другий спосіб чистового точіння заснований на пропусканні імпульсного струму через головну задню поверхню різальної кромки. У результаті утворюється регулярна дискретна структура у вигляді зміцнених фрагментів. Розташування зміцнених фрагментів залежить від частоти та тривалості імпульсів струму, а також режимів механічного оброблення (повздовжньої подачі та частоти обертання шпинделя). Живлення відбувається від генератора імпульсного струму. Основними характеристиками генератора імпульсного струму є: частота імпульсного струму 20...8000 Гц, шпаруватість 20...80%, максимальна робоча напруга 10 В, вихідний імпульсний струм прямокутної форми.

Довжина зміцнених фрагментів l_ϕ забезпечується тривалістю імпульсу τ_i , яка визначається за формулою [7]:

$$\tau_i = \frac{60l_\phi}{\pi D_{\text{дет}} n} K, \quad (3)$$

де l_ϕ – довжина зміцненого фрагмента, мм;

$D_{\text{дет}}$ – діаметр поверхні оброблюваної деталі, мм;

n – кількість обертів шпинделя, хв^{-1} ;

K – коефіцієнт, який залежить від матеріалу оброблювальної заготовки, щільності струму при пропусканні його через зону різання та швидкості різання.

Зміцнення поверхонь деталей шляхом пропускання імпульсу струму при механічній обробці сприяє утворенню незміцнених проміжків серед зміцнених фрагментів, тобто змащувальних кишень. Наявність регулярного мікрорельєфу створює умови для рідинного режиму тертя при експлуатації деталі, що підвищує їхні експлуатаційні властивості та термін служби.

Виконані експериментальні дослідження технологічних можливостей способу чистового точіння з електроімпульсним нагріванням. Металографічні дослідження зразків зі сталі 40ХН, що були виконані після обробки, показали формування в поверхневому шарі дрібнозернистої мартенситної структури та «білого» шару товщиною до 0,1 мм. Мікротвердість світлої зони поверхневого шару разом із мартенситом становить $H_\mu = 5900$ МПа. Дослідження зносостійкості зразків, що загартовані СВЧ та тих, що пройшли механічне оброблення з імпульсним струмом, на машині тертя СМЦ-2 довели, що зношення менше у зразків, що оброблені з імпульсним струмом.

Дослідження якості поверхні після чистового точіння з електроімпульсним нагріванням свідчать про те, що при швидкості різання $v = 100$ м/хв, подачі $s = 0,23$ мм/об, глибині різання $t = 0,35$ мм, силі струму $I = 150$ А та шпаруватості $q = 65\%$ шорсткість поверхні становить $Ra = 0,8 - 1$ мкм.

Використання електричного струму в зоні різання призводить до покращення умов різання за рахунок збільшення пластичної зони та, як наслідок, зменшення сили різання. Проведені експериментальні дослідження складових сил різання з використан-

ням універсального трикомпонентного динамометра свідчать про зменшення їх величини на 20-30 % залежно від оброблюваного матеріалу та режимів різання. У результаті зменшується потужність різання $N_{\text{эф}}$, та відповідно й питома енергоємність різання, що визначається за формулою (2).

Технологічна операція чистового точіння з електроімпульсним нагріванням використовується в технологічному процесі виготовлення ступінчастих валів номенклатури ПрАТ «СМЗ». Матеріал валу – сталь 40ХН. Габаритні розміри валу – максимальний діаметр – 200 мм, довжина – 1020 мм.

На відміну від базового технологічного процесу використання точіння з електроімпульсним нагріванням має декілька переваг: можливість зміцнювання поверхневого шару деталі диференційно її зносу (для деталей, що нерівномірно зношуються); обробка на одному технологічному обладнанні; скорочення кількості технологічних операцій; низькі витрати на устаткування.

У запропонованому технологічному процесі замість чотирьох операцій (токарної, двох круглошліфувальних та термічної) запропонована одна – операція електроімпульсного точіння. Енергоспоживання за двома варіантами технологічного процесу наведено в таблиці [7].

Використання способів обробки з використанням електричного струму дозволяє зменшити витрати енергії на виготовлення деталей машин, зменшити тривалість виробничого циклу за рахунок зменшення кількості технологічних операцій, однією з яких є термічна обробка. Дані таблиці 1 свідчать про те, що кількість енергії, що витрачається на виконання чотирьох операцій може бути зменшена при заміні на операцію точіння з електроімпульсним нагріванням на 80 %.

Таблиця – Енергоспоживання для базового й нового варіанта технологічного процесу

Номер операції	Назва операції	Потужність, кВт	Енергія, кВт/год
Базовий варіант			
035	Токарно-гвинторізна мод. 16К30	0,51	0,12
040	Термічна ТО гарт ТВЧ	250	2,5
050	Круглошліфувальна мод. 3А172	0,65	0,14
055	Круглошліфувальна мод. 3А172	0,4	0,03
Всього		3,56	2,8
Новий варіант			
035	точіння з ЕІН 16К30	3,65	0,60

Висновки. У роботі досліджено використання енергозберігаючих технологій при виготовленні деталей машин у важкому машинобудуванні. Визначено, що найменші витрати енергії (питома енергоємність різання) спостерігаються при застосуванні електричних джерел тепла. Використання чистового точіння з електроімпульсним нагріванням дозволяє отримати регулярну дискретну структуру поверхневого шару деталі у вигляді зміцнених фрагментів. Наявність такої структури створює умови для рідинного режиму тертя при експлуатації деталі, що підвищує їх експлуатаційні властивості та термін служби. Визначено, що запровадження методів обробки з використанням електричного струму, зокрема, точіння з електроімпульсним нагріванням, дозволяє зменшити тривалість виробничого циклу виготовлення деталей важкого машинобудування за рахунок зменшення кількості технологічних операцій. Кількість енергії, що витрачається при цьому, може бути зменшена на 80 %.

Список використаних джерел

1. Мироненко Е. В. Общая структура математической модели для определения энергоэффективных технологических параметров токарной обработки деталей тяжелого машиностроения / Е. В. Мироненко, Г. П. Клименко, В. В. Калиниченко // *Резание и инструмент в технологических системах*. – 2015. – Вып. 85. – С. 202–210.
2. Старков В. К. Физика и оптимизация резания материалов / В. К. Старков. – М. : Машиностроение, 2009. – 640 с.
3. 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.
4. Адаменко В. М. Энергоэффективность процесса резания поверхностей заготовок деталей на основе анализа энергопотребляющих показателей технологического оборудования / В. М. Адаменко, Ж. А. Мрочек // *Наука и техника*. – 2012. – № 4. – С. 3–6.
5. Яровой Ю. В. Распределение припуска по условию минимума удельной работы резания / Ю. В. Яровой, И. А. Яровая // *Сучасні технології в машинобудуванні*. – 2015. – Вип. 10. – С. 80–85.
6. Алифанов А. Я. Основные принципы классификации электрофизических, электро-механических и комбинированных методов обработки / А. Я. Алифанов // *Вестник машиностроения*. – 1993. – № 5–6. – С. 41–44.
7. Ковалевський С. В. Спеціальні методи оброблення робочих поверхонь деталей машин : монографія / С. В. Ковалевський, В. І. Тулупов. – Краматорськ : ДДМА, 2012. – 100 с.

References

1. Mironenko, E.V., Klimenko, G.P., Kalinichenko, V.V. (2015). Obshchaia struktura matematicheskoi modeli dlia opredeleniia energoeffektivnykh tekhnologicheskikh parametrov tokarnoi obrabotki detalei tiazhelogo mashinostroeniia [The general structure of the mathematical model for determining the energy-efficient technological parameters of turning heavy engineering parts]. *Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh – Cutting and tooling in technological systems*, (85), 202–210.
2. Starkov, V.K. (2009). *Fizika i optimizatsiia rezaniia materialov [Physics and optimization of cutting materials]*. Mashynostroenie.
3. Karpov, A.V. (2011). K voprosu upravleniia protsessom rezaniia na osnove energeticheskikh zakonomernostei deformatcii i razrusheniia tverdykh tel [On the issue of cutting process control based on the energy laws of deformation and destruction of solids]. *Mashinostroenie i bezopasnost zhiznedeiatel'nosti – Mechanical engineering and life safety*, (1(8)), 37–49.
4. Adamenko, V.M., Mrochek, Zh.A. (2012). Energoeffektivnost protcessa rezaniia poverkhnostei zagotovok detalei na osnove analiza energopotrebliaiushchikh pokazatelei tekhnologicheskogo oborudovaniia [Energy efficiency of the process of cutting the surfaces of workpieces based on the analysis of energy-consuming indicators of process equipment]. *Nauka i tekhnika – Science and technology*, (4), 3–6.
5. Iarovoi, Iu.V., Iarovaia, I.A. (2015). Raspredelenie pripuska po usloviu minimuma udelnoi raboty rezaniia [Allowance distribution according to the condition of minimum specific cutting work]. *Suchasni tekhnologii v mashynobuduvanni – Modern technologies in mechanical engineering*, (10), 80–85.
6. Alifanov, A.Ia. (1993). Osnovnye printcipy klassifikatsii elektrofizicheskikh, elektromekhanicheskikh i kombinirovannykh metodov obrabotki [Basic principles for the classification of electrophysical, electromechanical and combined processing methods]. *Vestnik mashinostroeniia – Herald of machine-building*, (5–6), 41–44.
7. Kovalevskiy, S.V., Tulupov, V.I. (2012). *Spetsialni metody obrobлення robochykh poverkhon detalei mashyn [Special methods of processing working surfaces of machine parts]*. DSEA.

Отримано 15.12.2022

Volodimir Tulupov¹, Serhii Onyshchuk²

¹PhD in Technical science, Associate Professor of Innovative Technologies and Management Department
Donbas State Engineering Academy (Kramatorsk-Ternopil, Ukraine)

E-mail: vladimir.tulupov@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3951-364X>

²PhD in Technical science, Associate Professor of Innovative Technologies and Management Department
Donbas State Engineering Academy (Kramatorsk-Ternopil, Ukraine)

E-mail: onishchuk65@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8157-6869>

USE OF ENERGY SAVING TECHNOLOGIES IN HEAVY ENGINEERING

Modern mechanical engineering is characterized by high energy consumption, which specific share of cost can reach from 15 to 25 %. The task is to research energy-efficient technological methods of mechanical processing, which will reduce the cost and duration of the production cycle.

As a criterion for optimizing the machining process, it is proposed to use quantitative indicators of the specific energy intensity of cutting. The feasibility of using energy-efficient strengthening methods in the technological process of manufacturing parts in heavy engineering needs to be studied.

The purpose of the work is to study the use of energy-saving technologies in the manufacture of machine parts in heavy engineering.

It is proposed to use a mathematical model to determine the optimal technological parameters of energy-efficient processes of mechanical processing of heavy engineering parts. The level of energy consumption in the cutting zone, which is spent on removing a given volume of material from the layer of the workpiece being cut, is best reflected by the specific energy intensity of cutting.

To ensure the operational properties of machine parts, it is proposed to use methods of surface strengthening with the use of electric current.

The use of finishing turning with electric pulse heating in the manufacturing process of the shaft allows to replace four operations - turning, heat treatment, two circular grinding operations - with one operation.

Clean turning with electric pulse heating has such advantages as: the possibility of strengthening the surface layer of the part by differentially wearing it (for parts that wear unevenly); processing on one technological equipment; reducing the number of technological operations; low equipment costs.

It was determined that the introduction of processing methods using electric current, in particular, turning with electric pulse heating, allows to significantly reduce the duration of the production cycle of manufacturing parts of heavy engineering. The amount of energy consumed can be reduced by 80 %.

Keywords: energy efficiency; technological process; specific energy intensity of cutting; electric current; turning

Tabl.: 1. Fig.: 1. References: 7.

Олег Деркач¹, Валерій Кобзар²

¹кандидат технічних наук, старший дослідник, завідувач відділу коливань і вібраційної надійності
Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України (Київ, Україна)
E-mail: derkach@ipp.kiev.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6783-8516>
ResearcherID: [H-2074-2014](https://orcid.org/0000-0002-6783-8516). Scopus Author ID: [57217115124](https://orcid.org/0000-0002-6783-8516)

²аспірант
Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України (Київ, Україна)
E-mail: kobzar@ipp.kiev.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5929-458X>. ResearcherID: [HGE-9205-2022](https://orcid.org/0000-0002-5929-458X)

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПІДВИЩЕНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ НА ДИСИПАТИВНІ
ВЛАСТИВОСТІ ОДНОСПРЯМОВАНОГО ВУГЛЕПЛАСТИКУ**

Представлено метод експериментального визначення дисипативних властивостей конструкційних матеріалів, який реалізовано за допомогою установки Д-6, коливальна система якої являє собою замкнений контур, у якому за умов чистого згину зразка матеріалу розсіюється енергія його коливань. За результатом проведеного комплексу експериментальних досліджень методом затухаючих коливань встановлено залежності логарифмічного декременту коливань (ЛДК) односпрямованого вуглепластику від деформації у діапазоні $(2...12) \cdot 10^{-4}$ для температури від 300 до 423 К. Для інтегральної характеристики структурної цілісності зразка матеріалу запропоновано параметр, який визначено за приростом ЛДК до деформації.

Ключові слова: демпфірування коливань; односпрямований вуглепластик; логарифмічний декремент коливань; температура; структурна цілісність.

Рис.: 6. Бібл.: 8.

Актуальність теми дослідження. Композитні структури, зокрема полімерні композитні матеріали, завдяки високому співвідношенню характеристик міцності до питомої ваги широко використовуються у конструктивних елементах авіакосмічної техніки та є перспективними у застосуванні в енергетичному машинобудуванні. Експлуатація таких конструктивних елементів пов'язана з дією інтенсивних вібраційних навантажень, а також впливом таких чинників, як температура, відцентрове навантаження та ультрафіолетове випромінювання. У зв'язку з цим важливою задачею з погляду забезпечення віброміцності композитних конструктивних елементів є аналіз їхньої здатності опиратися розвитку небезпечних амплітуд коливань при змінних навантаженнях, особливо при резонансних коливаннях [1; 2]. Для вирішення цієї задачі необхідне врахування розсіювання енергії в коливальній системі та впливу на неї реальних умов експлуатації.

Постановка проблеми. Композитні конструктивні елементи машин мають низку джерел розсіювання енергії, головні з яких: тертя в з'єднаннях, аеродемпфірування та розсіювання енергії в матеріалах його складових. У тонкостінних конструктивних елементах, які експлуатуються за умов високих напружень, більшість з'єднань виконуються клейовими, тому розсіювання енергії в матеріалі слід розглядати як основне джерело втрат енергії коливань [3]. Однак для цього необхідно розуміти механізми розсіювання енергії коливань в композитах і мати методику його достовірного визначення, що є комплексною задачею. Так, головні джерела розсіювання енергії в композитному матеріалі пов'язані як із в'язкими характеристиками матриці, так і з нелінійними процесами, які відбуваються при взаємодії матриці та армуючих компонентів [4]. Для побудови розрахункових моделей розсіювання енергії в полімерних композитах широко використовується модель в'язкопружного матеріалу, що пов'язано з її відносною простотою і хорошою узгодженістю отриманих розрахункових залежностей з даними експериментального визначення дисипативних властивостей композитних матеріалів [5; 6]. Інший підхід, заснований на врахуванні амплітудно-залежного розсіювання енергії, отримав обмежене застосування для композитних матеріалів [2]. Водночас велика кількість чинників, таких як локальне порушення структури композиту (міжфазні дефекти, розшарування та ін.) та порівняно великі амплітуди деформації, характерні для резонансних режимів експлуатації, можуть бути враховані з використанням

такого підходу або при його поєднанні з іншими. Таким чином, для вирішення задачі розробки моделей розсіювання енергії в структурно-неоднорідних матеріалах, а також з метою визначення закономірностей впливу конструктивних та експлуатаційних чинників на дисипативні властивості композитних матеріалів виникає необхідність у розробці методики визначення характеристик амплітудно-залежного розсіювання енергії в матеріалі.

Аналіз досліджень і публікацій вказує на те, що визначення дисипативних властивостей полімерних композитних матеріалів при амплітудах коливань, достатньо великих, щоб спричинити мікроструктурні пошкодження, становить особливий інтерес у вивченні надійності композитних конструктивних елементів та їхніх характеристик втомної міцності. Так, зокрема, у [7] показано, що характеристики демпфірування більш чутливі до порушення структурної цілісності композиту. У зв'язку з цим важливе наукове і практичне значення має розробка методів дослідження амплітудної залежності характеристик розсіювання енергії в композитних матеріалах за різних умов експлуатації.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Розробка експериментальної методики дослідження дисипативних властивостей матеріалів при коливаннях пружних систем має певні особливості у зв'язку зі специфікою досліджуваного явища. Саме нехтування такими особливостями може призвести до відмінності характеристик демпфірувальної здатності досліджуваних матеріалів. Це особливо актуально для композитних матеріалів, для яких характерна анізотропія дисипативних властивостей та сильний вплив на них параметрів структури, зокрема об'ємної частки волокон та температури [3; 7]. Зазначене зумовлює необхідність застосування уніфікованої методики дослідження дисипативних властивостей матеріалів за умов чистого згину зразків з різних матеріалів у широкому діапазоні температур, що дає можливість провести коректне порівняння одержаних даних для композитних матеріалів з різною структурою при умовах максимально наближених до експлуатаційних.

Метою цієї роботи є дослідження впливу температури на розсіювання енергії в матеріалі та характер залежності логарифмічного декременту коливань (ЛДК) зразків з односпрямованого вуглепластику від деформації за умов їх чистого згину та пошук показників структурної цілісності композиту на їх основі.

Виклад основного матеріалу. Метод визначення характеристик розсіювання енергії по затухаючим коливанням, який знайшов найбільше розповсюдження через простоту постановки експерименту, полягає в отриманні віброграм вільних коливань (рис. 1) досліджуваної механічної системи, за темпом затухання яких обчислюється величина ЛДК.

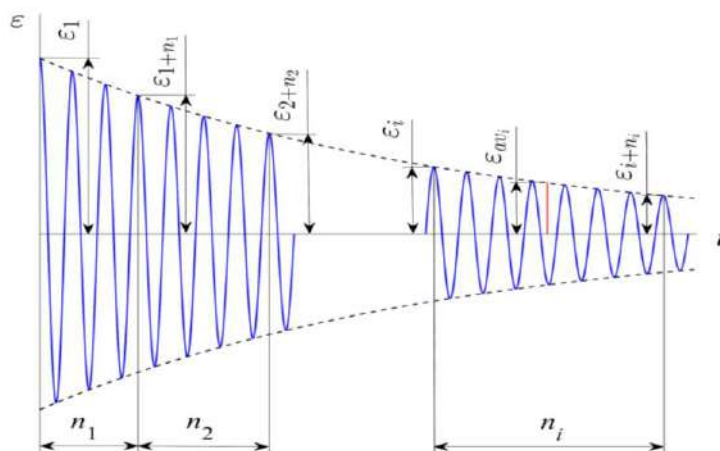
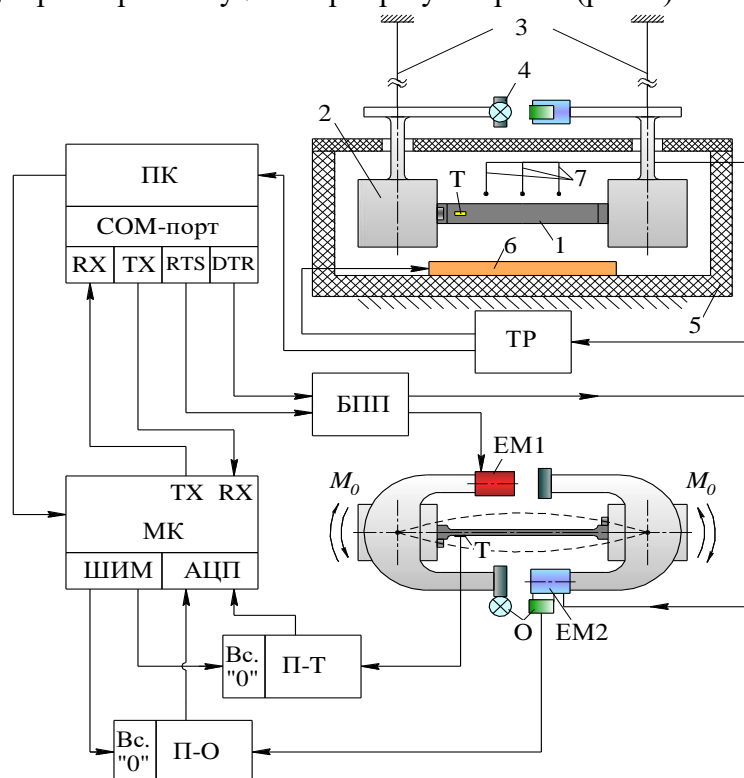


Рис. 1. Віброграма вільних затухаючих коливань (суцільні лінії) та її огинаюча (штрихові)

Представлений у цій роботі експериментальний метод визначення дисипативних властивостей матеріалів був розроблений за ідеями академіка Національної академії наук України Г. С. Писаренка та його учнів. Так, основними принципами цього методу є: виключення або зведення до мінімуму всіх інших втрати енергії в коливальній системі, крім розсіювання енергії в робочій частині досліджуваного зразка матеріалу; забезпечення оптимальної однорідності напружено-деформівного стану й амплітуди його циклічних деформацій; використання безконтактних способів збудження та реєстрації коливань. Функціональна схема модернізованої експериментальної установки Д-6, у якій реалізовані зазначені принципи та проведена автоматизація процесу експериментальних досліджень та обробки одержаних даних показана на рис. 2. Її основою є механічна система, яка складається зі зразка 1 та інерційних мас 2, підвішених на довгих сталевих струнах 3. Система збудження коливань, яка складається з пари електромагнітів (ЕМ1 і ЕМ2) та металевих дисків 4, які з ними взаємодіють, інтегрована в механічну систему, що обумовлює виникнення замкнутого силового контуру при дії крутного моменту M_0 навколо вузлів механічної системи. Для проведення досліджень при підвищеній температурі використовується система нагрівання та автоматичного регулювання температури, яка складається з термоізоляційної камери 5, нагрівального елемента 6, терморпар К-типу 7 та терморегулятора ТР (рис. 2).



АЦП	–	аналого-цифровий перетворювач;
БПП	–	блок підсилення потужності;
Вс. "0"	–	процедура встановлення нуля;
ЕМ1, ЕМ2	–	електромагніти;
МК	–	мікроконтролер;
О	–	фотоелектричний елемент зі світлодіодом;
П-О	–	підсилювач оптиканалу;
П-Т	–	підсилювач тензоканалу;
Т	–	тензодавач;
ТР	–	терморегулятор;
ШИМ	–	широкоімпульсний модулятор;
СОМ-порт	–	інтерфейс стандарту RS232 передачі даних з ПК;
M_0	–	згинальний момент;
RX, TX	–	сигнал прийому та передачі даних відповідно;
RTS, DTR	–	сигнали запиту і готовності до прийому даних інтерфейсу стандарту RS232 відповідно.

Рис. 2. Функціональна схема установки Д-6 для визначення дисипативних властивостей зразків конструкційного матеріалу за умов їх чистого згину

Для характеристики розсіювання енергії використаємо амплітудно-залежний ЛДК $\delta(\varepsilon)$, який визначає темп згасання амплітуд вільних затухаючих коливань. Так, залежність ЛДК від деформації зразка матеріалу визначається за результатом аналізу віброграм вільних затухаючих коливань механічної системи. Для їх запису збуджуються резонансні коливання механічної системи після чого виконується їх зрив (припинення збудження). Щоб не мати справу із різницею або відношенням дуже близьких по величині суміжних амплітуд коливань, при аналізі віброграми розглядається не один цикл, а її ділянку, яка містить деяке число циклів n_i [1]. У цьому разі ЛДК обчислюється за формулою [1; 2]:

$$\delta(\varepsilon_{av_i}) = \frac{1}{n_i} \ln \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{i+n_i}} \approx \frac{2(\varepsilon_i - \varepsilon_{i+n_i})}{\varepsilon_i + \varepsilon_{i+n_i}}, \quad (1)$$

де n_i – число циклів на i -й ділянці віброграми (рис. 1) між амплітудами ε_i та ε_{i+n_i} .

Отримане за формулою (1) значення ЛДК є усередненим по амплітуді деформацій оскільки як і для ділянки затухаючих коливань з числом циклів n_i , так і для одного циклу $n = 1$ невідомо якій амплітуді воно відповідає і в якій мірі визначає дисипативні властивості матеріалу при усталених коливаннях. На практиці значенню ЛДК зазвичай ставляють у відповідність середню амплітуду деформацій на i -й ділянці віброграми [1; 2]:

$$\varepsilon_{av_i} = \frac{1}{2}(\varepsilon_i + \varepsilon_{i+n_i}). \quad (2)$$

Для отримання коректних результатів за обмеженим числом точок, що характерно для великого затухання коливань, залежності ЛДК від деформацій було визначено за огинаючою віброграми вільних затухаючих коливань. При цьому для апроксимації експериментально одержаної огинаючої було застосовано згладжувальний сплайн, який проходить поряд отриманих значень максимальних амплітуд коливань системи за цикл. Він характеризується більшою плавністю (у сенсі коливань графіка функції та її похідної), порівняно з інтерполяційним сплайном, який проходить через вузли інтерполяції [8]. Найбільш раціональною з точки зору отримання «гладких» залежностей ЛДК від деформації виявилася апроксимація огинаючої віброграми у напівлогарифмічному масштабі. Таким чином, для визначення залежності ЛДК від деформації використовується така формула [2]:

$$\delta(\varepsilon_i) = -\frac{d}{dN} \ln \varepsilon(N), \quad (3)$$

де N – число циклів (як ціле, так і будь-яке дробове число).

Таким чином, для визначення ЛДК за формулою (3) достатньо обчислити першу похідну згладжувального сплайна. У представленій роботі його коефіцієнти отримано методом найменших квадратів.

Спосіб обчислення ЛДК за формулою (3) має велике значення при визначенні його залежності від амплітуди деформації для систем з дуже сильним затуханням. При цьому одержаний у такий спосіб ЛДК відноситься не до середньої деформації на ділянці ε_{av_i} (2), а до амплітуди ε_i , яка визначається дотичною до огинаючої віброграми. Таким чином досягається краща відповідність ЛДК до амплітуди циклічної деформації.

Представлені методи визначення амплітудно-залежного ЛДК були реалізовані у програмному забезпеченні установки Д-6 при автоматизованій обробці даних за формулами (1) і (3) для зразків матеріалу з односпрямованого вуглепластику при різних температурах.

Результати досліджень та їх аналіз. Згідно з постановкою задачі було проведено експериментальні дослідження з визначення впливу температури на дисипативні властивості призматичних зразків розміром $b \times h \times l = 2 \times 10 \times 225$ мм з односпрямованого вуглепластику. З обох кінців вони за допомогою накладок були потовщені до 5 мм та жорстко

закріплені в інерційних масах 2 (рис. 2). Волокна вуглецю були спрямовані вздовж зразка, довжина його робочої частини становила 130 мм. Дослідження проведено для п'яти однотипних зразків, виготовлених з однієї партії матеріалу. Об'ємна частка волокон вуглепластику в епоксидній матриці становить 0,5, густина матеріалу 1480 кг/см^3 .

Визначення залежностей ЛДК від амплітуди циклічної деформації $\varepsilon = (2 \dots 12) \cdot 10^{-4}$ проведено методом затухаючих коливань за умов чистого згину зразка матеріалу у діапазоні температури від 300 до 423 К за допомогою модернізованої установки Д-6, схема якої показана на рис. 2. Резонансні коливання механічної системи установки збуджувалися із наперед заданою амплітудою деформацій ε зразка з частотою, яка автоматично визначалася для різних температур дослідження. Так, при кімнатній температурі резонансна частота коливань механічної системи становила $(8,50 \pm 0,05) \text{ Гц}$.

Для забезпечення рівномірного розподілу температури по об'єму зразка він витримувався при її сталому значенні не менше 40 хвилин. Контроль розподілу температури проводився за допомогою трьох термопар К-типу розміщених вздовж робочої частини зразка. Реєстрація коливань механічної системи установки проводилася двома каналами – оптичним та тензометричним (див. рис. 2). Приклеєний до поверхні робочої частини зразка тензодавач використовувався як для тарування показань оптичного каналу реєстрації коливань механічної системи при кімнатній температурі, так і для контрольного запису віброграм затухаючих коливань до температури 353 К. Частота дискретизації сигналів кожного каналу складає 1 кГц.

Для кожного значення температури отримано по 10 віброграми затухаючих коливань. Обробку їх огинаючих проведено за формулою (4) з використанням згладжувальних сплайнів. На рис. 3 представлено експериментальні дані залежності ЛДК від деформації для різної температури зразка, їхні середні значення та середньоквадратичне відхилення (показані вертикальними відрізками).

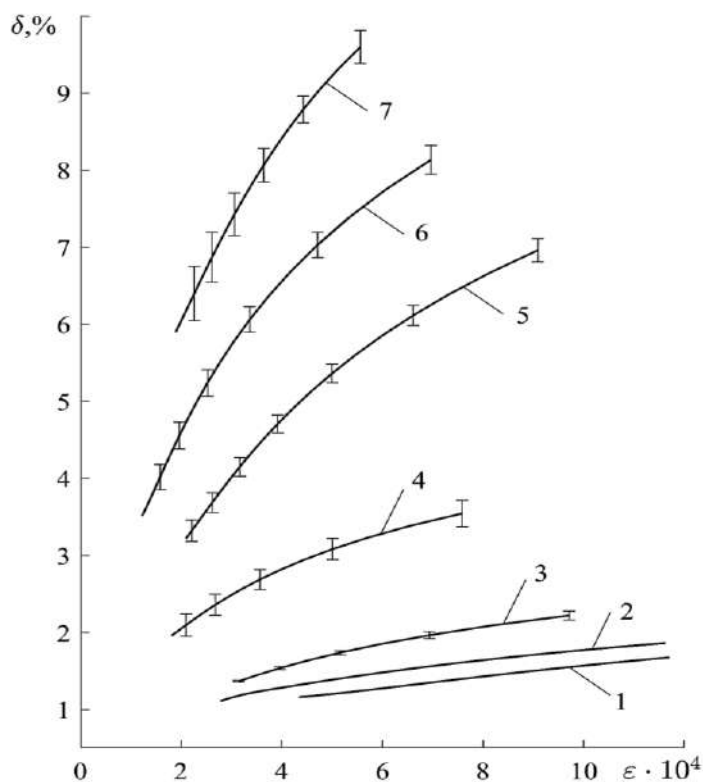


Рис. 3. Залежність ЛДК від деформації зразка з односпрямованого вуглепластику вздовж його волокон при різній температурі: $T = 300 \text{ К}$ (1), 353 К (2), 373 К (3), 393 К (4), 403 К (5), 413 К (6), 423 К (7)

Як і очікувалося, з підвищенням температури ЛДК зразка зростає. Так при температурі 423 К і деформації $5 \cdot 10^{-4}$ він збільшився майже у 8 разів. При цьому, як видно з рис. 3, дисипативні властивості досліджуваного матеріалу практично не змінюються до температури 353 К включно. Однак при подальшому підвищенні температури до 393 К відбувається порівняно стрімке зростання значень ЛДК і зміна характеру його амплітудної залежності, що вочевидь пов'язано із рухом молекул в полімерній матриці зразка вуглепластику, а також появою та зростанням його мікроструктурних пошкоджень. Такий же характер зміни дисипативних властивостей спостерігається при температурі склування (вітрифікації) матриці та після неї: 403 К, 413 К і 423 К (рис. 3). При подальшому зростанні температури до 433 К і 443 К отримано їх близькі значення, що вказує на перехід матриці композиту в гумоподібний стан та деградацію його пружних властивостей. Про це також свідчить отримана залежність від температури квадрата частоти f^2 вільних затухаючих коливань механічної коливальної системи, графік залежності якої в безрозмірній формі $\bar{f}^2 = f^2(T)/f_{300K}^2$ показана на рис. 4. Так встановлено, що при температурі 433 К жорсткість коливальної системи зменшилась приблизно на 10 %. Покажемо, що зміна характеру амплітудної залежності розсіювання енергії коливань може бути ефективно застосована для аналізу структурної цілісності досліджуваного зразка. З цією метою розглянемо деякий інтегральний параметр α , який визначимо за відношенням приросту ЛДК $\Delta\delta$ до деформації $\Delta\varepsilon$. Для цього графіки залежностей ЛДК від деформації, представлені на рис. 3, апроксимуємо відрізками, які з'єднують їх мінімальне (ε_{\min}) і максимальне (ε_{\max}) значення. У такому разі параметр α визначимо за формулою:

$$\alpha = \Delta\delta/\Delta\varepsilon = [\delta(\varepsilon_{\max}) - \delta(\varepsilon_{\min})]/(\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}).$$

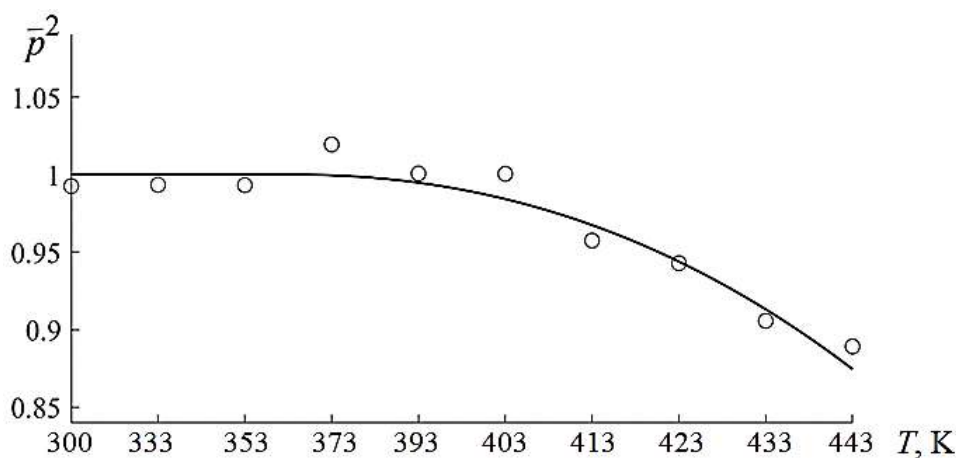


Рис. 4. Залежність відносного значення квадрату частоти вільних затухаючих коливань механічної системи установки Д-6 від температури

Для демонстрації ефективності застосування параметра α у якості інтегральної характеристики структурної цілісності зразка його залежність від температури, представлена на рис. 5 (світлі стовпчики) у безрозмірній формі ($\bar{\alpha}$), порівняно з відповідною залежністю для ЛДК ($\bar{\delta}$) (темні стовпчики):

$$\bar{\alpha} = \alpha(T)/\alpha_{300K}, \quad \bar{\delta} = \delta(T)/\delta_{300K}. \tag{4}$$

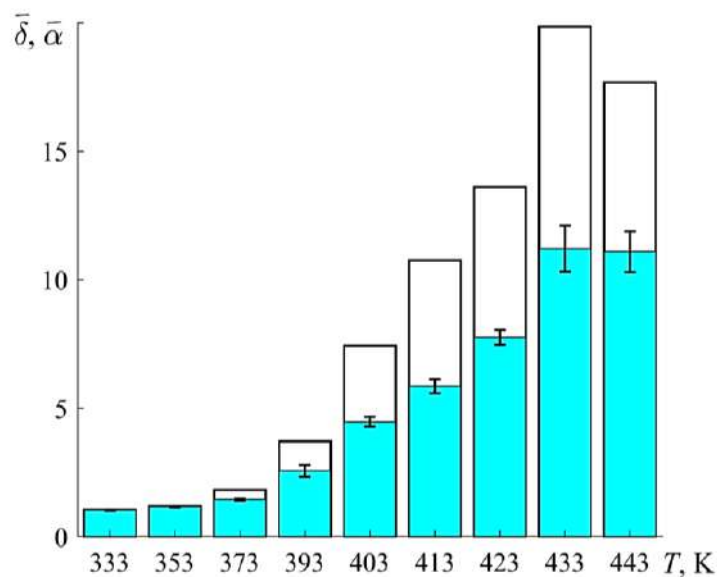


Рис. 5. Залежності відносних значень ЛДК $\bar{\delta}$ (темні стовпчики) та параметра $\bar{\alpha}$ (світлі стовпчики) для зразка з односпрямованого вуглепластика від температури при деформації $\varepsilon = 5 \cdot 10^{-4}$ вздовж волокон

Одержані залежності (рис. 5) для ЛДК підтвердили висновки роботи [6] щодо більшої чутливості до пошкоджень характеристик розсіювання енергії, порівняно зі зміною частоти коливань системи. Так, при температурі зразка 433 К його ЛДК зріс в 10 разів, порівняно з його значенням при кімнатній температурі. Водночас параметр $\bar{\alpha}$, який враховує вплив експлуатаційних чинників на характер амплітудної залежності розсіювання енергії коливань, виявився ще більш чутливим до зміни температури. Так, при температурі 373 К цей параметр на 20 % більше за відносно значення ЛДК $\bar{\delta}$, а для температури вище 393 К з діапазону, що розглядається, він більше за нього на 50 % (рис. 6). Таким чином, параметр α характеризує структурну цілісність зразків матеріалу навіть при незначних рівнях її порушення внаслідок нагрівання та циклічного деформування.

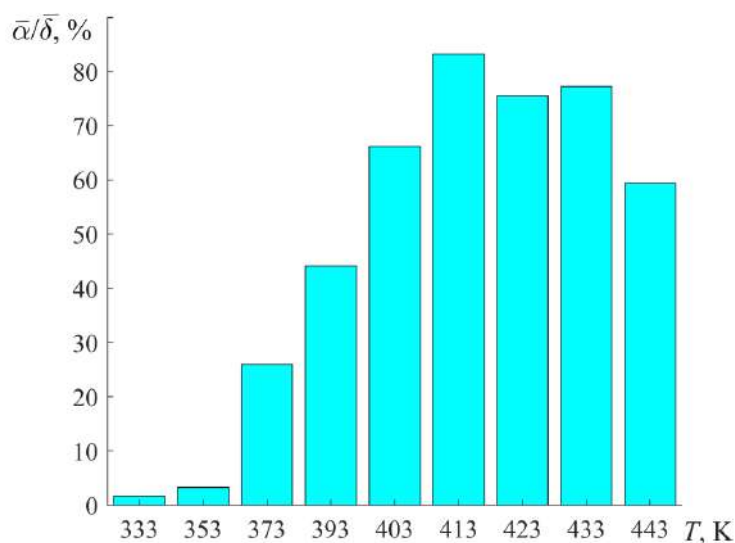


Рис. 6. Відношення безрозмірних значень параметра $\bar{\alpha}$ до ЛДК $\bar{\delta}$ при різній температурі

Висновки. У роботі отримав розвиток метод експериментальних досліджень дисипативних властивостей композитних матеріалів, основною характеристикою якого є мінімізація сторонніх втрат енергії та забезпечення рівномірного розподілу деформацій вздовж робочої частини зразків за умов їх чистого згину.

За результатом проведеного комплексу експериментальних досліджень з визначення дисипативних властивостей призматичних зразків з односпрямованого вуглепластика встановлено залежності ЛДК від деформації у діапазоні від $2 \cdot 10^{-4}$ до $12 \cdot 10^{-4}$ для температур від 300 К до 423 К.

Для аналізу впливу температури на дисипативні властивості композиту, запропоновано параметр, який визначено за приростом ЛДК до деформації. Показано, що він кількісно краще, порівняно з відносним зростанням ЛДК та падінням частоти коливань зразка, характеризує структурну цілісність зразка матеріалу навіть при відносно невеликому її порушенні внаслідок нагрівання і одночасному циклічному деформуванні.

Отримані експериментальні дані та представлений метод досліджень дисипативних властивостей матеріалів можуть бути використані як довідкові дані при проектуванні нових зразків техніки та при розробці математичних моделей композитних конструктивних елементів, працюючих при динамічних навантаженнях.

Представлені методологічні підходи можуть бути застосовані для визначення впливу експлуатаційних чинників на демпфірувальну здатність композитних матеріалів довільної структури.

Робота підготовлена в межах проекту «Розробка методів забезпечення демпфірувальної здатності сучасних машинобудівних конструкцій як критерію їх функціональної роботоздатності в екстремальних умовах експлуатації», що виконується за напрямом «Підтримка пріоритетних для держави наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок» бюджетної програми «Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень» у 2022-2023 рр. (Договір № 240/2022-03/02).

Список використаних джерел

1. Писаренко Г. С. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов. Справочник / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – К. : Наук. думка, 1971. – 375 с.
2. Яковлев А. П. Диссипативные свойства неоднородных материалов и систем / А. П. Яковлев. – К. : Наук. думка, 1985. – 248 с.
3. Adams R. D. Damping in composites / R. D. Adams // Materials Science Forum. – 1993. – Vols. 119-121. – Pp. 3-16.
4. Plunkett R. Damping mechanisms in fiber reinforced laminates / R. Plunkett // Mechanics of Composite Materials. – 1983. – P. 93-104.
5. Evaluation of the effective characteristics of energy dissipation in layered composites / O. L. Derkach, A. P. Zinkovskii, K. V. Savchenko, Ye. O. Onyschenko // Material Science. – 2022. – Vol. 57, No. 6. – Pp. 782-791.
6. On the application of energy method for the numerical evaluation of the effective dissipative properties of composites / O. Derkach, A. Zinkovskii, Ye. Onyschenko, V. Kobzar // 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). – 2022. – Pp. 343-347.
7. Gibson R. F. Dynamic mechanical behavior of fiber-reinforced composites: measurement and analysis / R. F. Gibson // J. Composite Materials. – 1976. – Vol. 10. – P. 325-341.
8. Хильчевский В. В. Несовершенная упругость материалов при сложных колебаниях / В. В. Хильчевский, В. Г. Дубенец, Д. В. Василевич. – К. : Вища школа, 1991. – 157 с.

References

1. Pisarenko, G.S., Yakovlev, A.P., & Matveev, V.V. (1971). *Vibropogloschayushchie svoystva konstruktivnykh materialov. Spravochnik [Vibration-absorbing properties of structural materials. Directory]*. Nauk. dumka.
2. Yakovlev, A.P. (1985). *Dissipativnyie svoystva neodnorodnykh materialov i sistem [Dissipative properties of inhomogeneous materials and systems]*. Nauk. dumka.

3. Adams, R.D. (1993). Damping in composites. *Materials Science Forum*, 119-121, 3-16.
4. Plunkett, R. (1983). Damping mechanisms in fiber reinforced laminates. *Mechanics of Composite Materials*, 93-104.
5. Derkach, O.L., Zinkovskii, A.P., Savchenko, K.V., & Onyschenko, Ye.O. (2022). Evaluation of the effective characteristics of energy dissipation in layered composites. *Material Science*, 57(6), 782–791.
6. Derkach, O., Zinkovskii, A., Onyschenko, Ye., & Kobzar, V. (2022). On the application of energy method for the numerical evaluation of the effective dissipative properties of composites. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, 343-347.
7. Gibson, R. F. (1976). Dynamic mechanical behavior of fiber-reinforced composites: measurement and analysis. *J. Composite Materials*, 10, 325-341.
8. Khilchevskii, V.V., Dubenets, V.V., & Vasilevich, D.V. (1991). *Nesovershennaya uprugost materialov pri slozhnyih kolebaniyah [Imperfect elasticity of materials under complex vibrations]*. Vischa shkola.

Отримано 06.12.2022

UDC 534.282:621.002.3

Oleh Derkach¹, Valerii Kobzar²

¹PhD in Technical Sciences, Senior Researcher, Head of Department of Vibrations and Vibrational Reliability
G.S.Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: derkach@ipp.kiev.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6783-8516>

ResearcherID: H-2074-2014. Scopus Author ID: [57217115124](https://orcid.org/0000-0002-6783-8516)

²PhD Student, G.S.Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: kobzar@ipp.kiev.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5929-458X>. ResearcherID: [HGE-9205-2022](https://orcid.org/0000-0002-5929-458X)

STUDY OF THE INFLUENCE OF ELEVATED TEMPERATURE ON THE DISSIPATIVE PROPERTIES OF UNIDIRECTIONAL CFRP

An experimental method for determination of composite materials dissipative properties, the main characteristic of which is the minimization of external energy losses and ensuring uniform distribution of deformations along the specimen working part under the pure bending condition has been developed. The scheme of the modernized experimental setup is presented. Its mechanical system represents a closed circuit in which the energy in material specimen under flexural vibrations is dissipated. Automated testing and registration of vibration characteristics were carried out by the method of attenuating vibrations at different temperatures.

Based on the results for a set of experimental studies on the determination of the dissipative properties of unidirectional CFRP specimens under the pure bending conditions, the dependencies of the logarithmic decrement of vibrations on the relative deformation in the range $(2...12) \cdot 10^{-4}$ for temperatures from 300 K to 423 K was established.

To analyze the effect of temperature on the dissipative properties of the composite, a parameter is proposed that is determined by the increment of the logarithmic decrement of vibrations (LDV) before deformation. It is shown that it is a more informative indicator of the structural integrity of carbon fiber samples, even with a relatively small violation of it due to heating and simultaneous cyclic deformation, compared to the relative growth of the LDV and the drop in the vibration frequency.

The obtained experimental data and the presented method of investigation the dissipative properties of materials can be used as a directory data in the design of new models of equipment and in the development of mathematical models of composite structural elements operating under dynamic loads and elevated temperatures.

Keywords: damping of vibrations; unidirectional CFRP; logarithmic decrement of vibrations; temperature; structural integrity.

Fig.: 6. References: 8.

*Serhii Lapkovsky¹, Liudmyla Danylova², Volodymyr Frolov³,
Vasyl Prykhodko⁴, Maksym Gladyskiy⁵*

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: Lapkovsky@ukr.net, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-9870-9231>, ResearcherID: [HCH-3837-2022](https://orcid.org/HCH-3837-2022)

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: ldanylova@outlook.com, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4442-3959>, ResearcherID: [ADU-9265-2022](https://orcid.org/ADU-9265-2022)

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: v.k.frolov@gmail.com, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-3697-286X>, ResearcherID: [ACH-0071-2022](https://orcid.org/ACH-0071-2022)

⁴PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: privas@bigmir.net, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1852-3777>, ResearcherID: [HDM-7277-2022](https://orcid.org/HDM-7277-2022)

⁵PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: gladsky@gmail.com, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4547-7131>, ResearcherID: [Q-1624-2017](https://orcid.org/Q-1624-2017)

GEOMETRIC ASPECT OF CHOOSING MODELS OF BASIC TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

Now methodological aspect of choosing machine tools is still not worked out, we can clearly conclude that it is a very urgent task that needs a special attention and responsibility. The purpose of the article is to create methodological foundations for a more justified choice of models of metal cutting machines when designing technological processes of manufacturing parts. It is proved in the article that the geometry of surfaces is the dominant feature of the items in the solution of the problem of choosing a particular model of machine tool, which can provide a process for the manufacture of the part.

Keywords: choice; equipment; machine tool; part; geometric characteristics.

Fig.: 5. References: 8.

Relevance of the research topic. Synthesis of technological processes refers to the kind of design work, in which the end result is directly dependent on the correctness of the decision-making at every stage of the design. Throughout the set of solved design tasks the selection of main process equipment is very important, since it has a decisive influence on the degree of effectiveness of the design decisions [1; 2].

Selection of equipment for production is a very difficult task, and a good training and accumulated engineering expertise and special skills are needed for its solution. Every model of the equipment should be selected based on the specific needs and problems of production. It is necessary to solve the problem, based on factors such as the possibilities and needs of a particular enterprise [3, 4].

Formulation of the problem. In the development of engineering production various problems were constantly associated with the manufacture of products by cutting, in connection with which, in parallel with the process, the design of machine tools also constantly changed, developed and improved, which led to an enormous number of types and models of equipment [1; 3].

At the enterprises, the core process equipment includes a large number of machine tools and machining centers, which are designed to perform a variety of different technological challenges, and together constitute a complex technological production.

Like any industrial equipment, metal-cutting machine is the key part of the production process that determines the success and profits or losses and the failure of the company after the introduction of technological processes of manufacture [1; 3; 4]. On the basis of the above, and based on the fact that methodological aspect of choosing machine tools is still not worked out, we can clearly conclude that it is a very urgent task that needs a special attention and responsibility.

Analysis of recent research and publications. In modern industrial practice in the selection of main process equipment, design engineers are often guided only by their professional knowledge and experience, and sometimes simply rely on their own intuition. At first look, the

state of affairs in this area is very interesting, because it does not require the development of a formalized methodology for the selection process, establishment of an appropriate mathematical software, information retrieval systems, databases, models of equipment, etc. In addition, the approach has relatively high efficiency of project decision-making, and the fact that the result of the selection is subjective, with highly skilled designer it is usually characterized by a high rationality [1; 3; 4]. However, despite a number of the above-mentioned advantages of the approach to the procedure for choosing a particular model of machine tool, this approach certainly has some negative traits, among which, first, you need consider the following:

1) despite the experience of the design engineer, who makes the final decision on the choice, due to a number of different reasons (human factors, psychological inertia, etc.), there is always a good chance of making a wrong decision;

2) constant and frequent upgrading of the core process equipment by machine tool manufacturers excludes possibility for designer to monitor the appearance of new models of machine tools, which is why there is a high probability of making inappropriate decisions;

3) the absence of formalized procedures for the selection of models of machine tools creates significant barriers to automation of solving the problem by means of CAD/CAM/CAE, though, at the moment, no one can deny that the modern concept of integrated automation engineering design is one of the most important trends in the development of modern engineering activities.

Highlighting unexplored parts of the general problem. The above list of negative traits of approach to the choice of a particular model of the main process equipment can be continued, but even only three of the above facts simply negate a number of positive attributes of the approach, which indicates that it is necessary to decisively reject the latter as in the case of an unfortunate choice of model, the machine can doom the whole idea of technological preparation of production to failure.

The purpose of the article is to create methodological foundations for a more justified choice of models of metal cutting machines when designing technological processes of manufacturing parts.

We can assume that in the case of development and use of a formalized methodology for selecting models of machine tools and the establishment of appropriate mathematical software, a significant positive effect will be achieved through:

1) increasing degree of making optimal design decisions;

2) a significant reduction in the probability of erroneous or inappropriate design decisions;

3) the efficiency of optimal design solutions;

4) ability to work in a single information space, where access to information can be carried out simultaneously in several engineering groups: technologists, designers, employees of various departments, which will make optimal use of collective experience;

5) operational monitoring the appearance of the global machine tool market of new models of basic technological equipment and the immediate inclusion them in the range of alternative design solutions;

6) significant reduction of the potential impact of such negative phenomena as human factors, psychological inertia, etc.

Presenting main material. In catalogs, brochures or websites of manufacturers and suppliers of machine tools, you can find a variety of models with a description of the technical characteristics and technological capabilities. It's not very easy to find quickly a huge amount of background information. In addition, it's not comfortable that different suppliers of the same models of equipment represent the information somewhat differently. As evidence, consider the sites of three companies-suppliers of the world famous metalworking equipment company Haas Automation, Inc. (USA) [5 - 7]:

1) Abplanalp (Poland, Switzerland, Ukraine, Lithuania, Estonia, Uzbekistan, Kazakhstan);

2) Abamet (Russia, Belarus);

3) Teximp (Switzerland, Czech Republic, Slovakia, Slovenia, Croatia, Serbia, Bosnia and Herzegovina, Bulgaria, Romania).

On these sites, consider the information provided by these companies about turning centers. Therefore, the site [5] provides the following parameters of machines:

- 1) swing diameter (over front apron, over cross slide, over tailstock);
- 2) capacities (chuck size, maximal cutting diameter, maximal cutting length, standard bar capacity);
- 3) travels and feedrates (X axis, Z axis, rapids on X, rapids on Z, maximal thrust X, maximal thrust Z);
- 4) spindle (maximal rating, maximal speed, maximal torque, spindle nose, spindle bore);
- 5) turret (number of tools, OD vs ID tools, boring bar rear clearance);
- 6) general (air required, coolant capacity).

The site [6] provides the following parameters of machines:

- 1) workspace of a machine tool (swing diameter over front apron, swing diameter over cross slide, maximal cutting diameter, maximal cutting length);
- 2) spindle options (spindle nose, maximal speed, maximal torque, maximal rating, spindle bore, standard bar capacity, chuck diameter);
- 3) feedrates options (X axis travels, Z axis travels, rapids, maximal thrust X, maximal thrust Z);
- 4) turret options (type, number of tools, VDI type, size of lathe tool, tool indexing time);
- 5) accuracy options (positioning accuracy, repeatability);
- 6) CNC options;
- 7) connection parameters and settings;
- 8) design features;
- 9) basic equipment.

At request of the features about HAAS machines on site [7] the readdressing occurs on site [8], where the following characteristics are presented:

- 1) swing diameter (over front apron, over cross slide, over tailstock);
- 2) capacities (chuck size, maximal cutting diameter, maximal cutting length, bar capacity);
- 3) travels and feedrates (X axis, Z axis, rapids on X, rapids on Z, maximal thrust X, maximal thrust Z);
- 4) spindle (maximal rating, maximal speed, maximal torque, spindle nose, spindle bore).

After detailed analysis in the above characteristics of the machine tool x_{MT}^{Σ} , it can be concluded that the latter can be divided into two main groups:

- 1) x_{MT}^{part} — characteristics of machine tool, which are determined by the characteristics of the part y_{part} , which is planned to be processed on this machine ($x_{MT}^{part} \subset x_{MT}^{\Sigma}$);
- 2) x_{MT}^{own} — own characteristics of the machine tool ($x_{MT}^{own} \subset x_{MT}^{\Sigma}$; $x_{MT}^{own} = \neg x_{MT}^{part}$; $x_{MT}^{own} \cap x_{MT}^{part} = \emptyset$; $x_{MT}^{own} \cup x_{MT}^{part} = x_{MT}^{\Sigma}$).

Exactly, the first group of characteristics x_{MT}^{part} defines possibility to manufacture the workpiece on the machine tool of that model.

Let us analyze the composition of the characteristics of this group and coordinate it with the basic design and technological characteristics of the parts y_{part} (Fig. 1).

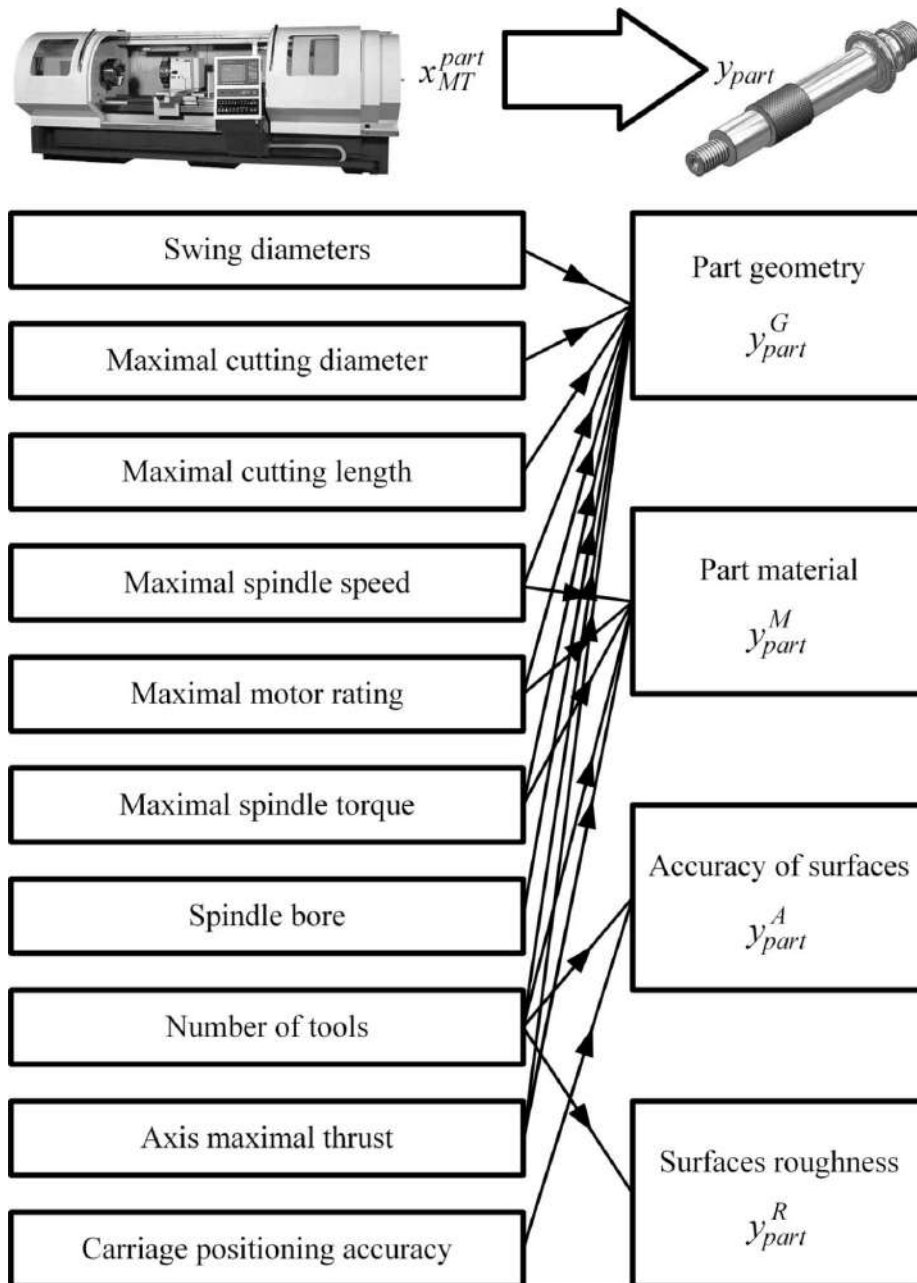


Fig. 1. Linkages between and x_{MT}^{part} and y_{part}

Source:designed by the authors.

Making connections between data inversion x_{MT}^{part} and y_{part} in Fig. 1 (Fig. 2), we can conclude that the geometry of surfaces is the dominant feature of the items in the solution of the problem of choosing a particular model of machine tool, which can provide a process for the manufacture of the part.

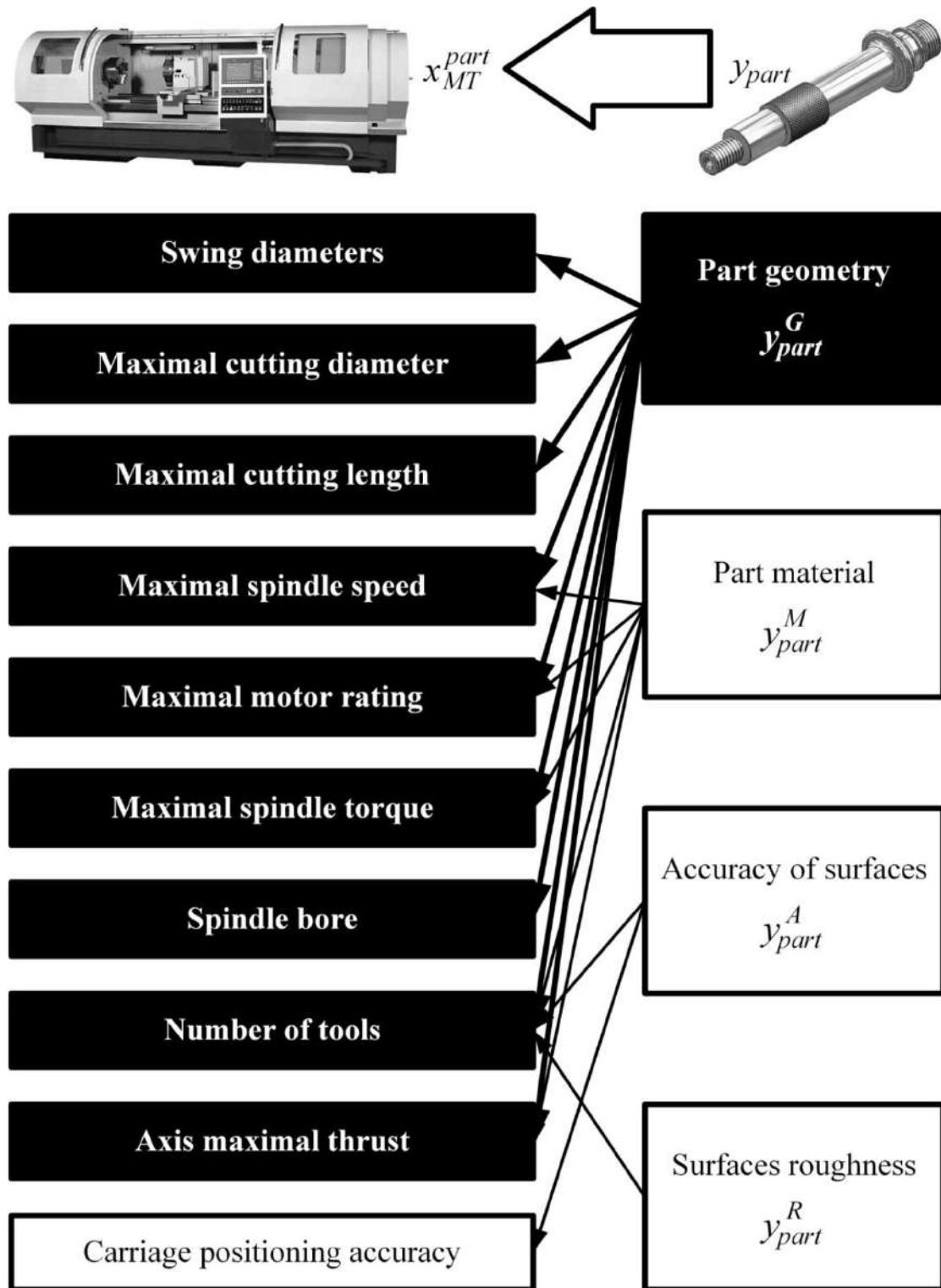


Fig. 2. Inversion links between x_{MT}^{part} and y_{part}

Source:designed by the authors.

The conclusion is clearly illustrated in Fig. 3, which shows quantitative characteristic link-ages between y_{part} and x_{MT}^{part} .

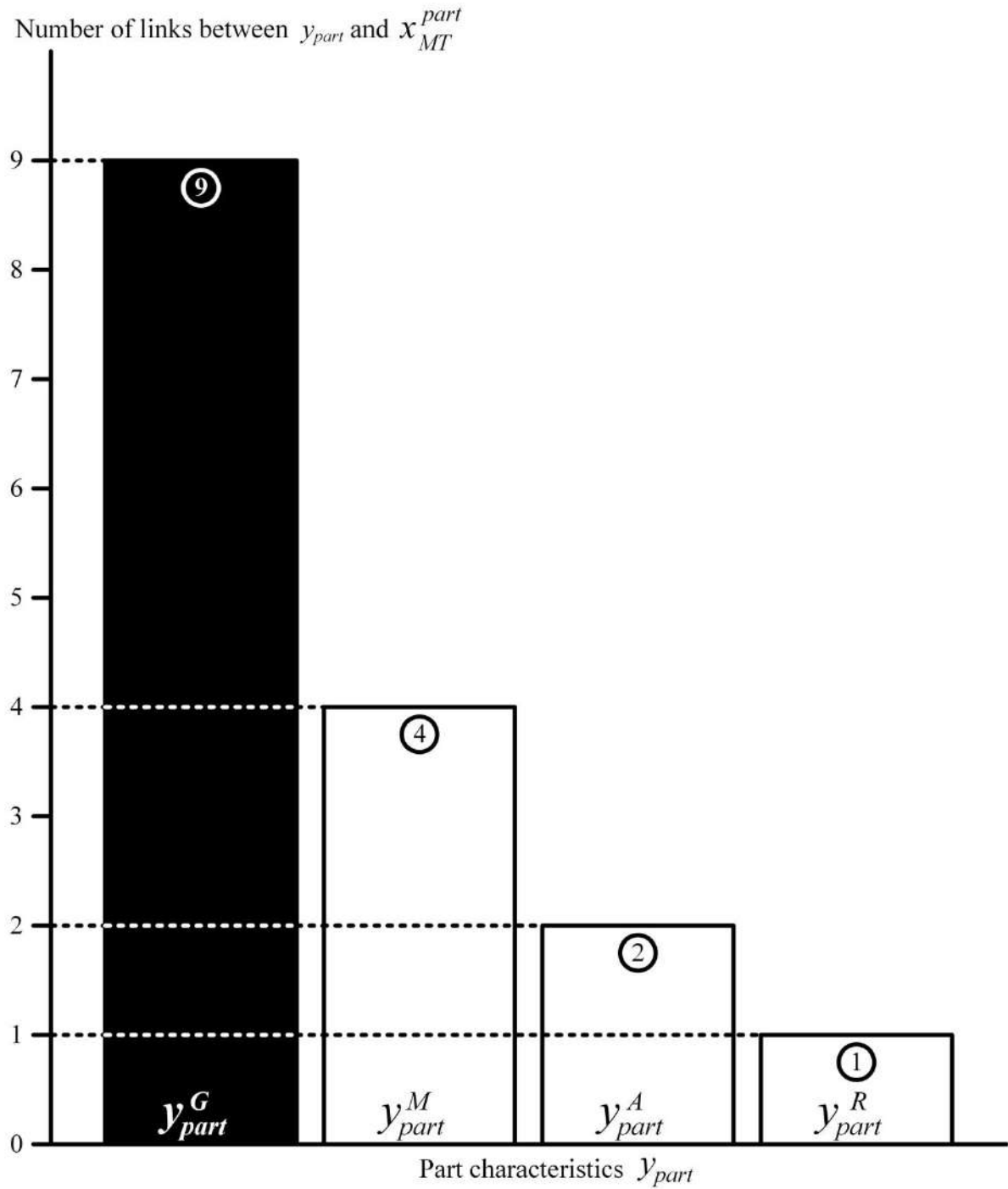


Fig. 3. Quantification of links between y_{part} and x_{MT}^{part} (as shown in Fig. 2)

Source: designed by the authors.

In Fig. 4 and Fig. 5 illustrates the stages of choosing models of metal cutting machines depending on the parameters of the workspace and the capacities of the turret.

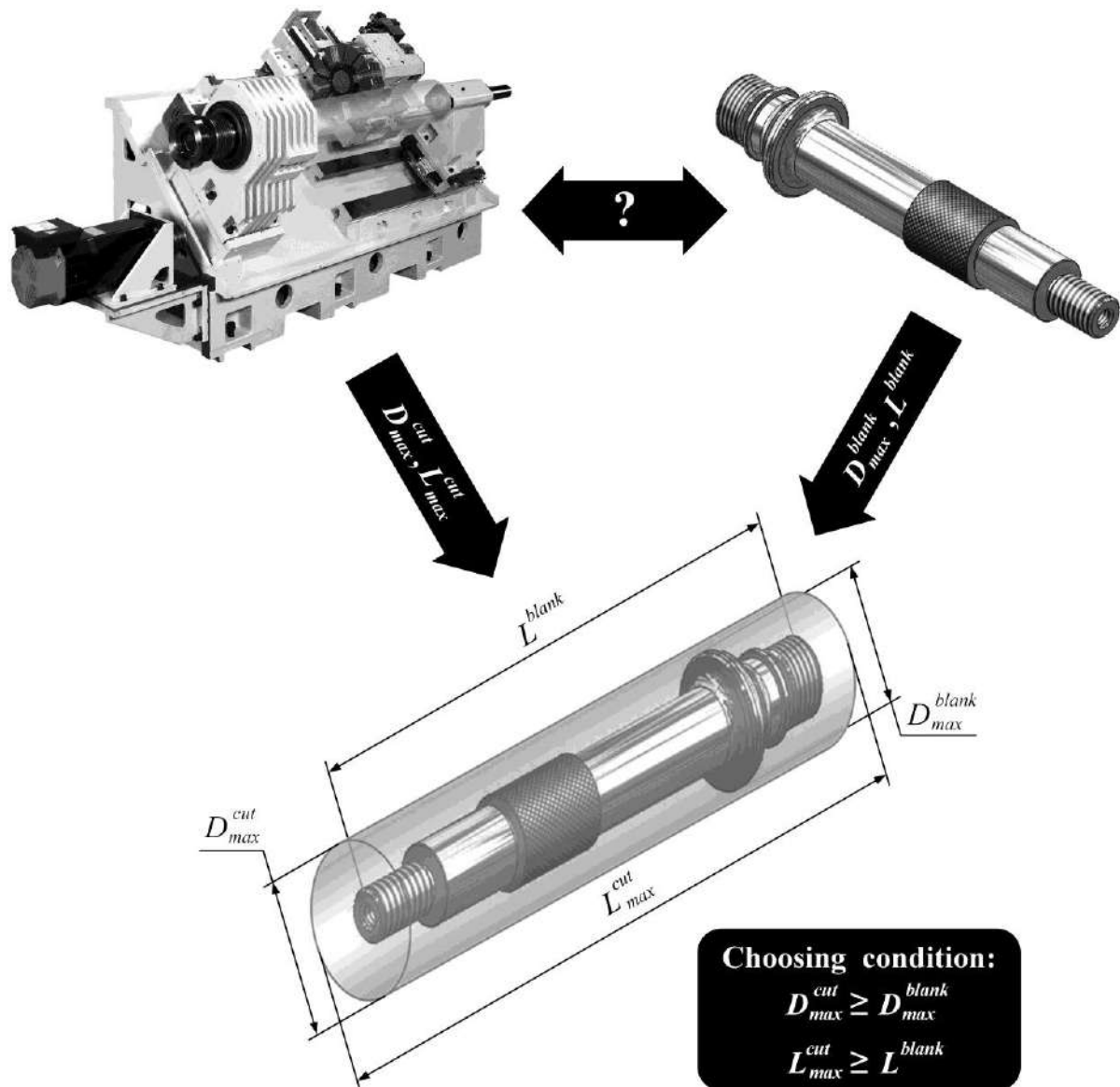


Fig. 4. The choosing of metal cutting machines depending on the parameters of the work-space: D_{max}^{cut} - maximal cutting diameter, L_{max}^{cut} - maximal cutting length, D_{max}^{blank} - maximal blank diameter, L^{blank} - blank length

Source:designed by the authors.

Conclusions. Thus, in view of the above, it is possible to draw conclusions:

1) in the designing of a formalized methodology for selecting models of machine tools and the creation of an appropriate mathematical software, special attention should be paid to the geometric characteristics of the surface of parts;

2) given requirement should be satisfied not only with the choice of types of lathes, but also in the choice of specific models of machines of all classification groups.

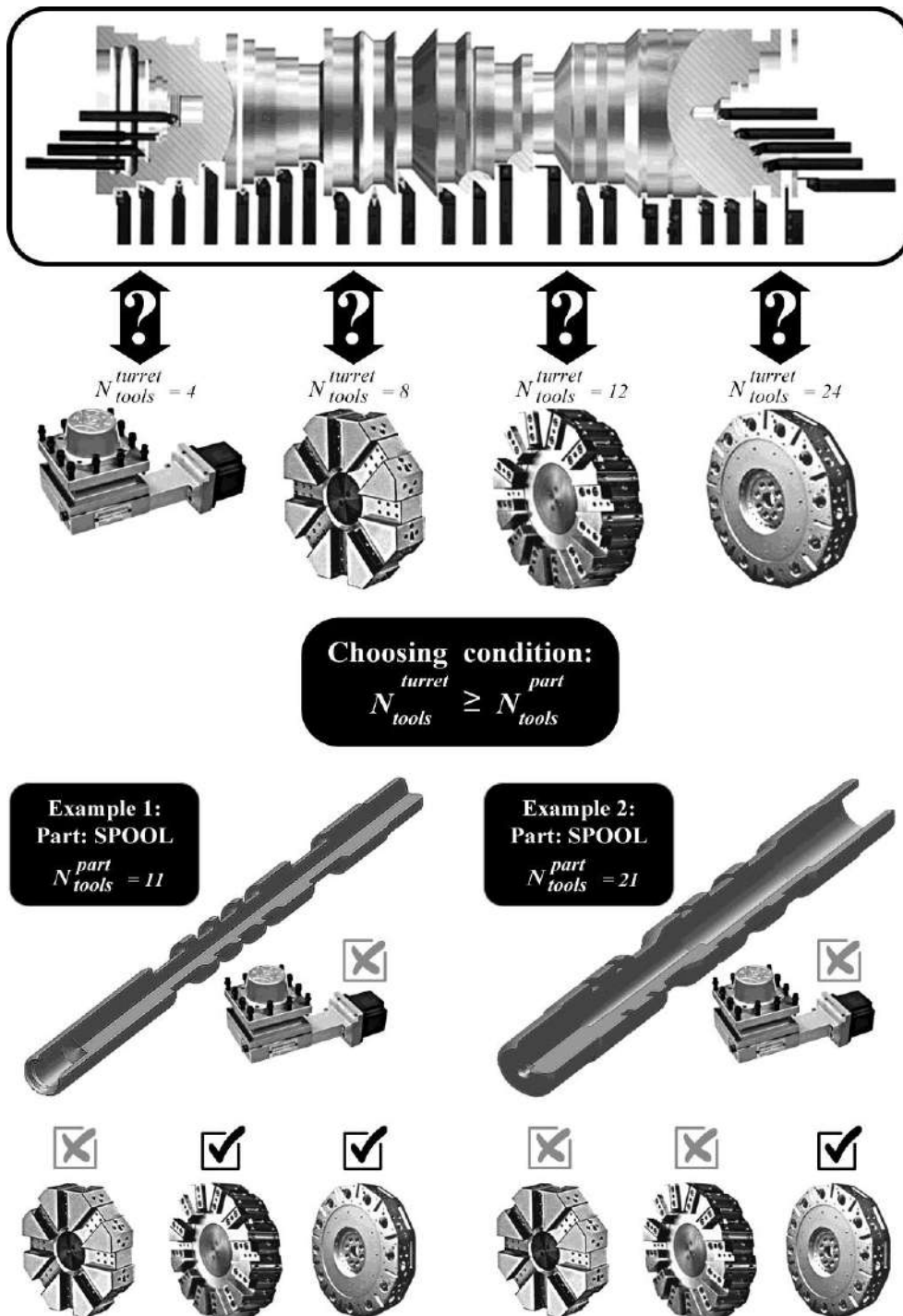


Fig. 5. The choosing of metal cutting machines depending on the parameters of the capacities of the turret: N_{tools}^{turret} – maximal number of cutting tools in the turret, N_{tools}^{part} – number of cutting tools for the production of the part

Source:designed by the authors.

References

1. Elperin, I.V., Pupena, O.M., Sidletskyi, V.M., Shved, S.M. (2021). *Avtomatyzatsiia vyrobnychykh protsesiv [Automation of production processes]*. Lira-K.
2. Bondarenko, S.H. (2021). *Osnovy tekhnologii mashynobuduvannia [Fundamentals of mechanical engineering technology]*. Mahnoliia.
3. Zaliubovskiy, M.H., Malyshev, V.V. (2020). *Mashyny ta obladnannia pidpriemstv [Machines and equipment of enterprises]*. Universytet “Ukraine”.

4. Dykan, V.L. (Ed.), Kalabukhin, Yu.Ie., Kalycheva, N.Ie. (2020). *Tekhnolohiia mashynobudivnykh pidpriemstv [Technology of machine-building enterprises.]*. UkrDUZT.
5. Informatsiia pro produkt [Product information]. (n.d.). *Tokarni verstaty z ChPK HAAS [Lathes with CNC HAAS]*. <https://abplanalp.ua/tokarni-verstaty-chpu/haas>.
6. Osnovnyie parametry [Basic parameters]. (n.d.). *Tokarnyie stanki s ChPU po metallu – CNC lathes for metal*. <https://www.abamet.ru/catalog/metallorzhushhie/tokarnye-chpu>.
7. CNC Lathe. (n.d.). Turning. *CNC Lathes by Teximp*. <https://www.teximp.com/en/products/turning>.
8. Standart Lathes. (n.d.). *ST Series Turning Centers*. <https://www.haascnc.com/machines/lathes/st.html>.

Список використаних джерел

1. Автоматизація виробничих процесів / І. В. Ельперін, О. М. Пупена, В. М. Сідлецький, С. М. Швед. – К. : Ліра-К, 2017. – 378 с.
2. Бондаренко С. Г. Основи технології машинобудування / С. Г. Бондаренко. – Львів : Магнолія 2006, 2021. – 500 с.
3. Залюбовський М. Г. Машини та обладнання підприємств / М. Г. Залюбовський, В. В. Малишев. – К. : Університет «Україна», 2020. – 120 с.
4. Дикань В. Л. Технологія машинобудівних підприємств : підручник / В. Л. Дикань, Ю. Є. Калабухін, Н. Є. Каличева. – Х. : УкрДУЗТ, 2020. – 387 с.
5. Токарні верстати з ЧПК HAAS. Інформація про продукт [Електронний ресурс] // Абпланалп Україна. – Режим доступу: <https://abplanalp.ua/tokarni-verstaty-chpu/haas>.
6. Токарные станки с ЧПУ по металлу. Основные параметры [Електронний ресурс] // Abamet. – Режим доступу: <https://www.abamet.ru/catalog/metallorzhushhie/tokarnye-chpu>.
7. Turning. CNC Lathes by Teximp. CNC Lathe [Електронний ресурс] // Abamet. – Режим доступу: <https://www.teximp.com/en/products/turning>.
8. ST Series Turning Centers. Standart Lathes [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.haascnc.com/machines/lathes/st.html>.

Отримано 11.10.2022

УДК 621.91.01

Сергій Лапковський¹, Людмила Данилова², Володимир Фролов³, Василь Приходько⁴, Максим Гладський⁵

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: Lapkovsky@ukr.net. ORCID <https://orcid.org/0000-0002-9870-9231>. ResearcherID: [HCH-3837-2022](https://orcid.org/HCH-3837-2022)

²кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: ldanylova@outlook.com. ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4442-3959>. ResearcherID: [ADU-9265-2022](https://orcid.org/ADU-9265-2022)

³кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: v.k.frolov@gmail.com. ORCID <https://orcid.org/0000-0002-3697-286X>. ResearcherID: [ACH-0071-2022](https://orcid.org/ACH-0071-2022)

⁴кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: privas@bigmir.net. ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1852-3777>. ResearcherID: [HDM-7277-2022](https://orcid.org/HDM-7277-2022)

⁵кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: gladsky@gmail.com. ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4547-7131>. ResearcherID: [Q-1624-2017](https://orcid.org/Q-1624-2017)

ГЕОМЕТРИЧНИЙ АСПЕКТ ВИБОРУ МОДЕЛЕЙ ОСНОВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

У процесі розвитку машинобудівного виробництва постійно виникали різні завдання, пов'язані з виготовленням виробів різанням, у зв'язку з чим, паралельно з цим процесом, конструкції металорізальних верстатів також постійно змінювалися, розвивалися та вдосконалювалися, що призвело до величезної кількості типів та моделей обладнання.

Вибір обладнання для організації виробництва є дуже непростим завданням, тому що для вирішення останнього необхідні й хороша професійна підготовка, і певний багаж накопиченого інженерного досвіду, і спеціальні навички. Кожну модель обладнання необхідно вибирати, виходячи з конкретних потреб та завдань виробництва. Як будь-яке промислове обладнання, металорізальний верстат є тією ключовою ланкою процесу виробництва, яка визначає прибуток і успіх або збитки та невдачу підприємства після впровадження розробленого технологічного процесу виготовлення виробу.

Дотепер методологічний аспект вирішення задачі вибору металорізальних верстатів ще недостатньо відпрацьований, тому це питання є дуже актуальним завданням, підходити до вирішення якого необхідно з особливою увагою та відповідальністю.

У сучасній виробничій практиці при виборі основного технологічного обладнання інженери-проектувальники дуже часто керуються лише своїми професійними знаннями та накопиченим досвідом, а іноді й просто покладаються на власну інтуїцію. Такий підхід, безумовно, має і певні негативні риси.

Метою статті є створення методологічних основ для більш обґрунтованого вибору моделей металорізальних верстатів при проєктуванні технологічних процесів виготовлення деталей.

У статті доведено, що саме геометрія поверхонь деталі є домінуючою характеристикою деталі при вирішенні задачі вибору конкретної моделі металорізального верстата, який може забезпечити процес виготовлення цієї деталі.

При розробленні формалізованої методології вибору моделей металорізальних верстатів та створенні відповідного програмно-математичного забезпечення особливу увагу необхідно приділяти геометричним характеристикам поверхонь деталі. Ця вимога повинна виконуватися не лише при виборі моделей верстатів токарної групи, але й при виборі конкретних моделей верстатів усіх класифікаційних груп.

Ключові слова: вибір; обладнання; верстат; деталь; геометричні характеристики.

Рис.: 5. Бібл.: 8.

**Сергій Лапковський¹, Володимир Фролов², Людмила Данилова³,
Василь Приходько⁴, Максим Гладський⁵**

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: Lapkovsky@ukr.net, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-9870-9231>, ResearcherID: [HCH-3837-2022](https://orcid.org/HCH-3837-2022)

²кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: v.k.frolov@gmail.com, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-3697-286X>, ResearcherID: [ACH-0071-2022](https://orcid.org/ACH-0071-2022)

³кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: ldanylova@outlook.com, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4442-3959>, ResearcherID: [ADU-9265-2022](https://orcid.org/ADU-9265-2022)

⁴кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: privas@bigmir.net, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1852-3777>, ResearcherID: [HDM-7277-2022](https://orcid.org/HDM-7277-2022)

⁵кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: gladsky@gmail.com, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4547-7131>, ResearcherID: [Q-1624-2017](https://orcid.org/Q-1624-2017)

ТЕХНОЛОГІЧНІСТЬ – НЕВІД’ЄМНА СКЛАДОВА ЯКОСТІ ВИРОБУ

Відпрацювання виробу на технологічність – це невід’ємна частина робіт із забезпечення якості виробів. Стаття присвячена питанням можливості та доцільності проведення робіт із відпрацювання виробів на технологічність незалежно від робіт із відпрацювання виробів за іншими властивостями якості. Запропоновано використовувати методи теорії потенційної ефективності складних систем, яка допускає, що при конструюванні виробів можливо вести відпрацювання виробів на технологічність та за іншими окремими властивостями або показниками якості, але відпрацювання конструкцій виробів на технологічність та за іншими показниками якості менш ефективно, ніж одночасне відпрацювання за всіма показниками якості.

Ключові слова: виріб; якість; технологічність; складна система; потенційна ефективність.

Рис.: 4. Бібл.: 8.

Актуальність теми дослідження. Перед економікою кожної країни в теперішній час стоять проблеми, серед яких одно з перших місць посідає проблема забезпечення споживачів якісною продукцією вітчизняного виробництва, яка виготовлена з урахуванням їхніх вимог. При цьому очевидно, що перевага кількісних або якісних акцентів визначає напрями вдосконалення виробництва й перспективи його подальшого розвитку. Це так само правильно щодо як до окремого підприємства, так і до усієї держави загалом. Держава перетворюється на провідну, передову або навпаки – стає відсталою країною, «сировинним придатком» залежно від того, які чинники – кількісні і якісні – є стратегічними в розвитку її економіки. Країни світу, в економіці яких багато уваги приділяється якості (як з боку виробника, так і з боку споживача), досягли великих успіхів у розвитку й забезпеченні високого рівня життя своїх громадян. Це не лише зазвичай економічно розвинені країни (США, Японія, Канада, Німеччина та інші країни Західної Європи), але й Південна Корея, Тайвань, Гонконг, Таїланд тощо.

Постановка проблеми. Якість продукції визначається такими поняттями, як безпосередньо «якість», а також «властивість» та «характеристика». При визначенні поняття «якість» треба враховувати всі аспекти розуміння цього терміна. Так, згідно з [1], під якістю продукції мається на увазі множина характеристик продукції (або послуги чи процесу), що належать до її здатності задоволення встановлених та передбачуваних потреб.

Характеристика – це низка залежних та незалежних змінних, яка наведена у вигляді графіка, тексту, математичної формули, таблиці тощо. Характеристика зазвичай подається функціонально.

Властивість продукції являє собою таку особливість продукції, яка може виявлятися при її створенні, споживанні або експлуатації [1]. Властивість продукції виражається через показники якості, тобто через кількісні характеристики одного або кількох властивостей продукції, які входять у якість та розглядаються стосовно певних умов створення, споживання або експлуатації останньої. Процес формування якості продукції відбувається на всіх етапах її життєвого циклу [2] (рис. 1).

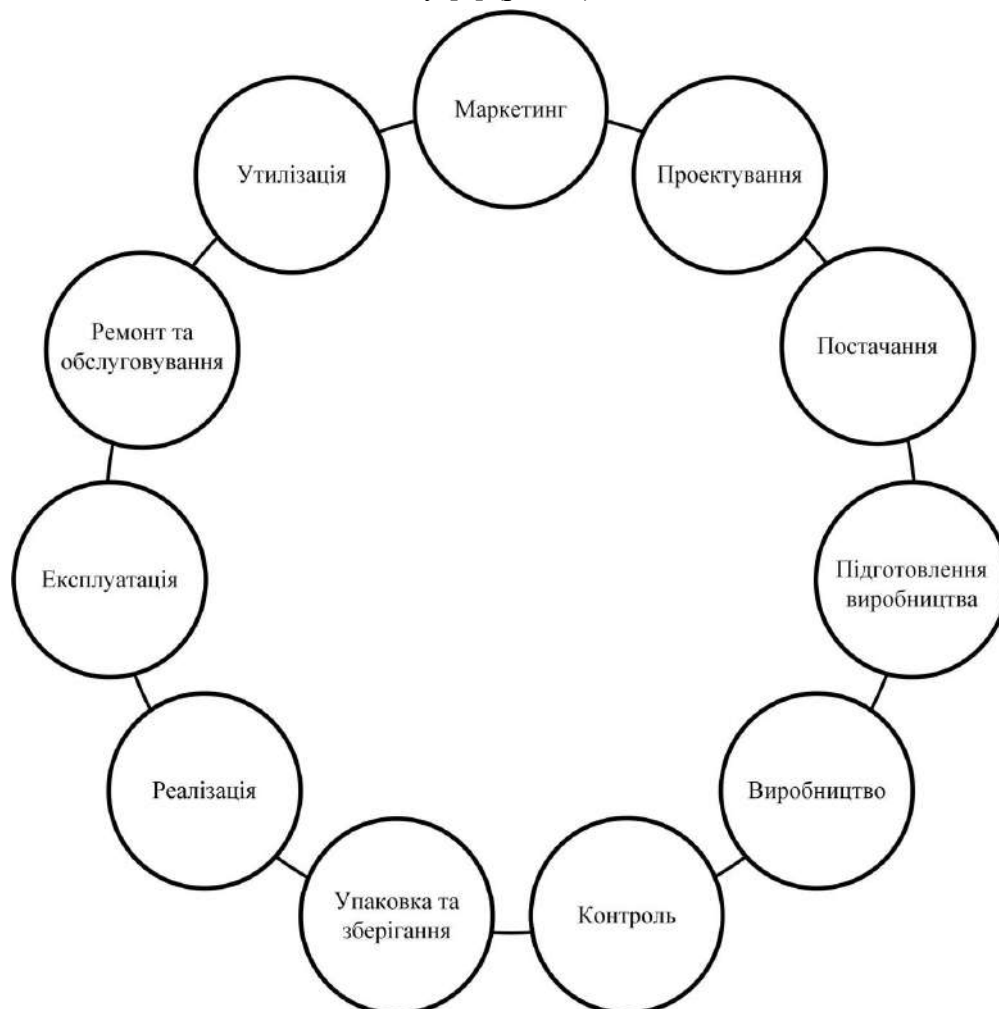


Рис. 1. Життєвий цикл продукції

Джерело: розроблено авторами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У багатьох зарубіжних літературних джерелах поняття якості подається у вигляді відповідності вимогам споживачів, у деяких випадках якість характеризується як здатність до експлуатації. Проте подібний підхід до визначення якості відбиває тільки один його аспект, тому що не враховує останній етап життєвого циклу виробу – його утилізацію [3].

Проте через такий однобокий підхід щодо питань якості як у закордонній, так і у вітчизняній літературі трапляється багато визначень цього поняття. Так, наприклад, у перших версіях міжнародного стандарту ISO серії 9000 якість визначалася як множина характеристик і властивостей послуги або продукції, які надають здатність задовольняти передбачувані або зумовлені потреби. У версії міжнародного стандарту ISO 2000 року якість визначається як міра, з якою множина власних характеристик виконують очікування або потреба, яка встановлена, є обов'язковою або зазвичай передбачається.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Показники якості – це кількісні вираження одного або декількох властивостей або характеристик виробу відносно конкретних умов його створення й експлуатації. Заходи, які спрямовані на покращення якості продукції, обов’язково повинні бути комплексними та всебічно охоплювати заходи щодо підвищення якості сировини та матеріалів, удосконалення технологій, післяпродажного ремонту й обслуговування тощо. Найбільш широко у процесі оцінювання рівня якості знаходять використання одиничні показники, які стосуються однієї з характеристик (властивостей) якості продукції. Одиничні показники відносно легко піддаються контролю та порівнянню. Залежно від властивостей, що характеризуються, існують такі показники якості (рис. 2):

- показники призначення;
- показники надійності;
- ергономічні показники;
- естетичні показники;
- показники безпеки;
- екологічні показники;
- показники технологічності;
- показники транспортабельності;
- показники стандартизації і уніфікації;
- патентно-правові показники;
- економічні показники.

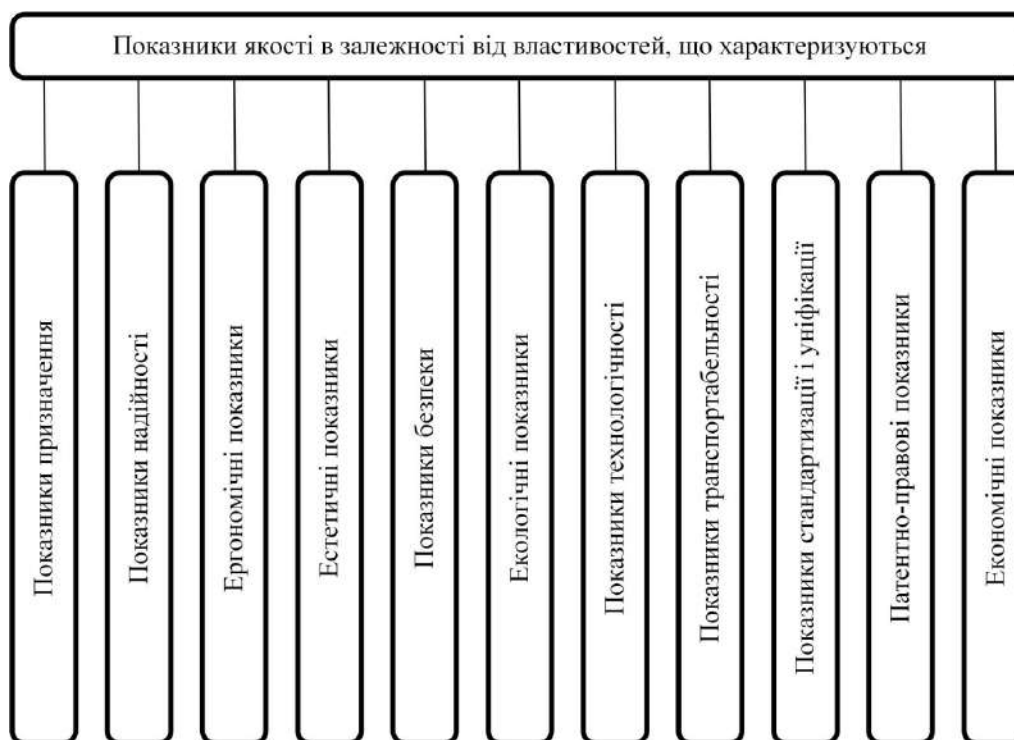


Рис. 2. Показники якості залежно від властивостей, що характеризуються
Джерело: розроблено авторами.

З наведеного вище виходить, що технологічність конструкції виробу (ТКВ) як властивість виробу входить до складу його якості, тобто ТКВ є однією з властивостей якості виробів, а відпрацювання виробу на технологічність – це невід’ємна частина робіт із забезпечення якості виробів (рис. 3).

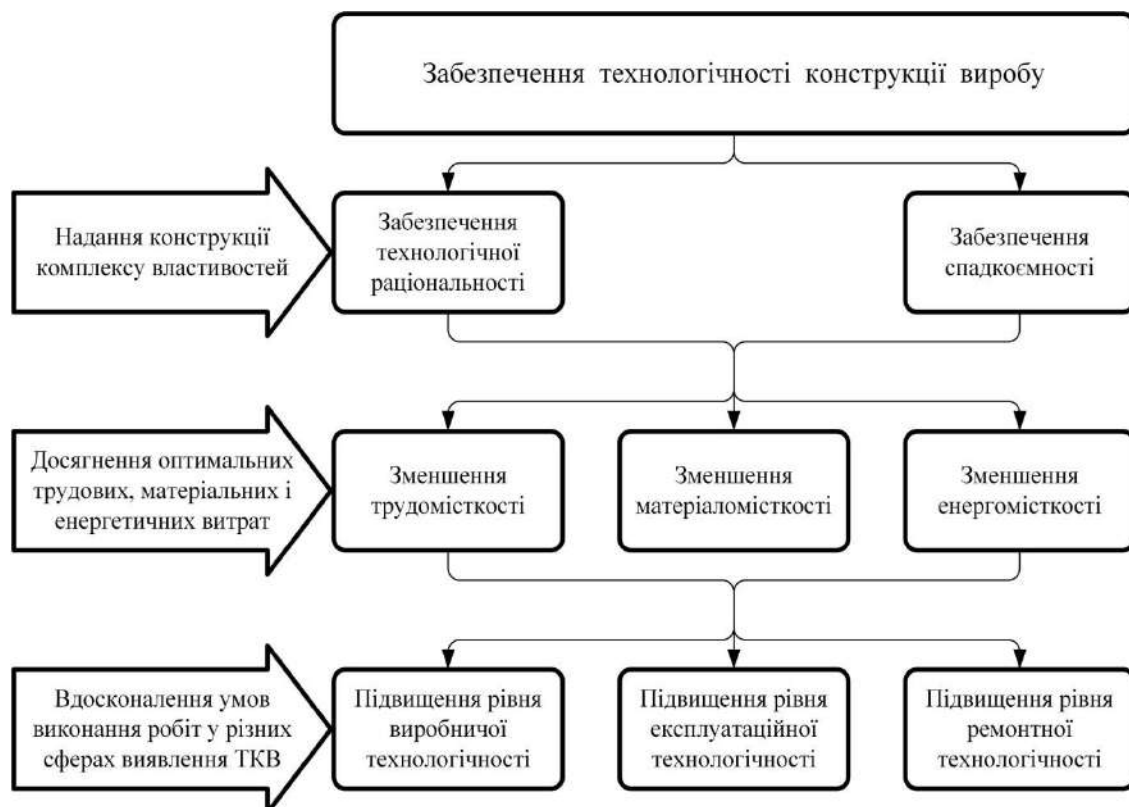


Рис. 3. Технологічність виробу – невід’ємна частина робіт із забезпечення якості
Джерело: розроблено авторами.

Як кожна властивість, ТКВ характеризується певними показниками (рис. 4). Згідно з [4], показники ТКВ утворюють один із видів показників якості виробів разом із такими, як показники призначення, надійності, рівня стандартизації і уніфікації тощо.

Метою статті є визначення можливості та доцільності проведення робіт із відпрацювання виробів на технологічність незалежно від робіт із відпрацювання виробів за іншими властивостями якості.

Необхідність досліджень за цією тематикою виникає тому, що відпрацювання виробу за основними характеристиками якості проводять різнопрофільні спеціалісти. Так, наприклад, для відпрацювання ергономічних характеристик виробу залучаються інженери-дизайнери, оцінювання і відпрацювання виробу за характеристиками надійності проводяться спеціалістами в галузі теорії надійності, відпрацювання ТКВ повинні проводитися технологістами тощо.

Для вирішення цього питання можна скористатися деякими методами теорії потенційної ефективності складних систем [5; 6].

До складних належать будь-які системи, які за складністю поведінки перевершують автоматичні системи, тобто такі системи, які можуть тільки детерміновано реагувати на зміну зовнішнього середовища. Низки різнорідних складних систем з порівняно слабкими зв’язками утворюють великі системи [5; 6]. До такого класу систем належать усі сучасні людиномашинні комплекси.

Отже, майже в усіх випадках об’єктом конструювання буде велика або складна система. Ця система буде відкритою, тобто такою, що взаємодіє із зовнішнім середовищем.

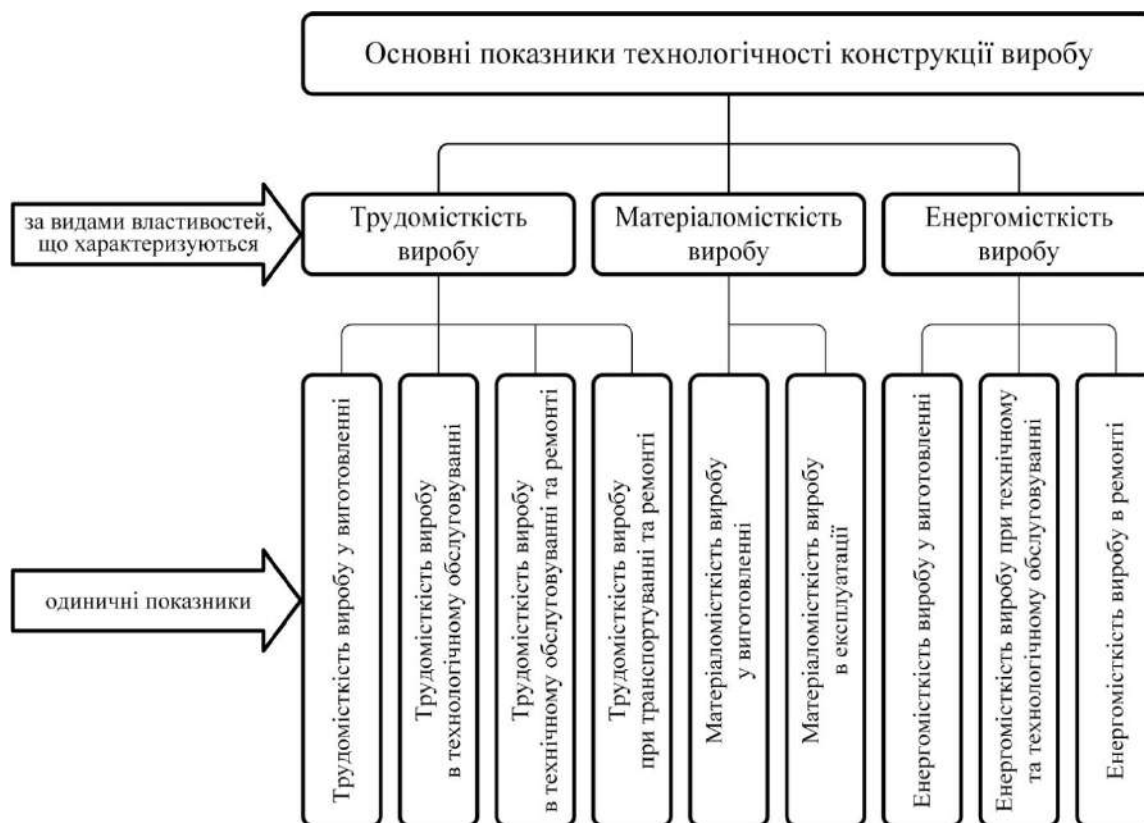


Рис. 4. Основні показники ТКВ і властивості, що ними характеризуються
Джерело: розроблено авторами.

Виклад основного матеріалу. Спочатку в процесі конструювання будь-якої технічної системи має бути визначена її мета. Формалізуючи постановку задачі для будь-якої технічної системи, можна зазначити, що мета системи – досягнення цією системою деякого переважного стану. Критерієм такого переважного стану можуть бути найвигідніші (R^{in}, R^{out}) -обміни [5; 6]. При цьому можна передбачити, що на створення відкритих систем і на забезпечення їх повноцінного функціонування витрачається деяка визначена кількість R^{in} ресурсів. З іншого боку, функціонування (експлуатація), систем забезпечує одержання R^{out} ресурсів (засобів). Таким чином, можна сказати, що метою систем є одержання сукупності максимальних R^{out} при фіксованій сукупності R^{in} , або при фіксованих сукупностях R^{out} – забезпечення мінімальних значень витрат R^{in} . Оскільки при конструюванні будь-якої технічної системи має право на існування майже нескінченна кількість розв'язків, то можна казати про деяку вірогідність $P(R^{in}, R^{out})$ досягнення системою S своєї мети, тобто, найвигіднішого (R^{in}, R^{out}) -обміну [5, 6]:

$$P(R^{in}, R^{out}) = P(S). \quad (1)$$

Система S при фіксації її мети визначається своїми структурою St та поведінкою Be :

$$S = (St, Be). \quad (2)$$

Середовище також можливо розглядати як систему S_e зі своєю метою, структурою St_e та поведінкою Be_e :

$$S_e = (St_e, Be_e). \quad (3)$$

Щодо технічних систем за зовнішнє середовище S_e можливо прийняти взаємопов'язаний комплекс організаційних та технічних умов, у яких відбувається процес експлуатації виробів [5, 6]. У такому сенсі середовище S_e та система S можуть перебувати в індиферентному стані, тобто зовнішнє середовище S_e може заподіяти неумисний вплив, що заважає, на

систему S (випадок умисного пошкодження виробу не розглядається). Середовище витрачає деяку множину ресурсів і на підтримання функціонування технічної системи, при цьому одержуючи деяку множину R^{out} ресурсів (у значення R^{in} обов'язково слід включати витрати на виготовлення виробу). Зрозуміло, що значення R^{out} залежить як від значення R^{in} , так і від структури та поведінки систем S і S_e :

$$R^{out} = R^{out}(R^{in}, S, S_e). \quad (4)$$

Для оптимальної системи S , яку можна позначити як S_o , існує константа R_o^{out} , що дорівнює

$$R_o^{out} = R^{out}(R^{in}, S_o, S_e) = \max_{S \in R^{in}} R^{out}(R^{in}, S, S_e). \quad (5)$$

При цьому

$$P(R^{in}, R^{out}) \approx \begin{cases} 0 & \text{при } R^{out} > R_o^{out} \\ 1 & \text{при } R^{out} < R_o^{out} \end{cases}. \quad (6)$$

Це означає, що будь-яка система S не може забезпечувати ефективність від експлуатації більше, ніж R_o^{out} при кожному визначеному технічному рішенні системи S . Аналогічно, при фіксованих значеннях R^{in} і R^{out} існує деяка оптимальна система S_o . У деякому загальному випадку дана система може бути відмінною від S_o .

Отже, завдання конструювання виробу може зводитися до побудови деякої системи S , яка максимально наближалася б до цільового функціонала $P(R^{in}, R^{out})$ [5; 6].

Оскільки величина функціоналу $P(R^{in}, R^{out})$ визначається значеннями показників якості системи S , то можливо сказати, що система S має сукупність різних властивостей, множину яких можна позначити через $\{X\}$, а елементи цієї множини можна називати X -властивостями. До X -властивостей можуть відноситися, наприклад, технологічність, надійність, патентоспроможність, рівень стандартизації тощо. Забезпечення оптимального ступеня кожної з даних X -властивостей складає деяку конкретно визначену тактичну мету загальної стратегічної мети системи. При відпрацюванні конструкції виробу по кожній із X -властивостей у системі S можуть виділятися деякі локальні підсистеми $S_X = (St_X, Be_X)$ зі своєю структурою St_X та поведінкою Be_X . Якщо одночасно проводити відпрацювання по двом XY -властивостям, то при тактичній меті A_{XY} у системі виділиться XY -переріз і $S_{XY} = (St_{XY}, Be_{XY})$.

Тактичним цілям S_X і S_{XY} тощо, відповідають свої (R_X^{in}, R_X^{out}) і $(R_{XY}^{in}, R_{XY}^{out})$ -обміни, тобто теорія систем припускає, що відпрацювання конструкцій виробів можливо проводити окремо за показниками технологічності, надійності, патентоспроможності тощо.

На основі вищенаведеного виникає важливе питання: наскільки при такому аспекті можливо забезпечити оптимальність (R^{in}, R^{out}) -обміну [5, 6].

На підставі відомої нерівності Джорджа Буля [7] для нашого випадку Бенціоном Флейшманом була отримана така залежність [8]:

$$1 - \sum_{\{X\}} (1 - P(S_X)) \leq P(S) \leq \min_{\{X\}} P(S_X). \quad (7)$$

Ця залежність означає, що вірогідність досягнення стратегічної мети системи S не може бути більшою, ніж мінімальне значення вірогідності досягнення тактичної мети за X -властивістю і не менша за суму вірогідностей невиконання всіх тактичних цілей за X -властивостям, яка віднімається від одного.

У термінах (R^{in}, R^{out}) -обміну ця залежність може бути записана в такому вигляді:

$$1 - \sum_{\{X\}} (1 - P(R_X^{in}, R_X^{out})) \leq P(R^{in}, R^{out}) \leq \min_{\{X\}} P(R_X^{in}, R_X^{out}). \quad (8)$$

Висновки. З наведених вище залежностей можна отримати такі висновки:

1) при конструюванні виробу можливо вести відпрацювання останнього на технологічність та іншим окремим показникам або властивостям якості. Кількість цих показників має бути повною та забезпечувати виконання виробом свого призначення щодо функціонування;

2) відпрацювання конструкцій виробів на технологічність та іншим окремим показникам якості не таке ефективне, як одночасне відпрацювання за всіма показниками якості.

Список використаних джерел

1. Держстандарт України. (1994). Якість продукції. Оцінювання якості. Терміни та визначення (ДСТУ 2925-94). – Український науково-дослідний інститут стандартизації, сертифікації і інформатики.

ДСТУ 2925-94. Якість продукції. Оцінювання якості. Терміни та визначення. – Чинний від 1996-01-01. – Вид. офіц. – Київ : Держстандарт України, 1994. – 34 с.

2. Бондаренко С. Г. Основи системної технології життєвого циклу машин : монографія : у 2 ч. Ч. 1 : Системність та створення виробу / С. Г. Бондаренко, О. П. Космач ; за заг. ред. С. Г. Бондаренка. – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2020. – 262 с.

3. Стенін О. А. Використання сучасних CAD/CAM/CAE/PLM-систем при крізному паралельному циклі підготовки виробництва [Електронний ресурс] / О. А. Стенін, С. В. Лапковський, М. О. Солдатова // Адаптивні системи автоматичного управління. – 2010. – № 17(37). – С. 109 – 117. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/6920>.

4. Технологичность конструкций изделий. Термины и определения (ГОСТ 14.205-83). – Введен 1983-07-01. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам, 1983.

5. Катренко А. В. Системний аналіз / А. В. Катренко. – Львів : Новий світ-2000, 2022. – 396 с.

6. Величко О. М. Основи системного аналізу і прийняття оптимальних рішень / О. М. Величко, Т. Б. Гордієнко. – Одеса : Олді+, 2021. – 672 с.

7. Найко Д. А. Теорія ймовірностей та математична статистика / Д. А. Найко, О. Ф. Шевчук. – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 382 с.

8. Васильків І. М. Основи теорії ймовірностей і математичної статистики / І. М. Васильків. – Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2020. – 184 с.

References

1. Derzhstandart Ukrainy. (1994). *Yakist produktsii. Otsiniuvannia yakosti. Terminy ta vyznachennia* [Product quality. Quality assessment. Terms and definitions] (DSTU 2925-94). Ukrainskyi naukovo-doslidnyi instytut standartyzatsii, sertyfikatsii i informatyky.

2. Bondarenko, S.H. (2020). *Osnovy systemnoi tekhnolohii zhyttievoho tsykladu mashyn* [Fundamentals of system technology of the life cycle of machines]. (Vol. 1). NU "Chernihivska politekhnika".

3. Stenin, O.A., Lapkovskiy, S.V., & Soldatova, M.O. (2010). *Vykorystannia suchasnykh CAD/CAM/CAE/PLM-system pry kriznomu paralelnomu tsykli pidhotovky vyrobnytstva* [The use of modern CAD/CAM/CAE/PLM-systems in the cross-parallel cycle of production preparation]. *Adaptyvni systemy avtomatychnoho upravlinnia – Adaptive systems automatic control*, 17(37), 109–117. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/6920>.

4. Gosudarstvennyi komitet SSSR po standartam (1983). *Tekhnologichnost konstrukticii izdelii. Terminy i opredeleniia* [Technological design of products. Terms and definitions] (GOST 14.205-83). Gosudarstvennyi komitet SSSR po standartam.

5. Katrenko, A.V. (2022). *Systemnyi analiz* [System analysis]. Novyi svit-2000.

6. Velychko, O.M., & Hordiienko T.B. (2021). *Osnovy systemnoho analizu i pryiniattia optymalnykh rishen* [Fundamentals of system analysis and optimal decision-making]. Oldi+.

7. Naiko, D.A., & Shevchuk, O.F. (2020). *Teoriia ymovirnostei ta matematychna statystyka* [Fundamentals of system analysis and optimal decision-making]. VNAU.

8. Vasylykiv, I.M. (2020). *Osnovy teorii ymovirnostei i matematychnoi statystyky* [Basics of the theory of probabilities and mathematical statistics]. LNU imeni Ivana Franka.

Отримано 25.11.2022

**Serhii Lapkovsky¹, Volodymyr Frolov², Liudmyla Danylova³,
Vasyl Prykhodko⁴, Maksym Gladskyi⁵**

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: Lapkovsky@ukr.net. **ORCID** <https://orcid.org/0000-0002-9870-9231>. **ResearcherID:** [HCH-3837-2022](https://orcid.org/HCH-3837-2022)

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: v.k.frolov@gmail.com. **ORCID** <https://orcid.org/0000-0002-3697-286X>. **ResearcherID:** [ACH-0071-2022](https://orcid.org/ACH-0071-2022)

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: ldanylova@outlook.com. **ORCID** <https://orcid.org/0000-0002-4442-3959>. **ResearcherID:** [ADU-9265-2022](https://orcid.org/ADU-9265-2022)

⁴PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: privas@bigmir.net. **ORCID** <https://orcid.org/0000-0003-1852-3777>. **ResearcherID:** [HDM-7277-2022](https://orcid.org/HDM-7277-2022)

⁵PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: gladsky@gmail.com. **ORCID** <https://orcid.org/0000-0002-4547-7131>. **ResearcherID:** [Q-1624-2017](https://orcid.org/Q-1624-2017)

DFM – AN INALIENABLE COMPONENT OF PRODUCT QUALITY

The article is devoted to questions on possibility and expediency of work on working of products on DFM irrespective of works on working of products on other properties of quality. Depending on the properties, there are the following quality indicators: purpose indicators, reliability indicators, ergonomic indicators, aesthetic indicators, safety indicators, ecological indicators, manufacturability indicators, transportability indicators, standardization and unification indicators, patent law indicators, economic indicators. The economy of countries where a lot of attention is paid to quality (both on the part of the producer and on the part of the consumer), have achieved great success in the development and provision of a high standard of living for their citizens. DFM as property of a product is a part of its quality and is one of properties of quality of products, and product working on DFM is an integral part of works on maintenance of quality of products. DFM is characterized by a number of indicators. DFM indicators form one of the types of product quality indicators along with indicators of purpose, reliability, level of standardization and unification, etc. The need for this research arises due to the fact that different specialists conduct the testing of products according to the main quality properties. So, for example, testing and evaluation of products according to reliability indicators is carried out by specialists in the field of reliability theory, engineers-designers are involved to test the ergonomic properties of products, testing of products for manufacturability should be carried out by technologists, etc. For the decision of the given problem it is offered to use methods of the theory of potential efficiency of complicated systems. The theory of complicated systems supposes that at designing of products it is supposed to conduct working of products on DFM and other separate properties or quality indicators, however working of designs of products on DFM and other separate indicators of quality is less effective, than simultaneous working on all indicators of quality.

Keywords: product; quality; DFM; complicated system; potential effectiveness.

Fig.: 4. **References:** 8.

Тетяна Макруха¹, Олександр Дубовий²

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної механіки

Економіко-технологічний інститут імені Роберта Ельворті (Кропивницький, Україна)

E-mail: tmakruha@gmail.com, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8841-1688>, **ResearcherID:** [57222660526](https://orcid.org/57222660526)

²доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри матеріалознавства і технології металів

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова (Миколаїв, Україна)

E-mail: oleksandr.duboviy@nuos.edu.ua, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2843-1879>, **ResearcherID:** [57194338570](https://orcid.org/57194338570)

СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ НАНОСТРУКТУРУВАННЯ ДЕФОРМОВАНИХ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ ТА НАПИЛЕНИХ ПОКРИТТІВ

Представлена у статті інформація має оглядовий характер щодо можливості застосування попереднього деформування та передрекристалізаційної термічної обробки для технічно чистого заліза, вуглецевих сталей 20; 45; 70; Ст3; У8, легованих сталей 40Х; 20Х13, газотермічних та електродугувих покриттів (Св-08Г2С), а також сплавів ніхрому Ni80Cr20 та бронзи БрАМц9-2.

У роботі експериментально досліджено вплив деформаційно-термічних факторів на механічні властивості, зокрема, твердість і міцність, металів, сплавів та напилених покриттів, та встановлено, що зміцнювальний ефект відбувається через здрібнення субструктурних елементів, таких як розмір областей когерентного розсіювання, кут розорієнтування субзерен та кількість субструктурних елементів до наномасштабного стану.

Показано можливість промислового застосування запропонованої технології на прикладі виготовлення пружних елементів зі сталі 70.

Ключові слова: передрекристалізаційна термічна обробка; механічні властивості сталей; динамічна деформація; розмір субзерна; кут розорієнтування субзерен.

Рис.: 6. Табл.: 5. Бібл.: 16.

Актуальність теми дослідження. Сучасне виробництво потребує застосування різноманітних конструкцій та деталей, які виготовляються з матеріалів із високими фізико-механічними властивостями [1], що дозволяє підвищити ресурс експлуатації. Застосування нових матеріалів у конструкційних і окремих деталях визначається співвідношенням між міцністю і пластичністю металів і сплавів, а також зносостійкістю, яка забезпечується переважно покриттями або шарами з відповідною структурою. Приріст міцності, що формує підвищену зносостійкість, при достатній пластичності забезпечується переважно формуванням здрібненої мікро-, ультра- і наномасштабних структур.

На сьогодні відомо декілька технологій, що дають змогу отримати наноструктурні матеріали: електроосадження, шарове розмелення, інтенсивна пластична деформація (ПД), компонування тощо [1].

Постановка проблеми. Подрібнення структури до наномасштабного розміру здійснюють здебільшого методами ПД [2], наприклад, множинна прокатка, множинне волочіння, кручення під тиском, рівноканальне кутове пресування. При цьому під час дослідження впливу ПД на структуру і властивості сплавів встановлено, що при використанні великих пластичних деформацій навіть за кімнатної температури протікають процеси динамічної рекристалізації, що сприяє створенню дрібнозернистої кристалічної структури сплавів [3]. Завдяки великому ступеню деформації утворюється високо дезорієнтована фрагментована субструктура.

Однак об'ємне наноструктурування методами ПД застосовується в техніці для одержання виробів порівняно невеликого розміру [2]. Задача створення ефективного пристрою ПД, який надасть можливість одержання з малою трудомісткістю масивних наноструктурованих заготовок і виробів із високими властивостями, є актуальною для розвитку багатьох галузей виробництва, зокрема машинобудування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні десятиріччя розроблені і використовуються способи механотермічного і термомеханічного оброблення, які суттєво підвищують якість прокатуваних і кованих сталевих виробів шляхом формування здрібненої полігонізаційної субструктури.

У роботі [4] описано спосіб здрібнення зерна аустеніту за допомогою гарячого обстикування сталі з вмістом вуглецю 0,61 %. У результаті дослідження встановлено, що при витримці 1,5 хв після завершення гарячої деформації розвиток процесів динамічної і статичної рекристалізації викликає незначне зростання зерна аустеніту. Така тривалість витримки дозволяє зберегти частково гарячий наклеп аустеніту перед прискореним охолодженням для термічного зміцнення.

Автор роботи [5] досліджував вплив гарячої пластичної деформації на структуру і механічні властивості литої нержавіючої сталі X13 та встановив, що гаряча деформація ковкою при температурі 1160 °С зі ступенем деформації ~500 % дозволяє підвищити пластичність у 3...5 разів та міцність у ~1,5 раза.

У статті [6] описано експериментальне дослідження впливу температури деформації на структуру сталі 20 та встановлено, що нагрівання зразків сталі 20 до температури 1000 °С протягом 1 год з подальшим охолодженням до температури 650...690 °С з одночасним деформуванням ($\epsilon = 0,11 \dots 2,60$) з наступною витримкою при температурі 610 °С дозволяє отримати здрібнену структуру з розміром аустеніту від 20 до 100 мкм.

Автори роботи [7] показали можливість підвищення механічних властивостей (твердості, мікротвердості та коефіцієнту зміцнення) сталей 15X13МФ та 25X1М1Ф за допомогою пластичної деформації (від 0,05 до 0,50 та від 0,05 до 1,25 відповідно) з температурами випробування 20, 375 та 600 °С, у результаті чого утворюється повністю фрагментована дислокаційна структура.

Виявлено [8], що попереднє пластичне деформування аустенітної сталі 12X18Н12Т спричиняє наклеп, який залежить від швидкості деформування. Зі збільшенням швидкості деформування зразків від $8 \cdot 10^{-4}$ до $417 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ характеристики як міцності (границя міцності), так і пластичності (відносне видовження) сталі 12X18Н12Т знижуються. Після витримання попередньо наклепаної сталі за температури 650 °С збільшується її міцність, а пластичність знижується.

Але можливості формування здрібненої і наномасштабної субструктури під час ПД та термомеханічної обробки використовуються не повністю через процеси динамічної та збиральної полігонізації, які відбуваються при порівняно тривалому часі витримка за високої температури.

Розроблено способи деформаційно-термічного оброблення металів і сплавів [9], які забезпечують підвищення твердості деформованих обтискуванням металів і сплавів та напилених покриттів і зниження теплопровідності. Досягається це шляхом нагрівання виробів із металів, сплавів та напилених покриттів до початку первинної рекристалізації з короткочасною (до 10 хв) витримкою та подальшим охолодженням до температури навколишнього середовища зі швидкістю $< 5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$, яка унеможливує ріст субзерен (передрекристалізаційна термообробка).

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Однак у всіх вищевказаних способів є недолік – короткочасна витримка термічної обробки, яка позбавляє можливості обробляти масивні деталі великого розміру.

Мета роботи – встановлення закономірностей формування термічно стабільних полігонізаційних наномасштабних субзерен у металах, сплавах і напилених покриттях із підвищеними фізико-механічними властивостями.

Виклад основного матеріалу дослідження. Залізо є основним компонентом будь-якої сталі, тому попередні дослідження закономірностей впливу деформаційно-термічних факторів на фізико-механічні властивості досліджували на прикладі технічно чистого заліза. Зразки розміром $5 \times 5 \times 8$ мм піддавали статичному деформуванню на гідравлічному пресі Losen Housen WERK (Dusseldorf) з навантаженням до 35 т. Передрекристалізаційну термічну обробку (ПТО) виконували в лабораторній електричній печі СНОЛ-1.6.2.0.08/9-М1. Твердість визначали відповідно ДСТУ ISO 6507-4:2008

на приладі типу Віккерс при навантаженні 5 кг. В результаті численних дослідів накопичилась інформація для побудови графічної залежності твердості (HV_5) від ступеня деформації і температури та залежності твердості від ступеня деформації і часу витримки при температурі 500 °С. Відомо, наприклад, [10], що зменшення розміру зерна (субзерна) веде до збільшення твердості. Цей ефект спостерігається практично для всіх типів матеріалів. Міцність у більшості випадків зростає аналогічно твердості, тому твердість, у нашому випадку може бути наближеним критерієм міцності, а також характеризувати розмір субзерна. Крім того, нашими дослідженнями [11] впливу передрекристалізаційної термічної обробки на розмір субзерна металів і сплавів не зафіксовано середній розмір субзерна менше 50 нм. Вплив деформаційно-термічних факторів на твердість (HV_5) технічно чистого заліза наведено на рис. 1.

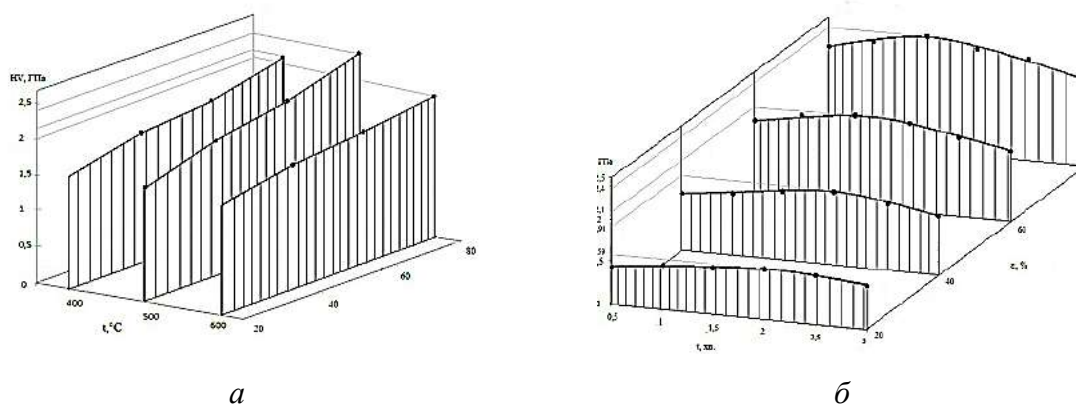


Рис. 1. Вплив деформаційно-термічних факторів на твердість технічно чистого заліза:

а – залежність твердості від ступеня деформації (ϵ ,%) і температури 400, 500 та 600 °С; *б* – залежність твердості від ступеня деформації (ϵ ,%) і часу витримки при температурі 500 °С

Джерело: розроблено авторами.

Дані рис. 1, *а* свідчать про те, що оптимальна температура ПТО становить 500 °С, при цьому залежність має екстремальний характер, а максимальна твердість досягається при витримці протягом 1.5...2 хв (рис. 1, *б*). Зі збільшенням величини статичної деформації підвищується твердість, яка досягає максимального значення при деформації 80 %. Вплив більш високої статичної деформації не досліджувався через те, що при деформуванні близько 90 % деінде спостерігалися тріщини, і на практиці статичне деформування вище 80 % майже не застосовування.

Максимальне значення твердості після 80 % деформування і ПТО при температурі 500 °С становило 2,4 ГПа (після деформування – 1,52 ГПа). Таким чином, приріст твердості становить 58 %. Цей ефект з'являється за рахунок здрібнення субзерен [12].

Для порівняння, зразки технічно чистого заліза піддавали тривісному деформуванню методом «*abc*», як різновиду рівноканального кутового пресування [13; 14]. Твердість (HV_5) і розмір областей когерентного розсіювання (ОКР) рентгенівських променів зразків технічно чистого заліза, деформовано «*abc*»-методом і одновісним пресуванням на 82 % після ПТО, наведено в табл. 1. ОКР визначали за формулою Шеррера за відображенням [110], зйомку дифрактограм виконували на приладі ДРОН-3,0. Сумарна величина дійсної деформації для методу «*abc*» склала $e = 3,4$.

Як впливає із даних табл. 1, після «*abc*»-деформування твердість вища порівняно з одновісною деформацією, але після ПТО обробки більша твердість спостерігається в одновісно деформованих зразках. Розмір ОКР, який можна ототожнювати з розміром субзерна, має суттєво нижчі значення як після одновісної деформації, так і після деформації

«abc» методом і ПТО. При деформації рух дислокацій здійснюється шляхом ковзання й дифузійного переповерхання, при цьому формуються об'ємні дислокаційні сплетіння – комірчаста структура. Під дією пружних напружень при нагріванні дислокаційні сплетіння перетворюються на плоскі малокутові субграниці, а комірки – в субзерна, але субзерна різко відрізняються за розмірами, кривизною границь і кутами в потрійних стиках субграниць. Комірчаста структура, яка утворилася після «abc» деформації, перетворюється в субзерну.

Таблиця 1 – Твердість HV_5 і розмір ОКР технічно чистого заліза, деформованого методом «abc» й одновісним пресуванням після ПТО

Метод деформації	Результати досліджень	Твердість, ГПа після		Розмір ОКР, нм після	
		деформування	деформування і термообробки	деформування	деформування і термообробки
«abc»		2,96	3,29	149	72
одновісна деформація на 82 %		2,35	3,60	83	66

Джерело: розроблено авторами.

Субзерна розорієнтовані одне проти одного хаотично на відміну від закономірно розорієнтованих зерен при одновісній деформації. У результаті алгебраїчна сума розорієнтації субзерен практично дорівнює нулю, що призводить до росту крупних субзерен за рахунок дрібних і викликає зниження твердості. Крім того, «abc» деформація тривісна й цим зумовлює появу більшої кількості дислокацій і різних знаків, що стає причиною їх анігіляції. Це сприяє збільшенню швидкості росту субзерен. Тому розмір ОКР після статичної деформації й термічної обробки менший, ніж після деформації «abc» методом і термічної обробки.

Нижчі значення твердості технічно чистого заліза після «abc» деформації і ПТО порівняно з одновісною деформацією можна пояснити ще й додатковим впливом зернограничного проковзування. Автори роботи [15] вказують, що в шарах з розміром субзерен від 50 до 200 нм деформація здійснюється за участю змішаного механізму. До звичайного дислокаційного механізму приєднується механізм зернограничного проковзування. При цьому деформація може реалізовуватися поворотом субзерен, який викликається рівнем напружень у потрійних стиках, що характерно для «abc» деформації.

З практичного погляду доцільно дослідити фізико-механічні властивості технічно чистого заліза і сталей. Результати таких досліджень наведені в роботі [12], з чого випливає, що межа міцності технічно чистого заліза і сталей після ПТО за режимом, який забезпечує максимальну твердість, суттєво вище, ніж, навіть, після деформування. При цьому й порівняно підвищена пластичність. Це пояснюється здрібненням субструктури, що підтверджено розміром ОКР, який лежить у наномасштабі.

ПТО надає можливість підвищення твердості (HV_5) холоднодеформованого ніхрому $Ni80Cr20$ на 25 %, бронзи БрАМц9-2 – на 19 %, електротехнічної міді М1 – на 13 %, то напиленого електродуговим методом ніхрому – на 29 % [12].

При напилюванні газотермічних покриттів відбувається інтенсивна пластична деформація частинок унаслідок високої швидкості співудару з підкладкою (в реальних процесах напилювання до 300 м/с). При цьому величина деформації може складати 90...95 %, а швидкість охолодження деформованих частинок досягає 10^8 °C/с, що запобігає протіканню динамічної рекристалізації в матеріалі покриття. Короткочасна витримка зразків з напиленими покриттями при температурі рекристалізації і подальше прискорене охолодження на повітрі забезпечує підвищення твердості покриттів завдяки фіксуванню передрекристалізаційного стану матеріалу покриття [16].

Досліджували електродугові покриття з дроту Св-08Г2С, оскільки вони характеризуються найменшим значенням ОКР та найвищим ефектом підвищення твердості після ПТО [9].

З практичного погляду основним недоліком ПТО є невелика тривалість витримки у декілька хвилин; тому актуальним являється дослідження можливості стабілізації здрібненої полігонізаційної субструктури напиленого покриття при більш тривалій витримці у процесі термічного оброблення за рахунок наступної деформації.

З метою гальмування руху дислокаційних субграниць у процесі збиральної полігонізації, який проявляється при нагріванні (тривалій витримці), здійснювали додаткове деформування покриття двома способами: пресуванням на гідравлічному пресі при навантаженні 10 т (ступінь деформації 30 %) та шляхом поверхневої пластичної деформації (ППД) сталевими кульками діаметром 0,1...0,3 мм протягом 2 хв. Температуру нагрівання деформованих зразків знизили до 400 °С з огляду на те, що при збільшенні величини деформації температурний поріг рекристалізації знижується. Результати наведено на рис. 2.

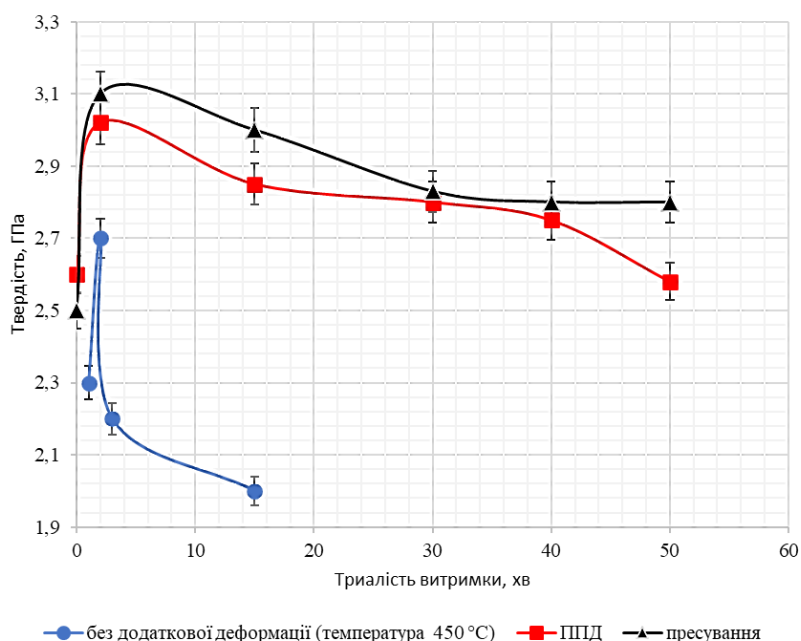


Рис. 2. Залежність твердості електродугових покриттів з дроту Св-08Г2С від тривалості витримки та виду наступної деформації

Джерело: розроблено авторами.

Аналіз наведених даних показує, що використання наступної деформації забезпечує менше зниження твердості при підвищенні тривалості витримки при ПТО з тривалістю витримки до 15 хв. Така тенденція спостерігається для обох видів деформації покриття. Так, наприклад, твердість покриття без наступної деформації при підвищенні тривалості витримки з 2 до 15 хв зменшується з 2,7 до 2 ГПа (-35 %), а при проведенні наступної деформації – з 3,0 до 2,8 ГПа (-7 %) та з 3,1 до 3,0 ГПа (-3 %) для ППД та пресування відповідно. Однак, достатньо високі значення твердості забезпечується при витримці до 40 хв для ППД, а для пресування до 50 хв. Пояснюється це тим, що при здійсненні повторної деформації дислокаційна взаємодія закінчується виникненням від 50 до 75 % дислокаційних бар'єрів (Хірша, Ломер–Коттрелла) решта бере участь у формуванні дислокаційних сплетінь. Дані дислокаційні бар'єри, які виникають вздовж напрямку, перпендикулярного осі деформації, стримують рух дислокацій та, як наслідок, зменшують рухливість полігонізаційних субграниць, чим знижується швидкість полігонізаційних процесів і забезпечується стабілізаційний ефект.

Аналіз мікроструктур [9] показав, що змін у структурі покриттів до і після ПТО не виявлено, що свідчить про зміцнювальний ефект, який забезпечують субструктурні елементи.

Для кількісної оцінки впливу ПТО на субструктуру електродугових покриттів провели визначення розмірів ОКР (табл. 2).

Дані наведені в табл. 2 свідчать про суттєвий вплив ПТО на розмір субзерен, особливо при використанні електроімпульсної дії при напilenні покриттів. Після ПТО розмір субзерен стає наномасштабним.

Таблиця 2 – Розмір ОКР електродугових покриттів

Покриття	Технологія напilenня та величина деформації частинок	Термообробка	Розмір ОКР, нм
Електродугові покриття з дроту марки Св-08Г2С	За традиційною технологією. Деформація 83%.	Без термічної обробки	>200
		450 °С, 2 хв	106
	З використанням електроімпульсної дії. Деформація 87%.	Без термічної обробки	~200
		400 °С, 1 хв	87

Джерело: розроблено авторами.

Ефект підвищення механічних властивостей сталей та покриттів вдалось впровадити тільки для виробів невеликого розміру (ножів для порізки слюдострічки та ножів жниварок, товщиною 3...5 мм), через малий час витримки 1,5...2 хв.

ПТО забезпечує підвищення фізико-механічних властивостей за рахунок фіксації здрібненої полігонізаційної субструктури шляхом короточасної витримки статично деформованих металів і сплавів при температурі первинної рекристалізації. Подовження часу витримки або підвищення температури ведуть до нівелювання отриманих результатів через розвиток процесів збиральної полігонізації. Границі субзерен, які утворюються на початку полігонізації, дислокаційні. Ці дислокації рухомі і при підвищенні температури або збільшенні часу витримки, не зустрічаючи перешкод, легко рухаються (переповзають), при цьому збільшується розмір субзерен і, як наслідок, зменшується твердість, міцність. Усе це унеможлиблює застосування цього процесу обробки для деталей великого (більше 10 мм) перерізу. Таким чином, для розширення можливості застосування ПТО для металевих виробів потрібно створити перешкоди руху дислокацій у вигляді подвійних і потрійних перехрещень, дисперсних виділень тощо.

Оскільки сталь Ст3 є одним із найпоширеніших конструкційних матеріалів, який використовують для виготовлення несучих зварних конструкцій, тому науковий і практичний інтерес представляє дослідження зміни субструктури та властивостей комбіновано деформованих зразків зі сталі Ст3.

Зразки розміром 3×5×5 мм піддавали комбінованому деформуванню, яке полягає у поєднанні динамічної деформації на 30 % та статичної деформації на 30 % (схему деформації наведено на рис. 3) з наступною ПТО ($t = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$). Швидкість динамічної деформації складала 100 мм/с, а статичної – 0,5 мм/с. Твердість після деформування становила 1,92 ГПа. Отриманні результати залежності твердості від тривалості витримки при ПТО наведено на рис. 4.

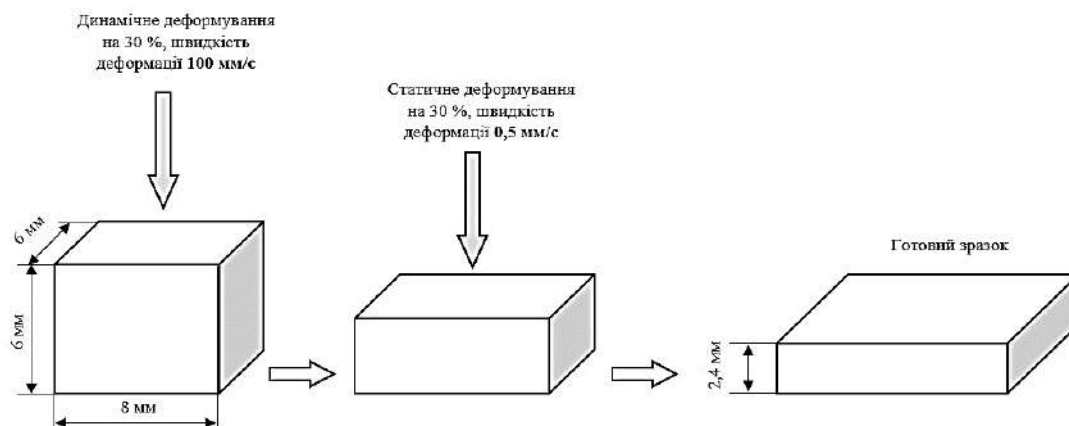


Рис. 3. Схема комбінованої деформації

Джерело: розроблено авторами.

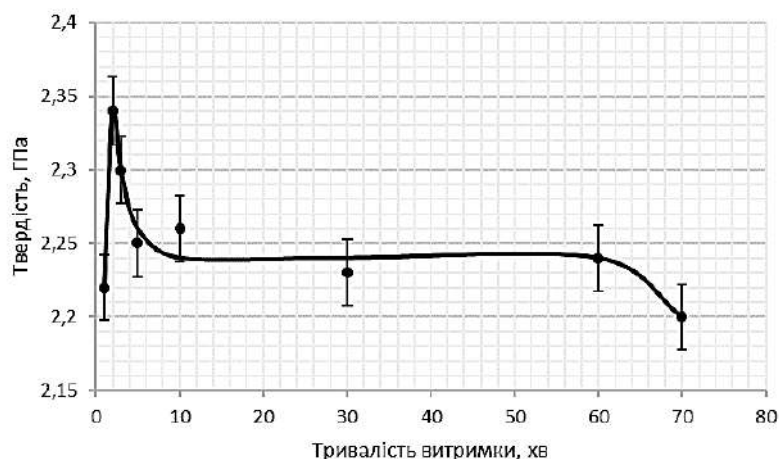


Рис. 4. Залежність твердості сталі Ст3 від часу витримки ПТО

Джерело: розроблено авторами.

З рис. 4 видно, що залежність твердості від тривалості витримки ПТО має екстремальний характер, при цьому приріст твердості після ПТО, яка забезпечує максимум твердості, відносно деформованого стану складає 22 %, а після ПТО при витримці 60 хв – 17 %.

Для дослідження зміни тимчасового опору руйнування, відносного звуження та відносного подовження проводили випробування на розтяг (ГОСТ 1497-84), результати обчислювання наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Значення тимчасового опору руйнування, показників пластичності, середнього розміру субзерна та кількості нанорозмірних елементів сталі Ст3 залежно від виду деформації та термообробки

Вид обробки	σ_b , МПа	δ , %	Ψ , %	Середній розмір субзерна, нм	Кількість нанорозмірних субзерен, %
Комбінована деформація	310	1,05	74	94	55
Комбінована деформація з наступною ПТО (500 °С, 2 хв)	586	5,26	75	89	66
Комбінована деформація з наступною ПТО (500 °С, 60 хв)	402	7,5	59	92	62

Джерело: розроблено авторами.

За допомогою аналітичного автоемісійного растрового електронного мікроскопа SUPRA55VP отримані фотографії субструктури зразків сталі Ст3, які наведено на рис. 5.

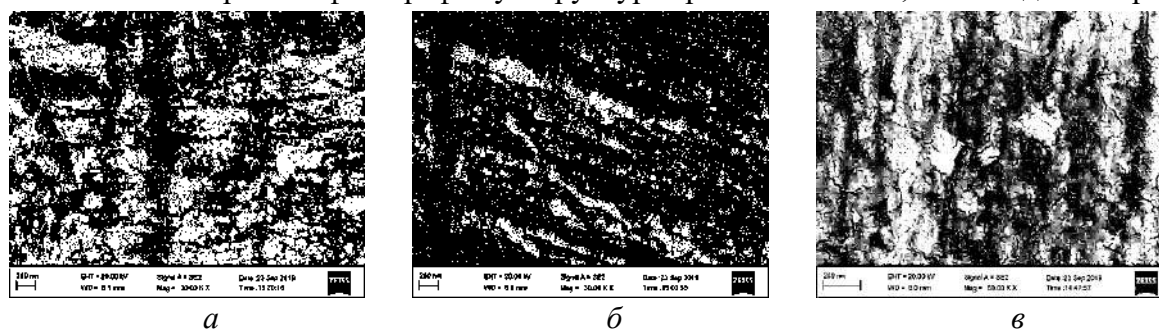


Рис. 5. Мікроструктури сталі Ст3:

а – після комбінованої деформації; б – після комбінованої деформації та термічної обробки, яка забезпечує максимальні значення твердості; в – після комбінованої деформації та термічної обробки, яка забезпечує термічну стабілізацію полігонізаційної субструктури

Джерело: розроблено авторами.

З рис. 5 видно, що відбувається здрібнення субструктурних елементів після ПТО відносно деформованого стану, що підтверджують дані визначення середнього розміру ОКР з фактором форми $\sim 0,42$ (див. табл. 3).

Далі вивчали вплив комбінованого деформування на середній розмір субзерен (ОКР) технічно чистого заліза та окремих сталей, які найбільш широко застосовуються в промисловості (табл. 4).

Таблиця 4 – Результати визначення розміру ОКР сталей після деформації та передрекристалізаційної термічної обробки

Вид обробки	Розмір ОКР, нм					
	Залізо	Сталь 20	Сталь 45	У8	40Х	20Х13
Комбінована деформація	149	143	110	130	131	117
Комбінована деформація з наступною ПТО з короткотривалою витримкою	100	119	80	115	117	101
Комбінована деформація з наступною ПТО впродовж 60 хв	140	187	179	130	118	110

Джерело: розроблено авторами.

Наведені в табл. 4 дані свідчать про те, що комбінована деформація та ПТО, забезпечує поліпшення показників фізико-механічних властивостей, завдяки здрібненню субструктурних елементів.

Деформовані комбінованим методом сталі характеризуються певними особливостями структури, яка значно відрізняється від структури цих самих матеріалів, які були статично деформовані, що обумовлюється дуже не рівноважними умовами їх формування (висока швидкість деформації). Однак, властивості таких сталей обумовлені не лише здрібненням субзерен, а і значною мірою залежать від відносної кількості наноструктурних елементів (субзерен) та кута їх розорієнтування, тому визначенню цих показників приділяється особлива увага, що певною мірою дозволяє прогнозувати властивості сталей, а кут розорієнтування субзерен визначає їх термічну стабільність, чим більший кут, тим вище термічна стабільність.

У табл. 5 наведено розраховану відносну кількість наномасштабних субзерен (%) та кута їх розорієнтування (°) для деформованих технічно чистого заліза та сталей до та після передрекристалізаційної термічної обробки.

Таблиця 5 – Відносна кількість наномасштабних субзерен (%) та кут їх розорієнтування (°) у комбіновано деформованих технічно чистому залізі та сталях до та після передрекристалізаційної термічної обробки

Обробка	Залізо	Сталь 20	Сталь 45	У8	40Х	20Х13
Деформування	54/1,4	17/0,04	15/0,4	28/0,14	37/0,05	18/0,08
Деформування та ПТО впродовж короткотривалої витримки	75/2,16	20/0,1	22/0,88	42/0,21	65/0,08	34/0,16
Деформування та ПТО впродовж 60 хв	58/1,8	16/0,08	18/0,24	19/0,19	16/0,06	12/0,14

Примітка: через «/» вказано значення кількості наномасштабних субзерен та кута їх розорієнтування.

Джерело: розроблено авторами.

Наведені дані табл. 5 свідчать про те, що комбінована деформація та наступна ПТО, яка забезпечує максимальні значення твердості, забезпечують збільшення кількості наномасштабних субзерен щонайменше на 18 % (сталь 20), а максимум на ~ 90 % (сталь 12Х13), при цьому кут розорієнтування субзерен після ПТО впродовж 60 хв дещо зменшується відносно максимального значення, але залишається більшим відносно деформованого стану, чим і пояснюється термічна стабілізація субструктури.

Можливий напрям впровадження запропонованої технології комбінованого деформування з наступною ПТО та її порівняння з традиційними технологіями обробки сталевих виробів, розглянуто на прикладі пружних елементів.

Пружини та ресори зазвичай працюють в умовах багаторазових повторних навантажень. Такі деталі повинні мати, крім високої твердості та міцності в умовах статичного, динамічного та циклічного навантажень, високі пружні властивості та витримувати під час експлуатації великі повторні навантаження без поломок та без осадження. Це значить, що при знятті навантажень пружина чи ресора повинна повністю відновлювати свої початкові розміри та форму.

Для ефективного та правильного виконання своєї роботи такі елементи конструкції повинні мати високу твердість, міцність, пружність, витривалість та релаксаційну стійкість.

Якісні пружини повинні відповідати вимогам ГОСТ 16118-70; ГОСТ 14959-69; ГОСТ 50753-95; ГОСТ 18242-72.

Для порівняльного аналізу впливу комбінованого деформування та традиційної технології виготовлення пружин та ресор обрано вуглецеву сталь 70. Відпалену сталь 70 комбіновано здеформовано сумарно на 60 % (30 % динамічної та 30 % статичної деформації), що задовольняє вимоги до дроту для виготовлення пружин та ресор. Твердість після деформації становила $HV_5 = 2,67$ ГПа (56 HRC).

Далі проводили термічну обробку за традиційною технологією: гартування при температурі 920 °С з охолодженням у мастило та високий відпуск при температурі 470 °С з охолодженням у мастило (згідно з ГОСТ 14959-69). Твердість після гартування становила $HV_5 = 3,31$ ГПа (62 HRC), після відпуску – $HV_5 = 3,01$ ГПа (46 HRC), що задовольняє вимоги до твердості пружин.

Для відпаленої сталі 70 проводили комбіноване деформування сумарно на 60 % (30 % динамічної та 30 % статичної), твердість після деформації становила $HV_5 = 2,67$ ГПа (56 HRC). ПТО проводили при температурах 450, 500 та 550 °С. Залежність твердості від тривалості витримки ПТО наведено на рис. 6.

Наведені дані на рис. 6 свідчать про те, що залежність твердості сталі 70 від тривалості витримки ПТО має екстремальний характер. При цьому максимальне значення твердості $HV_5 = 3,39$ ГПа (64 HRC) досягається при витримці 3 хв, що більше від здеформованого, загартованого та відпущеного стану (за традиційною технологією) на 13 % за шкалою Віккерса та на 39 % вище за шкалою Роквелла. Пружність твердих тіл характеризується лінійним співвідношенням між напруженням і деформацією, що своєю чергою прямо пропорційне твердості, тобто пружність зростає зі зростанням твердості.

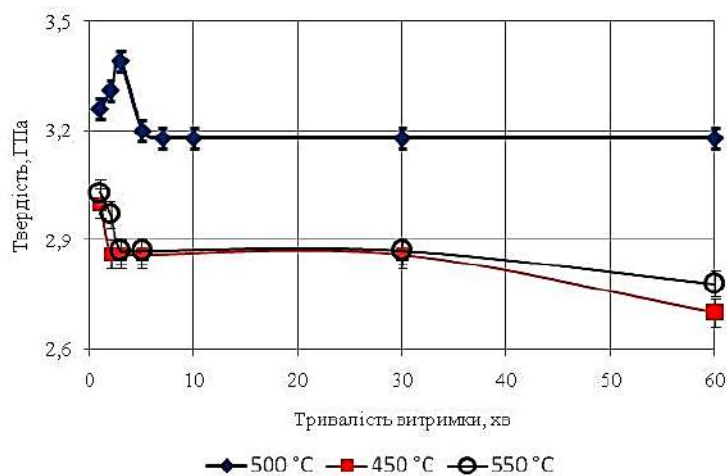


Рис. 6. Залежність твердості сталі 70 від тривалості часу витримки перед рекристалізаційною термічною обробкою

Джерело: розроблено авторами.

При цьому твердість зі збільшенням тривалості витримки ПТО до 60 хв падає на ~6 % ($HV_5 = 3,19$ ГПа, або 60 HRC), але залишається вищою на 19 %, ніж після комбінованого деформування. При цьому твердість після ПТО протягом 60 хв залишається вищою, ніж твердість після традиційної обробки на 30 %, що дозволяє використовувати запропоновану обробку як альтернативу традиційній технології виготовлення пружин та ресор.

Результати роботи впроваджені на підприємствах ТОВ «АМІКО ДІДЖИТАЛ», ТОВ «Едвайс Ю Уорлд Україна» / Advice You World GmbH (Ukraine), ТОВ «САКЕНА» при виготовленні регулюючих пружин мембранних клапанів трубопроводів.

Висновки. Діаграми залежності твердості технічно чистого заліза від величини статичної деформації, температури й часу витримки, які побудовані на основі експериментальних даних, свідчать про зміцнювальний ефект передрекристалізаційної термічної обробки (ПТО). Виявлено, що статичне деформування забезпечує більшу ефективність ПТО, ніж рівноканальне кутове пресування. ПТО надає можливість суттєво зміцнювати метали, сталі і напилени покриття при короткочасній витримці, при температурі початку первинної рекристалізації (1...2 хв).

Встановлено, що термічна стабілізація полігонізаційної субструктури до 60 хв забезпечується комбінуванням одновісних деформацій на стискування, а саме динамічної на 30 % та статичної на 30 %, з наступною передрекристалізаційною термічною обробкою при температурі початку первинної рекристалізації, при цьому розмір субзерен становить 80...187 нм, міцнісні характеристики підвищуються на 10...30 % при достатній пластичності.

Показано, що ПТО забезпечує формування наномасштабних елементів у електродугових покриттях із Св-08Г2С, а додаткове деформування покриття дозволяє підвищити термічну стійкість полігонізаційної субструктури до 40...50 хв.

Встановлено, що комбінована деформація та наступна передрекристалізаційна термічна обробка сталей забезпечує збільшення розрахункової кількості наномасштабних субзерен від 15 до 65 %. Кут розорієнтування субзерен при цьому залишається більшим відносно деформованого стану.

Апробація запропонованого способу комбінованого деформування з наступною передрекристалізаційною термічною обробкою впродовж 60 хв на сталі 70, яка використовується для виготовлення регулюючих пружин мембранних клапанів трубопроводів в промислових умовах, показала, що твердість (HRC) після запропонованої деформації та термічної обробки на 19 % більша, ніж після застосування традиційної технології (гартування та відпуску). Цим розкривається можливість практичного застосування запропонованого способу наноструктурування шляхом формування здрібної полігонізаційної субструктури передрекристалізаційною термічною обробкою.

Список використаних джерел

1. Хоменко О. В. Інтенсивна пластична деформація: методи та математичні моделі формування наноматеріалів [Електронний ресурс] / О. В. Хоменко // Журнал фізичних досліджень. – 2020. – № 24 (2). – С. 2000-1–2000-20. – DOI: <https://doi.org/10.30970/jps.24.2001>.
2. Research of the possibility of nanostructuring functional materials by pre-recrystallization heat treatment [Electronic resource] / Oleksandr Dubovyy, Anton Karpechenko, Tatyana Makryha, Maksym Bobrov, Alexander Labartkava, Andrey Labartkava // Bulletin of the Georgian National academy of sciences. – 2021. – Vol. 15, no. 1. – Pp. 45-51. – Accessed mode: http://science.org.ge/bnas/t15-n1/07_Dubovyy_Materials%20Science.pdf.
3. Влияние типа и степени интенсивной пластической деформации на структуру и свойства литых Al—Sc-сплавов [Электронный ресурс] / А. Л. Березина, Т. А. Монастырская, А. А. Давиденко, О. А. Молебный, С. С. Полищук // Металлофиз. новейшие технол., 2016. – Т. 38, № 8. – С. 1057-1076. – DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.38.08.1057>.
4. Залежність розміру зерна аустеніту від умов гарячого обтискування вуглецевої сталі [Електронний ресурс] / І. О. Вакуленко, О. О. Чайковський, Л. І. Вакуленко, Д. М. Болотова, А. О. Чайковська // Металознавство і термічна обробка металів. – 2018. – № 1. – С. 18-24. – DOI: <https://doi.org/10.30838/J.PMNTM.2413.240418.18.100>.

5. Проїдак С. В. Исследование влияния горячей пластической деформации на структуру и механические свойства литой нержавеющей стали типа X13 [Электронный ресурс] / *New Technologies and Achievements in Metallurgy and Materials Engineering : XIII International Scientific Conference*. – Czestochowa, 2012. – Chapter 1. – Pp. 460–463. – Режим доступа: <http://eadnurt.diit.edu.ua:82/jspui/handle/123456789/1572>.

6. Исследование влияния деформации на структуру и свойства катанки из стали 20 / Н. Н. Бережной, В. А. Чубенко, С. О. Мацышин, А. О. Шепель // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2012. – № 4/5 (58). – С. 4-6.

7. Вплив температури на мікроефекти статичного деформування та руйнування теплостійких сталей [Електронний ресурс] / П. Ясній, В. Гладько, П. Марущак, Д. Баран // *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. – 2007. – Т. 12, № 3. – С. 7-16. – Режим доступу: <https://core.ac.uk/download/pdf/237216578.pdf>.

8. Балицький О. І. Вплив попереднього пластичного деформування сталі 12X18H12T на її механічні властивості [Електронний ресурс] / О. І. Балицький, Я. Еліаш, І. В. Ріпей // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. – 2011. – № 4. – С. 20-27. – Режим доступу: <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/138270/02-Balitskii.pdf?sequence=1>.

9. Формування нанорозмірної полігонізаційної субструктури та її вплив на фізико-механічні властивості металів, стопів і напорошених покриттів [Електронний ресурс] / О. М. Дубовий, А. А. Карпеченко, О. О. Жданов, М. М. Бобров, Т. О. Макруха, Ю. Є. Неделько // *Металлофіз. новітні техн.* – 2017, – Т. 39, № 2. – С. 209–243. – DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.39.02.0209>.

10. Покропивний В. В. Перспективи наноматеріалознавства [Електронний ресурс] / В. В. Покропивний, В. В. Скороход // *Вісник Українського матеріалознавчого товариства*. – 2008. – № 1(1). – С. 55-70. – Режим доступу: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/15847>.

11. State and prospects of application of plastically deformed nanostructured metals, alloys, and sprayed coatings [Electronic resource] / Syzonenko Olha, Dubovyi Oleksandr, Makrukha Tetiana, Karpechenko Anton, Bobrov Maksym, Torpakov Andrii // *Machines. Technologies. Materials*. – 2021. – Vol. 15, Issue 7. – Pp. 279-282. – Accessed mode: <https://stumejournals.com/journals/mtm/2021/7/279>.

12. Жданов О. О. Закономірності впливу передрекристалізаційної термічної обробки на фізико-механічні властивості деформованих сталей : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.02.01 «Матеріалознавство» / Жданов Олександр Олександрович. – Херсон, 2015. – 24 с.

13. Тихонова М. С. Рекристаллизационные процессы в аустенитной коррозионностойкой стали после больших пластических деформаций : дис. ... канд. физ.-мат. наук : спец. 01.04.07 «Физика конденсированного состояния» / Тихонова Марина Сергеевна. – Белгород, 2015. – 138 с.

14. Дубовий О. М. Вплив тривісної деформації на субструктуру і твердість технічно чистого заліза після передрекристалізаційної термічної обробки [Електронний ресурс] / О. М. Дубовий, С. І. Шкурат, Т. О. Макруха // *Зб. наук. пр. НУК*. – Миколаїв : НУК, 2016. – № 1 (463). – С. 36–40. – Режим доступу: <http://eir.nuos.edu.ua/xmlui/handle/123456789/4097>.

15. Механические свойства наноструктурного железа, полученного интенсивной пластической деформацией трением [Электронный ресурс] / А. И. Юркова, А. В. Белоцкий, А. В. Бякова, Ю. В. Мильман // *Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии*. – 2009. – Т. 7, № 2. – С. 619–632. – Режим доступа: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/16356>.

16. Развитие технологии газотермического напыления покрытий формированием измельченной наноразмерной полигонизационной субструктуры [Электронный ресурс] / А. Н. Дубовой, А. А. Карпеченко, М. Н. Бобров, А. В. Лабарткава // *Металлофіз. новітні техн.* – 2020. – Т. 42, № 4. – С. 631-653. – DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.42.05.0631>.

References

1. Khomenko, O.V. (2020). Intensity of plastic deformation: methods and mathematical models of nanomaterials formation [Severe plastic deformation: methods and mathematical models of nanomaterials formation]. *Zhurnal fizychnykh doslidzhen – Journal of Physical Studies*, (24(2)), 2000-1–2000-20. <https://doi.org/10.30970/jps.24.2001>.

2. Oleksandr Dubovyy, Anton Karpechenko, Tatyana Makryha, Maksym Bobrov, Alexander Labartkava & Andrey Labartkava (2021). Research of the possibility of nanostructuring functional materials by pre-recrystallization heat treatment. *Bulletin of the Georgian National academy of sciences*, (15 (1)), 45-51. http://science.org.ge/bnas/t15-n1/07_Dubovyy_Materials%20Science.pdf.

3. Berezina, A.L., Monastyrskaya, T.A., Davidenko, A.A., Molebnyi, O.A., & Polishchuk, S.S. (2016). Vliianie tipa i stepeni intensivnoi plasticheskoi deformatsii na strukturu i svoistva litykh Al-Sc-splavov [Influence of Type and Degree of a Severe Plastic Deformation on Structure and Properties of Cast Al—Sc Alloys]. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii – Metallophysics and Advanced Technologies*, (38 (8)), 1057-1076. <https://doi.org/10.15407/mfint.38.08.1057>.

4. Vakulenko, I.O., Chaikovskiy, O.O., Vakulenko, L.I., Bolotova, D.M., & Chaikovska, A.O. (2018). Zalezhnist rozmiru zerna austenitu vid umov hariachoho obtyskuvannia vuhletsevoi stali [The dependence of grain size austenite from the condition of hot deformation carbon steel]. *Metaloznavstvo i termichna obrobka metaliv – Metal Science and Heat Treatment of Metals*, (1), 18-24. <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.240418.18.100>.

5. Proidak, S.V. (2012) Issledovanie vliianiia goriachei plasticheskoi deformatsii na strukturu i mekhanicheskie svoistva litoi nerzhaveiushchei stali tipa Kh13 [The analysis of influence of hot plastic deformation on the structure and mechanical properties of cast stainless steel type H13]. *New Technologies and Achievements in Metallurgy and Materials Engineering : XIII International Scientific Conference*, (1), 460–463. <http://eadnurt.diit.edu.ua:82/jspui/handle/123456789/1572>.

6. Bereznoi, N. N., Chubenko, V. A., Matcyshin, S. O. & Shepel, A. O. (2012). Issledovanie vliianiia deformatsii na strukturu i svoistva katanki iz stali 20 [Investigation of the influence of deformation on the structure and properties of wire rod from steel 20]. *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii – Eastern European Journal of Advanced Technologies*, (4/5(58)). 4-6.

7. Yasniy, P., Hlado, V., Maruschak, P. & Baran, D. (2007). Vplyv temperatury na mikromekhanizmy statychnoho deformuvannia ta ruinuvannia teplostiikykh stali [The influence of temperature on micromechanisms of static strain and fracture of heat-resistance steels]. *Visnyk Ternopilskoho derzhavnogo tekhnichnogo universytetu – Bulletin of Ternopil State Technical University*, (12 (3)), 7-16. <https://core.ac.uk/download/pdf/237216578.pdf>.

8. Balytskyi, O.I., Eliash, Ya. & Ripei, I.V. (2011). Vplyv poperednoho plastychnoho deformuvannia stali 12Kh18N12T na yii mekhanichni vlastyvoli [Injection of the front plastic deformation of steel 12X18H12T on the its mechanical power]. *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv – Physical and chemical mechanics of materials*, (4), 20-27. <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/138270/02-Balitskii.pdf?sequence=1>.

9. Dubovyy, O. M., Karpechenko, A. A., Bobrov, M. M., Zhdanov, O. O., Makrukha, T. O., & Nedelko, Yu. E. (2017). Formuvannia nanorozmirnoi polihonizatsiinoi substruktury ta yii vplyv na fizyko-mekhanichni vlastyvoli metaliv, stopiv i naporoshenykh pokryttiv [Formation of polygonization nanoscale substructure and its impact on the physical and mechanical properties of metals, alloys, and sprayed coatings]. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii – Metallophysics and Advanced Technologies*, (39 (2)), 209-243. <https://doi.org/10.15407/mfint.39.02.0209>.

10. Pokropivnyi, V.V. & Skorokhod, V.V. (2008). Pekspektivy nanomaterialovedeniia [Nanomaterials Science Perspectives]. *Visnyk Ukrainського materialoznavchoho tovarystva – Bulletin of the Ukrainian Material Science Association*, (1(1)). 55-70, <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/15847>.

11. Syzonenko, Olha, Dubovyi, Oleksandr, Makrukha, Tetiana, Karpechenko, Anton, Bobrov, Maksym, & Torpakov Andrii (2021). State and prospects of application of plastically deformed nanostructured metals, alloys, and sprayed coatings. *Machines. Technologies. Materials*, (15 (7)), 279-282. <https://stumejournals.com/journals/mtm/2021/7/279>.

12. Zhdanov, O.O. (2015). *Zakonomirnosti vplyvu peredrekrystalizatsiinoi termichnoi obrobky na fizyko-mekhanichni vlastyvoli deformovanykh stali [Regularities in the injection of pre-recrystallization heat treatment on the physical and mechanical power of deforming steels]. [Abstract of PhD dissertation, Kherson]*.

13. Tikhonova, M.S. (2015). *Rekristalizatsionnye protsessy v austenitnoi korroziionnostoikoii stali posle bolshikh plasticheskikh deformatsii [Recrystallization processes in austenitic corrosion-resistant steel after large plastic deformations]. [PhD dissertation, Belgorod]*.

14. Dubovyi, O.M., Shkurat, S.I., & Makrukha T.O. (2016). Vplyv tryvisnoi deformatsii na substrukturu i tverdist tekhnichno chystoho zaliza pislia peredrekrystalizatsiinoi termichnoi obrobky [The influence of triaxial deformation on the substructure and the hardness of technically pure iron after pre-recrystallization heat treatment]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK – Collection of scientific works NUoS*, (1(463)), 36-40. <http://eir.nuos.edu.ua/xmlui/handle/123456789/4097>.

15. Iurkova, A.I., Belotckii, A.V., Biakova, A.V., & Milman, Iu.V. (2009). Mekhanicheskie svoistva nanostrukturного zheleza, poluchennogo intensivnoi plasticheskoi deformatsiei treniem [Mechanical properties of nanostructured iron obtained by severe plastic deformation by friction]. *Nanosistemi, nanomateriali, nanotekhnologii – Nanosystems, nanomaterials, nanotechnologies*, (7(2)), 619-632. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/16356>.

16. Dubovoi, A.N., Karpechenko, A.A., Bobrov, M.N., & Labartkava, A.V. (2020). Razvitie tekhnologii gazotermicheskogo napyleniia pokrytii formirovaniem izmelchennoi nanorazmernoii poligonizatsionnoi substrukturny [Development of the technology of thermal spraying of coatings by the formation of a crushed nanosized polygonization substructure]. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii – Metallophysics and Advanced Technologies*, (42 (4)). 631-653. <https://doi.org/10.15407/mfint.42.05.0631>.

Отримано 17.11.2022

UDC 621.78: 66.065.32:67.017

Tetiana Makrukha¹, Oleksandr Dubovyy²

¹PhD, associate professor Department of Applied Mechanics

Robert Elvorti Economics and Technology Institute (Kropyvnytskyi, Ukraine)

E-mail: tmakruha@gmail.com, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8841-1688>, **ResearcherID:** [57222660526](https://orcid.org/57222660526)

²Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Materials Science and Technology of Metals

Admiral Makarov National University of Shipbuilding (Mykolaiv, Ukraine)

E-mail: oleksandr.dubovyy@nuos.edu.ua, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2843-1879>, **ResearcherID:** [57194338570](https://orcid.org/57194338570)

CURRENT STATUS AND DEVELOPMENT PROSPECTS OF NANOSTRUCTURING OF DEFORMED METALS AND ALLOYS AND SPRAYED COATINGS

The information presented in the article is an overview of the possibility of improving the mechanical properties of metals, alloys and sprayed coatings in order to obtain a dispersed, in particular, nanoscale substructure, which allows obtaining a set of unique operational characteristics, which, in turn, will increase the resource of parts of machines and mechanisms that are used in mechanical engineering.

Today, the most common method of nanostructuring is intensive plastic deformation (by friction, by equal-channel angular pressing, etc.), however, these methods can only be used for the manufacture of parts with a small cross-section, so the creation of new methods of deformation-thermal treatment is an urgent task of modern materials science.

The paper shows the possibility of applying pre-deformation and pre-recrystallization heat treatment for technically pure iron, carbon steels of 1020 (сталь 20), 1045 (сталь 45), 1070 (сталь 70), A284Gr.D (Cm3) and C80W (V8) brands, alloyed steels of 5140H (40X) and AISI 420 (20X13) brands, Sv-08G2S (Cв-08Г2С) gas-thermal and electric arc coatings, as well as Ni80Cr20 nichrome alloy and CuAl9Mn2 (2.0960) bronze (БрАМц9-2).

The work compares methods of static deformation with methods of intensive plastic deformation and shows that pre-recrystallization heat treatment allows to significantly strengthen metals (more than 30%) in combination with sufficient plasticity (for A284Gr.D (Cm3) steel, the relative elongation is up to 7.5%, and the relative narrowing is up to 75 %).

The work presents the results of the experimental investigation of the influence of deformation and thermal factors on the mechanical properties, in particular, hardness and strength, of metals, alloys and sprayed coatings. It is established that the strengthening effect occurs due to the refinement of substructural elements, such as the size of coherent scattering regions, the disorientation angle of subgrains, and the number of substructural elements to a nanoscale state. Thus, with the help of additional deformation followed by pre-recrystallization and heat treatment of carbon and alloyed steels, it is possible to obtain subgrains with a size of less than 200 nm with a disorientation angle of up to 2 ° with a relative amount of nanoscale subgrains of up to 65 %.

The possibility of industrial application of the proposed technology is shown on the example of production of regulating springs of membrane valves of pipelines made of 1070 (сталь 70) steel, which allows to increase the hardness by 19 %.

Keywords: pre-recrystallization heat treatment; mechanical properties of steels; dynamic deformation; subgrain size; angle of disorientation of subgrains.

Fig.: 6. Tables: 5. References: 16.

Віктор Романенко¹, Михайло Блощицин², Іван Жегет³, Юрій Юрченко⁴

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: romvvv@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1918-7090>

²кандидат технічних наук, доцент кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: m.bloshchytsyn@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3688-7948>

³магістр кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: i.zheget-ml71@iit.kpi.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7504-6490>

⁴магістр кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: yuriyyurchenko14@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9253-009X>

**КОНСТРУКТИВНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ
ЛАЗЕРНОЇ РІЗКИ МЕТАЛІВ**

Наведено аналіз існуючих способів лазерного різання та представлено особливості конструктивного та технологічного вдосконалення процесу. Розширення функціональності наявного на ринку обладнання може бути здійснено за рахунок застосування двох або більше лазерних головок. Розроблена комбінована технологія, де листовий метал піддається механічній активації перед лазерним різанням, що полягає у холодній пластичній деформації. При цьому відбувається зниження теплопровідності металу за рахунок його деформаційного зміцнення і, як наслідок, зменшення (локалізація) зони термічного впливу в зоні різання. Представлене технологічне рішення дозволяє знизити вартість виробу за рахунок зниження трудомісткості подальших слюсарних робіт у результаті підвищення точності розмірів і зниження шорсткості поверхні різі та значно зменшити ширину отриманого різі.

Ключові слова: лазер; технологічний процес; теплопровідність; різка; пластична деформація; схема обробки.
Рис.: 7. Табл.: 1. Бібл.: 12.

Актуальність теми дослідження. Широке застосування маловідходних технологічних процесів у різних галузях промисловості є одним із найбільш важливих завдань сучасної промисловості. У зв'язку з цим важливою є проблема створення високопродуктивних і маловідходних операцій розрізання матеріалів, широко вживаних у машинобудуванні та приладобудуванні. Таке завдання особливо гостро стоїть при обробці деталей зі складним контуром із важкооброблюваних матеріалів. Вирішення цієї проблеми вимагає розробки принципово нових технологічних процесів, відмінних від традиційних методів розкрою матеріалів. До таких технологій належить лазерне різання матеріалів.

Постановка проблеми. Лазерна різка вигідно відрізняється від існуючих методів розділення матеріалів, наприклад, кисневого або плазмового різання, оскільки при більш високій продуктивності процесу дозволяє виконувати розрізи значно меншої ширини (приблизно $\frac{1}{5}$ ширини різі при кисневому або плазмовому різанні) та підвищеної якості різів, що, з одного боку, різко знижує неповоротні втрати матеріалу, з іншого боку, дозволяє виключити необхідність подальшої обробки крайок розрізів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нині лазерне різання металів, зокрема листових, постійно вдосконалюється і модернізується. При цьому для прискорення процесу лазерного різання можна запропонувати використовувати машини із двома лазерними головками, які синхронно переміщуються по обидва боки матеріалу, що різеться. Для цього може використовуватися одне лазерне джерело, промінь якого розділений відповідними дзеркалами [1], або двома окремими лазерними джерелами [2; 3]. Така схема пристрою дозволяє збільшити швидкість різання, особливо в разі відносно товстих матеріалів, але вимагає точної комбінації променів по вертикалі й синхронного руху обох лазерних головок.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Відомий верстат для лазерного різання матеріалів, в якому два лазерних промені рухаються один за одним, щоб прискорити процес різання або сформувати складний профіль прорізу [4]. Існує також установка, у якій обидві головки рухаються синхронно в одному напрямку з можливістю регулювання відстані між ними, що дає можливість одночасно виробляти одразу дві однакові деталі [5]. Однак у цьому випадку жорстке з'єднання лазерних головок обмежує функціональність верстата.

Метою статті є визначення можливостей удосконалення процесу лазерного різання металів із можливістю спрощення технологічної реалізації процесу.

Виклад основного матеріалу. Більш раціональне вирішення проблеми полягає в розширенні функціональності обладнання, що дозволяє двом або більше лазерним головкам самостійно працювати на одній машині [6]. Такий станок для лазерного різання матеріалів, що складається з основи, поздовжньої напрямної, що кріпляться на основі та двох поперечних напрямних, кожна з яких монтується на поздовжній напрямній з можливістю самостійного руху по цій напрямній за допомогою власного приводу поздовжнього руху. При цьому на кожній із поперечних напрямних встановлюється лазерна головка з можливістю самостійного руху по цій поперечній напрямній за допомогою власного горизонтального приводу переміщення і власного вертикального привода. В конструкцію входить обчислювальний пристрій, до якого приєднані горизонтальний та вертикальний приводи руху лазерної головки. Привід поперечного переміщення налаштований із можливістю самостійного програмного управління горизонтальним та вертикальним рухом лазерної головки і поздовжніх рухів приводів поперечної та поздовжньої напрямної. При цьому кожен з приводів руху лазерної головки виконаний у вигляді лінійного електродвигуна, встановленого по відповідній напрямній.

Ще однією особливістю такої машини є те, що обчислювальний засіб налаштовуються з можливістю управління обома лазерними головками по шести координатам. Установка може також виконувати шестикоординатне управління обома лазерними головками.

Розроблена конструкція може бути реалізована для різання листових матеріалів. Машини в цьому варіанті, як показано на рисунку 1, має основу 1, на якій жорстко закріплена поздовжня напрямна 2. Крім того, поздовжніх напрямних може бути і дві, які встановлюються паралельно одна одній.

Як показано на рисунку 1, поперечні напрямні 3 встановлюються на поздовжню напрямну 2. На кресленні показано дві поперечні напрямні 3, але чисельність їх може бути різним. Наприклад, на одну поздовжню напрямну 2 можна встановити три поперечні напрямні 3. Кожна з поперечних напрямних 3 монтується на відповідну поздовжню напрямну 2 з можливістю самостійного руху по поздовжній напрямній 2. Таке переміщення забезпечується власним поздовжнім приводом поперечної напрямної, який являє собою лінійний електродвигун.

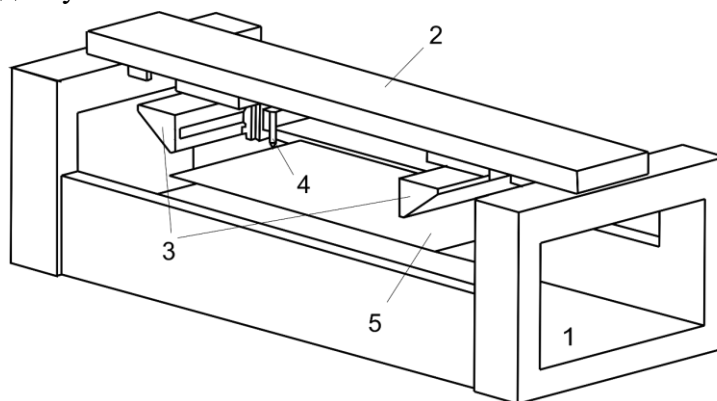


Рис. 1. Реалізації машини для лазерного різання матеріалу

На рисунку 1 обидві поперечні напрямні 3, монтуються таким чином, що кожен із приводів поперечної напрямної розташований на нижній стороні поздовжньої напрямної 2. Однак це не є обов'язковою умовою. Наприклад, якщо поперечна напрямна 3 виконана з кронштейном, що покриває поздовжню напрямну 2, привід поздовжнього переміщення поперечної напрямної може бути розміщений на верхній стороні поздовжньої напрямної 2. Специфічні характеристики підвіски поздовжньої напрямної 2 і розміщення поздовжнього привода поперечної напрямної визначаються розташуванням і конструктивними особливостями машини, зручністю її обслуговування і т. ін.

Як видно з рисунку 1, кожна поперечна напрямна 3 має лазерну головку 4, встановлену з можливістю самостійного переміщення по цій поперечній напрямній. Таке зміщення забезпечується власним горизонтальним приводом переміщення і власним вертикальним приводом переміщення, кожен з яких виконаний так само, як і поздовжній привід переміщення поперечної напрямної.

Слід враховувати, що дві або більше лазерних головок 4 можуть бути встановлені на одній поперечній направляючій 3, кожна з яких має свій горизонтальний і вертикальний привід переміщення. Наприклад, дві лазерні головки 4 можуть бути розташовані на протилежних плечах однієї поперечної напрямної.

Як показано на рисунку 1, поперечні напрямні 3 можуть бути одна по відношенню до другої в такому положенні, що відповідні лазерні головки 4 розташовані в межах максимальної відстані в поздовжньому напрямку. Здебільшого ця відстань для верстатів різання листів відповідає (або навіть трохи перевищує) поздовжній розмір листа матеріалу 5, що розрізається.

Використання декількох (не менше двох) лазерних головок 4, що переміщуються кожна по власній поперечній напрямній 3, дозволяє не тільки прискорити процес різання, але й забезпечує можливість одночасно вирізати кілька різних деталей або отворів з одного листа чи більшої кількості листів. Щоб реалізувати цю можливість, кожна головка повинна рухатися по своїй траєкторії (за трьома координатами), яка обслуговується як власним приводом горизонтального і вертикального переміщення, так і приводом поздовжнього руху поперечної напрямної 3. Ці приводи управляються відповідними обчислювальними пристроями з ЧПУ або програмованим контролером, процесором, комп'ютером і т. ін. Усі горизонтальні і вертикальні приводи руху лазерної головки 4 та всі поздовжні рухи поперечної напрямної 3 підключені до цього обчислювального засобу, який налаштований на самостійне програмування управління кожним з цих переміщень.

Зокрема, коли машина складається з однієї поздовжньої напрямної і двох поперечних напрямних та кожна має по одній лазерній головці, то зазначена програма може забезпечити шестикоординатне управління обома лазерними головками, тобто трикоординатне управління для кожної лазерної головки. Конкретний тип розроблюваної програми визначається як необхідною траєкторією різки, так і використовуваною мовою програмування.

Для здійснення операції різки листовий матеріал 5 укладається на основу 1. У комп'ютер вводиться відповідна програма, у якій враховуються всі лінії необхідних надрізів, щоб поперечні напрямні 3 і лазерні головки 4 у жодному разі не стикалися при їх рухах під час роботи.

Наприклад, якщо ви хочете вирізати двері з вікном з листа 5, то програму управління різанням можна спроектувати так, щоб перша (скажімо, ліва на рисунку 1) лазерна головка прорізала верхню частину дверей, а потім приступила до прорізання однієї зі сторін. При цьому друга (праворуч на рисунку 1) лазерна головка спочатку вирізає віконце, і передусім його верхню частину, а потім, після завершення вирізання віконця, друга (права) лазерна головка починає прорізати сторону приблизно із середини (ту, яку вже вирізала перша лазерна головка), а потім переходить до прорізування нижньої сторони.

У цей час перша головка перестає прорізати свою бічну сторону, рухається в іншу сторону в точку, де розріз був початий другою (правою) лазерною головкою, і прорізає цю сторону до кінця в напрямку вже прорізаної верхньої сторони дверей. Друга лазерна головка, завершивши надріз нижньої сторони дверей, переходить до прорізування бічної сторони, яка залишилася нерозрізаною першою лазерною головкою, і завершує розріз цієї сторони. У результаті обидві поперечні напрямні 3 не стикаються в процесі експлуатації, а час різання скорочується більш ніж наполовину, враховуючи той факт, що при різанні на звичайній машині з однією лазерною головкою потрібно деякий час на невиробниче переміщення лазерної головки з одного розрізу в інший. У цьому ж станку при переміщенні однієї поперечної напрямної 3 з відповідною лазерною головкою 4, інша лазерна головка 4 може продовжувати різання листа 5.

Звичайно, якщо необхідно не наскрізно прорізати матеріал, будь-яка лазерна головка 4 може рухатися по висоті (тобто по третій координаті) за допомогою вертикального приводу руху лазерної головки.

Таким чином, у наведеному конструктивному рішенні виконується одночасне шестикоординатне управління двома лазерними головками, що й забезпечує розширення функціональності, а також прискорення процесу різання.

Водночас недоліками традиційного методу контурного лазерного різання є невисока якість крайок різку внаслідок утворення ґрату, недотримання форми і розмірів деталі внаслідок низької якості бічної поверхні різку (не перпендикулярність і висока шорсткість), поверхневе короблення металу, обмежений асортимент матеріалів і діапазон товщин металу. Крім того, теплова енергія, що виділяється в процесі лазерного різання, створює зону температурного впливу на краю крайок різків [7].

Для поліпшення якості лазерного різання рекомендується зменшити тепловий вплив на метал заготовки з метою зниження теплопровідності. Раніше розроблений метод контурного лазерного різання, при якому охолодження зони різання здійснюється за допомогою охолоджуючої рідини, розпорошеної разом із потоком газу, що дозволяє знижувати теплопровідності металу заготовки [8].

Істотним недоліком такого методу є складна конструкція лазерної установки, яка повинна мати механізм подачі й видалення охолоджуючої рідини, недостатня ефективність процесу охолодження, а також зниження корозійної стійкості металу на залізній основі.

Тому була розроблена комбінована лазерна установка, технічним результатом якої є підвищення ефективності процесу розділу листового металу, розширення його технологічних можливостей при забезпеченні низької витрати матеріалу й високої якості продукції [9].

Технічний результат досягається тим, що листовий метал піддається механічній активації перед лазерним різанням, що полягає у холодній пластичній деформації, при якій відбувається зниження теплопровідності металу і, як наслідок, зменшення (локалізація) зони термічного впливу в зоні різання.

Суть процесу полягає в тому, що зниження теплопровідності в зоні різання досягається за рахунок процесу механічної активації прокату при нанесенні силової дії при холодній пластичній деформації [10]. При цьому забезпечується різке зниження теплопровідності металу за рахунок його деформаційного зміцнення. Спостережуваний ефект зумовлений ущільненням кристалічної решітки металу, збільшенням густини дислокацій при пластичній деформації (механічна активація металу заготовки).

Метод контурного лазерного різання з механічною активацією листового металу може бути здійснений за такими етапами:

1. Виконується холодна пластична деформація оброблюваної поверхні прокату будь-яким традиційним способом (валками, ударною дією тощо). На цьому етапі утворюється сприятлива текстура (макро-, і -мікро) в області зони подальшої контурної лазерної різки,

відбувається активація і механічний наклеп (деформаційне зміцнення), що знижує теплопровідність металу в зоні різання і знижує температурний вплив на метал шляхом створення більш локальної зони температурного впливу.

2. Виконується контурне лазерне різання попередньо холоднодеформованої ділянки металопрокату (металевої заготовки).

На рисунку 2 показана технологічна схема розробленого процесу контурного лазерного різання з механічною активацією листового металу.

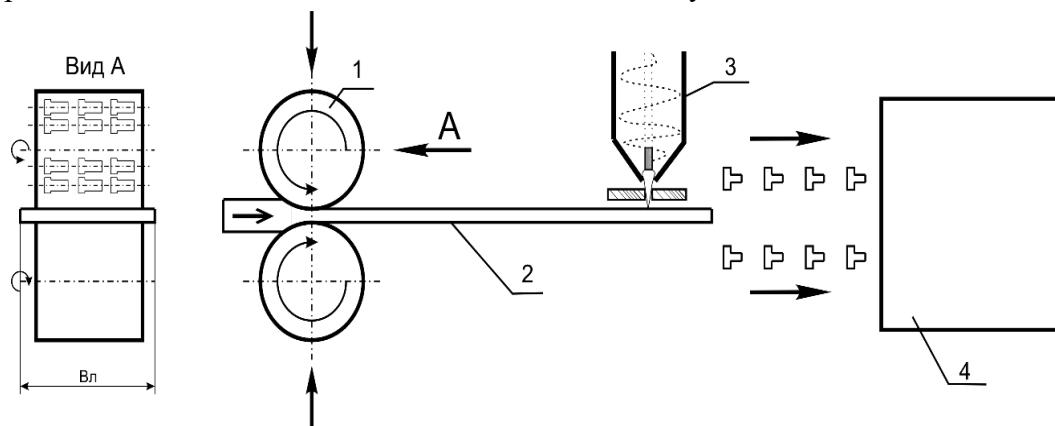


Рис. 2. Комбінована установка контурного лазерного різання з механічною активацією листового металопрокату

Деформаційне зміцнення листового металу здійснюється за допомогою деформуючих валків 1, здійснюючих різноспрямований обертальний рух, які забезпечують холодну пластичну деформацію вихідного листового матеріалу 2 у зонах подальшого розрізання згідно з кресленням. Валки 1 можуть бути оснащені клиноподібними ребрами, траєкторія яких відповідає контуру розрізаної деталі (вид А), що забезпечує локальне зміцнення вузької зони деформованого металу. Крім того, така схема холодної деформації оброблюваної ділянки забезпечить високий рівень пластичності контуру відрізаної заготовки, якщо заготовка піддається подальшому штампуванню. У положенні 3 проводиться контурне лазерне різання. Вирізані заготовки відправляються на місце штампування 4.

Таке представлене технологічне рішення дозволяє знизити вартість виробу за рахунок зниження трудомісткості подальших слюсарних робіт в результаті підвищення точності розмірів і зниження шорсткості поверхні різку та значно зменшити ширину отриманого різку.

Отже, метод контурного лазерного різання з механічною активацією листового металу полягає в тому, що листовий метал піддається холодній пластичній обробці перед лазерною різкою. При цьому поверхня обробки в зоні розрізу піддається силовій дії в деформуючих валках, оснащених клиноподібними ребрами, траєкторія яких узгоджена з контуром зрізаної частини.

Для реалізації лазерної різки металів з попередньою пластичною деформацією використовувалось таке обладнання. По-перше, нами використовувався вальцювальний верстат фірми Holzmann моделі RBM 1300M 26179088 (рисунок 3).



Рис. 3. Вальцювальний станок Holzmann RBM 1300M 26179088

У таблиці наведено основні технічні характеристики вальцювального верстата фірми Holzmann моделі RBM 1300M 26179088 [11].

Таблиця – технічні характеристики вальцювального верстата фірми Holzmann моделі RBM 1300M 26179088

Виробник	Holzmann Maschinen
Тип приводу	Електричний
Напруга живлення, В	380
Потужність, Вт	1100
Макс. товщина листа, мм	1.5
Макс. ширина листа, мм	1300
Діаметр валків, мм	75
Кількість валків, шт.	3
Габарити, мм	1800×650×1100
Вага, кг	280
Родина бренду	Німеччина

Подальше розрізання матеріалу виконувалось на верстаті для лазерного різання серії LTC75 фірми Aramis (Україна) (рисунок 4). Представлений верстат є високопродуктивним і надійним інструментом, призначеним для високоточного розкрою листового матеріалу [12].



Рис. 4. Верстат для лазерного різання LTC75

Нижче представлені основні технічні характеристики запропонованого лазерного комплексу для різки матеріалів:

Лазерне джерело:

Тип лазера – Ітербієвий лазер;

Передача променя – Оптичне волокно;

Діаметр плями сфокусованого випромінювання – 0,07-0,15 мм;

Середня потужність випромінювання – 1000, 2000 або 3000 Вт;

ККД лазерного джерела – не менше 30 %.

Система руху:

Кінематична схема – Портальна, лист нерухомий;

Базові варіанти розмірів поля обробки – 3000×1500 мм;

Тип приводу координат X,Y – Лінійний привід;

Тип приводу координати Z – Сервопривід;

Точність позиціонування за координатами (X, Y) – ± 0.01 мм;

Максимальна швидкість переміщення – 100 м/хв.

Як ми й очікували, при розрізанні тих самих листів металів без попереднього деформаційного зміцнення листового металу та по запропонованій схемі (з механічною деформацією листів) відбувається, в першу чергу, зменшення ширини різів. На рисунку 5 представлено фото вигляду різів зверху металевого листа, виконаних по двох цих схемах обробки, яке підтверджує це. З рисунку 5 також видно, що при застосуванні попередньої деформації зменшується не тільки ширина отриманого розрізу металу, а й величина зони термічного впливу (ЗТВ) на його краяхках.

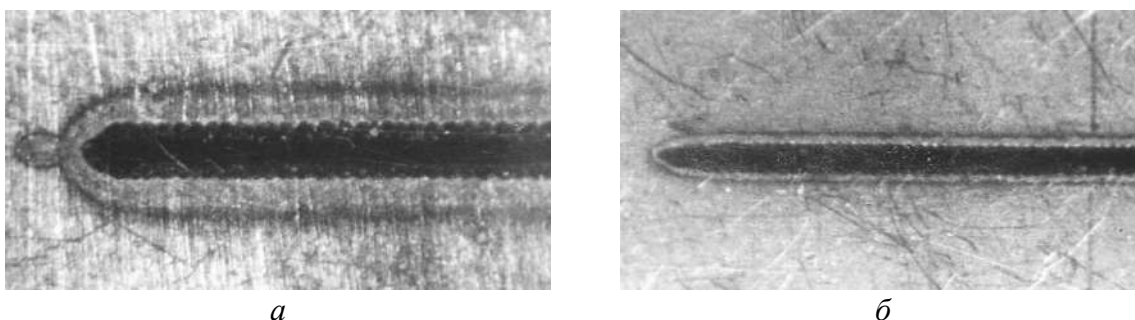


Рис. 5. Величина ширини різів та видимого сліду (ЗТВ) на верхній поверхні металу при різці без (а) та з попереднім деформуванням металу (б)

Водночас розгляд вигляду поверхні різів, виконаних по обох цих схемах обробки, показує, як змінюється вигляд та величина шорсткості поверхні різів (рис. 6).

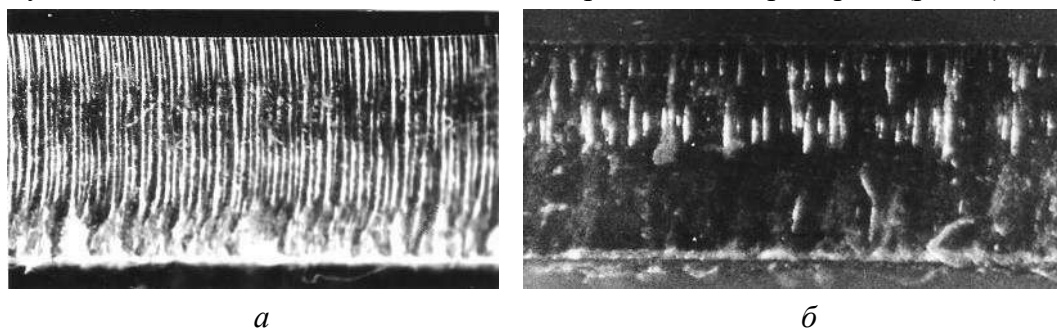


Рис. 6. Вигляд поверхні різів при різці без (а) та з попереднім деформуванням металу (б)

При застосуванні попередньої механічної деформації поверхня лазерного різіу набуває більш литий вигляд, без гострих виступів. При цьому зменшується величина мікросорткості з величини $R_z = 30...40$ мкм до величини $R_z = 10...20$ мкм.

Виконані пошукові експерименти показали, що ширина поверхні різіу на верхній поверхні металу в залежності від швидкості розрізання зменшується при застосуванні попередньої активації металу за рахунок механічного деформування (рис. 7).

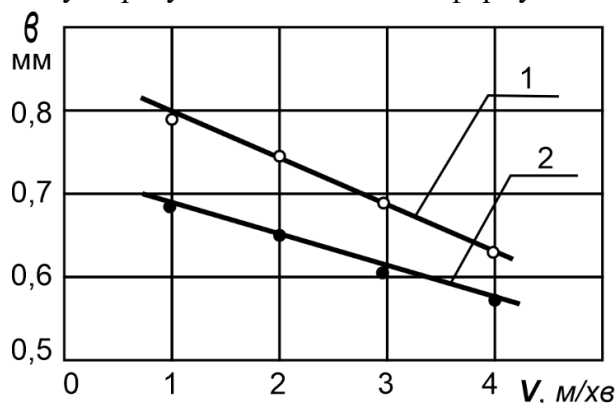


Рис. 7. Залежність ширини різіу на верхній поверхні металу від швидкості різіування без (крива 1) та з попереднім деформуванням металу (крива 2).

Висновки. Розроблені конструктивні та технологічні вдосконалення методу лазерного різіування металів дають можливість реалізувати, як підвищення продуктивності процесу лазерного розрізання металів, так і зростання якості отриманих крайок різів.

Список використаних джерел

1. Патент США № 6576870, опубл. 10.06.2003.
2. Патент США № 6313433, опубл. 06.11.2001.
3. Патент на корисну модель Китаю № 2661357, опубл. 08.12.2004.
4. Патент на корисну модель Китаю № 201257862, опубл. 17.06.2009.
5. Патент на корисну модель Китаю № 201338160, опубл. 04.11.2009.
6. Патент на корисну модель Китаю № 246890371, опубл. 14.06.2017.
7. Коваленко В. С. Малоотходные процессы резки лучом лазера / В. С. Коваленко, В. В. Романенко, Л. М. Олещук. – К. : Техніка, 1987. – 112 с.
8. Патент на корисну модель Китаю № 201338162 опубл. 04.11.2009.
9. Заявка на патент США № 2010/0044353, опубл. 25.02.2010.
10. Man H.C. Dynamic characteristics of gas jets from subsonic and supersonic nozzles for high pressure gas laser cutting / H. C. Man, J. Duan, T. M. Yue // Optics & Laser Technology. – 2018. – Vol. 30. – Pp. 497-509.
11. Основні характеристики вальцювального верстата RBM 1300M Maschinen 26179088, фірми Holzmann, Німеччина [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http:// abplanalp.ua.html](http://abplanalp.ua.html).
12. Основні характеристики лазерного верстата для різіування (AFL), фірми Aramis, Україна. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://aramis.com.ua/laser-cut-afl.html>

References

1. Patent SShA № 6576870, opubl. 10.06.2003.
2. Patent SShA № 6313433, opubl. 06.11.2001.
3. Patent na korysnu model Kitaiu № 2661357, opubl. 08.12.2004.
4. Patent na korysnu model Kitaiu № 201257862, opubl. 17.06.2009.
5. Patent na korysnu model Kitaiu № 201338160, opubl. 04.11.2009.
6. Patent na korysnu model Kitaiu № 246890371, opubl. 14.06.2017.
7. Kovalenko, V.S., Romanenko, V.V., & Oleshchuk, L.M. (1987). *Malootkhodnye protsessy rezky luchom lazera [Low-waste laser cutting processes]*. Tekhnika.
8. Patent na korysnu model Kitaiu № 201338162 opubl. 04.11.2009.
9. Zaiavka na patent SShA № 2010/0044353, opubl. 25.02.2010.

10. Man, H.C., Duan, J., Yue, T.M. (2018). Dynamic characteristics of gas jets from subsonic and supersonic nozzles for high pressure gas laser cutting. *Optics & Laser Technology*, 30, 497-509.

11. Osnovni kharakterystyky valtsiuvalnoho verstata RBM 1300M Maschinen 26179088, firmy Holzmann, Nimechchyna. [http:// abplanalp.ua.html](http://abplanalp.ua.html).

12. Osnovni kharakterystyky lazernoho verstata dlia rizannia (AFL), firmy Aramis, Ukraina. <http://aramis.com.ua/laser-cut-afl.html>.

Отримано 31.01.2023

UDC 621.375.826:621

Victor Romanenko¹, Mykhaylo Bloshchytyn², Ivan Zheget³, Yuriy Yurchenko⁴

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Laser Systems and Physical Technologies National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: romvvv@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1918-7090>

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Laser Systems and Physical Technologies National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: m.bloshchytyn@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3688-7948>

³Master of the Department of Laser Systems and Physical Technologies National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: i.zheget-ml71@iit.kpi.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7504-6490>

⁴Master of of the Department of Laser Systems and Physical Technologies National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: yuriyyurchenko14@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-9253-009X>

DESIGN AND TECHNOLOGICAL IMPROVEMENTS OF THE PROCESS OF LASER CUTTING OF METALS

An analysis of the existing methods of laser cutting is given and the features of constructive and technological improvement of the process are presented. The technology of laser cutting of metals, in particular sheet metal, is constantly being improved and modernized. Expanding the functionality of existing equipment on the market can be done by using two or more laser heads. The laser heads move synchronously and are programmatically coordinated among themselves in six coordinates. This allows not only to increase the speed of the cutting process, but also provides the possibility of simultaneously cutting several different parts or holes from one sheet or more sheets, which ensures the expansion of functionality, as well as the acceleration of the cutting process.

At the same time, the disadvantages of the traditional method of contour laser cutting are the low quality of the cut edges. To improve the quality of laser cutting, it is recommended to reduce the thermal effect on the metal of the workpiece with the help of a cooling liquid sprayed along with the gas flow, which allows to reduce the thermal conductivity of the metal of the workpiece. A significant drawback of this method is the complex design of the laser installation. Taking into account other disadvantages of the traditional contour laser cutting method (non-perpendicularity and high roughness) and the possible range of metal thicknesses, a combined laser cutting method was proposed. A combined laser installation was developed, where sheet metal is subjected to mechanical activation before laser cutting, which consists in cold plastic deformation. At the same time, the mechanical activation of the metal sheet occurs, which leads to a decrease in the thermal conductivity of the metal due to its deformation hardening and, as a result, a reduction (localization) of the zone of thermal influence in the cutting zone. The observed effect is due to the compaction of the crystal lattice of the metal, the increase in the density of dislocations during plastic deformation. When applying preliminary deformation, not only the width of the cut in the metal is reduced, but also the roughness of the cut surface and the size of the thermally affected zone at its edges.

The presented technological solution makes it possible to reduce the cost of the product by reducing the labor intensity of further metalwork as a result of increasing the accuracy of dimensions and reducing the roughness of the cut surface and significantly reducing the width of the cut.

Keywords: laser; technological process; thermal conductivity; cutting; plastic deformation; diagram of treatment.

Fig.: 7. **Table:** 1. **References:** 12.

Сергій Сапон

кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій машинобудування та деревообробки
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: s.sapon@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1082-6431>
ResearcherID: G-7764-2014. Scopus Author ID: 56736964700

**КОНЦЕПЦІЯ СТВОРЕННЯ МОДЕЛІ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ШПИНДЕЛЬНОГО ВУЗЛА**

Технологія цифрового двійника лежить в основі реалізації кіберфізичної технологічної системи і є базовою технологією Індустрії 4.0. Цифровим двійником шпиндельного вузла (ШВ) вважається динамічна віртуальна модель, яка в режимі реального часу двосторонніми інформаційними зв'язками пов'язує ШВ, як реальний фізичний об'єкт, з його цифровою моделлю та відображає всі особливості його конструкції і функціонування протягом життєвого циклу в режимі реального часу. Ключовим компонентом цифрового двійника ШВ є його модель, яка являє собою комплекс цифрових моделей, що описують його конструктивні, технологічні, експлуатаційні, параметри та фізико-механічні процеси, які відбуваються протягом експлуатації ШВ і відображають вплив цих параметрів на показники якості та ефективності його функціонування протягом життєвого циклу в режимі реального часу. Тому в роботі розглянуто концепцію створення моделі цифрового двійника ШВ.

Ключові слова: цифровий двійник; шпиндельний вузол; модель цифрового двійника.

Рис.: 5. Бібл.: 19.

Актуальність теми дослідження. Шпиндельний вузол (ШВ) є основним формуючим компонентом металорізальних верстатів. Динамічні характеристики ШВ безпосередньо впливають на точність, якість обробки та інші показники, що визначають ефективність функціонування технологічної оброблюючої системи. Отримання максимально достовірних динамічних характеристик ШВ у процесі експлуатації є надважливою фундаментальною основою для підвищення ефективності конструкторських рішень при проектуванні ШВ та реалізації ефективних систем керування параметрами ШВ у процесі експлуатації. Стабільна потреба в пошуку шляхів покращення функціональних показників ШВ зумовлює необхідність створення максимально точних і адекватних моделей, що описують роботу ШВ, як елемента технологічної оброблюючої системи нового покоління. Перспективним шляхом вирішення проблеми підвищення точності та ефективності експлуатації ШВ є створення їхніх цифрових двійників (ЦД). Власне це й зумовлює актуальність цієї роботи.

Постановка проблеми. Динамічні характеристики ШВ в процесі різання змінюються. Ці зміни зумовлені будь-якими змінами в елементах технологічної оброблюючої системи: зміна режимів різання, температурні деформації, спрацювання різального інструменту, анізотропія властивостей оброблюваних заготовок тощо. Традиційні методики не дають можливості оперативно, максимально адекватно і точно визначити динамічні характеристики ШВ в процесі різання в режимі реального часу. Це зумовлено тим, що традиційно використовуване апаратне і програмне забезпечення для моніторингу експлуатаційних параметрів та показників якості ШВ належною мірою не інтегровано в єдину систему. Це є суттєвим обмеженням для широкого впровадження парадигм Industry 4.0. Перспективним шляхом вирішення зазначеної проблеми є створення цифрових двійників ШВ [1-4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вперше концепцію цифрових двійників озвучив Майкл Гривс в 2002 році. У 2014 році він докладно описав ЦД у роботі [1]. В подальшому по мірі розвитку цифрових технологій концепція ЦД також еволюціонувала і на сьогодні цифровим двійником вважається динамічна віртуальна модель системи, яка являє собою поєднання фізичного об'єкта, як системи компонентів, його цифрової моделі, яка відображає всі особливості його конструкції і функціонування протягом життєвого циклу, та комунікаційних засобів, які забезпечують обмін даними між фізичним об'єктом та його цифровою моделлю в режимі реального часу [1-5]. Поняття, сутність і тенденції розвитку ЦД в сфері машинобудування більш-менш докладно висвітлено в ро-

ботах [3; 4]. Ідея створення і перспективність використання ЦД металорізальних верстатів висвітлена в роботах [3; 6; 7] та багатьох інших. У роботі [8] роз'яснено концепцію створення інтелектуальних шпинделів, яку в певній мірі можна реалізовувати для створення ЦД ШВ. Про перспективність створення ЦД ШВ, як окремих автономних інтелектуальних компонентів верстатів сказано в роботах [9; 10]. Автори роботи [10] відмічають, що застосування ЦД ШВ, як окремого інтелектуального компонента, дозволить спростити та підвищити ефективність системи інтелектуального моніторингу верстата в цілому. У зазначених роботах [9; 10] основну увагу зосереджено на архітектурі та функціональних можливостях інтегрованої системи локального збору, об'єднання, обробки, представлення і передачі даних до ЦД ШВ.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Треба зазначити, що попри достатню кількість праць, присвячених розробкам ЦД металорізальних верстатів, робіт, у яких було б акцентовано увагу на розробці ЦД ШВ як важливого компонента металорізальних верстатів, мало. У наявних у відкритому доступі закордонних працях переважно приділено увагу здебільшого проблемам та питанням перспективності створення ЦД технологічних систем загалом. В роботах [8-10] обґрунтовано перспективність та наведено авторські концепції інтелектуальних ШВ, як автономних інтелектуальних компонентів верстатів, проте в цих роботах не акцентується увага на конкретній послідовності етапів створення моделі ЦД ШВ. Робіт українських вчених, в яких би висвітлювалася концепція створення ЦД ШВ не виявлено. Тому розробка узагальненої концепції створення моделі ЦД інтелектуального ШВ є необхідним і важливим завданням, вирішення якого на цьому етапі дозволить надалі конкретизувати етапи та сформулювати чітку методологію його створення.

Метою статті є розробка узагальненої концепції створення моделі цифрового двійника, як компонента інтелектуального ШВ, яка дозволить в подальшому конкретизувати зміст етапів створення ЦД ШВ та сформулювати методологію його створення.

Виклад основного матеріалу.

Для чіткого трактування і розмежування понять, на основі термінів і визначень, наведених у [1-7; 9; 10] з деякими авторськими уточненнями сформулюємо визначення ЦД виробу як фізичного об'єкта або системи та визначення моделі ЦД виробу.

Цифровий двійник виробу (системи) – це віртуальне представлення фізичного об'єкта (системи), яке складається з самого фізичного об'єкта (системи), його цифрової моделі та двосторонніх інформаційних зв'язків між фізичним об'єктом і цифровою моделлю об'єкта і (або) його складових частин, і використовується для моделювання, аналізу, оптимізації стану та поведінки фізичного об'єкта (системи) в реальних умовах функціонування, у режимі реального часу протягом всього життєвого циклу виробу (системи).

Модель цифрового двійника виробу являє собою детальне повноелементне представлення та оцифроване відображення в інформаційному просторі конструкції та робочого стану фізичного об'єкта у процесі виконання своїх функцій і є інтегрованою мультифізичною, мультимасштабною, мультидисциплінарною, гіперреалістичною, динамічною, імовірнісною імітаційною моделлю, яку можна використати для моделювання, моніторингу, діагностики, прогнозування та управління поведінкою виробу в реальних умовах його функціонування, у режимі реального часу протягом всього життєвого циклу виробу (системи), як фізичного об'єкта.

Можна сказати, що ЦД – це технології, процеси та методи, застосовані для його створення та забезпечення функціональності, а модель ЦД – це віртуальне відображення об'єкта, цифрові моделі та дані, які пов'язані між собою і з реальним фізичним об'єктом, і які описують особливості його функціонування в реальному середовищі, у режимі реального часу протягом усього життєвого циклу [11].

Відповідно до вищевикладеного, в контексті ШВ його цифровим двійником є система, яка в режимі реального часу двосторонніми інформаційними зв'язками пов'язує ШВ як реальний фізичний об'єкт з його цифровою моделлю (рис. 1).

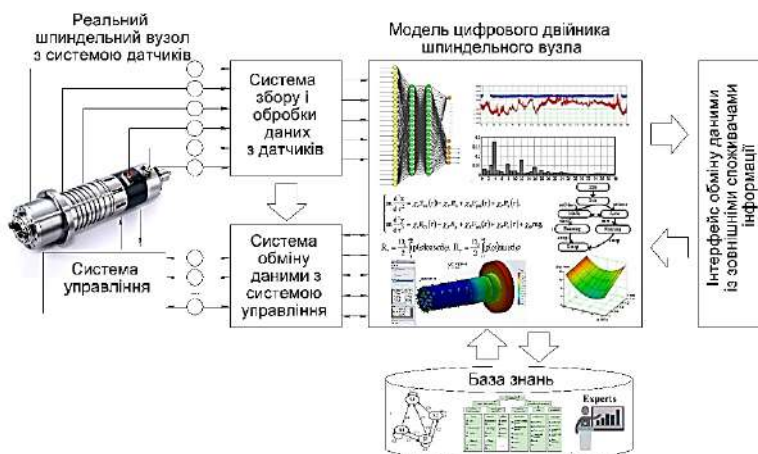


Рис. 1. Концептуальна структура цифрового двійника ШВ

Джерело: розроблено автором.

По суті, цифровий двійник ШВ поєднує в собі: інтеграцію сучасних цифрових технологій, інтеграцію інструментів моделювання з безперервним інформаційним обміном даними, інтеграцію моделі цифрового двійника з реальним ШВ на базі інформаційного обміну даними в максимально наближеному до реального часу режимі, інтеграцію моделювання на всіх стадіях життєвого циклу ШВ.

Концептуальні характеристики цифрового двійника ШВ:

- ЦД – це цифрова копія ШВ, яка відображає його структуру, особливості, технічний стан, а також характер та історію експлуатації реального ШВ (фізичного двійника).
- ЦД базується на мультифізичному, масштабованому і мультидисциплінарному математичному моделюванні компонентів та фізичних процесів, що визначають вихідні показники якості ШВ.
- ЦД – модель, яка накопичує інформацію про параметри й функціональні показники реального ШВ протягом його експлуатації у конкретних умовах. У двох конструктивно однакових ШВ ЦД будуть різні, оскільки вони працюють у неоднакових умовах.
- ЦД – модель ШВ, яка оновлюється і уточнюється протягом його експлуатації на основі даних з датчиків реального ШВ в режимі реального часу.
- ЦД інтегрує різномірну інформацію про функціональні показники і параметри реального ШВ.
- ЦД дозволяє розробникам ШВ віддалено спостерігати за параметрами віртуальної копії ШВ, щоб краще зрозуміти, як оптимізувати конструкцію реального ШВ.
- ЦД допомагає встановлювати і уточнювати на всіх етапах експлуатації закономірності формування функціональних показників конкретного ШВ в реальних умовах для оптимізації режимів експлуатації.
- ЦД дозволяє на основі даних про експлуатаційні параметри реального ШВ робити оцінку і прогнозування його ресурсного стану та віддалено планувати сервісне обслуговування.

Ключові компоненти для створення цифрового двійника ШВ наведено на рис. 2.

Надалі в цій роботі увагу сконцентровано виключно на розробці структури моделі ЦД інтелектуального ШВ.

Основою концепції створення моделі ЦД ШВ пропонується застосувати інструменти модельно-орієнтованого системного інжинірингу (Model-Based Systems Engineering (MBSE) [12; 13]. Однією із частин MBSE є описання будь-якого об'єкту, як технічної системи за допомогою комплексу математичних моделей, які відображають взаємозв'язки між параметрами системи та показниками, що визначають якість її функціонування. Відповідно моделлю ЦД ШВ будемо вважати впорядковану архітектуру цифрових моделей, які описують констру-

ктивні, технологічні, експлуатаційні, параметри ШВ та фізико-механічні процеси, які відбуваються протягом експлуатації ШВ і відображають вплив цих параметрів на показники якості та ефективності функціонування ШВ в режимі реального часу. В моделі ЦД ШВ також враховуються дані про попередні періоди експлуатації та інформація, яка відображає індивідуальні конструкторсько-технологічні особливості ШВ, сформовані на етапі його виготовлення.



Рис. 2. Ключові компоненти для створення цифрового двійника ШВ

Джерело: розроблено автором

Для максимально адекватного описання особливостей функціонування ШВ, як і будь-якого фізичного об'єкта, його модель ЦД повинна бути: унікальною, мультифізичною, мультимасштабною, ієрархічною, інтегрованою, динамічною, ймовірнісною, гіперреалістичною, мультидисциплінарною з необхідними обчислювальними спроможностями та функціональністю (рис. 3).



Рис. 3. Характеристики моделі цифрового двійника ШВ

Джерело: розроблено автором

Функціональність моделі цифрового двійника ШВ полягає в тому, що вона повинна відображати необхідні й достатні функції конкретного ШВ відповідно до його функціонального призначення. Модель повинна відображати механізми формування критеріїв, за якими визначається виконання ШВ своїх функцій.

Унікальність моделі ЦД ШВ полягає в тому, що ця модель будується тільки у відповідності до індивідуальних параметрів, особливостей конструкції та умов функціонування конкретного ШВ. Абсолютно однакових ШВ і умов, в яких вони експлуатуються не існує. Тому будь-який інший візуально конструктивно-однаковий ШВ буде мати власну унікальну модель цифрового двійника.

Ієрархічність моделі ЦД ШВ зумовлена тим, що ШВ є складною технічною системою, яка містить в собі різні компоненти, частини, які мають відповідні цифрові моделі-двійники. Зокрема, модель ЦД ШВ містить моделі корпусу, шпиндельного вала, шпиндельних опор, приводу, модель ЦД системи мащення, охолодження, модель ЦД технологічного оснащення для закріплення оброблюваної заготовки або різального інструменту, цифрову модель системи управління робочими параметрами ШВ тощо. Моделі компонентів ШВ, які складають модель його ЦД взаємопов'язані і в комплексі мають створювати впорядковану ієрархічну архітектуру.

Мультифізичність моделі ЦД ШВ обумовлена тим, що сучасний ШВ є складною мехатронною системою, яка містить механічні, електричні, гідравлічні (пневматичні) та інші компоненти. Відповідно для повноцінного описання закономірностей формування показників якості та ефективності функціонування ШВ необхідне врахування всіх процесів, що протікають у ШВ протягом його експлуатації. Тобто необхідно не тільки описати геометричні властивості ШВ (конструкція, розміри, фактичні відхилення форми і розташування виконавчих поверхонь, основних і допоміжних баз), а й описати різні фізико-механічні властивості компонентів ШВ, включно з динамічними моделями процесів, термо-динамічними моделями, моделями аналізу напружень, моделями властивостей конструкційних матеріалів (жорсткість, міцність, твердість і втомна міцність) тощо. При мультифізичному моделюванні необхідно враховувати не тільки різні фізичні процеси у ШВ, а й їх взаємний вплив. Так, наприклад, на формування показників точності ШВ з гідростатичними опорами впливають його індивідуальні динамічні характеристики, температурні деформації, властивості робочої рідини системи живлення шпиндельних опор, геометричні відхилення форми опорних поверхонь шпиндельних підшипників, характер технологічного навантаження тощо [14; 15; 16].

Мультимасштабність моделі ЦД ШВ означає, що для описання закономірностей формування показників якості та ефективності функціонування ШВ необхідно застосовувати моделі на макро- мезо- та мікрорівні [17; 18; 19]. Наприклад, при створенні моделі ЦД ШВ макроскопічні моделі використовуються для виявлення взаємозв'язків між конструктивними, експлуатаційними параметрами ШВ та його кінематичними, динамічними або механічними характеристиками. Вплив геометричних відхилень спряжених поверхонь компонентів ШВ описується моделями мезорівня. Наприклад, у роботах [14; 15] систематизовано і досліджено деякі фактори, що впливають на геометрію радіального зазору в гідростатичній опорі прецизійного ШВ. Показано, що геометричні відхилення опорних поверхонь гідростатичного підшипника впливають на режим тертя в підшипнику та реакцію його масляного шару, що істотно впливає на його навантажувальну здатність та динамічні характеристики. Моделі на мікрорівні орієнтовані на дослідження у мікромасштабі впливу на функціональні показники ШВ параметрів робочої рідини в гідростатичних опорах шпинделя, властивостей мікроструктури матеріалів, шорсткості поверхонь компонентів ШВ тощо.

Слід відзначити, що мезорівень і мікрорівень є доволі складними для прямого математичного моделювання внаслідок численних нелінійних, стохастичних, еволюційних та дисипативних процесів, які необхідно максимально точно описати. Водночас, оскільки вимоги до продуктивності й точності верстатів постійно зростають, не можна

нехтувати процесами, що протікають на мікрорівні. Саме тому при розробці високоточних ШВ для обробки поверхонь з точністю у нанометричному діапазоні важливо застосовувати підхід, заснований на мультимасштабному моделюванні та аналізі конструкції ШВ та фізико-механічних процесів, що відбуваються в процесі виконання ним свого функціонального призначення.

Мультидисциплінарність моделі цифрового двійника ШВ передбачає перетин та об'єднання кількох дисциплін, таких як теоретична механіка, опір матеріалів і матеріалознавство, теорія різання, теоретичні основи технології машинобудування, математичний аналіз, інформатика, електроніка, електромеханіка, гідродинаміка тощо.

Модель ЦД ШВ являє собою мультимасштабну, мультифізичну і багаторівневу інтегровану модель, яка повинна мати здатність інтегрувати весь цей комплекс моделей, забезпечуючи при цьому їх взаємопов'язаність для оперативного обміну даними.

Динамічність моделі ЦД ШВ полягає в тому, процеси, які відбуваються зовні та в середині ШВ не є інваріантними в часі, тому модель постійно оновлюється та вдосконалюватиметься завдяки безперервній взаємодії з реальним ШВ на різних етапах всього життєвого циклу. Таким чином, оперативні дані про функціональні показники і ресурсний стан ШВ будуть відображатися в моделі ЦД ШВ у віртуальному просторі. Водночас ґрунтуючись на моделі ЦД, можна здійснювати моніторинг стану ШВ у режимі реального часу.

Стохастичність моделі ЦД ШВ означає те, що практично всі процеси і ШВ та в оточуючому середовищі мають стохастичний характер. Відповідно модель ЦД ШВ повинна мати обчислювальні можливості здійснювати відповідну статистичну обробку даних з моделей і датчиків реального ШВ в режимі онлайн.

Гіперреалістичність полягає в тому, що модель цифрового двійника ШВ має максимально ідентично з високим рівнем реалістичності відображати реальний стан ШВ, як фізичного об'єкта. Гіперреалістичність моделі ЦД ШВ забезпечується досконалістю засобів, які застосовують для створення моделі ЦД ШВ та максимальним врахуванням в режимі реального часу протягом всього періоду експлуатації ШВ інформації про параметри і показники, які визначають якість його функціонування.

Обчислювальні спроможності моделі ЦД ШВ полягають в наявності достатніх обчислювальних потужностей для зберігання, накопичення і обробки багатопоточних даних, здійснення моделювання, відображення стану та необхідних функціональних показників і параметрів ШВ в режимі реального часу.

Відповідно до концепції MBSE етапи створення моделі ЦД ШВ наведено на рис.4.



Рис. 4. Етапи створення моделі цифрового двійника інтелектуального ШВ
Джерело: розроблено автором.

У спрощеному вигляді компоненти моделі ЦД ШВ наведено на рис. 5.

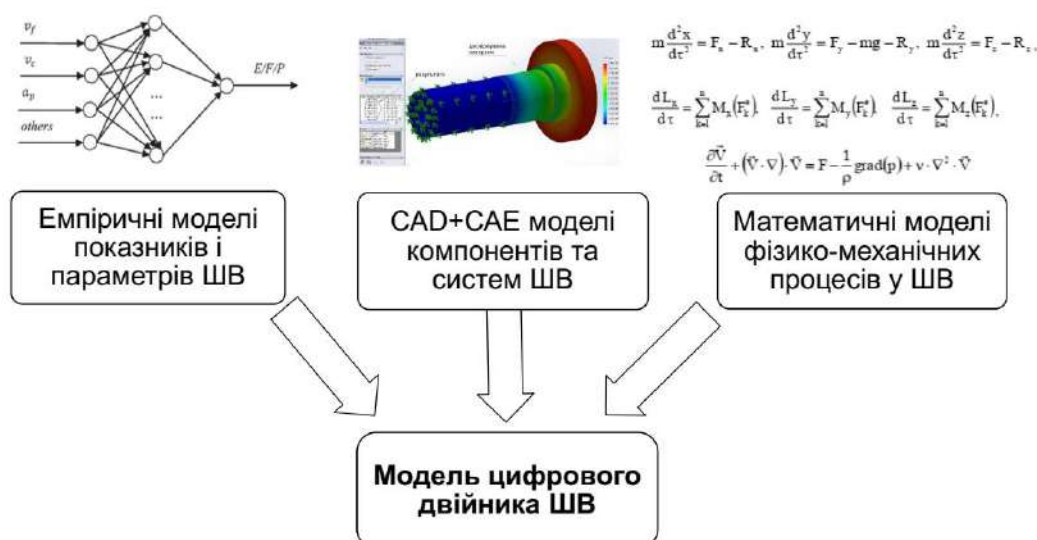


Рис. 5. Компоненти моделі цифрового двійника інтелектуального ШВ

Джерело: розроблено автором.

На найпершому етапі будуються тривимірні геометричні CAD-моделі, що описують форми, розміри, положення і складальні зв'язки компонентів ШВ. На цьому ж етапі в першому наближенні в CAE-системах здійснюється моделювання впливу робочих процесів і навантажень, що діють на ШВ і його компоненти в процесі експлуатації, на його статичні та динамічні характеристики. На цьому етапі конструкція ШВ може бути ще не до кінця визначеною, тому цей етап передбачає здійснення швидкого мультифізичного, мультимасштабного міждисциплінарного моделювання для швидкого аналізу конструкції ШВ без стремління до високої точності моделювання.

Завданням другого етапу є цифровізація та побудова впорядкованої архітектури мультифізичних (фізико-механічних, електро-механічних, гідравлічних тощо) математичних моделей, якими описується функціонування ШВ. Архітектура математичних моделей – це комплекс математичних залежностей, які кількісно описують взаємозв'язки між конструкторсько-технологічними та експлуатаційними параметрами ШВ та його показниками якості та ефективності. Зрозуміло, що чим більше висувається функціональних вимог до ШВ, тим більшою має бути кількість параметрів і показників, які його характеризують. Тільки в такому випадку описання функціонування ШВ буде максимально адекватним до реальних умов. Відповідно кількість і складність математичних моделей та трудомісткість моделювання також буде зростати, оскільки збільшення кількості моделей зумовить виключно нелінійне зростання інформаційних потоків та обсягів обчислень. Спрощення і зменшення кількості математичних моделей знизить адекватність моделі ЦД ШВ. Тому конкретний перелік математичних моделей визначається функціональними вимогами до ШВ у вигляді набору необхідних і доступних показників, які є потреба і можливість контролювати у реального ШВ. Тут слід відзначити, що на етапі моделювання окремі загальноприйняті фізико-механічні моделі процесів, компонентів та систем ШВ дозволяють визначити показники якості та ефективності функціонування конкретного ШВ лише з певною ймовірністю та рівнем адекватності. Об'єднання цих моделей в єдину систему обміну даними та з'єднання з сенсорною системою реального ШВ у режимі онлайн дозволить підвищити адекватність окремих моделей та всієї архітектури моделі ЦД ШВ загалом. Тому на цьому етапі створюється структурована система обміну даними між моделями, що описують функціонування ШВ. Тут треба зазначити, що на сьогодні немає більш ефективного інструменту для поєднання різномірних моделей в єдину систему, ніж технології штучного інтелекту.

На наступному етапі здійснюється попередня перевірка адекватності побудованої архітектури цифрових моделей ШВ. Оцінювання здійснюється завдяки наявності апріорної інформації та експертних знань про фізику і механіку процесів, які відбуваються протягом експлуатації ШВ. Для цього замість підключення до датчиків, що фіксують стан реального ШВ здійснюється підключення створеної моделі ЦД ШВ до комплексу віртуальних датчиків, які генерують сигнали подібно реальним процесам.

4-й етап передбачає підключення створеної моделі ЦД ШВ до реального ШВ, адаптацію моделі на основі експериментальних випробувань ШВ. Наявність достатньої кількості статистично оброблених показань датчиків створює можливість для побудови і додавання до архітектури моделі ЦД ШВ емпіричних, регресійних, нейромережових моделей, необхідних для визначення певних функціональних показників і ресурсного стану ШВ. Кількість емпіричних моделей, що додаються визначається функціональністю моделі ЦД ШВ. Також за даними з датчиків уточнюються фізико-математичні моделі у вигляді диференціальних рівнянь, що описують робочі процеси і взаємозв'язки між конструкторсько-технологічними, експлуатаційними параметрами ШВ та його показниками якості й ефективності.

Заключний етап побудови моделі ЦД ШВ передбачає адаптацію моделі ЦД ШВ до конструкторсько-технологічних та експлуатаційних особливостей конкретного ШВ протягом всього періоду його експлуатації. Модель ЦД ШВ з'єднується з системою збору, обробки і передачі даних (див. рис.1), яка комутує дані з датчиків реального ШВ. Далі в режимі онлайн статистично оброблені дані з датчиків реального ШВ передаються в моделі ЦД, які завдяки цьому оновлюються та уточнюються протягом всього життєвого циклу.

Таким чином, побудова моделі ЦД ШВ має двонаправлений характер: від загального до часткового і від часткового до загального. Саме поєднання цих двох напрямів дозволяє стверджувати, що побудова моделі ЦД ШВ не може вважатися повністю завершеним процесом, оскільки модель ЦД ШВ буде постійно уточнюватися і оновлюватися до тих пір, поки експлуатація ШВ не припиниться.

Отже при створенні моделі ЦД ШВ необхідно докладно розглянути наступні ключові питання: високоточне моделювання, інтеграція моделей, верифікація моделей, аналіз взаємоузгодженості моделей, механізми функціонування та еволюції моделей.

Модель ЦД ШВ імітує всі можливі режими роботи ШВ протягом його експлуатації, враховує вплив зовнішніх факторів та процесів управління, дозволяє передбачати ресурсний стан, показники якості та ефективності функціонування ШВ. Цифровий двійник базується на інтеграції математичного, імітаційного моделювання, технологій штучного інтелекту, машинного навчання та аналітичного програмування. Протягом експлуатації конкретного ШВ його ЦД безперервно навчається та оновлює свої параметри, отримуючи інформацію від множини датчиків, максимально адекватно відображаючи стан реального ШВ. Під час навчання модель ЦД ШВ оновлюється, використовуючи поточні дані від датчиків реального ШВ, системи ЧПК верстата, поєднуючи фактичні дані з базою знань експертів та даними попередніх етапів експлуатації.

В останні роки технологія ЦД стрімко розвивається як на теоретичному, так і на прикладному рівнях. У той же час сфера застосування поступово зміщується від етапу проектування продукту до етапу його виробництва, експлуатації та обслуговування, що привертає широку увагу і вчених і виробництва. Основними причинами цього є такі аспекти [11]:

1. Зростання та широке застосування технологій цифрового моделювання робить можливим більш точне математичного описання фізико-механічних, хімічних, електро-механічних та інших процесів на різних етапах життєвого циклу продукту.

2. Швидка популяризація та застосування нового покоління інформаційних та комунікаційних технологій, таких як Big data, інтернет речей, мобільний Інтернет, хмарний комп'ютер, швидкий розвиток комп'ютерних наук та технологій, таких як великомасштабні, високопродуктивні, розподілені обчислення, а також поява інтелектуальних алгоритмів оптимізації, таких як машинне навчання та глибоке навчання, роблять надійнішими

продукти з динамічним збором даних у реальному часі. Прогнозування, швидка передача, зберігання, аналіз даних і прийняття рішень забезпечують важливу технічну підтримку для засобів кореляції та взаємодії віртуального і фізичного простору в реальному часі.

Висновки. У роботі представлено узагальнену концепцію створення моделі ЦД як компонента інтелектуального ШВ, яка дозволить в подальшому конкретизувати зміст етапів створення ЦД ШВ та сформуванню методологію його створення. Запропоновано формулювання визначення ЦД ШВ та його моделі, як ключового компонента ЦД. Наведено етапи створення моделі ЦД ШВ та сформульовано завдання, які підлягають вирішенню на цих етапах.

Показано, що побудова моделі ЦД ШВ має двонаправлений характер і не може вважатися повністю завершеним процесом, оскільки модель ЦД ШВ буде постійно уточнюватися та оновлюватися до моменту припинення експлуатації ШВ. Зауважено, що при створенні моделі ЦД ШВ необхідно докладно розглянути наступні ключові питання: високоточне моделювання, інтеграція моделей, верифікація моделей, взаємоузгодженість моделей, механізми функціонування та еволюції моделей.

Слід також відзначити, що наразі впровадження моделі ЦД ШВ має багато невирішених проблемних моментів. По-перше, у зв'язку зі стохастичністю, змінністю в часі, нелінійністю та певною невизначеністю зовнішніх та внутрішніх процесів у ШВ, побудова з високою точністю моделей, які формують архітектуру моделі ЦД ШВ у віртуальному просторі є фундаментальною проблемою. Крім того виникнення невідповідностей між моделями та реальними об'єктами і процесами важко оперативно відстежувати і, як наслідок, ефект від використання моделей знижується. По-друге, оскільки безперервний фізичний простір і дискретний віртуальний простір перебувають у різних масштабах, виникає проблема подолання розбіжності, щоб реалізувати безшовну інтеграцію реального ШВ та його цифрової моделі. Оскільки модель ЦД ШВ оновлюються протягом усього життєвого циклу ШВ, дані від датчиків ШВ і моделей генеруються безперервно. Тут постає питання як інтегрувати й об'єднати неперервно зростаючі обсяги даних. Пошук шляхів подолання зазначених проблем є завданням подальших досліджень.

Список використаних джерел

1. Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication / M. Grieves // White paper. – 2014. – № 1. – Pp. 1-7.
2. Uhlemann T.H.-J. The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0 / Uhlemann T.H.-J., Steinhilper C.L.R., Steinhilper R. // Procedia CIRP. – 2017. – Vol. 61. Part of special issue: The 24th CIRP Conference on Life Cycle Engineering. Ed. by S. Takata, Y. Umeda, S. Kondoh. – Pp. 335-340. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.152.
3. Fei Tao. Digital Twin Driven Smart Manufacturing / Fei Tao, Meng Zhang and A.Y.C. Nee. – Academic Press, London, United Kingdom, 2019. – 269 p.
4. Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0: A review / Leng, Jiewu & Wang, Dewen & Shen, Weiming & Li, Xinyu & Liu, Qiang & Chen, Xin // Journal of Manufacturing Systems. – Vol. 60. – Pp.119-137.
5. Segovia M. Design, modeling and implementation of digital twins. / Segovia M., Garcia-Alfaro J. // Sensors. – 2022. – No. 22. – 5396. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s22145396>.
6. Lai X. A Review: Machine Tools Digital Twin Modeling And Application / X. Lai, Y. Zhou, L. Jiang and G. Ding // 26th International Conference on Automation and Computing (ICAC), Portsmouth, United Kingdom, 2021. – Pp. 1-6. – DOI: 10.23919/ICAC50006.2021.9594151.
7. Armendia Mikel. Twin-Control: A Digital Twin Approach to Improve Machine Tools Lifecycle / Armendia Mikel, Ghassempouri Mani, Ozturk Erdem, Peysson, Flavien. – Springer Cham, 2019. – 298 p. – DOI:10.1007/978-3-030-02203-7.
8. Cao H. The concept and progress of intelligent spindles: a review/ Cao H., Zhang X., Chen X. // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2017. – No. 112. – Pp. 21–52. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.10.005>.

9. Wójcicki J. Potential for smart spindles adoption as edge computing nodes in Industry 4.0 / J. Wójcicki, M. P. Leonesio, G. Bianchi // *Procedia CIRP*. – 2021. – No. 99. – Pp.86-91.
10. Wójcicki J. A smart spindle component concept as a standalone measurement system for Industry 4.0 machine tools. / J. Wójcicki, G. Bianchi // 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT, 2020. – Pp. 278-282.
11. Wang Z. Digital Twin Technology in Industry 4.0 / Z. Wang // *Impact on Intelligent Logistics and Manufacturing*. – Intech Open, 2020. – Pp. 95-114. – DOI: 10.5772/intechopen.80974.
12. Micouin P. Model-based systems engineering: Fundamentals and methods / Patrice Micouin. – London : ISTE Ltd, 2014. – 272 p.
13. Wang, Yübo. Integration of model based system engineering into the digital twin concept / Wang Yübo, Steinbach Tanja, Klein Jonathan, Anderl Reiner // *Procedia CIRP*. – 2021. – Vol. 100. – Pp. 19-24. – DOI 10.1016/j.procir.2021.05.003.
14. Федориненко Д. Ю. Шпиндельні гідростатичні підшипники : монографія / Д. Ю. Федориненко, С. П. Сапон. – Чернігів : ЧНТУ, 2016. – 405 с.
15. Струтинський В. Б. Статистична динаміка шпиндельних вузлів на гідростатичних опорах : монографія / В. Б. Струтинський, Д. Ю. Федориненко. – Ніжин : ТОВ „Видавництво „Аспект-Поліграф”, 2011. – 464 с.
16. Fedorynenko D. Accuracy of spindle units with hydrostatic bearings / Dmytro Fedorynenko, Serhii Sapon, Sergiy Boyko // *Acta Mechanica et Automatica*. – 2016. – Vol. 10, no. 2(36) – Pp. 117-124. – DOI: 10.1515/ama-2016-0019.
17. Shao Y. Development of multiscale multiphysics-based modelling and simulations with the application to precision machining of aerofoil structures / Shao Y., Adetoro O.B., Cheng K. // *Engineering Computations*. – 2021. – Vol. 38, no. 3. – Pp. 1330-1349. – DOI 10.1108/EC-10-2019-0473.
18. Weinan E. Principles of Multiscale Modelling / E. Weinan. – Cambridge: Cambridge University Press, 2011. – 510 p.
19. Gou N. Multiscale modelling and analysis for design and development of a high-precision aerostatic bearing slideway and its digital twin / Gou N., Cheng K., Huo D. // *Machines*. – 2021. – No. 9, Vol. 85. – DOI 10.3390/machines9050085.

References

1. Grieves, M. (2014). Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. *White paper*, (1), 1-7.
2. Uhlemann T.H.-J., Steinhilper C.L.R., Steinhilper R. (2017). The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0. *Procedia CIRP*. (61). Part of special issue: The 24th CIRP Conference on Life Cycle Engineering (pp. 335-340).
3. Fei Tao, Meng Zhang and A.Y.C. Nee. (2019). *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*. Academic Press.
4. Leng, Jiewu & Wang, Dewen & Shen, Weiming & Li, Xinyu & Liu, Qiang & Chen, Xin. (2021). Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, (60),119-137. doi:10.1016/j.jmsy.2021.05.011.
5. Segovia, M., Garcia-Alfaro, J. Design. (2022) Modeling and Implementation of Digital Twins. *Sensors*, (2)(5396)). <https://doi.org/10.3390/s22145396>
6. Lai, X., Zhou, Y., Jiang, L., & Ding, G. (2021) A Review: Machine Tools Digital Twin Modeling And Application. *26th International Conference on Automation and Computing (ICAC)* (pp. 1-6).
7. Armendia Mikel, Ghassempouri Mani, Ozturk Erdem, Peysson, Flavien. (2019). *Twin-Control: A Digital Twin Approach to Improve Machine Tools Lifecycle*. Springer Cham.
8. Cao, H., Zhang, X., Chen, X. (2017) The concept and progress of intelligent spindles: a review. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, (112), 21–52.
9. Wójcicki, J., Leonesio, M.P., & Bianchi, G. (2021). Potential for smart spindles adoption as edge computing nodes in Industry 4.0. *Procedia CIRP*, (99), 86-91.
10. Wójcicki, J., & Bianchi, G. (2020). A smart spindle component concept as a standalone measurement system for Industry 4.0 machine tools. *2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT* (pp. 278-282).
11. Wang, Z. (2020). Digital twin technology in Industry 4.0. *Impact on Intelligent Logistics and Manufacturing* (pp. 95-114). doi: 10.5772/intechopen.80974

12. Micouin P. (2014). *Model-based systems engineering: Fundamentals and methods*. ISTE Ltd.
13. Wang Yübo, Steinbach Tanja, Klein Jonathan, Anderl Reiner. (2021) Integration of model based system engineering into the digital twin concept. *Procedia CIRP*, (100), 19-24.
14. Fedorynenko D., & Sapon S. (2016). *Spindle Hydrostatic Bearings (in Ukrainian)*. ChNUT.
15. Strutynsky V., & Fedorynenko D. (2011). *Statistical dynamics of spindle units for hydrostatic bearings (in Ukrainian)*. Aspect-Polygraph.
16. Fedorynenko, D., Sapon, S., & Boyko, S. (2016) Accuracy of spindle units with hydrostatic bearings. *Acta Mechanica et Automatica*, 10(2(36)), 117-124.
17. Shao, Y., Adetoro, O.B., & Cheng, K. (2021). Development of multiscale multiphysics-based modelling and simulations with the application to precision machining of aerofoil structures. *Engineering Computations*, 38(3), 1330-1349. <https://doi.org/10.1108/EC-10-2019-0473>.
18. Weinan, E. (2011). *Principles of Multiscale Modelling*. Cambridge University Press.
19. Gou, N., Cheng, K., & Huo, D. (2021) Multiscale Modelling and Analysis for Design and Development of a High-Precision Aerostatic Bearing Slideway and Its Digital Twin. *Machines*, 9(85). doi:10.3390/machines9050085.

Отримано 11.10.2022

UDC 621.923.42

Serhii Sapon

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Wood Technology
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: s.sapon@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1082-6431>.
ResearcherID: G-7764-2014. Scopus Author ID: 56736964700

THE CONCEPT OF CREATING OF A DIGITAL TWIN MODEL OF AN INTELLIGENT SPINDLE UNIT

The digital twin technology is the basis for the implementation of a cyber-physical technological system and is the core technology of Industry 4.0. A digital twin of a spindle unit is a dynamic virtual model that connects the spindle unit as a real physical object with its digital model in real time via two-way information links and reflects all the features of its design and functioning during its life cycle in real time. The key component of the digital twin of the spindle unit is its model, which is a set of digital models that describe its design, technological, operational, parameters and physical and mechanical processes that occur during the operation of the spindle unit and reflect the impact of these parameters on the quality and efficiency of its functioning during the life cycle in real time. Therefore, the paper considers the concept of creating a model of a digital twin of a spindle unit.

The introductory part of the article formulates the issues and relevance and analyzes the works that propose approaches to the creation of digital twins, in particular, their models. In the main part of the paper; we first propose definitions of the terms digital twin of a spindle unit and its model. The conceptual structure of the digital twin of the spindle unit is presented. A list of characteristics of the model of the digital twin of the spindle unit is defined. The structure of the model of the digital twin of the intelligent spindle unit is determined and the stages of its model creation are given, the tasks to be solved at these stages are specified.

It is shown that building a model of a digital twin of a spindle unit has a two-directional character and cannot be considered a fully completed process, since the model of a digital twin of a spindle unit will be constantly refined and updated until the spindle unit is out of service. It is noted that when creating a model of a digital twin of a spindle unit, it is necessary to consider in detail the following key issues: high-precision modeling, model integration, model verification, model consistency, mechanisms of functioning and evolution of models.

In the conclusions, attention is paid to the unresolved problematic issues that currently exist in the implementation of the model of a digital twin of a spindle unit.

The generalized concept of creating a model of a digital twin of an intelligent spindle unit presented in this paper will allow further specifying the content of the stages of creating a digital twin of a spindle unit and forming a methodology for its creation.

Keywords: digital twin; intelligent spindle unit; model of a digital twin; spindle.

Fig.:5. References: 19.

РОЗДІЛ II. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-4(30)-91-97
УДК 004.9:339.138

Костянтин Ткаченко¹, Анастасія Божок²

¹кандидат економічних наук, доцент кафедри інформаційних технологій та дизайну
Державний університет інфраструктури та технологій (Київ, Україна)
E-mail: oitkachenko56@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0549-3396>

²кандидат економічних наук, доцент кафедри маркетингу
Національний авіаційний університет (Київ, Україна),
магістр спеціальності «Інженерія програмного забезпечення»
Державний університет інфраструктури та технологій (Київ, Україна)

E-mail: nastya.bozhok@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4404-2267>. ResearcherID: [AAE-8833-2019](https://orcid.org/0000-0002-4404-2267)

РОЗШИРЕНА РЕАЛЬНІСТЬ ТА ЇЇ РОЛЬ У СОЦІАЛЬНИХ МЕДІА

У статті розглянуто поняття розширеної реальності, віртуальної та доповненої реальності, розкриваються значення цих термінів і сучасної концепції, особливості та відмінності віртуальної та доповненої реальності. Зазначаються можливі сфери використання видів реальностей як технології, яка змінить світ. Представлений прогноз збільшення ринку розширеної реальності в найближчі роки. Досліджено роль метавсесвіту та вплив розвитку віртуальної та доповненої форм реальності на соціальні медіа.

Ключові слова: розширена реальність; віртуальна реальність; доповнена реальність; метавсесвіт, визначення.
Рис.: 1. Бібл.: 12.

Актуальність теми дослідження. Технології та суспільство переходять у майбутнє, де більше «віртуальних продуктів» і людей, які приєднуються до спільнот в Інтернеті зі своїми віртуальними аватарами. Цей приклад демонструють світові лідери цифрових інновацій, які працюють над технологіями віртуальної та доповненої реальності, розвиваючи їх із кожним днем швидше і це суттєво трансформує бізнес та соціальні медіа. Для підвищення своєї конкурентоспроможності компанії впроваджують цифрові інновації у виробництво та маркетинг і таким чином технології віртуальної та доповненої реальності на сьогодні є основним потоком і потенціалом зміни способів взаємодії людей із продуктами, і із соціальними медіа.

Постановка проблеми. Загалом прогрес інформаційних технологій, таких як високошвидкісний мобільний Інтернет, штучний інтелект, збільшення обчислювальної потужності обладнання, високоякісні дисплеї надають користувачам нові можливості сприйняття реальності, а також потужний поштовх до трансформації її форм. У науковій і практичній літературі, крім понять віртуальна та доповнена реальність, дедалі частіше трапляються поняття розширеної реальності та метавсесвіту. При цьому погляди на цю термінологію різняться. Важливо зазначити, що термінологія відіграє важливу роль у досягненні взаєморозуміння, дозволяє уникнути нечіткостей і двозначностей у судженнях і, зрештою, прийняття спеціалістами правильних рішень.

Аналіз останніх досліджень та виділення невирішених проблем Розвиток науки про віртуальну реальність має довгу історію. Поняття штучної реальності було вперше введено М. Крюгером. Пізніше у зв'язку з прогресуючим розвитком технологій з'явилися інші пов'язані види реальності, трансформувалось визначення понять, їх концепції та погляди, з'явилась доповнена та змішана форми реальності. Основними лідерами з розвитку технологій віртуальної та доповненої реальності на сьогодні є Google, Microsoft та Meta Platforms. Microsoft просуває окуляри HoloLens як пристрій «змішаної реальності». Meta Platforms, Inc. (раніше Facebook, Inc.) придбала Oculus – компанію «Віртуальної реальності» (VR) (Hoffman et al., 2014), щоб доповнити свої основні продукти для соціальних мереж як компанію «метавсесвіту». РТС обговорює «Assisted Reality» як новий формат реальності для складських компаній (Coon, 2018). Apple рекламувала «доповнену

реальність» (AR) як технологію, яка змінить світ (Raymundo, 2016). Deloitte (2018) часто використовує термін «цифрова реальність», а Accenture використовує термін «розширена реальність» (Raghavan & Rao, 2018) [1].

Останніми десятиліттями простежується тенденція зростання кількості цитувань і публікацій, що демонструє підвищення інтересу до цієї теми. Німецький учений Ф. Раушнабель досліджує метавсесвіт, розширену реальність, здійснює вагомий внесок у концепцію віртуальної та доповненої реальності, описує їхню роль у виробництві та маркетингу [1, 2]. Ю. Пан визначає взаємозв'язок між віртуальною та доповненою реальністю на тлі віртуальної реальності [3]. Автори Д. Карміньяні, Б. Фрухт, М. Анісеті, П. Чераволо розглядають сучасний стан технології, системи й додатки доповненої реальності, проблеми та вимоги мобільних систем доповненої реальності [4]. Однак у галузевих публікаціях та блогах можна побачити неоднозначність в трактуванні та змістовому наповненні понять змішана реальність (XR), віртуальна реальність (VR) та доповнена реальність (AR).

Тому метою статті є систематизація існуючих знань з цього напрямку й розкриття на цій основі квінтесенції різних форматів реальності та сфер їх застосування.

Виклад основного матеріалу дослідження. Різноманітні технології відрізняються в першу чергу їхнім співвідношенням між реальним та віртуальним світом. У той час як користувачі доповненої реальності сприймають віртуальні об'єкти як розширення реального світу, користувачі віртуальної реальності занурюються в суто віртуальний світ, не бачивши водночас навколишнього фізичного середовища. Що стосується розширеної реальності, то ключовим аспектом її визначення є те, що вона завжди стосується технології занурення.

Розширена реальність або XR (extended reality) часто згадується як форма метавсесвіту, яка передбачає злиття фізичного та цифрового світів за допомогою гарнітур і пристроїв. Завдяки розширеній реальності ми можемо потрапити у віртуальні світи та взаємодіяти з 3D-аватарами в соціальних мережах, спільнотах. XR – це новий загальний термін для всіх імерсійних технологій. Ті, які ми вже маємо сьогодні – доповнена реальність (AR – augmented reality), віртуальна реальність (VR – virtual reality) і змішана реальність (MR – mixed reality), а також ті, які створюватимуться в майбутньому. Термін XR належать до всіх реальних і віртуальних комбінованих середовищ, взаємодій людини і машини, створених комп'ютерними технологіями та Інтернету речей [5].

Facebook прагне відіграти ключову роль у формуванні майбутнього ринку розширеної реальності та планує створити численні нові робочі місця в Європі. З наведеного нижче графіка (рис. 1) видно, що очікується зростання доходу у світовій індустрії AR/VR в секторі B2C до 47 млрд дол. США у 2026 р. За оцінками програмне забезпечення AR надалі, як і сьогодні, залишатиметься найбільшим сегментом ринку. У 2021 р. ринок мобільної доповненої реальності AR оцінювався у 12,45 млрд дол. США, на кінець 2022 р. – 17 млрд дол. США, а у 2026 р. за прогнозами він перевищить 36 млрд дол. США. Розширена реальність може отримати поштовх стрімкого зростання у зв'язку з новою та дуже швидкою інфраструктурою 5G.

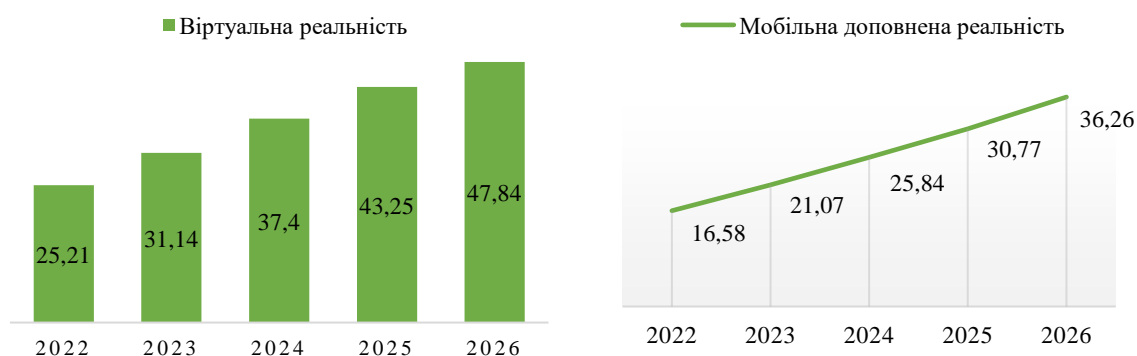


Рис. 1. Прогноз обсягу світового ринку віртуальної та доповненої реальності за даними Statista, млн євро [6; 7]

Усі технології занурення розширюють реальність, яку ми відчуваємо, або поєднуючи віртуальний і «реальний» світи, або створюючи повністю захоплюючий досвід. Щоб отримати краще уявлення про XR, необхідно розглянути існуючі на сьогодні технології.

Ринок розширеної реальності постійно зростає. Прикладом може бути **індустрія розваг**, де більшість інвестицій вкладається в розробку та розповсюдження технологій, а також актуалізується в **багатьох секторах** таких як армія, медицина, промисловість та туризм.

В індустрії розваг найвідомішим застосуванням розширеної реальності є відеоігри. Це також пов'язано з тим, що **ігрова індустрія** раніше за інші сфери прийняла технологію VR, зробивши її фінансово доступною для кінцевих споживачів. Існуючі та очікувані технології відкривають багато нових можливостей для **різних заходів – концерти, спортивні змагання** тощо з можливістю їх відвідувати, не виходячи з дому через Інтернет, і при цьому відчути їх атмосферу завдяки розширеній реальності та віртуальному середовищу. Тоді організатори подій матимуть можливість значно збільшити продаж квитків.

Наявні та потенційні клієнти можуть **відкривати та випробувати** продукти у віртуальному середовищі за допомогою XR. Крім того, ця технологія пропонує компаніям нові підходи до **безпосередньої взаємодії з клієнтами віддалено**.

Розширена реальність може застосовуватися у сфері нерухомості і дизайні. У першому випадку покупці або орендарі можуть зручно **оглядати нерухомість** дистанційно. Це зменшує навантаження на агентів із нерухомості та її власників. У другому – під **час планування нового об'єкта** технологія занурення дозволяє архітекторам і дизайнерам візуалізувати свої ідеї.

Технології занурення відкривають нові можливості для **онлайн-магазинів**. Наприклад, оскільки під час покупок в Інтернеті споживач зазвичай не може побачити та доторкнутися товарів перед їх покупкою. Перше стало можливим у віртуальних аналогах завдяки використанню технології XR [8]. Меблевий магазин ІКЕА вдало застосовує технологію доповненої реальності. Клієнти можуть проєктувати розташування меблів у власному будинку в мобільному додатку в смартфоні, який показує, як обраний предмет меблів виглядатиме в їхньому домі, полегшуючи рішення про покупку.

Репрезентативними формами XR є AR та VR. Надалі розглянемо що дає підстави вважати, що віртуальна та доповнена реальність є принципово відмінними поняттями.

На сьогодні доповнена реальність (англ. augmented reality, AR) визначається як термін, що позначає всі проєкти, спрямовані на доповнення реальності будь-якими віртуальними елементами. При цьому існує точка зору, що доповнена реальність є складовою частиною змішаної реальності (англ. mixed reality), в яку також входить «доповнена віртуальність» (коли реальні об'єкти інтегруються у віртуальне середовище) [9].

Також доповнену реальність інтерпретують як інтерактивний досвід, який поєднує реальний світ і комп'ютерний контент. Вміст може охоплювати кілька сенсорних модальностей, включаючи візуальні, слухові, тактильні, соматосенсорні та нюхові. AR визначають як систему з трьома основними функціями: поєднання реального та віртуального світів, взаємодію в реальному часі, а також точну 3D-реєстрацію віртуальних та реальних об'єктів. Накладена сенсорна інформація може бути конструктивною (тобто додаватися до природного середовища) або деструктивною (тобто маскувати природне середовище). Цей досвід плавно переплітається з фізичним світом так, що він сприймається як захоплюючий аспект реального середовища [10].

Основна цінність доповненої реальності полягає як компоненти цифрового світу змішуються зі сприйняттям людиною реального світу не як просто відображення даних, а через інтеграцію захоплюючих відчуттів, які сприймаються як природні частини навколишнього середовища.

У 1901 році автор Л. Франк Баум, вперше згадує ідею електронного дисплея/окулярів, які накладають дані на реальне життя (у цьому випадку «люди»). Він називається «маркером символу». Найперші функціональні системи доповненої реальності, які забезпечували захопливий досвід змішаної реальності для користувачів, були винайдені на

початку 1990-х років, починаючи з системи Virtual Fixtures, розробленої в лабораторії Армстронга в США у 1992 році. Згодом комерційні можливості доповненої реальності вперше були представлені в розважальному та ігровому бізнесі. Сьогодні додатки доповненої реальності охоплюють освіту, зв'язок, медицину та розваги. В освіті доступ до змісту можна отримати шляхом сканування або перегляду зображення на мобільному пристрої або за допомогою безмаркерних методів AR [11].

Таким чином, доповнена реальність змінює постійне сприйняття середовища реального світу, тоді як віртуальна реальність повністю замінює середовище реального світу користувача змодельованим.

Прикладом доповненої реальності є швидкий хіт 2016 року Pokemon Go, який дозволив користувачам ловити своїх улюблених покемонів, дивлячись через телефони на реальний світ, але з накладеними зображеннями. Гра мала приголомшливий успіх, до 65 млн користувачів на піку її популярності, безліч підлітків і молодих людей, які ходили вулицями міст, весь час дивлячись на свої телефони.

Подальші дослідження видів реальності привели до висновку, що необхідно відокремити AR від VR на основі того, чи присутні частини реального світу, як мінімум візуально, частиною користувацького досвіду (так = AR або ні = VR), нижче це описується більш детально.

Віртуальна реальність (VR) – це змодельований досвід, який може бути схожим або повністю відрізнитися від реального світу. Нині стандартні системи віртуальної реальності використовують або гарнітури віртуальної реальності, або багатопроектні середовища для створення реалістичних зображень, звуків та інших відчуттів, які імітують фізичну присутність користувача у віртуальному середовищі. Людина, яка використовує обладнання віртуальної реальності, може оглядати штучний світ, пересуватися в ньому та взаємодіяти з віртуальними об'єктами чи предметами. Ефект зазвичай створюється гарнітурами віртуальної реальності, які складаються з дисплея, встановленого на голові, з маленьким екраном перед очима, але його також можна створити за допомогою спеціально розроблених кімнат із кількома великими екранами. Віртуальна реальність зазвичай включає слуховий і відеозв'язок, але також може допускати інші типи сенсорного та силового зворотного зв'язку через тактильні технології.

Віртуальна реальність також застосовується в розвагах (особливо відеоігри), в освіті (наприклад, медичне або військове навчання, авіація) та в бізнесі (наприклад, віртуальні зустрічі). Людина, яка використовує обладнання віртуальної реальності, може розглядати штучний світ, переміщатися в ньому та взаємодіяти з віртуальними функціями або предметами [1].

З розвитком технологій концептуальні підходи до змісту понять розширеної, віртуальної, доповненої, змішаної реальностей також змінюються, виокремлюються реальності такі як допоміжна (асистована) і змішана реальність як підвиди доповненої реальності, атомістична та холістична як підвиди віртуальної реальності.

Німецький дослідник Ф. Раушнабель є автором концепції xReality, яка відокремлює AR от VR на основі того чи присутнє фізичне середовище в користувацькому досвіді або ні. Якщо присутнє, то це AR; якщо фізичне середовище відсутнє, отже, досвід є виключно віртуальним, то це VR. Для більш детального уточнення AR и VR в даній концепції передбачені два континууми: континуум AR варіюється від допоміжної (асистованої) до змішаної реальності з локальною присутністю. Континуум VR варіюється від атомістичної до цілісної, а рівень телеприсутності є основним відмінним фактором між ними. Однією з особливостей даної концепції є те, що змішана реальність вважається складовою доповненої реальності, що підтверджено практиками з інформаційних технологій, адже раніше змішану реальність розглядали як поєднання доповненої та віртуальної реальності [1].

Найбільшими перешкодами для більш широкого впровадження XR є досвід користувача та обмежений вміст, обидва з яких швидко покращуються. Вартість VR та AR гарнітури з часом стає більш доступною для широкого кола користувачів, і очевидним є швидке зростання її продажів у наступні роки. Результати аналізу ринку гарнітур віртуальної та доповненої реальності вказують такі його особливості:

- збільшення кількості користувачів VR/AR;
- потреба в соціальному спілкуванні за допомогою гарнітур VR/AR;
- збільшення світових витрат на контент і додатки віртуальної реальності;
- зростання кількості VR/AR стартапів;
- впровадження VR/AR в цілях навчання;
- завоювання позицій в електронній комерції завдяки збільшенню конверсій онлайн-покупок;
- інженерна галузь отримає переваги від впровадження AR, VR завдяки скороченню часу проектування моделей;
- переваги впровадження AR і VR у виробництво є підвищення ефективності, продуктивності та безпеки;
- ремонт і технічне обслуговування – найпопулярніші напрями застосування AR і VR у виробництві;
- внутрішні спеціалізовані навчання співробітників компаній;
- можливості для маркетологів.

Використанню гарнітур віртуальної та доповненої реальності сприяє метавсесвіт (Metaverse). У розмовній мові метавсесвіт – це мережа 3D-віртуальних світів, орієнтованих на соціальні зв'язки. У 2019 році соціальна мережа Facebook запустила соціальний VR-світ під назвою Facebook Horizon. У 2021 році Facebook було перейменовано на «Meta Platforms», а його голова Марк Цукерберг оголосив про зобов'язання компанії розробити метавсесвіт. М. Цукерберг висвітив нове бачення метавсесвіту як наступника мобільного Інтернету – набору взаємопов'язаних цифрових просторів, які дозволяють робити те, що не можна зробити у фізичному світі. Важливо, що вона буде характеризуватися соціальною присутністю, відчуттям того, що ви поруч з іншою людиною, незалежно від того, де б ви не опинилися. Відповідно до цього бачення, М. Цукерберг також оголосив про новий бренд Meta. Отже, поглиблення та розвиток академічних досліджень XR, формування єдиних підходів до визначення цих понять, які відповідають сучасному стану розвитку технологій, побудова нових моделей набувають важливого значення для науки і практики [12].

Висновок. Таким чином, у найближчій перспективі не лише віртуальна, а й доповнена реальність дуже активно впроваджуватимуться у виробництво, навчання і соціальні медіа, а отже, важливо чітко розуміти відмінність між різними форматами реальності. Оскільки існують відмінні погляди щодо сутності даних понять, об'єднання поглядів учених та практиків на різні форми реальності прискорить розуміння і прогрес даних унікальних середовищ.

Враховуючи такі швидкі зміни, можна припустити, що розширена реальність вплине на трансформацію досвіду користувача. Це посилює необхідність дослідження різних можливостей, які представляють нові технології з метою забезпечення кращої реалізації споживчих цінностей, а також моделювання поведінкових аспектів, розробки програмних продуктів, представлення моделей реальності та зв'язків між ними.

Список використаних джерел

1. What is XR? Towards a Framework for Augmented and Virtual Reality / Philipp A. Rauschnabel, Reto Felix, Chris Hinsch, Hamza Shahab, Florian Alt // Computers in Human Behavior. – 2022. – Vol. 133. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chb.2022.107289>.

2. What is Augmented Reality Marketing? It's definition, complexity, and future / Philipp A. Rauschnabel, Barry J. Babin, M. Claudia tom Dieck, Nina Krey, Timothy Jung // *Journal of Business Research*, – 2022. – Vol. 142. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.12.084>.
3. Yongming P. VR Reality of the Relationship between Augmented Reality and Virtual Reality in the Context of Virtual Reality / Pan Yongming // *Journal of Physics: Conference Series*. 2066(1):012056/ – 2021. – DOI: 10.1088/1742-6596/2066/1/012056
4. Carmigniani J. Augmented reality technologies, systems and applications / Julie Carmigniani, Borko Furht, Marco Anisetti, Paolo Ceravolo // *Multimedia Tools and Applications* 51(1):341-377. – 2010. – DOI: 10.1007/s11042-010-0660-6.
5. Extended Reality // Wikipedia, the free encyclopedia [Electronic resource]. – 2022. – Accessed mode: [https://en.wikipedia.org/wiki/Extended_reality#:~:text=Extended%20reality%20\(XR\)%20is%20a,the%20areas%20interpolated%20among%20them](https://en.wikipedia.org/wiki/Extended_reality#:~:text=Extended%20reality%20(XR)%20is%20a,the%20areas%20interpolated%20among%20them).
6. Alsop T. Mobile augmented reality (AR) market revenue worldwide from 2021 to 2026 [Electronic resource] / Thomas Alsop // *Satista*. – 2022. – Accessed mode: <https://www.statista.com/statistics/282453/mobile-augmented-reality-market-size>.
7. Alsop T. Virtual reality (VR) B2C market revenue worldwide from 2017 to 2027 [Electronic resource] / Thomas Alsop // *Satista*. – 2022. – Accessed mode: <https://www.statista.com/forecasts/1337169/vr-b2c-market-revenue-worldwide>.
8. Божок А.Р., Колбушкін Ю.П. Economics, management and administration in the coordinates of sustainable development: Scientific collective monograph. Riga, Latvia: Baltija Publishing, 2021. Pp. 121-147.
9. Доповнена реальність [Електронний ресурс] // Wikipedia, вільна енциклопедія. – 2022. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/дповнена_реальність.
10. Augmented_reality [Electronic resource] // Wikipedia, the free encyclopedia. – 2022. – Accessed mode: https://en.wikipedia.org/wiki/Augmented_reality.
11. Joehnsn J. Envisions augmented reality glasses in 1901 [Electronic resource] / Joel Joehnsn // *Way back mashine*. 2012. – Accessed mode: <https://web.archive.org/web/20130522153011/http://moteandbeam.net/the-master-key-l-frank-baum-envisions-ar-glasses-in-1901>.
12. Творонович В. І. Вплив цифрових лідерів на трансформацію маркетингу / В. І. Творонович, А. Р. Божок // *Бренд-менеджмент: маркетингові інструменти : матеріали III Міжнар. наук.-практ. конф. (Київ, 11 березня 2021 р.)*. – К. : КНТЕУ, 2021. – С. 254-256.

References

1. Rauschnabel, Ph. A., Hinsch, C., Shahab, H., Alt, F. (2022). What is XR? Towards a Framework for Augmented and Virtual Reality. *Computers in Human Behavior*, 133. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2022.107289>.
2. Rauschnabel, Ph. A., Babin, B. J., M. C. Tom Dieck, Krey, N., Jung, T. (2022). What is Augmented Reality Marketing? It's definition, complexity, and future. *Journal of Business Research*, 142. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.12.084>.
3. Yongming, P. (2021). VR Reality of the Relationship between Augmented Reality and Virtual Reality in the Context of Virtual Reality. *Journal of Physics: Conference Series*, 2066(1). 012056. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2066/1/012056>
4. Carmigniani, J., Furht, B., Anisetti, M., Ceravolo P. (2010). Augmented reality technologies, systems and applications. *Multimedia Tools and Applications*, 51(1), 341-377. <https://doi.org/10.1007/s11042-010-0660-6>.
5. Extended Reality. (2022). *Wikipedia, the free encyclopedia*. [https://en.wikipedia.org/wiki/Extended_reality#:~:text=Extended%20reality%20\(XR\)%20is%20a,the%20areas%20interpolated%20among%20them](https://en.wikipedia.org/wiki/Extended_reality#:~:text=Extended%20reality%20(XR)%20is%20a,the%20areas%20interpolated%20among%20them).
6. Alsop, T. (2022). Mobile augmented reality (AR) market revenue worldwide from 2021 to 2026. *Satista*. <https://www.statista.com/statistics/282453/mobile-augmented-reality-market-size>.
7. Alsop, T. (2022). Virtual reality (VR) B2C market revenue worldwide from 2017 to 2027 / *Satista*. <https://www.statista.com/forecasts/1337169/vr-b2c-market-revenue-worldwide>.
8. Bozhok, A.R., Kolbushkin, Y.P. (2021). *Economics, management and administration in the coordinates of sustainable development*: Scientific collective monograph (pp. 121-147). Baltija Publishing.

9. Dopovnena realnist. (2022). *Wikipedia, vilna entsyklopediia*. https://uk.wikipedia.org/wiki/доповнена_реальність.

10. Augmented_reality. (2022). *Wikipedia, the free encyclopedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Augmented_reality.

11. Joenson, J. (2012). "The Master Key": L. Frank Baum envisions augmented reality glasses in 1901. *Way back mashine*. <https://web.archive.org/web/20130522153011/http://moteandbeam.net/the-master-key-l-frank-baum-envisions-ar-glasses-in-1901>.

12. Tvoronovych, V.I., Bozhok, A.R. (2021). Marketynh yak instrument realizatsii pryntsyviv staloho rozvytku. [Marketing as a tool for implementing the principles of sustainable development Vplyv tsyfrovyykh lideriv na transformatsiiu marketynhu]. *Brend-menedzhment: marketynhovi instrumenty: materialy III Mizhnar. nauk.-prakt. konf. – Brand management: marketing tools: materials of the III International science and practice conf.* (pp. 254-256). KNTEU.

Отримано 05.12.2022

UDC 004.9:339.138

Kostiantyn Tkachenko¹, Anastasiia Bozhok²

¹PhD in Economics, Associate Professor of the Department of Information Technology and Design
State University of Infrastructure and Technologies (Kyiv, Ukraine)

E-mail: oitkachenko56@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0549-3396>

²PhD in Economics, Associate Professor of the Marketing Department
National Aviation University (Kyiv, Ukraine),
master's student in Software Engineering

State University of Infrastructure and Technologies (Kyiv, Ukraine)

E-mail: nastya.bozhok@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4404-2267>. ResearcherID: [AAE-8833-2019](https://orcid.org/0000-0002-4404-2267)

AUGMENTED REALITY AND HER ROLE IN SOCIAL MEDIA

World leaders of digital innovations today actively demonstrate the development and implementation of virtual, augmented reality in technology and society. Now and in the future, this will significantly transform most areas of activity such as production, education, marketing, medicine, etc.

The analysis of recent studies has shown that in scientific and practical literature, in addition to the concepts of virtual and augmented reality, the concepts of augmented reality and metaverse are often found. At the same time, views on this terminology differ. Clearly defined terminology allows avoiding ambiguities in judgments and, ultimately, making the right decisions by specialists.

Therefore, the purpose of the article is to systematize the existing knowledge in this area and to disclose on this basis the quintessence of different formats of reality and their applications.

The article analyzes the concepts of virtual reality, augmented reality, mixed reality, extended reality. The data on the volume of the world market of virtual and augmented reality are used. It is determined in which areas of activity these types of reality are successfully applied and can be effectively implemented in the future. Based on the analysis of the virtual and augmented reality headsets market, its trends in the near future are determined by key aspects, including the number of users, the need for social communication, global spending, startups, implementation in production, e-commerce, etc. This article defines the role of the metaverse, as the successor of the Internet, in the development of virtual and augmented reality. Combining the collective opinion of leading experts in this area will allow to better understand the essence of the concepts of different types of reality and their differences, help to advance knowledge in this area and make the right decisions in practice.

Keywords: extended reality; virtual reality; augmented reality; metaverse; definition.

Fig.: 1. References: 5.

**Світлана Корнієнко¹, Ігор Корнієнко², Андрій Тристан³,
Максим Геращенко⁴, Максим Солодчук⁵**

¹кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри кібербезпеки та математичного моделювання

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: cornel@ukr.net. ORCID <http://orcid.org/0000-0002-9162-1229>.

ResearcherID: [AAV-4708-2020](https://orcid.org/0000-0002-9162-1229). SCOPUS Author ID [57219057983](https://orcid.org/0000-0002-9162-1229)

²кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри геодезії, картографії та землеустрою

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: cornelukr@gmail.com. ORCID <http://orcid.org/0000-0001-9105-0780>.

ResearcherID: [F-7236-2017](https://orcid.org/0000-0001-9105-0780). SCOPUS Author ID [57485157200](https://orcid.org/0000-0001-9105-0780)

³доктор технічних наук, старший науковий співробітник, заступник начальника інституту з наукової роботи Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки (Чернігів, Україна)

E-mail: avtris@ukr.net. ORCID <https://orcid.org/0000-0002-2137-5712>. SCOPUS Author ID [57216296699](https://orcid.org/0000-0002-2137-5712)

⁴начальник науково-дослідного управління

Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, (Чернігів, Україна)

E-mail: demio99@ukr.net. ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6587-0355>

⁵начальник науково-дослідного відділу

Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки (Чернігів, Україна)

E-mail: rocket15733@gmail.com. ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1162-6784>

АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ВИПРОБУВАННЯ З ПРІОРИТЕТНИМИ ЗАЯВКАМИ

У статті розглянуто питання розробки моделі системи випробування. Для моделювання та аналізу процесів, які впливають на продуктивність випробувальної організації, використана багатофазна система масового обслуговування, у якій фазами представлені основні стадії випробування. Для різних стадій випробування здійснюється формалізація умов надходження пріоритетних зразків, особливостей обслуговування пріоритетних зразків та їхній вплив на продуктивність системи випробувань. Виводяться основні аналітичні співвідношення, що визначають продуктивність функціонування системи випробування.

Ключові слова: випробування; модель; інформаційна система; озброєння та військова техніка; продуктивність.

Рис.: 8. Бібл.: 22.

Актуальність теми дослідження. Останніми роками в Україні суттєво позвжалися процеси випробування зразків озброєння та військової техніки (ОВТ). Безумовно, це пов'язано з діями росії, яка починаючи з 2014 року чинить військову агресію проти України. Масовий характер проведення випробувань при наявних обмеженнях на ресурси випробувальної організації викликали зацікавленість у дослідженні й пошуку оптимальних режимів роботи системи випробувань. Динамічність випробувальної діяльності унеможливило обрання сталого рішення, яке спроможне максимізувати продуктивність системи випробувань організації за будь-яких умов. Це, у свою чергу, підводить до ідей розробки системи рішень, найкраще з яких автоматично обиратиметься відповідно до умов, що склалися.

Такі та інші міркування сприяли проведенню робіт у Державному науково-дослідному інституті випробувань і сертифікації ОВТ зі створення автоматизованої інформаційної системи супроводження випробувань. Аналізуючи весь спектр чинників, які впливатимуть на продуктивність системи випробувань, були визначені основні цілі створюваної інформаційної системи, а саме: науково-технічний та методичний супровід у розробці програмно-методичної документації випробувань, автоматизація організаційних робіт, процесів обробки результатів випробувань, підготовки звітної документації, налагодження дієвої комунікації та документообігу всередині випробувальної організації. Додатковим корисним ефектом, який очікується від впровадження інформаційної системи супроводження випробувань, є можливість автоматичного визначення оптимальних режимів робіт і вироблення організаційних рішень, які визначаються на основі аналізу статистичних даних щодо перебігу масових випробувань.

Постановка проблеми. Станом на сьогодні, незважаючи на воєнний стан у державі, обсяг задач з випробування ОВТ не зменшується, а навпаки, набув останніми місяцями тенденції до зростання. Зважаючи на складність і тривалість процесу випробувань, додаткове навантаження однозначно призводить до проблеми диференціації важливості зразків ОВТ, які підлягають випробуванню. Поява пріоритетності у випробуваннях в умовах обмежених ресурсів потребуватиме вироблення рішень щодо черговості проведення випробувань, а отже, і аналізу впливу «пріоритетності» на систему випробувань та загальний потік випробуваних зразків. Одним з ефективних інструментів вирішення такої проблеми є моделювання процесів у системі випробування за допомогою аналітичного апарату теорії систем масового обслуговування (СМО), яка на сьогодні набула ґрунтовного розвитку й довела свою ефективність при вирішенні практичних проблем.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Загальний порядок організації проведення випробувань зразків ОВТ визначений у нормативних і методичних документах, зокрема [1-4]. У [4] передбачена потреба в запровадженні й розвитку інформаційної системи супроводження випробувань. У [5] наводиться перелік завдань, які покладаються на інформаційну систему, серед яких є задача управління ефективністю функціонування випробувальної організації. При пошуку методичних підходів, які дозволять моделювати та оптимізувати режими функціонування системи випробувань було проведено дослідження параметрів вхідного потоку зразків, які надходили на випробування [6; 7]. За допомогою методів теорії ймовірностей і математичної статистики [8-11] були визначені характеристики потоку масових надходжень випробуваних зразків, які, у свою чергу, дали змогу зупинитись на аналітичному апараті СМО для моделювання всієї системи випробувань. Фундаментальні і прикладні праці [12-19] були покладені в основу створення моделі СМО системи випробувань ОВТ у межах випробувальної організації. Основні статистичні параметри, які потрібні для моделювання процесу випробування зразків ОВТ для потреб Збройних сил України наведені у [20], а у [21] розроблена модель підготовчої стадії випробувань, мета якої дослідження впливу основних методів організації процесу випробувань на їх продуктивність.

Виділення не досліджених частин загальної проблеми. Поява у вхідному потоці «важливих» зразків ОВТ, які потребують негайного випробування, потребує нових підходів в управлінні процесом випробування. Розроблена у [21] модель, що належить до класу $M/M/n/\infty$, цілком придатна для дослідження загальних процесів впливу розподілу персоналу по стадіях і бригадах випробування на продуктивність системи випробування, але не враховує потенційну можливість надходження пріоритетних заявок. Також неможливо пряме використання відомих моделей багатоканальних СМО з пуассонівськими вхідним потоком і характером обслуговування вхідних заявок, з необмеженою чергою і пріоритетними заявками, що пов'язано з особливостями перебігу випробувань на різних стадіях. Відповідно, виникає потреба у докладному розгляді процесів обслуговування заявок і розробці моделі СМО системи випробувань, яка враховуватиме наявність пріоритетних заявок на випробуваннях та здатна моделювати процеси розподілу персоналу на всіх стадіях проведення випробувань.

Мета дослідження. На основі визначених параметрів і характеристик вхідного потоку заявок на випробування зразків ОВТ, відомих моделей багатоканальних СМО та вдосконаленої моделі СМО підготовчої стадії випробувальної організації необхідно розробити модель СМО системи випробувань з пріоритетними заявками, а також визначити її основні показники ефективності.

Виклад основного матеріалу. Модель системи випробувань, яка запропонована у [20, 21], представляється у вигляді багатофазної СМО (рис. 1).

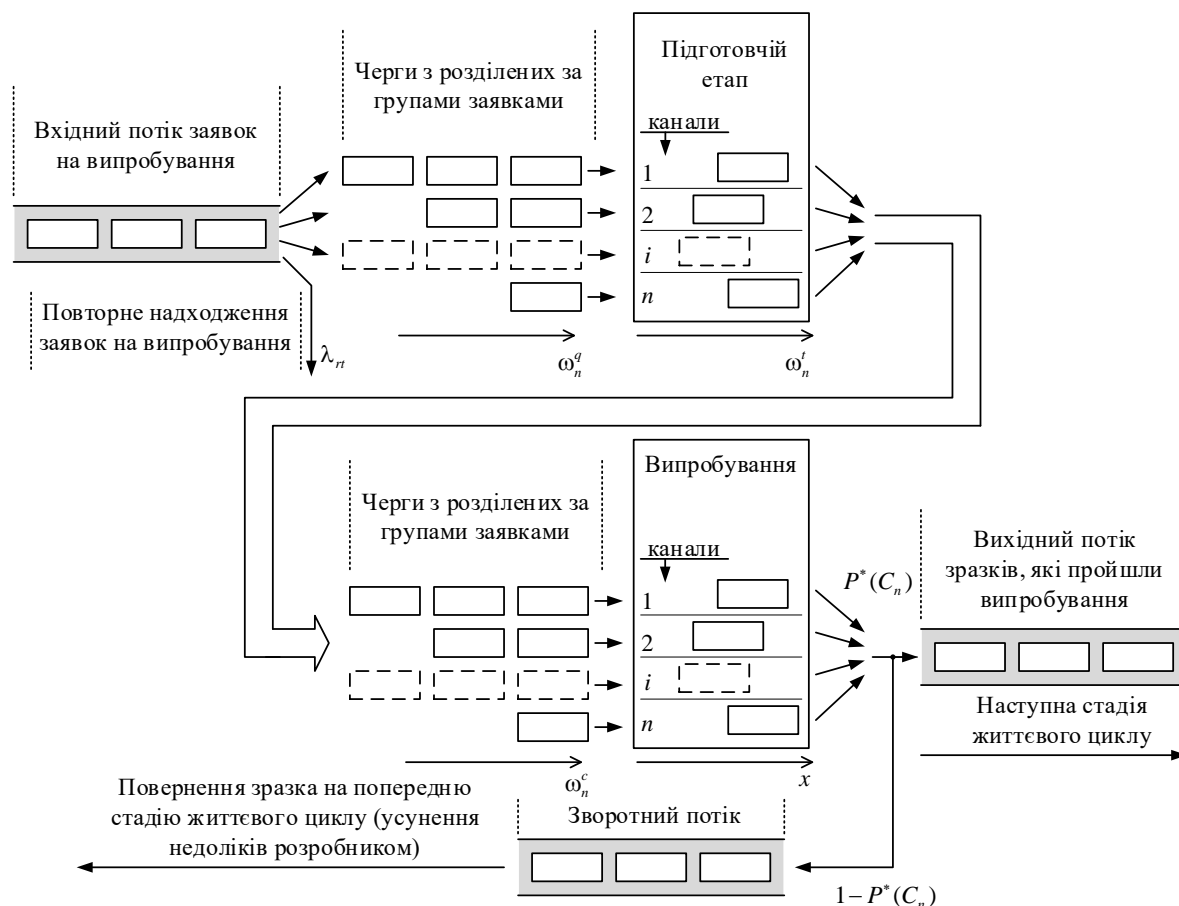


Рис. 1. Представлення системи випробувань організації у вигляді багатофазної СМО

Запропонована модель системи випробування належить до класу $M / M / n / \infty$ (згідно з класифікацією Кендала) – послідовні багатоканалні СМО з необмеженими чергами очікування заявок. У моделі (рис. 1) зразки ОВТ, які потребують випробування, представлені заявками, а різні стадії випробування виконують роль обслуговуючих пристроїв. Встановлені у [20] показникові закони розподілу випадкових величин у вхідному (часові інтервали між заявками, які надійшли на випробування зразків ОВТ) і вихідному (часові інтервали між обслуговуванням заявок) потоках випробуваних зразків є найкращим варіантом при моделюванні системи випробування за допомогою апарату СМО. По-перше, стаціонарний пуассонівський потік дозволяє використовувати марківські ланцюги, що суттєво спрощує аналітичний опис показників ефективності функціонування СМО, а отже, суттєво спрощує процес моделювання. По-друге, сума довільних незалежних потоків з інтенсивностями λ_i також є пуассонівським потоком з інтенсивністю $\Lambda = \sum_i \lambda_i$. І по-третє, канали, які розра-

ховані на пуассонівський потік вимог, забезпечуватимуть не меншу ефективність обслуговування інших видів потоків з аналогічною середньою інтенсивністю [16].

Представлені на рисунку 1 канали обслуговування заявок на різних стадіях відображають випробувальні підрозділи організації, які проводять випробування певного виду ОВТ. Проте таке схематичне зображення не означає, що весь підрозділ може обслуговувати одночасно лише одну заявку. У свою чергу, кожен підрозділ являє собою багатоканалну СМО, потенційна кількість каналів якої визначається кількістю персоналу. При цьому, один канал може обслуговувати один або декілька фахівців. Схематично, для підготовчої стадії випробувань, обслуговування заявок підрозділами можна відобразити моделлю на рисунку 2.

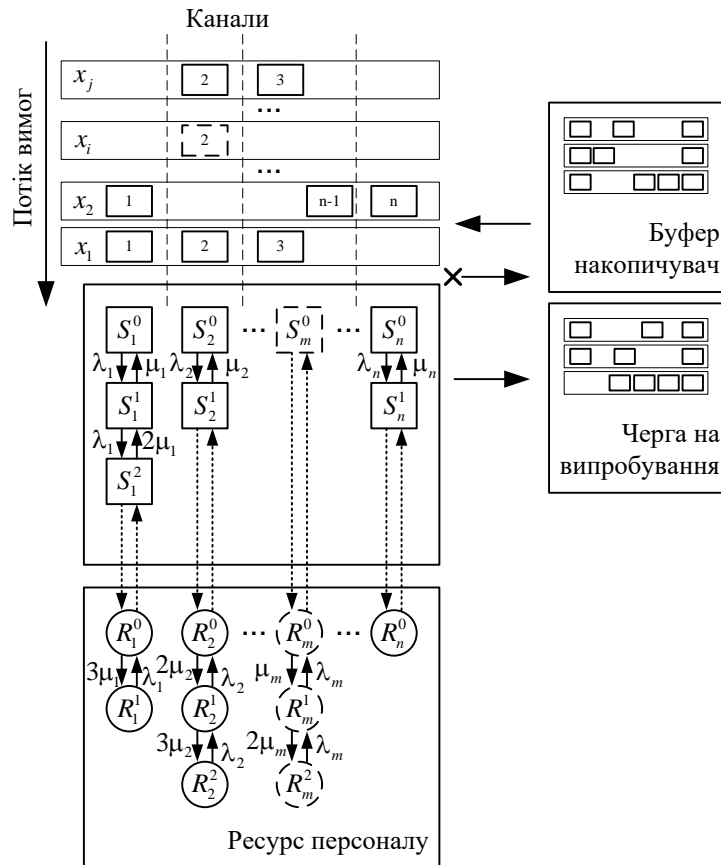


Рис. 2. Представлення підготовчого етапу випробувань за схемою марківських процесів

Наявність незайнятого персоналу характеризуються станами $R^l - l$ вільних осіб із загальної кількості осіб на канал L_m , R^0 – відсутній резерв каналу. Стан каналу з R^0 означає відмову при надходженні наступної вимоги у цей канал і переведення цієї вимоги в буфер-накопичувач. Інтенсивності λ_m і μ_m – відповідно інтенсивності надходження і підготовки до випробувань зразків ОВТ m -ої групи. Можливість зайняття одним зразком декількох каналів визначається складністю зразка, коли для випробувань потребуватимуться фахівці різного профілю.

Для відшукування аналітичних співвідношень, що характеризуватимуть показники якості функціонування системи випробувань скористаємось запропонованою у [21] моделлю СМО підготовчої стадії випробування окремого підрозділу (рис. 3).

Система випробувань (рис. 3) представлена ланцюгом Маркова, який відображає перехід стаціонарних станів системи. Кожний стан системи характеризується кількістю зайнятих обслуговуванням паралельних каналів b , кількість яких знаходиться в межах $0 \leq b \leq B$. Індекс p у позначенні можливих станів відображає моделювання на підготовчій стадії випробування.

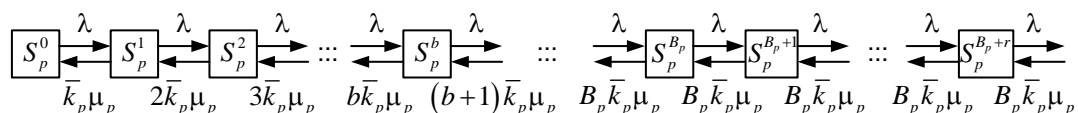


Рис. 3. Представлення підготовчої стадії випробувань за схемою марківських процесів з осередненою кількістю персоналу у випробувальних бригадах та необмеженою чергою

Кількість заявок, які можуть одночасно перебувати в черзі, відображається верхнім індексом r . Вхідний потік заявок має інтенсивність λ . У вхідному потоці пріоритетні заявки можуть мати різний ступінь важливості – ранг. Заявки з нижчим рангом пріоритетності щодо заявок із вищим рангом пріоритетності вважаються такими, що не мають пріоритету. Характеристики потоків пріоритетних заявок можна визначити за наявності достатніх статистичних даних, тоді ймовірність надходження пріоритетних заявок s -го рангу становитиме:

$$P^s \approx P^*(C_n^s) = \frac{\sum n^{(s)}}{\sum n} = \frac{\bar{m}_{n^{(s)}}}{\bar{m}_n}, \tag{1}$$

де $\bar{m}_{n^{(s)}} = M^*(n^{(s)})$ та $\bar{m}_n = M^*(n)$ – статистичні середні кількості заявок із рангом пріоритетності s та загальної кількості заявок n , що надійшли за прийнятий часовий інтервал аналізу.

Відповідно, інтенсивність надходження пріоритетних заявок рангу s становитиме $\lambda_s = \lambda P(C_n^s)$. З урахуванням того, що СМО системи випробування є розімкненою, тобто дисципліна обслуговування заявок не впливає на характер вхідного потоку, то для потоку з пріоритетними заявками, які представлені незалежними «простішими» потоками, справедливо записати $\lambda = \lambda_0 + \sum_{s=1}^S \lambda_s$, де λ_0 – потік заявок без пріоритету; λ_s – потоки заявок з пріоритетом s -го рангу.

Інтенсивність обслуговування каналів μ визначається добутком $\bar{k}\mu_p$, де \bar{k} – середня кількість фахівців у випробувальній бригаді; μ_p – продуктивність окремого фахівця випробувальної бригади. Потреба в такому розгляді продуктивності каналів виникла внаслідок можливої девіації складу випробувальних бригад і дослідження впливу цього явища на продуктивність системи випробування загалом. Навантаження СМО при такому представленні інтенсивності обслуговування становитиме $\rho_p = \frac{\lambda}{\bar{k}_p \mu_p}$.

Аналогічним є представлення другої фази системи випробування – практичного випробування та обробки результатів дослідів, графічна модель якої представлена на рисунку 4:

Стани і змінні цієї моделі відповідають аналогічним станам і змінним у моделі підготовчої стадії випробування. Індекс t (*testing*) у позначеннях станів моделі та інших змінних (рис. 4) показує їх належність до стадії практичного випробування. Зауважимо на особливостях вхідного потоку зразків на практичній стадії випробування.

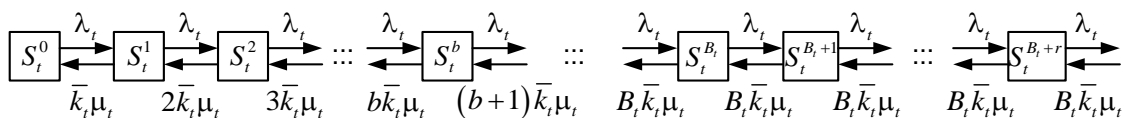


Рис. 4. Представлення стадії практичного випробування за схемою марківських процесів з осередненою кількістю персоналу у випробувальних бригадах та необмеженою чергою

Сумарний потік складатиметься з потоку пріоритетних та непріоритетних заявок, які пройшли підготовчу стадію (вихідний потік підготовчої стадії) та потоку зразків, які раніше були зняті з випробування та надійшли повторно (див. рис. 1), тобто:

$$\lambda_t = \lambda + \lambda_{rt} = \lambda_0 + \sum_{s=1}^S \lambda_s + \lambda_{rt}, \tag{2}$$

де λ_{rt} – потік заявок, які надійшли повторно на практичну стадію випробування, минаючи підготовчу стадію (індекс rt – *retesting*). За статистичними оцінками [6; 20], частка такого повторного потоку складала близько 15 % від загального вхідного потоку λ . Враховуючи незалежність подій, пов'язаних із невдалим випробуванням різних зразків (зразків ОВТ різного типу, різних розробників, які поставлені на випробування в довільний час та зняті з випробування по мірі виявлення неприпустимих недоліків) можна очікувати, що потік λ_{rt} також можна віднести до класу «простіших» потоків, тобто формула (2) є справедливою, що дозволяє моделювати стадію практичних випробувань за схемою марківських ланцюгів.

Поведінка моделей СМО різних стадій випробування (рис. 3) і (рис. 4) при надходженні пріоритетних заявок визначатиметься дисципліною обслуговування заявок, що залежить від виду пріоритету заявки. «Абсолютний» пріоритет заявки залишить без змін продуктивність обох моделей у випадку наявності вільних каналів обслуговування у стаціонарному стані СМО. Варто зауважити, що кількість вільних каналів визначається наявністю незадіяного на час обслуговування заявки персоналу. При цьому канали обслуговування не є статичними за своєю сутністю (маємо на увазі склад випробувальної бригади), а формуються кожен раз наново по мірі обслуговування заявок, зважаючи на вид зразка, що надійшов на випробування, і компетентностей інженерів-випробувачів.

У випадку, якщо заявка з «абсолютним» пріоритетом надійшла на підготовчу стадію, а всі канали є зайнятими, то заявка без пріоритету, яка надійшла останньою, переміщується в чергу, а її місце посідає заявка з пріоритетом (рис. 5).

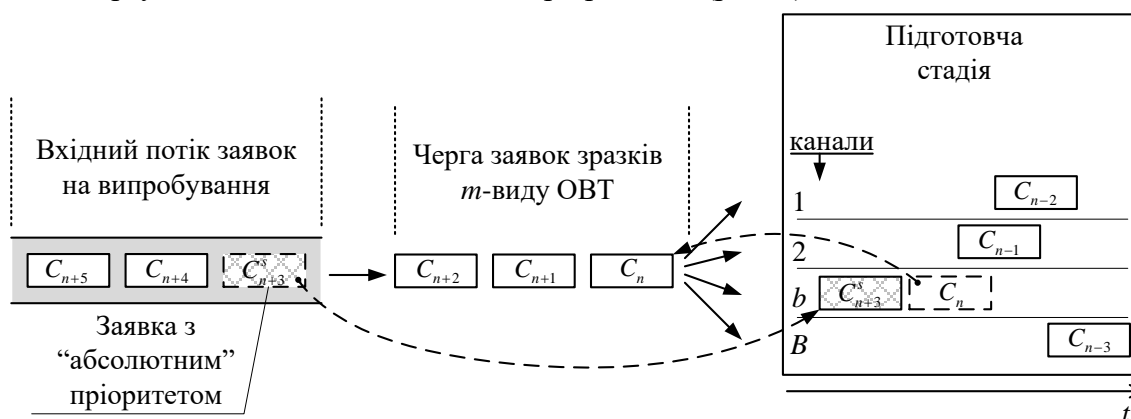


Рис. 5. Надходження заявки з «абсолютним» пріоритетом до підготовчої стадії випробування

Відмінністю СМО системи випробування від абстрактної СМО є можливі варіанти дообслуговування непріоритетної заявки яка потрапила у чергу: заявка дообслуговується першим вивільненим каналом (персоналом, який вивільнився від виконання інших завдань); заявка очікує вивільнення того самого каналу (персоналу), який був зайнятий пріоритетною заявкою. Зважаючи на складності моделювання другого варіанту дообслуговування непріоритетної заявки та з урахуванням принципів комплектування команд випробувачів, що було викладено раніше, надалі розглядатимемо тільки перший варіант дообслуговування заявки першим вивільненим каналом СМО. Також на користь прийняття першого варіанта говорить і елементарний принцип «справедливого» обслуговування – відтермінована заявка без пріоритету не буде очікувати нескінченно довго, у той час як інші заявки без пріоритету, які, навіть, надійшли пізніше, будуть обслужені. Безумовно, можна припустити, що новий персонал може скористатися раніше проведеними роботами підготовчої стадії і всю роботу по непріоритетній заявці не прийдеться виконувати спочатку.

На практиці варто очікувати, що дообслуговування заявки без пріоритету супроводжуватиметься певною втратою часу τ_l , що пояснюється людським фактором переорієнтування на інший вид робіт (інший зразок, нова документація, ознайомлення й вивчення виконаної частини роботи). Тоді в розрахунках можна прийняти, що загальні втрати часу внаслідок дообслуговування непріоритетних заявок становитимуть:

$$\tau_L(\Delta t) = n_s(\Delta t)\tau_l, \tag{3}$$

де $n_s(\Delta t)$ – кількість пріоритетних заявок, яка надійшла за період часу Δt . Відповідно, інтенсивність обслуговування потоку заявок, у якому є заявки з «абсолютним» пріоритетом, становитиме

$$\mu_p = \frac{\Delta t - \tau_L(\Delta t)}{n_\Sigma}, \tag{4}$$

де Δt – прийнятий часовий інтервал аналізу; n_Σ – загальна кількість заявок (з пріоритетом і без), яка надійшла на обслуговування за інтервал часу Δt . Якщо взяти за увагу, що для системи випробувань прийнятий інтервал аналізу 1 тиждень, то з (4), з урахуванням (3), маємо остаточну інтенсивність для потоку з заявками з "абсолютним" пріоритетом:

$$\mu'_p = \frac{1 - \tau_L}{n_\Sigma} = \frac{1 - n_s\tau_l}{n_\Sigma}. \tag{5}$$

Одержаний вираз (5) справедливий для випадку, якщо на вхід системи надходять рівнозначні пріоритетні заявки та лише у випадку відсутності вільних каналів, коли можна очікувати припинення обслуговування непріоритетної заявки при надходженні пріоритетної. У цьому разі модель СМО підготовчого етапу (рис. 2) набуде такого вигляду (рис. 6):

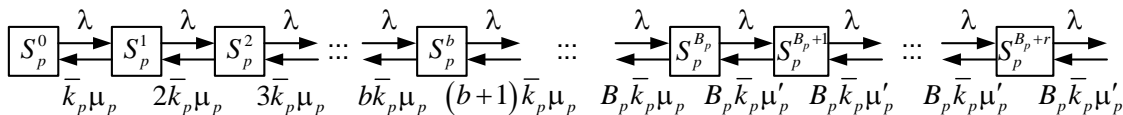


Рис. 6. Представлення підготовчої стадії випробувань за схемою марківських процесів з осередненою кількістю персоналу у випробувальних бригадах та необмеженою чергою при надходженні рівнозначних заявок з «абсолютним» пріоритетом

Інакше, якщо пріоритетні заявки мають ранги, то вираз (5) являє собою верхню оцінку інтенсивності обслуговування:

$$\mu_p^* = \mu'_p = \frac{1 - n_s\tau_l}{n_\Sigma}. \tag{6}$$

Нижню оцінку інтенсивності обслуговування, яка розраховується на найгірший можливий випадок, можна представити формулою:

$$\mu_{*p} = \frac{1 - n_s\tau_l - (n_s - 1)\tau_l}{n_\Sigma} = \frac{1 - \tau_l(2n_s - 1)}{n_\Sigma}. \tag{7}$$

Таке представлення нижньої оцінки ґрунтується на тому, що з усіх потенційно можливих комбінацій надходження пріоритетних заявок, з невизначеними інтервалами між надходженням заявок, за довільний інтервал аналізу, принаймні одна заявка матиме найвищий пріоритет відносно інших.

Відповідно до цього, модель СМО підготовчого етапу (рис. 3) для випадку надходження ранжованих заявок з «абсолютним» пріоритетом набуде такого вигляду (рис. 7):

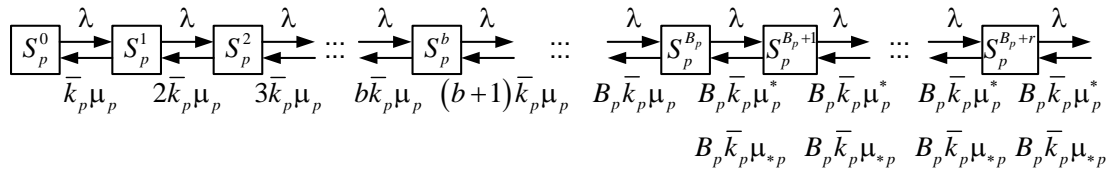


Рис. 7. Представлення підготовчої стадії випробувань за схемою марківських процесів з осередненою кількістю персоналу у випробувальних бригадах та необмеженою чергою при надходженні ранжованих заявок з "абсолютним" пріоритетом

При надходженні заявки з «абсолютним» пріоритетом на обслуговування при всіх зайнятих каналах стадії практичного випробування слід очікувати, що така заявка потрапить у перше місце черги (рис. 8), оскільки навряд чи буде переривання ходу практичних випробувань зразка ОВТ, до яких залучено, крім випробувальної бригади, представників підприємства розробника, персонал випробувального полігону, а також, можливо, спеціально навчений екіпаж, який керує та використовує випробуваний зразок.

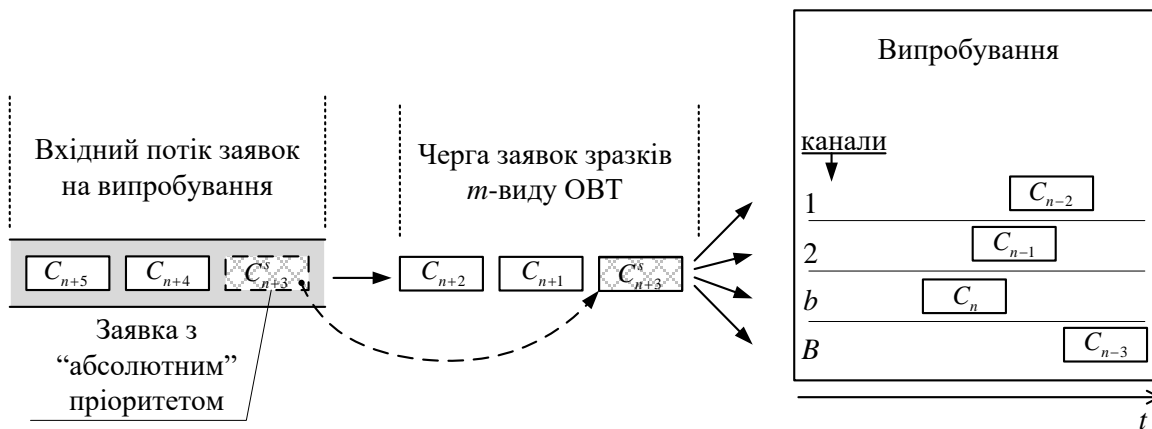


Рис. 8. Надходження заявки з «абсолютним» пріоритетом до стадії практичного випробування

У випадку, якщо надходить заявка з "відносним" пріоритетом до будь-якої стадії випробування – переривання обслуговувань заявок без пріоритету не відбувається, при цьому пріоритетна заявка стає на перше місце в черзі (ситуація відповідає моделі на рис. 6).

Для моделювання системи випробувань за допомогою моделі Маркова (рис. 3) і (рис. 4) при надходженні заявки з будь-яким пріоритетом означає звичайний перехід системи $S_p^{B_p} \rightarrow S_p^{B_p+1}$. Зазначимо також, якщо пріоритетна заявка потрапляє на перше місце черги, то втрати часу на дообслуговування заявки без пріоритету не відбувається, і, відповідно, інтенсивність обслуговування на будь-яких стадіях випробування не змінюється.

Скористаємось відомими з [12-19; 20] співвідношеннями для визначення показників якості СМО типу $M / M / n / \infty$. Стационарні ймовірності знаходження СМО в різних можливих станах для заявок з «відносним» пріоритетом становитимуть:

у стані S_p^0 :

$$P_p^0 = \left(\sum_{b=0}^{B_p} \frac{\rho_p^b}{b!} + \frac{\rho_p^{B_p+1}}{B_p!(B_p - \rho_p)} \right)^{-1}; \tag{8}$$

у стані S_p^b :

$$P_p^b = \frac{\rho_p^b}{b!} P_p^0; \tag{9}$$

у стані $S_p^{B_p+r}$:

$$P_p^{B_p+r} = \frac{\rho_p^{B_p+r}}{B_p! B_p^r} P_p^0. \tag{10}$$

Змінні у наведених формулах (8), (9) і (10) містять в собі індекс p , який відображає підготовчу стадію випробувань, проте, враховуючи ідентичність Марківських моделей, наведених на рис. 3 і рис. 4, формули (8), (9) і (10) також будуть справедливі і для стадії практичних випробувань, для чого потрібно змінити індекси p на t .

У випадку надходження заявок з «абсолютним» пріоритетом для підготовчої стадії системи випробувань змінюється інтенсивність обслуговування заявок без пріоритету, які надходять із черги (рис. 6). Відповідно, стаціонарні ймовірності перебування у різних станах при надходженні заявок з «абсолютним» пріоритетом без рангів записуються у вигляді:

у стані S_p^0 :

$$P_p^0 = \left(\sum_{b=0}^{B_p} \frac{\rho_p^b}{b!} + \frac{\rho_p^{B_p+1}}{B_p! (B_p - \rho_p')} \right)^{-1}, \tag{11}$$

де $\rho_p' = \frac{\lambda}{k_p \mu_p'}$ – навантаження СМО у черзі;

у стані S_p^b :

$$P_p^b = \frac{\rho_p^b}{b!} P_p^0; \tag{12}$$

у стані $S_p^{B_p+r}$:

$$P_p^{B_p+r} = \frac{\rho_p^{B_p+r}}{B_p! B_p^r} P_p^0. \tag{13}$$

Стаціонарні ймовірності перебування в різних станах при надходженні ранжованих заявок з «абсолютним» пріоритетом матимуть у своєму складі верхню – μ_p^* й нижню – μ_{*p} оцінки інтенсивності обслуговування, які при підстановці у (11) та (13) замість μ_p' дозволять отримати максимальну й мінімальну оцінку ймовірності перебування у стаціонарних станах. Далі, при розгляді показників продуктивності СМО будемо враховувати, що при надходженні заявок з «абсолютним» пріоритетом при підстановці у формули стаціонарних ймовірностей станів СМО потрібно використовувати формули (11), (12) та (13).

Вважаючи, що метою моделювання системи випробування є дослідження і максимізація пропускної спроможності системи випробувань ОВТ при обмежених ресурсах, а також дослідження швидкості обслуговування і просування заявок у системі, далі розглянемо стаціонарні ймовірнісні характеристики заявок.

Стационарна ймовірність беззупинного обслуговування довільної заявки, яка еквівалентна знаходженню системи в будь-якому стані, при якому ще є принаймні один вільний канал:

$$P_p^S = P_p^0 \sum_{b=0}^{B_p-1} \frac{\rho_p^b}{b!} = 1 - P_p^B.$$

Ця ймовірність визначає потенційну можливість відсутності черги. Також, за умови визначення інтенсивності вхідного потоку, ймовірність беззупинного обслуговування заявки характеризуватиме достатність кількісного складу персоналу для беззупинного обслуговування заявок, у тому числі неперіоритетних заявок.

Стационарна ймовірність потрапляння заявки у чергу:

– для заявок без пріоритету та заявок з «відносним» пріоритетом визначається станом системи, коли всі канали обслуговування зайняті, тобто:

$$P_p^B = \frac{\rho_p^{B_p}}{B_p!} P_p^0; \quad (14)$$

– для заявок з «абсолютним» пріоритетом обслуговування потрапляння заявки у чергу можливе, коли всі канали зайняті заявками з пріоритетами, причому ранг таких заявок не може бути меншим, чим ранг заявки, що надійшла в систему. Тоді для заявок з s пріоритетом:

$$P_p^B = \frac{(\rho_p^s)^{B_p}}{B_p!} \left(\sum_{b=0}^{B_p} \frac{\rho_p^{s b}}{b!} + \frac{\rho_p^{s B_p+1}}{B_p! (B_p - \rho_p^s)} \right)^{-1}, \quad (15)$$

де $\rho_p^s = \frac{\sum_{i=s+1}^S \lambda_i}{k_p \mu_p}$ – навантаження СМО пріоритетними заявками з вищим ніж s пріоритетом

$\{s+1, s+2, \dots, S\}$. В окремому випадку, коли пріоритетні заявки не мають рангів (тобто всі пріоритетні заявки рівнозначні) навантаження СМО у формулі (15) становитиме

$\rho_p^s = \frac{\lambda_s}{k_p \mu_p}$. Для стадії практичних випробувань стационарна ймовірність потрапляння за-

явки в чергу визначається формулою (14).

Стационарна ймовірність призупинення обслуговування конкретної заявки внаслідок

надходження заявки з вищим пріоритетом: $P_p^{s_break} = \sum_{i=s+1}^S (P_p^s)_i$,

де P_p^s – ймовірність надходження пріоритетної заявки s рангу на підготовчому етапі випробувань. В окремому випадку рівнозначності пріоритетних заявок – ймовірність призупинення обслуговування заявки без пріоритету при надходженні заявки з «абсолютним» пріоритетом: $P_p^{Break} = P_p^s$.

Середня кількість заявок, які перебувають на обслуговуванні: $L_p^S = \frac{\lambda}{k_p \mu_p} = \rho_p$.

Середнє число заявок у черзі:

$$L_p^q = \frac{\rho_p^{B_p+1} B_p}{B_p! (B_p - \rho_p)^2} P_p^0. \quad (16)$$

Для випадку заявок з "абсолютним" пріоритетом на підготовчій стадії справедливо очікувати певне збільшення часу обслуговування заявок з меншим пріоритетом, і, відповідно, слід використовувати значення інтенсивності обслуговування з формули (6), або відповідної верхньої (7) та нижньої оцінки (8). Аналогічні міркування стосуються стаціонарної імовірності перебування у стані P_p^0 .

Середнє число заявок на підготовчій стадії: $L_p = L_p^s + L_p^q$.

Середній час перебування заявки на обслуговуванні на підготовчій стадії: $\omega_p^t = \frac{1}{\mu_p}$.

Середній час очікування заявки у черзі за формулою Літтла [22]: $\omega_p^q = \frac{L_p^q}{\lambda}$.

Середній час перебування заявки на підготовчій стадії випробування:

$$t_p = \omega_p^t + \omega_p^q = \frac{L_p^q}{\lambda} + \frac{1}{\mu_p}.$$

Аналогічно обчислюються середні кількісні та часові характеристики заявок на практичній стадії випробувань.

Абсолютна пропускна здатність підготовчої стадії випробувань для СМО з необмеженою чергою приймають $Q_p = 1$. Продуктивність СМО без постановки заявок у чергу: $Q_p^* = \lambda P_p^s$.

Коефіцієнт завантаження СМО: $\eta_p = \sum_{b=1}^{B_p} S_p^b P_p^b = \rho_p (1 - P_p^0)$. Для випадку надходження заявок з абсолютним пріоритетом підстановки підлягають відповідні значення ρ_p і P_p^0 .

Середня кількість зайнятих фахівців: $\bar{N}_p = \bar{k}_p \rho_p = \frac{\lambda}{\mu_p}$.

Середній час простою: $t_p^0 = P_p^0 T$, де T – період аналізу системи.

Середня інтенсивність просування заявки на підготовчій стадії випробування:

$$\lambda_p^i = 1/t_p.$$

Нагадаємо, що в зв'язку з еквівалентністю моделей підготовчої стадії і стадії випробувань немає сенсу дублювати наведені вирази для практичної стадії, достатньо змінити індекс p на t , і врахувати, що на практичній стадії випробувань заявки не можуть мати «абсолютного» пріоритету.

Середня інтенсивність просування заявки в системі випробування: $\Lambda = \frac{1}{t_p + t_t}$. За-

уважимо, що значення Λ за своїм сенсом еквівалентно продуктивності системи випробувань, оскільки метою оптимізації режимів роботи, безумовно, є мінімізація часу перебування заявки в системі випробування.

Висновки. Запропонована у статті аналітична модель багатофазної СМО системи випробування з пріоритетними заявками дозволяє безпосередньо перейти до моделювання і пошуку оптимальних режимів функціонування випробувальної організації. Модель ґрунтується на відомих аналітичних співвідношеннях, які одержали розвиток відповідно до специфіки проведення різних стадій випробування. На відміну від

розглядуваних раніше моделей СМО системи випробування [21], модель дозволяє обчислювати вплив можливих потоків пріоритетних заявок, які, у свою чергу, можуть мати власну систему рангів.

Подальше застосування моделі базується на використанні статистичних даних і параметрів вхідного потоку [5; 6] і наближених статистичних оцінок продуктивності функціонування випробувальних бригад [20]. Аналіз продуктивності системи випробування при надходженні пріоритетних заявок має передбачувати розробку варіантів надходження пріоритетних заявок до різних стадій випробування та системи сценаріїв використання персоналу. Використовуване при цьому поняття математичного сподівання задіяних фахівців на канал СМО \bar{k} дає змогу врахувати різну кількість фахівців у випробувальних бригадах, уникаючи при цьому зайвого ускладнення моделі.

Кінцева реалізація моделі можлива в автоматизованій інформаційній системі супроводження випробувань у складі модуля менеджменту випробувань для аналізу й видачі організаційних рішень, які сприятимуть підвищенню продуктивності системи випробувань організації.

Список використаних джерел

1. Про затвердження Порядку розроблення, освоєння та випуску нових видів продукції оборонного призначення, а також припинення випуску існуючих видів такої продукції [Електронний ресурс]: Постанова Кабінету Міністрів України № 234 (2021). – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/234-2021-%D0%BF#Text>.
2. Про затвердження Порядку проведення випробувань зразків озброєння та військової техніки [Електронний ресурс]: Постанова Кабінету Міністрів України № 159 (2021). – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/159-2021-%D0%BF#Text>.
3. Держстандарт України. (1995). Випробування і контроль якості продукції. Терміни та визначення (ДСТУ 3021-95).
4. Методичні рекомендації щодо організації наукової і науково-технічної діяльності у Збройних Силах України. (Ч. 4). Основи організації випробувань зразків (комплексів, систем) озброєння і військової техніки для потреб Збройних Сил України. ВНУ ГШ ЗС України. – 2020.
5. Щодо можливих функціональних компонент інформаційної системи супроводження випробувань Збройних сил України [Електронний ресурс] / І. Корнієнко, С. Корнієнко, Д. Камак, С. Казначей, О. Жирна // Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. – 2020. – № 6. – С. 52–61. – Режим доступу: <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.6.2020.06>.
6. Формування параметрів вхідного потоку вимог на випробування озброєння і військової техніки [Електронний ресурс] / І. В. Корнієнко, С. П. Корнієнко, В. А. Дмитрієв, А. Г. Павленко, Д. О. Камак // Озброєння та військова техніка. – 2020. – № 3(27). – С. 95-102. – Режим доступу: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2020.3\(27\).95-102](https://doi.org/1034169/2414-0651.2020.3(27).95-102).
7. Investigation of the Model of Testing for Weapons and Military Equipment [Electronic resource] / Korniienko I., Korniienko S., Dmytriiev V., Pavlenko A., Kamak D. // Mathematical Modeling and Simulation of Systems (MODS'2020). MODS 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing / Shkarlet S., Morozov A., Palagin A. (Eds.). – 2021. – Vol. 1265. Springer, Cham. – Accessed mode: https://doi.org/10.1007/978-3-030-58124-4_30.
8. Гнеденко Б. В. Курс теорії ймовірностей / Б. В. Гнеденко. – К.; Л.: Рад. шк. 1949. –
9. Cramer H. Mathematical Methods of Statistics / H. Cramer. – Princeton University Press, Princeton, 1946.
10. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М.: Наука, 1969. – 577 с.
11. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 1977. – 479 с.
12. Kleinrock L. Queueing systems / L. Kleinrock. – New York, 1975. – Vol. I: theory. John Wiley & Sons.

13. Kleinrock L. *Queueing systems: problems and solutions* / L. Kleinrock, R. Gail. – A Wiley-Interscience publication. New York : NY [u.a.] : Wiley, 1996.
14. Allen A. *Probability, Statistics and Queuing Theory with Compute Science Applications* / A. Allen. – Second Edition. – Academic Press Inc., 1990.
15. Saaty T. L. *Stochastic network flows: advances in networks of queues* / Saaty T. L. // *Congestion Theory* / Smith W. L., Wilkinson W. E. (Eds.). – Chapel Hill : University of North Carolina, 1964. – Pp. 86-107.
16. Казачинский В. З. *Математические методы решения военно-специальных задач* / В. З. Казачинский, Г. Е. Левитский. – К. : ВА ВПВО, 1980. – 292 с.
17. Ложковський А. Г. *Теорія масового обслуговування в телекомунікаціях : учебник* / А. Г. Ложковський. – Одеса : ОНАС ім. А. С. Попова, 2012. – 112 с. : ил.
18. *Performance Analysis and Optimal Allocation of Layered Defense M/M/N Queueing Systems* [Electronic resource] / Li L., Liu F., Long G., Zhao H., Mei Y. // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2016. – Pp. 1-21. – Accessed mode: <https://doi.org/10.1155/2016/5915918>.
19. *Analysis on Aircraft Sortie Generation Rate Based on Multi-class Closed Queueing Network* / Mao Z., Yu-juan W., Chao W., Sheng H. // *Proceedings 2nd International Conference on Computer Science and Electronic Engineering, ICCSEE*. – 2013. – Pp. 1877-1880.
20. *Modeling and Analysis of the Main Statistical Parameters of the Testing System of Special Equipment* [Electronic resource] / Korniienko I., Korniienko S., Dmytriiev V., Pavlenko A., Kamak D. // *Mathematical Modeling and Simulation of Systems. MODS 2021. Lecture Notes in Networks and Systems* / Shkarlet S. et al. (Eds.). – 2022. – Vol. 344. – Springer. Cham. – Accessed mode: https://doi.org/10.1007/978-3-030-89902-8_34.
21. Розробка моделі підготовчого етапу випробувань ОВТ: модель продуктивності випробувального підрозділу [Електронний ресурс] / І. В. Корнієнко, С. П. Корнієнко, В. А. Дмитрієв, А. Г. Павленко, Д. О. Камак // *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. – 2021. – № 4(45). – С. 124-34. – Режим доступу: <https://doi.org/10.30748/nitps.2021.45.16>
22. Масліков С. А. *Математична модель багатоканальної системи масового обслуговування* / С. А. Масліков, Л. П. Дюжаєв // *Вісник НТУУ «КПІ»*. Радіотехніка, радіоапаратобудування : збірник наукових праць. – 2009. – № 38. – С. 95–97.

References

1. Pro zatverdzhennia Poriadku rozroblennia, osvoiennia ta vypusku novykh vydiv produktsii oboronnoho pryznachennia, a takozh pryupynennia vypusku isnuichykh vydiv takoi produktsii [About the statement of the Order of development, development and release of new types of products of defense appointment, and also the termination of release of existing types of such products], Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine № 234 (2021) (Ukraine). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/234-2021-%D0%BF#Text>.
2. Pro zatverdzhennya Poryadku provedennya vyprobuvan' zrazkiv ozbroiennta ta viys'kovoyi tekhniki № 159 vid 17.02.2021 r." [About the statement of the Procedure for carrying out tests of samples of the weapon and military equipment], Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine № 159 (2021) (Ukraine). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/159-2021-%D0%BF#Text>.
3. State Standard of Ukraine (1995), 3021-95 *Vyprobuvannia i kontrol yakosti produktsii. Terminy ta vyznachennia [3021-95 Product testing and quality control. Terms and definitions]*.
4. *Metodychni rekomendatsii shchodo orhanizatsii naukovoї i naukovo-tekhnichnoi diialnosti u Zbroinykh Sylakh Ukrainy. Ch.4. Osnovy orhanizatsii vyprobuvan' zrazkiv (kompleksiv, system) ozbroiennta i viiskovoi tekhniki dlia potreb Zbroinykh Syl Ukrainy [Methodological recommendations regarding the organization of scientific and scientific and technical activities in the Armed Forces of Ukraine. Part 4. Basics of organizing tests of samples (complexes, systems) of weapons and military equipment for the needs of the Armed Forces of Ukraine]* (2020). VNU GSH of the Armed Forces of Ukraine.
5. Korniienko, I., Korniienko, S., Kamak, D., Kaznachei, S., & Zhyrna, O. (2020). Shchodo mozhlyvykh funktsionalnykh komponent informatsiinoi systemy suprovodzhennia vyprobuvan' Zbroinykh syl Ukrainy [Regarding the possible functional components of the information system for

supporting tests of the Armed Forces of Ukraine], *Scientific works of the State Research Institute of Testing and Certification of Weapons and Military Equipment*, (6), 52-61. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.12.2022.07>.

6. Korniienko, I., Korniienko, S., Dmytriiev, V., Pavlenko, A., & Kamak, D. (2020). Formuvannia parametriv vkhidnogo potoku vymoh na vyprobuvannia ozbroiennia i viiskovoi tekhniki [Parameters formation of the input flow of requirements for testing weapons and military equipment]. *Weapons and military equipment. Scientific and technical journal*, (3(27)), 95-102. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2020.3\(27\).95-102](https://doi.org/1034169/2414-0651.2020.3(27).95-102).

7. Korniienko, I., Korniienko, S., Dmytriiev, V., Pavlenko, A., & Kamak, D. (2021) Investigation of the Model of Testing for Weapons and Military Equipment. In S. Shkarlet, A. Morozov, A. Palagin (Eds.), *Mathematical Modeling and Simulation of Systems (MODS'2020)*. MODS 2020. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1265. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58124-4_30.

8. Hniedenko, B.V. (1949). *Kurs teorii ymovirnosti [Course in probability theory]*. Rad. shkola.

9. Cramer, H. (1946). *Mathematical Methods of Statistics*. Princeton University Press, Princeton.

10. Venttsel, E.S. (1969). *Teoriia veroiatnosti [Probability theory]*. Nauka.

11. Gmurman, V.E. (1977). *Teoriia veroiatnosti i matematicheskaia statistika [Theory of probability and mathematical statistics]*. Vysshaia shkola.

12. Kleinrock, L. (1975). *Queueing systems* (Vol. I: theory). John Wiley & Sons, New York.

13. Kleinrock, L., & Gail, R. (1996). *Queueing systems: problems and solutions*. A Wiley-Interscience publication.

14. Allen, A. (1990). *Probability, Statistics and Queueing Theory with Compute Science Applications*. Academic Press Inc., Second Edition.

15. Saaty, T.L. (1964). Stochastic network flows: advances in networks of queues. In Smith W.L., W.E. Wilkinson (Eds.), *Congestion Theory* (pp. 86-107). University of North Carolina, Chapel Hill.

16. Kazachinskii, V.Z., & Levitskii, G.E. (1980). *Matematicheskie metody reshenia voenno-spetzialnykh zadach [Mathematical methods for solving military special problems]*. VA VPVO SV.

17. Lozhkovskiy, A.H. (2012). *Teoriia massovoho obsluzhyvaniya v telekommunikatsiyakh [Theory of queueing in telecommunications]*. ONAS ym. A. S. Popova.

18. Li, L., Liu, F., Long, G., Zhao, H., & Mei, Y. (2016). Performance Analysis and Optimal Allocation of Layered Defense M/M/N Queueing Systems. *Mathematical Problems in Engineering* (pp. 1-21). <https://doi.org/10.1155/2016/5915918>.

19. Mao, Z., Yu-juan, W., Chao, W., & Sheng, H. (2013). Analysis on Aircraft Sortie Generation Rate Based on Multi-class Closed Queueing Network. *Proceedings 2nd International Conference on Computer Science and Electronic Engineering, ICCSEE* (pp. 1877-1880).

20. Korniienko, I., Korniienko, S., Dmytriiev, V., Pavlenko, A., & Kamak, D. (2022). Modeling and Analysis of the Main Statistical Parameters of the Testing System of Special Equipment. In S. Shkarlet et al. (Eds.), *Mathematical Modeling and Simulation of Systems. MODS 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*, 344. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89902-8_34.

21. Korniienko, I.V., Korniienko, S.P., Dmytriiev, V.A., Pavlenko, A.H., & Kamak, D.O. (2021). Rozrobka modeli pidhotovchoho etapu vyprobuvan OVT: model produktyvnosti vyprobuvalnogo pidrozdilu [Development of a model of the preparatory phase of test tests: a model of productivity of the test division]. *Science and technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*, 4(45), 124-34. <https://doi.org/10.30748/nitps.2021.45.16>.

22. Maslikov, S.A., & Diuzhaiev, L.P. (2009). Matematychna model bahatokanalnoi systemy masovoho obsluzhuvannia [Mathematical model of multi-channel queueing system]. *Bulletin of NTUU "KPI". Radio engineering, radio apparatus construction: a collection of scientific papers*, 38, 95-97.

Отримано 01.12.2022

**Svitlana Korniienko¹, Ihor Korniienko², Andrii Trystan³,
Maksym Herashchenko⁴, Maksym Solodchuk⁵**

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Senior Lecturer of the Department cybersecurity and mathematical modeling

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: cornel@ukr.net, ORCID <http://orcid.org/0000-0002-9162-1229>.

ResearcherID: [AAV-4708-2020](https://orcid.org/0000-0002-9162-1229), SCOPUS Author ID [57219057983](https://orcid.org/0000-0002-9162-1229)

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department of geodesy, cartography and land planning

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: cornelukr@gmail.com, ORCID <http://orcid.org/0000-0001-9105-0780>.

ResearcherID: [F-7236-2017](https://orcid.org/0000-0001-9105-0780), SCOPUS Author ID [57485157200](https://orcid.org/0000-0001-9105-0780)

³Doctor of Technical Sciences, Senior Research, Deputy Chief of Institute of Research Work

State Scientific reSearch Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: avtris@ukr.net, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-2137-5712>, SCOPUS Author ID [57216296699](https://orcid.org/0000-0002-2137-5712)

⁴Chief of the Scientific-Research Department

State Scientific reSearch Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: demio99@ukr.net, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6587-0355>

⁵Chief of the Scientific-Research Department

State Scientific reSearch Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: rocket15733@gmail.com, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1162-6784>

ANALYTICAL MODEL OF THE TESTING SYSTEM WITH PRIORITY REQUESTS

The military aggression carried out by the Russian Federation against Ukraine for more than eight years has significantly increased the volume of military development by the military-industrial complex of Ukraine. Considering the special importance and danger of the developed samples of weapons and military equipment, the issue of their high-quality and timely testing is crucial. The flow of samples of weapons and military equipment, which are sent to the testing organization for research, may have heterogeneity in the importance of samples for immediate mass production and supply to the troops. The priority that arises in the flow of tested samples can negatively affect the timeliness of testing non-priority samples and the throughput of the testing organization as a whole, which, in turn, forces the search for methods of effective organizational management of the testing process.

The article deals with the development of a test system model. To model and analyze the processes that affect the performance of the testing organization, a multi-phase system of mass service is used, in which the main stages of the test are represented by phases. Determined with the help of statistical analysis of the incoming flow of samples arriving for testing and the processes of servicing these samples, it was possible to model the main stages of the test according to the scheme of Markov processes. The model introduces the concept of the average number of the test team, which makes it possible to analyze the effectiveness of the distribution of personnel, which in the conditions of mass tests is a limited resource of the organization. For various stages of testing, the conditions for the receipt of priority samples, the features of maintenance of priority samples and their impact on the performance of the testing system are formalized. The main analytical ratios that determine the successful functioning of the test system are derived.

It is assumed that the implementation of the model is possible as part of an automated test support information system for analyzing the performance of the test process and developing organizational solutions aimed at optimizing the functioning modes.

Keywords: tests, model, information system, weapons and military equipment, productivity, queuing system.

Fig.:8. References: 22.

Yevhenii Berloh¹, Andrii Rohovenko², Hanna Dyvnych³

¹PhD student of the Department of Information and Computer Systems
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: evgeniy.berlog@gmail.com

²PhD in Technical Sciences, associate professor of the Department of Information and Computer Systems
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: aurogoenko@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4594-5692>. ResearcherID: [G-3926-2014](https://orcid.org/0000-0003-4594-5692)

³PhD in Public Administration, associate professor of the Department of Foreign Philology
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: anyahaidai@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4240-5391>. ResearcherID: [R-1613-2016](https://orcid.org/0000-0003-4240-5391)

**RESEARCH OF METHODS OF AUTOMATED SEARCH
OF “SQL INJECTION” TYPE VULNERABILITIES IN WEB APPLICATIONS**

The article presents the results of a scientific and methodological study of the methods of automated search for SQL vulnerabilities in web applications. An example of an attack using a typical SQL injection is provided. The classification of web application security assessment methods based on penetration testing is given. The results of practical studies of the operation of the most widely used web scanners for automated vulnerability testing of web applications are given. Based on the results, a comparison of the effectiveness of penetration testing methods has been made. The possible directions of further research into the methods of automated search for SQL vulnerabilities in web applications are substantiated, taking into account the results obtained, in particular the values of the Youden Index.

Key words: SQL; SQL injection; OWASP; SPA; WVS; Black Box.

Table: 1. Fig.: 3. References: 16.

Urgency of the research. Modern society is more and more relying on web applications, transferring its life to a digital level, which is raising the level of security requirements. Due to the complexity of modern web applications, finding vulnerabilities is a very difficult task, the solution of which does not always give positive results. Both for the research community and for the data security industry, it is important to develop research methods for finding vulnerabilities in web applications, taking into account the degree of impact of web technologies on the life of our society. According to Internet Live Stats as of February 2019 [3], hundreds of millions of websites are attacked every day, causing significant harm to a large number of people.

According to the leading web security organization Open Web Application Security Project (OWASP), one of the most common security risks to web applications is code injection [1], such as cross-site scripting (XSS) and structured query language injection (SQL) [2].

Target setting. In the case of site testing for vulnerabilities, either automated tools or manual tests are used. Manual testing has a number of disadvantages, of which the most significant should be highlighted:

- Time-consuming. A person significantly loses to computer systems in terms of speed.
- High probability of low-quality testing. The quality of the tests depends on the skills of the specialist who develops them. There is a risk that some of the vulnerabilities will be missed due to the human factor.

Thus, taking into account the volume and variety of modern web applications, the use of automated testing is extremely relevant. However, at the moment, there is no clear information to what extent existing methods and automated web application testing tools effectively detect code injection-based vulnerabilities. To determine the effectiveness, it is necessary to conduct a series of tests using existing automated testing tools.

Actual scientific researches and issues analysis. Many works have been devoted to the issue of the effectiveness of automated tools designed to find vulnerabilities in web applications built on the basis of various methods.[1] Most of them are characterized by low efficiency. At the same time, there are many publications on the possible improvements of automated tools designed to find vulnerabilities in web applications [6; 9]. The existing test sets for most types

of vulnerabilities in web applications are described in great detail in the literature [12]. There is also some information on testing certain types of vulnerabilities [13]. According to the results of the analysis of recent studies, it can be concluded that there is enough information available to the general public about commercial tools for testing the vulnerability of web applications.

Uninvestigated parts of general matters defining. An unsolved task is to determine the effectiveness of open-source web vulnerability testing tools based on penetration testing methods. In this work, special emphasis is placed on the fact that in the case of low efficiency of open-source testing tools, it is possible to analyse the reasons that create this deficiency and propose a solution to the problem. It is necessary to conduct a study of existing open-source web scanners and perform an analysis of their performance according to the Youden Index.

The research objective. The purpose of this work is a practical study of tools for searching vulnerabilities in web applications, as well as an analysis of their work efficiency according to the Youden index and the determination of directions for the development of automated tools in order to further simplify the process of protecting web applications from attacks based on code injections.

The statement of basic materials. SQL injection is classified as a code injection attack where an attacker enters malicious SQL queries into an input field. An example of a typical SQL injection can be seen in Figure 1. All types of SQL injection are very similar to this example. By making an SQL injection, an attacker can either change the database or show the contents of those data that would normally be inaccessible [10].

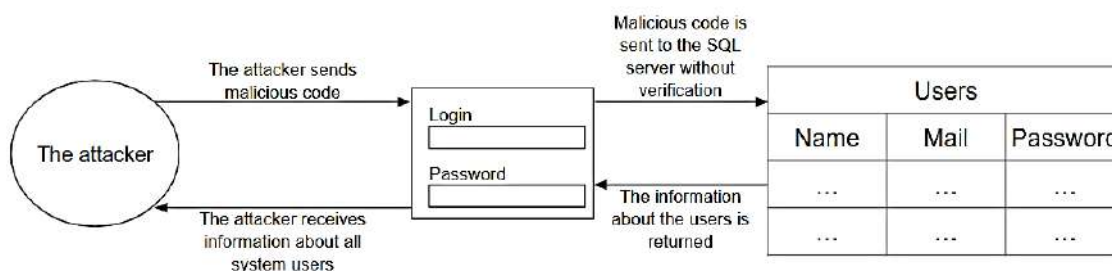


Fig. 1. An example of a typical SQL injection

Security assessment methods based on penetration testing (pentests) can be classified into several categories depending on the level of knowledge about the system to be tested. This knowledge may include the programming language, the type of database used in the application, the technologies used. In general, the tests are commonly divided into three categories:

- Black Box;
- White Box;
- Grey Box.

Black Box is a type of pentests when the developer knows only the address of the application that needs to be tested. In the case of web applications, this is the IP address (or domain name) and the port. In most cases, Black Box testing is a combination of manual and automated testing. The advantage of this type is that the tester is in the same conditions as the external hacker and therefore can find the same vulnerabilities. The disadvantage is that the tester does not have access to internal services.

White Box testing is the opposite of Black Box. In this case, the tester has full access to the code, documentation, architecture, user credentials, etc. The advantage of this type of testing is that the tester can find some vulnerabilities based on code analysis. Also, in this case, you can test both external and internal services. This type of testing is more resource-consuming compared to Black Box testing.

Grey Box testing is a mix of White Box and Black Box. In this case, the tester may have a certain piece of information that may be useful for testing [4].

One of the tools used for automated Black Box testing is the Web Vulnerability Scanner (WVS). WVS scans a web application for specific vulnerabilities. Usually, it consists of three modules: web scanner, fuzzer and analyzer [6].

The first to come into play is the web scanner, which is used to analyse the web application, to determine what data the web application can accept as input and to build the structure of the web application pages. When the first stage is completed, the fuzzer generates data that can be used to attack the web application and actually executes the attacks. Finally, the analyser evaluates the result to determine which attacks were successful and which were not. Based on these results, the analyser generates a report with a list of vulnerabilities that were found with a detailed description of how exactly this particular vulnerability was found.

The web scanner automatically searches the web application for URLs derived from the original URL. It is traditionally used in search engines such as Google and Bing. The scanner's workflow begins by loading a web page with an initial URL and searching the HTML DOM for related URLs. One of the resources that the scanner pays attention to is the robots.txt file, which is used to inform the scanner of which resources it should not access. Another type of file that the scanner analyses during this process is the XML sitemap. This file is a list of important web pages and is essential for building the website structure. The algorithm of the scanner can be seen in Fig. 2.

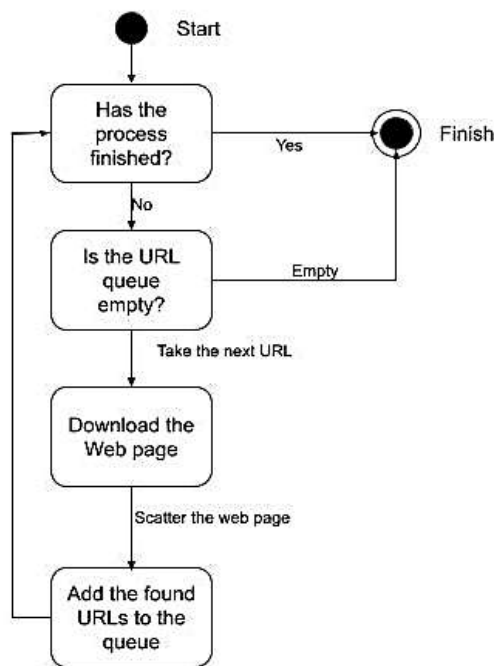


Fig. 2. Algorithm of the web scanner

Fuzzing is an automated testing technique that randomizes the input for programs and focuses on edge cases with the use of invalid data.[7] Fuzzing was first described by Miller [8] in a program called The Fuzz. This program generated random characters as input for testing UNIX utilities.

There are two traditional types of fuzzing techniques, which are listed below:

- Mutation-based fuzzing is based on collecting correct data, and randomly or heuristically changing that data. The data is then used to attack the system under test (SUT) and observe the behaviour of the web application. An example of mutation-based fuzzing with heuristics can be a change in the length of an input string.
- Another traditional type of fuzzing is generation-based fuzzing, which uses a specification describing the composition of the input data, such as a file format, to automatically generate semi-valid input data. This is often combined with various types of fuzzing heuristics, such as

very long empty strings. Mutation-based fuzzing is generally easier to get started with because it doesn't take much to know about SUTs. However, mutation-based fuzzing generally results in lower code coverage compared to generation-based fuzzing [14].

The analyser's job is to decide if a vulnerability exists in a web application. This is resolved based on the response received from a fuzzer attack on the web application [9]. The analyser tries to find common patterns in the error messages that indicate that this part of the web application has some kind of vulnerability.

Since the purpose of this article is to analyse the methods and efficiency of performance of scanners, several scanners should be selected as the subject of testing and analysis. Based on the information from the sources, a large number of available open-source scanners can be identified. Therefore, the following criteria were used as a basis for the selection of experimental specimens:

- The ability to work with SPA (Single Page Application) web applications;
- Code openness.
- Project support by the developer community.
- The ability to search for SQL injections.

As a result of the analysis, three scanners were selected.

OWASP Zap (Zed Attack Proxy) is one of the most popular WVS with a huge community behind it and so it was chosen as the first focus scanner [15]. It has shown good results according to some previous articles and consists of many different functionalities, making it an interesting tool for this project. Zap is created and maintained by the OWASP Foundation [1], runs on Windows, Linux, and Mac OS, and is written in Java. ZAP uses a GUI from which the user can perform scans, but it also acts as a proxy server so that the user can observe and manipulate all the traffic that passes through it. OWASP Zap can work with both traditional and AJAX scanners.

Arachni is a high-performance, free and open source ruby-based scanner designed to help administrators and testers assess the security of web applications. Arachni supports multiple platforms, including Windows, Linux, and Mac OS X, and can be instantly used on any system. Arachni includes both a command line interface (CLI) and a web user interface for multi-user management [16].

Wapiti is the third and final scanner selected for testing. Wapiti differs from the other two scanners in several ways:

It is written in Python and only works on Linux.

It has no GUI and does not act as a proxy server.

This scanner is different from the other two and also has active community support, making it an interesting choice for analysis.

The OWASP Benchmark test was launched in 2015 to evaluate the accuracy, coverage and speed of web application vulnerability scanners. Being an open-source program, organizations and researchers can use this framework to evaluate web vulnerability scanners using thousands of test cases provided by the OWASP Benchmark for eleven different vulnerability categories. These categories include cross-site scripting (XSS), insecure cookie, LDAP injection, structured query language (SQL) injection, and many others. OWASP Benchmark is implemented in Java and can be used to evaluate different types of scanners. Although OWASP Benchmark is a free and open-source program, it remains one of the most up-to-date because it is actively supported by the open-source community. Thus, the OWASP Benchmark can be considered an effective option for measuring the effectiveness of vulnerability scanners. It evaluates a tested scanner based on true positive rate, false positive rate, true negative rate, and false negative rate.

The score obtained by the OWASP Benchmark is the Youden index, which is a standard method that summarizes the accuracy of a set of tests [12]. OWASP Benchmark calculates an individual score for each category of test cases, called the Benchmark Accuracy Score, ranging from 0 to 100. The following example provides an overview of how OWASP Benchmark calculates the Scanner Accuracy Score.

Let's say the scanner showed a true positive rate (TPR) of 88 % and a false positive rate (FPR) of 15 %; This means that its sensitivity = TPR (0.88) and its specificity = 1-FPR (0.85). So, the Youden Index is $(0.88+0.85) - 1 = 0.73$ and the OWASP score is 73 because it normalizes the results to a range of 0 to 100.

Each of the scanners was run on the OWASP Benchmark tests and the scan results are shown in Table 1 below. Metrics including TP, FN, TN, FP, TPR and FNR and the Youden index have been calculated for each web vulnerability scanner.

Table 1 – The results of the study of scanners on the OWASP Benchmark

WVS	TP	FN	TN	FP	Total of tests	TP percentage	FP percentage	Youden Index
OWASP ZAP v2.12.0	160	112	215	17	504	58,82%	7,33%	51,50%
Arachni v1.6.1.3	136	136	232	0	504	50,00%	0,00%	50,00%
Wapiti v3.1.4	153	119	232	0	504	56,25%	0,00%	56,25%

Fig. 3 highlights the performance evaluation of each of the selected scanners based on the OWASP Benchmark tests for SQL Injection vulnerability.

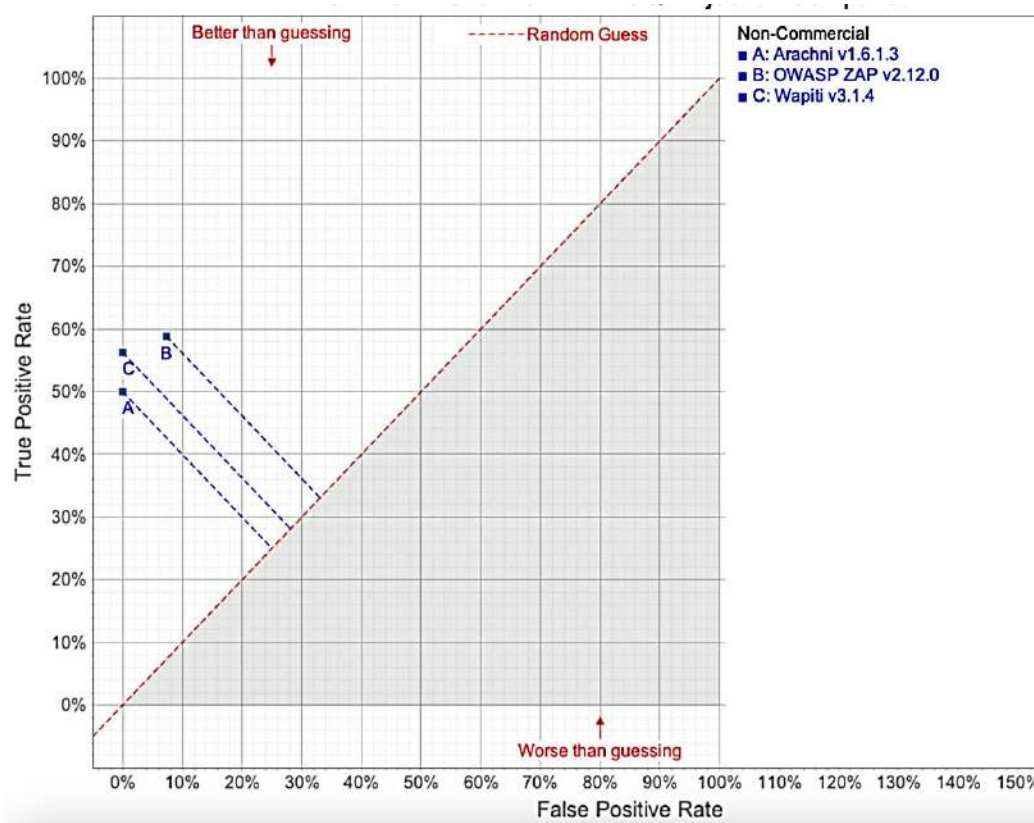


Fig. 3. Performance evaluation of the scanners based on the OWASP Benchmark

As a result, Wapiti has shown the best results with a Youden index of 56.25, ZAP is in second place with an indicator of 51.50 and Arachni is in third place with a result of 50.00.

Conclusions.

- An example of an attack on a web application is given and the main elements and stages of a typical SQL injection are highlighted;
- The classification of web application security assessment methods based on penetration testing is provided.

- The results of practical studies of the operation of the most widely used open-source web scanners for automated vulnerability testing of web applications are presented.

The calculated Youden index allows us to conclude that the Wapiti scanner has the highest efficiency, that is, it has detected the largest number of vulnerabilities. But even this scanner has a Youden coefficient of less than 60%, so the task of improving the efficiency of searching for SQL injection vulnerabilities is highly relevant for further research. In addition, during the study, it was determined that the process of scanning for vulnerabilities of the "SQL injection" type is more complicated for applications of the SPA (Single Page Application) type, which also requires a solution as a special case of the problem of increasing the effectiveness of the search for vulnerabilities of web applications.

Список використаних джерел

OWASP, Top 10 2021 [Electronic resource]. – 2021. – Available: https://owasp.org/www-chapter-minneapolis-st-paul/download/20211216_OWASP-MSP_OWASP_Top_Ten_2021.pdf?raw=true.

Halfond W. G. J. A classification of SQL injection attacks and countermeasures / W. G. J. Halfond, J. Viegas, A. Orso // Proceedings of the IEEE international symposium on secure software engineering. – 2006. – Vol. 1. – Pp. 13-15.

W3C, Internet live stats [Electronic resource]. – 2019. – Available: <http://www.internetlivestats.com>.

Mohd. Ehmer Khan. A Comparative Study of White Box, Black Box, and Grey Box Testing Techniques / Mohd Ehmer Khan, Fareema Hkaan // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2012. – Vol. 3, No 6. – Pp. 12-14. – Available: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.261.1758&rep=rep1&type=pdf>.

Benjamin Eriksson. Black Widow: Black-box Data-driven Web Scanning / Benjamin Eriksson, Giancarlo Pellegrino, Andrei Sabelfeld // 2021 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP). – 2021. – Pp. 1125–1142. – DOI: 10.1109/SP40001.2021.00022.

Siham el Idrissi. Performance evaluation of web application security scanners for prevention and protection against vulnerabilities / Siham el Idrissi, Naoual Berbiche, Fatima Guerouate, Sbihi Mohamed // International Journal of Applied Engineering Research. – Jan. 2017. – Vol. 12 – Pp. 11068–11076.

Oehlert P. Violating assumptions with fuzzing? / Peter Oehlert // IEEE Security Privacy. – 2005. – Vol. 3.2. – Pp. 58–62. – DOI: 10.1109/MSP.2005.55.

Barton P. Miller. An Empirical Study of the Reliability of UNIX Utilities / Barton P. Miller, Louis Fredriksen, Bryan So // Commun. ACM. – Dec. 1990. – Vol. 33.12. – Pp. 32–44. – DOI: 10.1145/96267.96279.

Adam Doupe. Why Johnny can't pentest: An analysis of black-box web vulnerability scanners / Adam Doupe, Marco Cova, and Giovanni Vigna // International Conference on Detection of Intrusions and Malware, and Vulnerability Assessment. – Springer, 2010. – Pp. 111–131.

William G. Halfond. A classification of SQL-injection attacks and countermeasures / William G. Halfond, Jeremy Viegas, and Alessandro Orso // Proceedings of the IEEE international symposium on secure software engineering. IEEE. – 2006. – Vol. 1. – Pp. 13–15.

OWASP. (2022). OWASP Benchmark [Electronic resource]. – Available: <https://www.owasp.org/index.php/Benchmark>.

Vulnerability Scanning Tools, 2022 [Electronic resource]. – Available: https://owasp.org/www-community/Vulnerability_Scanning_Tools.

Matti E. Evaluation of open source web vulnerability scanners and their techniques used to find SQL injection and cross-site scripting vulnerabilities: Student thesis. – Linköping universitet, Institutionen för datavetenskap, 2021.

OWASP. (2016). Fuzzing [Electronic resource]. – Available: <https://www.owasp.org/index.php/Fuzzing>.

OWASP ZAP [Electronic resource]. – URL: <https://github.com/zaproxy>.

Laskos T. Arachni Application Security Scanner Framework [Electronic resource] / T. Laskos. – 2017. – Available: <http://www.arachni-scanner.com>.

References

1. OWASP Top 10 2021, 2021. https://owasp.org/www-chapter-minneapolis-st-paul/download/20211216_OWASP-MSP_OWASP_Top_Ten_2021.pdf?raw=true.

2. Halfond, W.G.J., Viegas, J., Orso, A. (2006). A classification of SQL injection attacks and countermeasures, *1*, 13-15.
3. W3C, Internet live stats. (2019). <http://www.internetlivestats.com>.
4. Mohd, Ehmer Khan, Fareema, Hkaan. (2012). A Comparative Study of White Box, Black Box, and Grey Box Testing Techniques. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 3(6), 12-14. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.261.1758&rep=rep1&type=pdf>.
5. Benjamin, Eriksson, Giancarlo, Pellegrino, & Andrei Sabelfeld. (2021). Black Widow: Black-box Data-driven Web Scanning". *2021 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP)* (pp. 1125–1142). doi: 10.1109/SP40001.2021.00022.
6. Siham, el Idrissi, Naoual, Berbiche, Fatima, Guerouate, & Sbihi, Mohamed. (Jan. 2017). Performance evaluation of web application security scanners for prevention and protection against vulnerabilities. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12, 11068–11076.
7. Oehlert, P. (2005). Violating assumptions with fuzzing. *IEEE Security Privacy*, 3.2, 58–62. doi: 10.1109/MSP.2005.55.
8. Barton, P. Miller, Louis, Fredriksen, & Bryan, So. (Dec. 1990). An Empirical Study of the Reliability of UNIX Utilities. *Commun. ACM*, 33.12, 32–44. doi: 10.1145/96267.96279.
9. Adam, Doupé, Marco, Cova, & Giovanni, Vigna. (2010). Why Johnny can't pentest: An analysis of black-box web vulnerability scanners. *International Conference on Detection of Intrusions and Malware, and Vulnerability Assessment* (pp. 111–131). Springer.
10. William, G. Halfond, Jeremy, Viegas, & Alessandro, Orso. (2006). A classification of SQL-injection attacks and countermeasures. *Proceedings of the IEEE international symposium on secure software engineering*. IEEE, 1, 13–15.
11. OWASP. (2022). OWASP Benchmark. <https://www.owasp.org/index.php/Benchmark>.
12. Vulnerability Scanning Tools (2022). https://owasp.org/www-community/Vulnerability_Scanning_Tools.
13. Erik, Matti. (2021). *Evaluation of open source web vulnerability scanners and their techniques used to find SQL injection and cross-site scripting*. Vulnerabilities.
14. OWASP. (2016). Fuzzing. <https://www.owasp.org/index.php/Fuzzing>.
15. OWASP ZAP. <https://github.com/zaproxy>.
16. Laskos, T. (2017). *Arachni Application Security Scanner Framework*. <http://www.arachni-scanner.com>.

Отримано 15.11.2022

УДК 004.056.53

Євгеній Берлог¹, Андрій Роговенко², Ганна Дивнич³

¹аспірант кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: evgeniy.berlog@gmail.com

²кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: arogovenko@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4594-5692>. ResearcherID: [G-3926-2014](https://orcid.org/0000-0003-4594-5692)

³кандидат наук з державного управління, доцент кафедри іноземної філології
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: anyahaidai@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4240-5391>. ResearcherID: [R-1613-2016](https://orcid.org/0000-0003-4240-5391)

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПОШУКУ ВРАЗЛИВОСТЕЙ ТИПУ «SQL INJECTION» У ВЕБДОДАТКАХ

У статті представлено результати науково-методичного дослідження методів автоматизованого пошуку SQL вразливостей у вебдодатках.

Наведено приклад атаки з застосуванням типової SQL ін'єкції. Усі SQL ін'єкції будуються за подібною структурою, тобто результатом SQL ін'єкції, може бути несанкціонована зміна вмісту бази даних, або отримання доступу до інформації, яка за звичайних умов недоступна.

Наведено класифікацію методів оцінки безпеки веб-додатків на основі тестування на проникнення. Зокрема, при класифікації враховуються мова програмування, тип бази даних яка використовується в додатку та використані технології. Виділено три категорії тестів, та наведені відмінності між ними.

Розглянуто підходи до тестування на проникнення такі як *Black Box*, *White Box* та *Grey Box*. Беручи до уваги необхідність автоматизації тестування та максимальної імітації хакерської атаки ззовні було обрано підхід *Black Box* підхід тестування.

Розглянуто алгоритм роботи засобів пошуку вразливостей у *web*-додатках, зокрема веб-сканера (*WVS*). Також розглянуто особливості використання традиційних методів знаходження вразливостей у *web*-додатках беручи до уваги типову архітектуру *WVS* та беручи до уваги типову відмінність у роботі *WVS* при роботі з традиційними вебдодатками та *SPA* додатками.

Наведено результати практичних досліджень роботи найуживаніших вебсканерів для автоматизованого тестування вразливості вебдодатків, зокрема досліджено сканери *OWASP Zap*, *Arachni*, *Wapiti*.

Обчислено індекс Юдена, який дав змогу зробити висновок, що найбільша ефективність є у сканера *Wapiti*, тобто він виявив найбільшу кількість вразливостей. Але навіть цей сканер має коефіцієнт Юдена менше ніж 60 %, отже задача підвищення ефективності пошуку вразливостей типу “*SQL injection*” є дуже актуальним для подальшого дослідження. Додатково при дослідженні було визначено, що процес сканування на предмет вразливостей типу “*SQL injection*” є складнішим для додатків типу *SPA* (*Single Page Application*), що також потребує рішення в якості окремого випадку задачі підвищення ефективності пошуку вразливостей *web*-додатків.

Ключові слова: *SQL*; *SQL injection*; *OWASP*; *SPA*; *WVS*; *Black Box*.

Олена Мураховська

старший викладач кафедри вищої математики та системного аналізу
Національний аерокосмічний університет імені М. С. Жуковського «ХАІ» (Харків, Україна)
E-mail: o.murahovska@khai.edu. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6170-5173>
ResearcherID: [HIA-0690-2022](https://orcid.org/0000-0002-6170-5173). SCOPUS Author ID: [57223964871](https://orcid.org/0000-0002-6170-5173)

**ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИЯВЛЕННЯ
НАЗЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ БЕЗПІЛОТНИМ ЛІТАЛЬНИМ АПАРАТОМ
ЦИВІЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

Вирішується задача побудови частинних критеріїв ефективності безпілотного літального апарата при виконанні завдань поодинокого або групового пошуку незамаскованих нерухомих об'єктів методом випадкового пошуку з постійною інтенсивністю спостереження. Запропоновано ймовірнісну модель побудови частинних критеріїв ефективності, яка дозволить оцінити ймовірність виявлення поодинокого об'єкта в заданий проміжок часу, середній час, необхідний для пошуку до виявлення об'єкта з урахуванням технічних характеристик безпілотного літального апарату, обмежень на час знаходження в робочій зоні та відстань до дальньої межі робочої зони.

Ключові слова: безпілотна авіаційна система; критерії ефективності; ймовірнісна модель; пошук об'єктів; поодинокий об'єкт; груповий об'єкт.

Рис.: 2. Бібл.: 19.

Актуальність теми дослідження. Активний розвиток безпілотних літальних апаратів (БпЛА) зумовлено низкою їхніх важливих переваг [1; 2]. Насамперед це відсутність екіпажу, тобто вони можуть виконувати маневри з перевантаженням, що перевищує фізичні можливості людини, порівняно невелика вартість БпЛА, малі витрати на їхню експлуатацію, вони не вимагають спеціальних аеродромів із розвиненою інфраструктурою для свого базування, великі тривалість і дальність польоту через відсутність фактору втоми екіпажу та інші переваги порівняно з пілотованою авіацією. Наприклад, у роботі [3] серед переваг БпЛА транспортної категорії порівняно з пілотованим варіантом зазначено відмову від систем та обладнання життєзабезпечення, маса яких для середнього транспортного літака приблизно дорівнює 1,6-1,7 т. Актуальність дослідження пов'язана з аналізом найбільш доцільних способів поодинокого або групового пошуку об'єкта, які забезпечують виявлення об'єкта в найкоротший термін та з найменшою витратою ресурсів.

Постановка проблеми. Кінцевою метою пошукових дій є виявлення об'єкта, яке може бути реалізовано в різний спосіб, нерівноцінним із погляду витрачених зусиль та тривалості пошуку. Отже, актуальна розробка найбільш доцільних способів пошуку, які забезпечують виявлення об'єкта в найкоротший термін та з найменшою витратою ресурсів [4]. Виявлення об'єкта залежить від багатьох чинників, основними з яких є:

- спосіб пошуку цілі (маршрут польоту, послідовність перегляду місцевості тощо);
- характер об'єктів пошуку (об'єкт поодинокий або множинний, рухомий чи ні);
- умови застосування БпЛА (швидкість, висота польоту тощо);
- апаратура, що використовується для ведення пошуку та передачі інформації;
- дестабілізуючий вплив факторів зовнішнього середовища (природного та техногенного характеру).

Тобто на виявлення об'єктів впливають як об'єктивні чинники (наприклад, спосіб пошуку цілі), так і випадкові (наприклад, дестабілізуючий вплив чинників довкілля) [5; 6], тому попередньо не можна напевно стверджувати, буде виявлено об'єкт за даних умов та у даний спосіб пошуку чи ні. Інакше кажучи, виявлення об'єкта при його пошуку є випадковою подією, а тому, характеризуючи можливість виявлення об'єкта та ефективність його пошуку, необхідно використовувати відповідні методи теорії ймовірностей [7; 8].

У цій роботі для оцінки ефективності обрані ймовірнісні частинні критерії, що дозволяють не лише оцінити ефективність використання БпЛА, а ще і спланувати поставлене завдання із заданим рівнем ймовірності [4; 7; 9]. До цієї групи критеріїв належать:

- $P_{\text{виявл}}$ – частинний критерій виявлення об'єкта і заданий проміжок часу t ;
- $T_{\text{сер}}$ – середній час пошуку до виявлення об'єкта;
- P_m – частинний критерій виявлення не менше m об'єктів із загальної кількості n ;
- P_M – частинний критерій виявлення не менше заданої кількості об'єктів за заданий час пошуку;
- $P_{\text{виявл}}^1$ – частинний критерій виявлення не менш одного об'єкта.

Метод пошуку – випадковий пошук із постійною інтенсивністю спостереження (район можливого знаходження об'єкта проглядається в хаотичному порядку, більша увага приділяється ділянкам найбільш вірогідного розташування об'єкта пошуку, не включаючи багаторазового перегляду тієї самої ділянки). Також приймаються такі припущення: знаходження об'єкта рівноймовірне в будь-якій точці району пошуку; об'єкт нерухомий; об'єкт не замаскований; об'єкт поодинокий або груповий.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно з [10] безпілотні авіаційні системи (БАС) класифікуються за сферою застосування та належності на військові, цивільні, спеціальні та дослідні. Цивільні БАС, у свою чергу, поділяються на протипожежні, транспортні, пошукові, моніторингові та побутові. БпЛА можна використовувати також під час вирішення наступних цивільних завдань [11-14].

Виробничий та екологічний моніторинг – збір інформації про об'єкт з метою визначення відповідності його функціональних характеристик до технологічних та екологічних норм. Виробничому та екологічному моніторингу підлягають об'єкти видобутку, зберігання газу, магістральні трубопроводи, газопереробні та газохімічні комплекси.

Пошукові та рятувальні роботи – виконуються за потреби, здебільшого в разі виникнення позаштатних (надзвичайних) ситуацій в обсягах, що відповідають можливостям безпілотної авіаційної техніки – авіамоніторинг різних видів.

Оперативна доставка вантажів – доставка вантажів у важкодоступні райони (що не мають транспортних комунікацій по земній поверхні) та інші.

Охорона об'єктів – виконання моніторингу та активних дій щодо запобігання несанкціонованому втручанням в діяльність об'єктів.

Геофізичні дослідження – збирання інформації щодо фізичного стану земної поверхні, а також ґрунту до можливої глибини, на якій розташовуються або плануються до розміщення об'єкти інфраструктури, а також з метою пошуку родовищ корисних копалин, уточнення їхніх меж.

Картографування – виконання робіт з визначення просторового розміщення та поєднання елементів земної поверхні, геометричної прив'язки об'єктів інфраструктури до геодезичної системи Землі.

Валідація результатів обробки матеріалів космічної зйомки – збір та обробка контрольної вибірки матеріалів наземної та авіаційної зйомки для підтвердження заявленої точності вимірювання тематичних характеристик природних об'єктів чи технологічного обладнання.

Льодова розвідка – виконання моніторингу крижаних полів, переважно у водних акваторіях, з метою визначення віку льоду, напряму та швидкості дрейфу льодових полів, положення та величин розводів тощо.

Ретрансляція радіосигналів систем зв'язку – забезпечення оперативної передачі радіосигналів за лінію радіогоризонту від джерела до споживача в районах із відсутністю дротових, радіорелейних та інших видів зв'язку.

Таким чином, питання створення та ефективного використання БпЛА на сьогодні стоять надзвичайно гостро та актуально. Це пояснюється не тільки зростаючою кількістю об'єктів моніторингу, але й тією обставиною, що наявні способи моніторингу не влаштовують споживачів за тими чи іншими показниками.

БпЛА – складова частина безпілотного авіаційного комплексу (БАК). Критерій ефективності БАК – це показник, за числовою величиною якого виконується оцінка та порівняння результативності (ефективності) БАК при виконанні ним поставленого завдання [15]. Для оцінки ефективності БАК найчастіше використовуються вартісні критерії [16]. Вартісні критерії характеризують витрати на виконання завдання [17].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Аналіз літературних джерел виявив, що проблема побудови частинних критеріїв ефективності БпЛА залежно від об'єктивних та випадкових чинників мало досліджена. Також не досліджено питання побудови частинних критеріїв, що дозволяють не лише оцінити ефективність використання БпЛА, а ще і спланувати поставлене завдання із заданим рівнем ймовірності.

Метою дослідження є побудова частинних критеріїв ефективності БпЛА цивільного призначення при виконанні завдання пошуку та виявлення нерухомих об'єктів. Ці критерії повинні не тільки дозволити оцінювати ефективність виконання завдання БпЛА, а ще і планувати завдання пошуку одиничного або групового об'єкта із заданим рівнем ймовірності.

Виклад основного матеріалу. Вибір критерію ефективності є важливим етапом при вирішенні будь-якого завдання, пов'язаного з функціонуванням БАК [4; 5; 9; 16; 18]. Для того, щоб правильно вибрати критерії, необхідно керуватися основними вимогами, що пред'являються до них. Тільки при дотриманні цих вимог критерій буде обраний правильно, оцінка ефективності буде об'єктивною і стане надійною основою рішення про дії або вибір параметрів складових частин БАК, при їх створенні та модернізації. Основні вимоги до критеріїв ефективності БАК:

– критерії повинні безпосередньо відображати цільову спрямованість вирішувального завдання;

– критерії повинні враховувати основний напрямок завдання, що виконується;

– критерії повинні враховувати основні фактори, від яких залежить виконання завдання;

– критерії мають бути кількісними та можливо простими для обчислення та аналізу;

– бажано, щоб критерій мав фізичний зміст.

Загальний критерій ефективності БАК [19] повинен давати можливість як для оцінки ефективності його функціонування при виконанні ним конкретного завдання, так і для дослідження впливу тактико-технічних характеристик, експлуатаційних властивостей та умов застосування БАК на ефективність його функціонування. Однак це надзвичайно складне завдання. Тому загальний критерій ефективності записується як функція частинних критеріїв, які своєю чергою виражаються через характеристики БАК. Частинні критерії ефективності БАК – це показники ефективності виконання окремих етапів функціонування БАК, які характеризують якість виконання кожного етапу його функціонування [4; 9].

Припустимо, що завдання пошуку полягає у виявленні одного з об'єктів, що знаходиться в районі пошуку площею S (розмір робочої зони). У цьому випадку частинним критерієм ефективності буде ймовірність виявлення об'єкта пошуку $P_{\text{виявл}}$. Оскільки пошук об'єктів є процесом без післядії по випадковій траєкторії, то час пошуку підпорядковується показниковому закону розподілу, щільність якого має вигляд [7]:

$$\rho(t) = \gamma e^{-\gamma t},$$

де γ – щільність виявлення об'єкта пошуку, тобто середнє очікуване число виявлень в одиницю часу, що приблизно визначається як

$$\gamma = \frac{S_1}{S} = \frac{BV_{\text{БПЛА}}}{S} = \frac{2R V_{\text{БПЛА}}}{S} = \frac{2 H \text{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right) V_{\text{БПЛА}}}{S},$$

де S_1 – розмір полоси перегляду;

B – ширина області огляду оптичної системи, $B = 2R$;

$V_{\text{БПЛА}}$ – швидкість польоту БПЛА;

H – висота польоту;

θ – кут поля зору оптичної системи БПЛА.

Тоді середня кількість виявлених об’єктів пошуку за одиницю часу становить

$$\gamma_{\text{зН}} = \gamma P_{\text{В}},$$

де $P_{\text{В}}$ – ймовірність миттєвого виділення незамаскованого об’єкта.

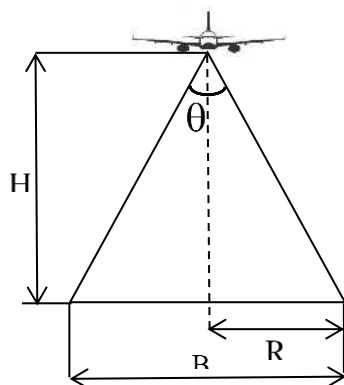


Рис. 1. Ширина області огляду оптичної системи БпЛА

На рис. 1 зображено залежність ширини області огляду оптичної системи БПЛА від висоти польоту та кута поля зору оптичної системи БПЛА. Коефіцієнт γ залежить від характеристик об’єкта спостережень [4]. Такою узагальненою характеристикою є середній час $T_{\text{сер}}$, яке витрачається на пошук та упізнання об’єкта у заданому районі. Його можна знайти як математичне сподівання випадкової величини, розподіленої за показниковим законом:

$$T_{\text{сер}} = \int_0^{\infty} t \rho(t) dt = \gamma_{\text{зН}} \int_0^{\infty} t_{\text{зН}} e^{-\gamma_{\text{зН}} t_{\text{зН}}} dt_{\text{зН}} = \frac{1}{\gamma_{\text{зН}}} = \frac{1}{\gamma P_{\text{В}}},$$

де $t_{\text{зН}}$ – час знаходження БПЛА в робочій зоні.

Ймовірність виявлення об’єкта $P_{\text{виявл}}(t)$ у заданому районі S за час пошуку $t_{\text{зН}}$ (частинний критерій ефективності) може бути визначений за формулою [7]:

$$P_{\text{виявл}} = \int_0^{t_{\text{зН}}} \rho(t) dt = \int_0^{t_{\text{зН}}} \gamma_{\text{зН}} e^{-\gamma_{\text{зН}} t_{\text{зН}}} dt_{\text{зН}} = 1 - e^{-\gamma_{\text{зН}} t_{\text{зН}}} \text{ або}$$

$$P_{\text{виявл}} = 1 - e^{-t_{\text{зН}}/T_{\text{сер}}} = 1 - e^{-\gamma P_{\text{В}} t_{\text{зН}}}.$$

Як показано у [18] на час знаходження БПЛА у робочій зоні та відстань до дальньої межі робочої зони накладаються обмеження:

$$t_{\text{зН}} = t_{\text{max}} - 2t_{\text{від}}, \quad t_{\text{від}} = D_{\text{від}}/V_{\text{БПЛА}}, \quad D_{\text{мвід}} \leq D_{\text{упр}},$$

де t_{max} – максимальний час знаходження БПЛА в польоті; $t_{\text{від}}$ – час польоту БПЛА від точки зльоту до ближньої межі робочої зони; $D_{\text{від}}$ – відстань від точки зльоту БПЛА до ближньої межі робочої зони; $D_{\text{мвід}}$ – відстань до дальньої межі робочої зони; $D_{\text{упр}}$ – максимальна дальність, на якій забезпечується управління БПЛА з наземного пункту управління.

На практиці можуть бути поставлені такі завдання пошуку групового об’єкта, розташованого на певній площі або у просторі:

1. Знайти частинний критерій виявлення m об’єктів із загальної кількості n , за умови, що імовірність виявлення об’єктів різна.

Застосовуючи теореми теорії ймовірностей [7] напишемо твірну функцію $\varphi_n(z)$ ймовірностей $P_{m,n}$:

$$\varphi_n(t) = (q_1 + p_1 t)(q_2 + p_2 t) \dots (q_n + p_n t) = \prod_{i=1}^n (q_i + p_i t),$$

де t – довільний параметр;

q – ймовірність протилежної події, тобто $q = 1 - p$.

Тоді ймовірність, що з n об'єктів буде виявлено m , дорівнює коефіцієнту при t^m у виразі для твірної функції, тобто

$$\prod_{i=1}^n (q_i + p_i t) = \sum_{m=0}^n P_{m,n} t^m.$$

Якщо $p_1 = p_2 = \dots = p_n = p$ и $q_1 = q_2 = \dots = q_n = q$, тобто за умови, що ймовірності виявлення об'єктів однакові, твірна функція звертається в n -й ступінь бінома, таким чином отримуємо частинний критерій:

$$P_{m,n} = (q + pt)^n = \sum_{m=0}^n C_n^m p^m q^{n-m} t^m,$$

де C_n^m – комбінація з n по m елементів. На рис. 2 наведено алгоритм знаходження частинного критерію $P_{m,n}$ за умов різної ймовірності виявлення об'єктів при груповому пошуку.

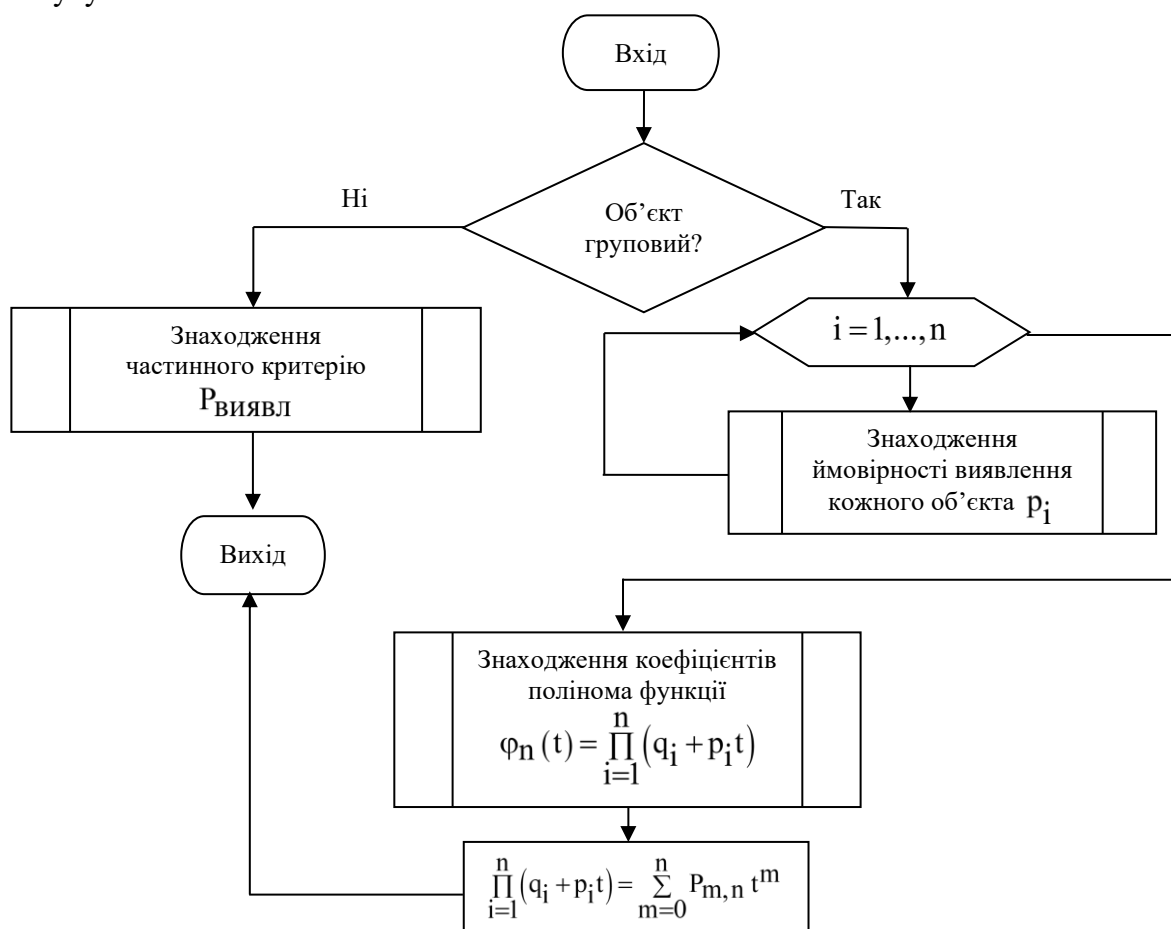


Рис. 2. Блок-схема алгоритму знаходження частинного критерію

2. Частинний критерій P_M знаходження не менш ніж M об'єктів можна обчислити за формулою:

$$P_M = \sum_{m=M}^n P_m.$$

3. Частинний критерій $P_{\text{виявл}}^1$ виявлення не менш ніж одного об'єкта розраховують за формулою:

$$P_{\text{виявл}}^1 = 1 - (1 - P_{\text{виявл}})^n = 1 - (\bar{P}_{\text{виявл}})^n,$$

де $\bar{P}_{\text{виявл}}$ – ймовірність протилежної події, тобто не знайти жодного об'єкта.

4. За відомою (заданою) ймовірністю виявлення об'єкта $P_{\text{виявл}}$ знайти необхідний час знаходження $t_{\text{зн}}$:

$$P_{\text{виявл}} = 1 - e^{-t_{\text{зн}}/T_{\text{сер}}} \Rightarrow t_{\text{зн}} = -T_{\text{сер}} \ln(\bar{P}_{\text{виявл}}).$$

5. За відомою (заданою) ймовірністю виявлення об'єкта $P_{\text{виявл}}$ знайти площу S , переглянуту спостерігачем протягом заданого часу $t_{\text{зн}}$:

$$S = \frac{S_1}{\gamma} = \frac{BV_{\text{БПЛА}}}{\gamma} = \frac{BV_{\text{БПЛА}} P_V}{\gamma_{\text{зн}}},$$

оскільки $P_{\text{виявл}} = 1 - e^{-\gamma_{\text{зн}} t_{\text{зн}}} \Rightarrow \gamma_{\text{зн}} = -\frac{\ln(\bar{P}_{\text{виявл}})}{t_{\text{зн}}}$, остаточно маємо

$$S = -\frac{BV_{\text{БПЛА}} P_V t_{\text{зн}}}{\ln(\bar{P}_{\text{виявл}})}.$$

Висновки. Проаналізовано коло цивільних завдань, для яких можна використовувати БПЛА. Сформульовано основні вимоги до критеріїв ефективності БАК. Отримано ймовірнісні частинні критерії ефективності БПЛА цивільного призначення при виконанні завдання пошуку та виявлення нерухомих об'єктів при поодинокому та груповому пошуку. Побудовано алгоритм знаходження частинного критерію виявлення об'єктів при груповому пошуку, за умови різної ймовірності виявлення об'єктів. Подальші дослідження доцільно спрямувати в напрямку створення математичного та алгоритмічного апарату визначення частинних критеріїв ефективності пошуку рухомих об'єктів.

Список використаних джерел

1. Павлушенко М. И. Беспилотные летательные аппараты: История, применение, угроза пространства и перспективы развития / М. И. Павлушенко, Г. М. Евстафьев, И. К. Макаренко // Научные записки ПИР-центра. – 2004. – № 2(26). – 612 с.
2. Концепции развития современной авиационной техники основных назначений : инновац. учеб. для неавиационных специальностей аэрокосм. ун-та / В. А. Богуслаев, А. И. Рыженко, Е. А. Мураховская, Р. Ю. Цуканов. – Запорожье : Просвіта, 2020. – 707 с.
3. Долгих В. С. Основні положення концепції створення безпілотної авіаційної транспортної системи / В. С. Долгих // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології : зб. наук. праць. – 2021. – Вип. 94. – С. 40-49. – DOI: 10.32620/oikit.2021.94.04.
4. Боевые авиационные комплексы и их эффективность: учебник для слушателей и курсантов инженерных ВУЗов ВВС / И. В. Арбузов, О. В. Болховитинов, О. В. Волочаев [и др.]. – М. : Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. – 224 с.
5. Кузнецов И. Е. Методика учета влияния метеофакторов на эффективность применения беспилотных летательных аппаратов на основе системного анализа / И. Е. Кузнецов, О. В. Страшко, А. В. Мельников, Е. А. Рогозин // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2018. – Т. 45, № 2. – С. 134-149. – DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-2-125-139.

6. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М. : Высш. шк., 1998. – 576 с.
7. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология / Е. С. Вентцель. – 2-е изд., стер. – М. : Наука. 1988. – 208 с.
8. Коцюруба А. В. Рекомендації щодо оцінювання розвідувальних можливостей безпілотних літальних апаратів / А. В. Коцюруба, І. Ю. Салій // Повітряна міць держави. – 2021. – № 1 (1). – С. 47-50.
9. Вероятностная модель поиска и обнаружения наземных объектов с использованием беспилотных летательных аппаратов в условиях нерегулярных воздействий внешней среды / И. Е. Кузнецов, А. А. Кузнецов, И. О. Бакланов, О. В. Страшко // VI Международная конференция и молодёжная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2020). – Самара, 2020. – С. 152-156.
10. Ростопчин В. В. “Напасть XXI века”: стороны одной “медали” / В. В. Ростопчин // Авиапанорама. – 2019. – № 1. – С. 28-51.
11. Беспилотная авиация: терминология, классификация, современное состояние / В. С. Фетисов, Л. М. Неугодникова, В. В. Адамовский, Р. А. Красноперов ; под ред. В. С. Фетисова. – Уфа: ФОТОН, 2014. – 217 с.
12. Сметанін К. В. Особливості використання безпілотних літальних апаратів в екологічному моніторингу / К. В. Сметанін // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2018. – № 3. – С. 22-25. – doi: 10.26906/SUNZ.2018.3.022.
13. Кобрин В. Н. Беспилотные авиационные комплексы для решения экологических задач / В. Н. Кобрин, Н. В. Нечипорук, Н. В. Кобрин // Екологічна безпека. – 2014. – № 2. – С. 43-50.
14. Харченко В. П. Аналіз застосування безпілотних авіаційних систем у цивільній сфері / В. П. Харченко, Д. Е. Прусов // Вісник Національного авіаційного університету. – 2012. – № 4. – С. 118-130.
15. Ростопчин В. В. Беспилотные авиационные системы: основные понятия / В. В. Ростопчин, И. Е. Бурдун // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2009. – № 4. – С. 82-88.
16. Тенденції розвитку ударної безпілотної авіації імовірного противника. критерій оцінювання ефективності бойового застосування сучасних ударних безпілотних ударних літальних апаратів / А. Г. Салій, С. М. Коротін, Б. А. Білявський // Повітряна міць держави. – 2021. – № 1(1). – С. 62-67.
17. Мураховська О. А. Алгоритм визначення оцінки ефективності літальних апаратів транспортної категорії / О. А. Мураховська, Н. А. Українець // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2022. – № 4 (70). – С. 10-15. – doi: 10.26906/SUNZ.2022.4.010.
18. Корочкін О. А. Оцінка ефективності виконання бойових задач бойовим авіаційним комплексом / О. А. Корочкін, Д. В. Дяченко, Ю. А. Олійник // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2009. – № 1(1). – С. 35-39.
19. Боевые авиационные комплексы и их эффективность / О. В. Болховитинов [и др.] ; под ред. О. В. Болховитинова. – М. : ВВИА им. Н.Е. Жуковского. 1990. – 99 с.

References

1. Pavlushenko, M.I., Evstafev, G.M., & Makarenko, I.K. (2004). *Bespilotnye letatelnye apparaty: Istoriia, primeneniie, ugroza rasprostraneniia i perspektivy razvitiia* [Unmanned aerial vehicles: History, application, proliferation threat and development prospects]. *Nauchnye zapiski PIR-tcentra – Scientific notes of the PIR Center*, (2(26)).
2. Boguslaev V.A., Ryzhenko A.I., Murahovska E.A., & Tsukanov R.Iu. (2020). *Kontseptsii razvitiia sovremennoi aviatcionnoi tekhniki osnovnykh naznachenii* [Concepts for the development of modern aviation technology for the main purposes]. Prosvita.
3. Dolhykh, V.S. (2021). *Osnovni polozhennia kontseptsii stvorennia bezpilotnoi aviatsiinoi transportnoi systemy* [Basic provisions of the concept of creating an unmanned aviation transport system]. *Vidkryti informatsiini ta kompiuterni intehrovani tekhnolohii – Open information and computer integrated technologies*, 94, 40-49. doi: 10.32620/oikit.2021.94.04.
4. Arbuzov, I.V., Bolkhovitinov, O.V., & Volochaev, O.V. (2008). *Boevye aviatsionnye kompleksy i ikh effektivnost: uchebnik dlia slushatelei i kur-santov inzhenernykh VUZov VVS* [Combat aviation systems and their effectiveness: a textbook for students and cadets of engineering universities of the Air Force]. Izd. VVIA im. prof. N. E. Zhukovskogo.

5. Kuznetsov, I.E., Melnikov, A.V., & Rogozin, E.A. (2018). Metodika ucheta vliianiia meteofaktorov na effektivnost primeneniia bespilotnykh letatelnykh apparatov na osnove sistemnogo analiza [Methodology for taking into account the influence of meteorological factors on the effectiveness of the use of unmanned aerial vehicles based on system analysis]. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – Bulletin Dagestan State Technical University. Technical science*, 45(2), 134-149. doi: 10.21822/2073-6185-2018-45-2-125-139.
6. Venttsel, E.S. (1998). *Teoriia veroiatnostei [Probability Theory]*. Vyssh. shk.
7. Venttsel, E.S. (1988). *Issledovanie operatsii: zadachi, printsipy, metodologiya [Operations Research: Objectives, Principles, Methodology]*. 2nd ed. Nauka.
8. Kotsiuruba, A.V., & Saliy, I.Yu. (2021). Rekomendatsii shchodo otsiniuvannia rozviduvalnykh mozhlyvosti bezpilo-tnykh litalnykh aparativ [Recommendations for evaluating the intelligence capabilities of unmanned aerial vehicles]. *Povitriana mits derzhavy – Air power of the state*, (1(1)), 47-50.
9. Kuznetsov, I.E., Kuznetsov, A.A., Baklanov, I.O., & Strashko, O.V. (2020). Veroiatnostnaia model poiska i obnaruzheniia nazemnykh obektov s ispolzovaniem bespilotnykh letatelnykh apparatov v usloviakh nereguliarnykh vozdeistvii vneshnei sredy [Probabilistic model of search and detection of ground objects using unmanned aerial vehicles in conditions of irregular environmental influences]. *VI Mezhdunarodnaia konferentsiia i molodezhnaia shkola «Informatsionnye tekhnologii i nanotekhnologii» (ITNT-2020) – VI International Conference and youth school "Information technologies and nanotechnologies" (ITNT-2020)* (pp. 152-156).
10. Rostopchin, V.V. (2019). “Napast XXI veka”: storony odnoi “medali” [“The misfortune of the XXI century”: sides of the same “medal”]. *Aviapanorama*, (1), 28-51.
11. Fetisov, V.S. (Ed.), Neugodnikova, L.M., Adamovskii, V.V., & Krasnoperov, R.A. (2014). *Bespilotnaia aviatsiia: terminologiya, klassifikatsiia, sovremennoe sostoianie [Unmanned aircraft: terminology, classification, current state]*. FOTON.
12. Smetanin, K.V. (2018). Osoblyvosti vykorystannia bespilotnykh litalnykh aparativ v ekolohichnomu monitorynhi [Peculiarities of the use of unmanned aerial vehicles in environmental monitoring]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku – Management, navigation and communication systems*, (3), 22-25. doi: 10.26906/SUNZ.2018.3.022.
13. Kobrin, V.N., Nechiporuk, N.V., & Kobrina, N.V. (2014). Bespilotnye aviatcionnye kompleksy dlia resheniia ekologicheskikh zadach [Unmanned aerial systems for solving environmental problems]. *Ekologichna bezpeka – Ecological safety*, (2), 43-50.
14. Kharchenko, V.P., & Prusov, D.E. (2012). Analiz zastosuvannia bespilotnykh aviatsiinykh system u tsyvilnii sferi [Analysis of the application of unmanned aircraft systems in the civil sphere]. *Visnyk Natsionalnoho aviatsiinoho universytetu – Bulletin of the National Aviation University*, (4), 118-130.
15. Rostopchin, V.V., & Burdun, I.E. (2009). Bespilotnye aviatcionnye sistemy: osnovnye poniatii [Unmanned Aircraft Systems: Basic Concepts]. *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes – Electronics: Science, Technology, Business*, (4), 82-88.
16. Saliy, A.H., Korotin, S.M., & Biliavskiy, B.A. (2021). Tendentsii rozvytku udarnoi bespilotnoi aviatsii imovirnoho protyvnyka. kryterii otsiniuvannia efektyvnosti boiovoho zastosuvannia suchasnykh udarnykh bespilotnykh udarnykh litalnykh aparativ [Trends in the development of unmanned attack aircraft of the alleged enemy. criterion for evaluating the effectiveness of combat use of modern shock unmanned shock aircraft]. *Povitriana mits derzhavy – Air power of the state*, (1(1)), 62-67.
17. Murakhovska, O.A. (2022). Alhorytm vyznachennia otsinky efektyvnosti litalnykh aparativ transportnoi katehorii [Algorithm for determining the efficiency of transport category aircraft]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku – Management, navigation and communication systems*, (4(70)), 10-15. doi: 10.26906/SUNZ.2022.4.010.
18. Korochkin, O.A., Diachenko, D.V., & Oliinyk, Yu.A. (2009). Otsinka efektyvnosti vykonannia boiovykh zadach boiovykh aviatsiinykh kompleksom [Assessment of the effectiveness of combat missions by the combat aviation complex]. *Nauka i tekhnika Povitria-nykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy – Science and technology of the Air Forces of the Armed Forces of Ukraine*, (1(1)), 35-39.
19. Bolkhovitinov, O.V. (Ed.). (1990). *Boevye aviatcionnye kompleksy i ikh effektivnost [Combat aviation systems and their effectiveness]*. VVIA im. N.E. Zhukovskogo.

Отримано 22.11.2022

Olena Murahovska

Senior Lecturer, Department of Higher Mathematics and System Analysis

National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute» (Kharkiv, Ukraine)

E-mail: o.murahovska@khai.edu. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6170-5173>

ResearcherID: [HIA-0690-2022](https://orcid.org/0000-0002-6170-5173). SCOPUS Author ID: [57223964871](https://orcid.org/0000-0002-6170-5173)

FEATURES OF DETECTION EFFICIENCY ASSESSMENT OF GROUND OBJECTS BY UNMANNED FLIGHT APPARATUS BY CIVIL PURPOSE

The task of constructing partial criteria for the effectiveness of an unmanned aerial vehicle for civilian purposes when performing the tasks of single or group search for unmasked stationary objects by the method of random search with a constant intensity of observation is set and solved. The relevance of the research is related to the analysis of the most appropriate search methods, which ensure the detection of the object in the shortest time and with the least consumption of resources. The purpose of the article is to construct partial criteria for the effectiveness of civil unmanned aerial vehicles when performing the task of searching for and detecting stationary unmasked objects. These criteria should not only allow to evaluate the effectiveness of the task by an unmanned aerial vehicle, but also to plan the task of searching for a single or group object with a given level of probability, to estimate the time spent, the area viewed by the observer during the given time, etc. The range of civil tasks for which unmanned aerial vehicles can be used has been analyzed. The main requirements for the efficiency criteria of unmanned aircraft complexes have been studied and formulated. An analysis of publications was conducted and the shortcomings of existing approaches to the formation of criteria for the effectiveness of unmanned aerial vehicles were revealed. Taking into account that the search for objects is a process without an aftereffect along a random trajectory, a probabilistic model of constructing partial of efficiency criteria is proposed. It will make it possible to estimate the probability of detecting a single object in a given period of time, as well as the average time required for the search until the object is detected, taking into account the technical characteristics of the unmanned aerial vehicle and the optical system, as well as limitations on the time of finding an unmanned aerial vehicle in working area and the distance to the far boundary of the working area. A probabilistic model was proposed and an algorithm was built for finding a partial criterion for detecting the frequency of stationary and unmasked objects from the total number during a group search, under the condition of different object detection probabilities. The scientific novelty of the research is related to the development of a method that allows not only to evaluate the effectiveness of a task performed by an unmanned aerial vehicle, but also to plan the task of searching for a single or group object with a given level of probability.

Keywords: *unmanned aircraft system; performance criterion; probabilistic model; object search; single object; group object.*

Fig.: 2. **References:** 19.

Артем Волокита¹, Богдан Гереза²¹кандидат технічних наук, доцент, кафедра обчислювальної техніки

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: artem.volokita@kpi.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9069-5544>²студент 6-го курсу факультету ІОТ

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: bogdangerega19@gmail.com**ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ
ДЛЯ СИСТЕМ ПРОГНОЗУВАННЯ СЕРЦЕВО-СУДИННИХ ЗАХВОРЮВАНЬ**

Серцево-судинні захворювання щорічно вбивають близько 20,5 мільйонів людей. Раннє виявлення захворювання може допомогти людям змінити свій спосіб життя та забезпечити належне медичне лікування. У роботі представлені різні атрибути, пов'язані з хворобами серця, та модель на основі таких алгоритмів навчання: Logistic Regression, K-nearest neighbors, Support Vector Machine, Decision Tree Classifier, Random Forest Classifier та XGBoost Classifier. Модель використовує набір даних із Клівлендської бази даних UCI для пацієнтів із серцевими захворюваннями. Набір даних містить 303 екземпляри та 76 атрибутів. З цих 76 атрибутів лише 14 атрибутів розглядаються для тестування, що важливо для обґрунтування продуктивності різних алгоритмів. Результати показують, що найвищий бал точності досягається з алгоритмом Support Vector Machine. Ця дослідницька робота має на меті продемонструвати ймовірність розвитку серцевих захворювань у пацієнтів використовуючи різні алгоритми машинного навчання.

Ключові слова: машинне навчання; серцево-судинні захворювання; модель прогнозування; алгоритм; класифікація; регресія; набір даних; атрибут.

Рис.: 8. Табл.: 1. Бібл.: 14.

Актуальність теми дослідження. Протягом останнього десятиліття серцево-судинні захворювання залишаються основною причиною смерті в усьому світі. За оцінками Всесвітньої організації охорони здоров'я, щороку в усьому світі від серцево-судинних захворювань помирає понад 17,9 мільйона, і з них 80 % – через ішемічну хворобу серця та церебральний інсульт [1]. Ефективна, точна та рання медична діагностика захворювань серця відіграє вирішальну роль у проведенні профілактичних заходів для запобігання смерті.

Постановка проблеми. Методи, які в цей час використовуються для прогнозування та діагностики захворювань серця, в першу чергу засновані на аналізі історії хвороби пацієнта, симптомів та звітів про фізичний огляд, які лікарі проводять. У більшості випадків медичним експертам важко точно передбачити захворювання серця у пацієнта, оскільки вони можуть передбачити з точністю до 67 %, оскільки наразі діагностика будь-якого захворювання проводиться за схожими симптомами від раніше діагностованих пацієнтів [2]. Отже, медична сфера потребує автоматизованої інтелектуальної системи для точного прогнозування захворювань серця. Цього можна досягти, використовуючи величезну кількість даних про пацієнтів, які доступні в медичній галузі, а також алгоритми машинного навчання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У ході дослідження було здійснено аналіз чотирьох статей, у яких розглядаються найсучасніші методи діагностики захворювань серця з використанням методів машинного навчання, які були здійснені в результаті різноманітних дослідницьких робіт. Розглянемо кожну з них:

1. R. Perumal та Kaladevi AC [3] розробили модель прогнозування серцево-судинних захворювань, використовуючи набір даних Клівленда з 303 екземплярів даних за допомогою стандартизації та зменшення ознак за допомогою PCA (principal component analysis), де вони визначили та використали сім основних компонентів для навчання класифікаторів ML. Вони дійшли висновку, що LR (Logistic regression) і SVM (Support-vector machine) забезпечили майже подібні значення точності (87 і 85 % відповідно) порівняно з k-NN (K-Nearest Neighbor) – 69 %.

2. Christalin Latha і Carolin Jeeva [4] провели порівняльний аналіз для підвищення точності прогнозування ризику серцево-судинних захворювань з використанням ансамблевих методів (ensemble methods) на наборі даних Клівленда з 303 спостережень. Вони застосували метод грубої сили (brute-force) для отримання всіх можливих комбінацій наборів атрибутів і навчили класифікатори. Вони досягли максимального збільшення точності класифікатора на основі алгоритму ансамблю та отримали точність 85,48%, використовуючи такі класифікатори NB (Naive Bayes), BN (Bayesian Network), RF (Random forest) та MLP (Multilayer perceptron) та використовуючи набір із дев'яти атрибутів.

3. Ananey-Obiri, Daniel і Sarku, Enoch [5] розробили три моделі класифікації, а саме, LR (Logistic regression), DT (Decision Tree) і GNB (Gaussian Naive Bayes), для прогнозування серцевих захворювань на основі набору даних Клівленда. Зменшення ознак було виконано за допомогою декомпозиції одного значення, яка зменшила ознаки з 13 до 4. Вони дійшли висновку, що як LR, так і GNB мали кращі прогнозні показники 82,75 %, а для DT трохи менше за 79,31 %.

4. Kumar, Sindhu та ін. [6] навчили п'ять класифікаторів машинного навчання, а саме, LR, SVM, DT, RF і KNN, використовуючи набір даних UCI з 303 записами та 10 атрибутами для прогнозування серцево-судинних захворювань. Класифікатор RF досяг найвищої точності 85,71 % порівняно з іншими класифікаторами (DT – 74,28 %, LR – 74,28 %, SVM – 77,14 %, K-NN – 68,57 %).

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Провівши аналіз останніх досліджень було визначено найефективніші алгоритми машинного навчання - Logistic Regression, K-nearest neighbors, Support Vector Machine, Decision Tree Classifier, Random Forest Classifier та XGBoost Classifier. Також аналіз показав, що варіювання кількості атрибутів при прогнозуванні залишається недослідженою областю.

Метою статті є дослідження різних методів аналізу даних, корисних для ефективного прогнозування серцевих захворювань та розробка ефективного та точного підходу прогнозування з оптимальною кількістю атрибутів.

Виклад основного матеріалу. Важливим початковим етапом будь-якого прогнозування є створення або знаходження набору даних та подальша його обробка. Набір даних який використовувався у дослідженні - це дані зібрані у Клівленді про хворобу серця у форматі .csv із репозиторію машинного навчання UCI [7]. Потім вони були імпортовані у програмний інструмент, досліджувались атрибути, типи, діапазони значень та інша статистична інформація. Наступним кроком була попередня обробка даних, яка включала такі завдання, як пошук відсутніх значень у наборі даних та заміна відсутніх значень або константою користувача, або середнім значенням залежно від типу атрибута, щоб переконатися, що класифікатори машинного навчання забезпечують кращу продуктивність.

Набір даних Cleveland складається з 303 екземплярів із 76 атрибутами, але лише 14 атрибутів розглядаються для експериментальних цілей дослідження. Описи атрибутів для набору даних Cleveland наведено в таблиці.

Таблиця

Опис атрибутів для набору даних Cleveland із репозиторію MH UCI

Атрибут	Опис	Тип атрибута	Діапазон значень атрибута
1	2	3	4
age	Вік у роках	Numeric	29 - 77
sex	Стать	Nominal	0 - жінка, 1 - чоловік
cp	Тип болю в грудях	Nominal	0 - типова стенокардія, 1 - нетипова стенокардія, 2 - біль без стенокардії, 3 - без симптомів
trestbps	Артеріальний тиск спокою в мм рт.ст. на момент оформлення у стаціонар	Numeric	94 - 200

Закінчення табл.

1	2	3	4
chol	Сироватковий холестерин в mg/dL	Numeric	125 - 564
fbs	Цукор у крові (натще) > 120 mg/dL	Nominal	0 - false, 1 - true
restecg	Результати електрокардіографії у стані спокою	Nominal	0 - норма, 1 - аномалія ST-T wave, 2 - визначена гіпертрофія лівого шлуночка за критеріями Естеса
thalach	Досягнута максимальна частота серцевих скорочень	Numeric	71 - 202
exang	Вправи викликають стенокардію	Nominal	0 - ні, 1 - так
oldpeak	Депресія ST, спричинена фізичними навантаженнями, порівняно зі спокоєм	Numeric	0 - 6.2
slope	Нахил піку вправи сегмент ST	Nominal	0 - висхідний, 1 - плоский, 2 - низхідний
ca	Кількість магістральних судин, забарвлених за допомогою флюорокопії	Nominal	0-4
thal	Стан серця	Nominal	0 -3
target	Передбачуваний атрибут	Nominal	0 - відсутність ризику серцево-судинних захворювань, 1 - ризик серцево-судинних захворювань

Перед навчанням моделі було розглянуто та проаналізовано дані. Мета тут полягає в тому, щоб дізнатися більше про дані, з якими доводиться працювати. Було проведено аналіз даних, який включає статистику, яка підсумовує центральну тенденцію, дисперсію та форму розподілу набору даних, за винятком NaN значень. Результати наведено нижче (рис. 1).

	age	sex	cp	trestbps	chol	fbs	restecg	thalach	exang	oldpeak	slope	ca	thal	target
count	303.00	303.00	303.00	303.00	303.00	303.00	303.00	303.00	303.00	303.00	303.00	303.00	303.00	303.00
mean	54.37	0.68	0.97	131.62	246.26	0.15	0.53	149.65	0.33	1.04	1.40	0.73	2.31	0.54
std	9.08	0.47	1.03	17.54	51.83	0.36	0.53	22.91	0.47	1.16	0.62	1.02	0.61	0.50
min	29.00	0.00	0.00	94.00	126.00	0.00	0.00	71.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25%	47.50	0.00	0.00	120.00	211.00	0.00	0.00	133.50	0.00	0.00	1.00	0.00	2.00	0.00
50%	55.00	1.00	1.00	130.00	240.00	0.00	1.00	153.00	0.00	0.80	1.00	0.00	2.00	1.00
75%	61.00	1.00	2.00	140.00	274.50	0.00	1.00	166.00	1.00	1.60	2.00	1.00	3.00	1.00
max	77.00	1.00	3.00	200.00	564.00	1.00	2.00	202.00	1.00	6.20	2.00	4.00	3.00	1.00

Рис. 1. Результати аналізу даних

Дослідивши набір даних, можна помітити, що потрібно перетворити деякі категорійні змінні (а саме: age, trestbps, chol, thalach, oldpeak) в фіктивні змінні та масштабувати всі значення перед навчанням моделей машинного навчання.

Дані було поділено на навчальний і тестовий набори, вони відповідно становлять 70 та 30 %.

У роботі застосовано кілька алгоритмів машинного навчання до одного набору даних, щоб визначити найкращий класифікатор для прогнозування захворювань. У цій роботі розглядаються різні класифікатори, які були використані для прогнозування ризику серцевих захворювань. Розглянемо послідовно кожен із них.

Логістична регресія (logistic regression) – статистичний регресійний метод, що застосовують у випадку, коли залежна змінна є бінарною, тобто може набувати тільки двох значень (0 або 1). Логістична регресія, по суті, використовує логістичну функцію для моделювання двійкової вихідної змінної, її вигляд такий:

$$\frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (1)$$

LR не вимагає лінійного відношення між вхідними та вихідними змінними. LR – це рівняння, де кожен предиктор множиться на коефіцієнт і підсумовується. Ця сума стає аргументом для логістичної функції для передбачення класу. Для одного спостереження x з n ознаками відповідь y визначається як:

$$\frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n)}} \quad (2)$$

Математика логістичної регресії спирається на концепцію «шансів» події, яка являє собою ймовірність того, що подія відбудеться, поділену на ймовірність того, що подія не відбудеться. Так само, як і в лінійній регресії, логістична регресія має ваги, пов'язані з розмірами вхідних даних, де зв'язок між ваговими коефіцієнтами та результатом моделі є експоненціальним. Ця модель класифікації, яку дуже легко реалізувати, досягає дуже хорошої продуктивності за допомогою лінійно розділених класів [8].

Алгоритм К-найближчих сусідів (K-NN) є методом контрольованого алгоритму класифікації (supervised classification algorithm). Він класифікує об'єкти залежно від найближчого сусіда. Це тип навчання на основі прикладів (instance-based learning). Розрахунок відстані атрибута від його сусідів вимірюється за допомогою евклідової відстані. Алгоритм використовує групу іменованих точок та використовує їх, щоб позначити іншу точку. Дані групуються на основі подібності між ними, і можна заповнити відсутні значення даних за допомогою K-NN. Після заповнення відсутніх значень до набору даних застосовуються різні методи прогнозування. Можна отримати кращу точність, використовуючи різні комбінації. K-NN простий у виконанні. Цей алгоритм є універсальним і використовується для класифікації, регресії та пошуку [9].

Метод опорних векторів (support-vector machine) – це лінійна модель для задач класифікації та регресії. Він може вирішувати лінійні та нелінійні задачі та добре працювати для багатьох практичних задач. Ідея SVM проста: алгоритм створює лінію або гіперплощину, яка розділяє дані на класи. Відповідно до алгоритму SVM ми знаходимо точки, найближчі до прямої з обох класів. Ці точки називають опорними векторами. Тепер обчислюємо відстань між прямою та опорними векторами. Ця відстань називається маржею. Основна мета – максимізувати маржу. Гіперплощина, для якої запас є максимальним, є оптимальною гіперплощиною. Таким чином, SVM намагається прийняти межу рішення таким чином, щоб поділ між двома класами був якомога ширшим [10].

Дерево рішень (Decision Tree) - це алгоритм класифікації, який працює як з категоріальними, так і з числовими даними. Дерево рішень використовується для створення деревоподібних структур. Дерево рішень просте і широко використовується для обробки медичних даних. Легко реалізувати та проаналізувати дані у вигляді деревоподібного графіка. Модель дерева рішень проводить аналіз на основі трьох вузлів. Кореневий вузол: головний вузол, на основі якого функціонують усі інші вузли. Внутрішній вузол: обробляє різні атрибути. Листковий вузол: представляє результат кожного тесту. Цей алгоритм розбиває дані на два або більше аналогічних набори на основі найважливіших показників. Обчислюється ентропія кожного атрибута, а потім дані поділяються, причому предиктори мають максимальний приріст інформації або мінімальну ентропію. Алгоритм може бути дуже корисним для вирішення проблем, пов'язаних із прийняттям рішень [11].

Алгоритм випадкового лісу (Random forest) — це алгоритм керованого навчання (supervised learning algorithm). У цьому алгоритмі кілька дерев створюють ліс. Кожне окреме дерево у випадковому лісі дає очікування класу, а клас з найбільшою кількістю голосів перетворюється на прогноз моделі. У класифікаторі Random forest більша кількість дерев дає вищу точність, наприклад. Алгоритм використовується як для задач класифікації, так і для завдань регресії. Він працює в чотири кроки:

- 1) Вибираються випадкові вибірки з заданого набору даних.
- 2) Будується дерево рішень для кожної вибірки та отримуємо результат прогнозу з кожного дерева рішень.
- 3) Проводиться голосування за кожен прогнозований результат.
- 4) Вибирається результат прогнозу з найбільшою кількістю голосів як остаточний прогноз.

Random forest вважається дуже точним і надійним методом через кількість дерев рішень, які беруть участь у процесі. Проте алгоритм повільно генерує прогнози, оскільки має кілька дерев рішень [12].

Алгоритм екстремального градієнтного підсилювання (eXtreme Gradient Boosting) - це реалізація Random forest із покращеним градієнтом, розроблена для більшої швидкості та продуктивності, що є домінуючим фактором машинного навчання. XGBoost належить до сімейства алгоритмів підсилювання (boosting algorithms) і використовує в своїй основі структуру підвищення градієнта (GBM). Основна ідея, що лежить в основі алгоритмів підсилювання, полягає в тому, щоб створити відносно слабку модель, зробити висновки про важливість і параметри різних функцій, а потім використати ці висновки для побудови нової, сильнішої моделі та отримати вигоду з помилкової класифікації попередньої моделі та спробувати її зменшити. Слід знати про базові програми XGBoost, які навчаються за замовчуванням: деревні ансамблі (tree ensembles). Модель деревного ансамблю – це набір дерев класифікації та регресії (CART). Древа вирощують одне за одним, і в наступних ітераціях робляться спроби зменшити рівень помилкової класифікації. Кожне дерево дає різну оцінку прогнозу залежно від даних, які воно бачить, і бали кожного окремого дерева підсумовуються, щоб отримати остаточний бал. XGBoost реалізує паралельну обробку і це дозволяє зменшити час отримання рішення. XGBoost є потужним алгоритмом машинного навчання, особливо коли йдеться про швидкість та точність [13].

Для аналізу алгоритмів машинного навчання було використано sklearn, що є безкоштовною програмною бібліотекою машинного навчання для мови програмування Python, яка надає функціональність для створення та тренування різноманітних алгоритмів класифікації, регресії та кластеризації. Бібліотека містить реалізовані класифікатори такі як: LogisticRegression, KNeighborsClassifier, SVC, DecisionTreeClassifier та RandomForestClassifier. А також було використано бібліотеку xgboost для використання класифікатора XGBClassifier.

Основними метриками, на основі яких визначалась ефективність алгоритмів є: accuracy score (оцінка точності класифікації), confusion matrix (матриця невідповідностей) та classification report (текстовий звіт з основними показниками класифікації).

Результати метрик для моделі LR наведені на рисунку 2. Можна помітити, що точності в навчальному та тестовому наборі практично однакові. Матриця невідповідностей показує, що в навчальному наборі до класу 0 (відсутність ризику ССЗ) віднесено 80 екземплярів, а згідно з Classification Report має бути 97 екземплярів, та до класу 1 (ризик ССЗ) - 104 зі 115 екземплярів. У тестовому наборі ситуація наступна: до класу 0 – 34 з 41 екземплярів, до класу 1 – 45 з 50.

Train Result:						Test Result:					
Accuracy Score: 86.79%						Accuracy Score: 86.81%					
CLASSIFICATION REPORT:						CLASSIFICATION REPORT:					
	0	1	accuracy	macro avg	weighted avg		0	1	accuracy	macro avg	weighted avg
precision	0.88	0.86	0.87	0.87	0.87	precision	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
recall	0.82	0.90	0.87	0.86	0.87	recall	0.83	0.90	0.87	0.86	0.87
f1-score	0.85	0.88	0.87	0.87	0.87	f1-score	0.85	0.88	0.87	0.87	0.87
support	97.00	115.00	0.87	212.00	212.00	support	41.00	50.00	0.87	91.00	91.00
Confusion Matrix:						Confusion Matrix:					
[[80 17]						[[34 7]					
[11 104]]						[5 45]]					

Рис. 2. Результати метрик для моделі LR

Результати для моделі K-NN наведені на рисунку 3. Наочно видно, що значення точності на навчальному наборі та тестовому наборі майже ідентичні. Матриця невідповідностей показує, що 82 екземпляри в навчальному наборі були віднесені до класу 0, тоді як згідно зі звітом про класифікацію має бути 97 випадків, а 102 із 115 випадків були віднесені до класу 1. У тестовому наборі ми отримали, що до класу 0 віднесено 35 з 41 екземплярів, до класу 1 – 44 з 50 екземплярів.

Train Result:						Test Result:					
Accuracy Score: 86.79%						Accuracy Score: 86.81%					
CLASSIFICATION REPORT:						CLASSIFICATION REPORT:					
	0	1	accuracy	macro avg	weighted avg		0	1	accuracy	macro avg	weighted avg
precision	0.86	0.87	0.87	0.87	0.87	precision	0.85	0.88	0.87	0.87	0.87
recall	0.85	0.89	0.87	0.87	0.87	recall	0.85	0.88	0.87	0.87	0.87
f1-score	0.85	0.88	0.87	0.87	0.87	f1-score	0.85	0.88	0.87	0.87	0.87
support	97.00	115.00	0.87	212.00	212.00	support	41.00	50.00	0.87	91.00	91.00
Confusion Matrix:						Confusion Matrix:					
[[82 15]						[[35 6]					
[13 102]]						[6 44]]					

Рис. 3. Результати метрик для моделі K-NN

Результати для моделі SVC наведені на рисунку 4. Точності в навчальному та тестовому наборах є вищими, ніж у моделях LR та K-NN. Згідно з матрицею невідповідності у навчальному наборі до класу 0 віднесено 89 з 97 екземплярів, та до класу 1 – 109 зі 115 екземплярів. У тестовому наборі ситуація така: до класу 0 – 36 з 41 екземплярів, до класу 1 – 44 з 50.

Train Result:						Test Result:					
Accuracy Score: 93.40%						Accuracy Score: 87.91%					
CLASSIFICATION REPORT:						CLASSIFICATION REPORT:					
	0	1	accuracy	macro avg	weighted avg		0	1	accuracy	macro avg	weighted avg
precision	0.94	0.93	0.93	0.93	0.93	precision	0.86	0.90	0.88	0.88	0.88
recall	0.92	0.95	0.93	0.93	0.93	recall	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88
f1-score	0.93	0.94	0.93	0.93	0.93	f1-score	0.87	0.89	0.88	0.88	0.88
support	97.00	115.00	0.93	212.00	212.00	support	41.00	50.00	0.88	91.00	91.00
Confusion Matrix:						Confusion Matrix:					
[[89 8]						[[36 5]					
[6 109]]						[6 44]]					

Рис. 4. Результати метрик для моделі SVC

Результати для моделі DT наведені на рисунку 5. Точність у навчальному наборі становить 100 %, що є найвищим показником. У тестовому наборі точність дорівнює 78,02 %, що є меншим значенням, ніж у попередніх моделях. Матриця невідповідностей показує, що всі екземпляри вірно класифіковано у навчальному наборі, а у тестовому ситуація така: до класу 0 віднесено 34 з 41 екземплярів, до класу 1 – 37 з 50.

Train Result:						Test Result:					
Accuracy Score: 100.00%						Accuracy Score: 78.02%					
CLASSIFICATION REPORT:						CLASSIFICATION REPORT:					
	0	1	accuracy	macro avg	weighted avg		0	1	accuracy	macro avg	weighted avg
precision	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	precision	0.72	0.84	0.78	0.78	0.79
recall	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	recall	0.83	0.74	0.78	0.78	0.78
f1-score	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	f1-score	0.77	0.79	0.78	0.78	0.78
support	97.00	115.00	1.00	212.00	212.00	support	41.00	50.00	0.78	91.00	91.00
Confusion Matrix:						Confusion Matrix:					
[[97 0]						[[34 7]					
[0 115]]						[13 37]]					

Рис. 5. Результати метрик для моделі DT

Результати для моделі RF наведені на рисунку 6. Точність у навчальному наборі складає максимум - 100%, а у тестовому наборі 82.42%, що є меншим значенням ніж у LR та K-NN, проте більшим, ніж у DT. Згідно матриці невідповідності всі екземпляри навчального набору вірно класифіковано. Натомість у тестовому наборі до класу 0 віднесено 33 з 41 екземплярів, до класу 1 – 42 з 50.

Train Result:						Test Result:					
Accuracy Score: 100.00%						Accuracy Score: 82.42%					
CLASSIFICATION REPORT:						CLASSIFICATION REPORT:					
	0	1	accuracy	macro avg	weighted avg		0	1	accuracy	macro avg	weighted avg
precision	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	precision	0.80	0.84	0.82	0.82	0.82
recall	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	recall	0.80	0.84	0.82	0.82	0.82
f1-score	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	f1-score	0.80	0.84	0.82	0.82	0.82
support	97.00	115.00	1.00	212.00	212.00	support	41.00	50.00	0.82	91.00	91.00
Confusion Matrix:						Confusion Matrix:					
[[97 0]						[[33 8]					
[0 115]]						[8 42]]					

Рис. 6. Результати метрик для моделі RF

Результати для моделі XGB наведені на рисунку 7. На навчальному наборі ми отримали точність 98.58%, а на тестовому - 83.52%, що є меншим значенням, ніж у LR та K-NN, проте більшим, ніж у DT та RF. При визначенні класу ризику CC3 95 з 97 екземплярів вірно класифіковано згідно матриці невідповідностей та до класу ризик CC3 - 114 зі 115 екземплярів. У тестовому наборі ситуація наступна: до класу 0 – 34 з 41 екземплярів, до класу 1 – 42 з 50.

Train Result:						Test Result:					
Accuracy Score: 98.58%						Accuracy Score: 83.52%					
CLASSIFICATION REPORT:						CLASSIFICATION REPORT:					
	0	1	accuracy	macro avg	weighted avg		0	1	accuracy	macro avg	weighted avg
precision	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99	precision	0.81	0.86	0.84	0.83	0.84
recall	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	recall	0.83	0.84	0.84	0.83	0.84
f1-score	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	f1-score	0.82	0.85	0.84	0.83	0.84
support	97.00	115.00	0.99	212.00	212.00	support	41.00	50.00	0.84	91.00	91.00
Confusion Matrix:						Confusion Matrix:					
[[95 2]						[[34 7]					
[1 114]]						[8 42]]					

Рис. 7. Результати метрик для моделі XGB

Результати точності для всіх моделей наведені на рис. 8. З досліджень наглядно видно, що найкращу точність на тестовому наборі має модель Support Vector Machine – 87,91 %, а найнижчу Decision Tree Classifier – 78,02 %.

	Model	Training Accuracy %	Testing Accuracy %
0	Logistic Regression	86.79	86.81
1	K-nearest neighbors	86.79	86.81
2	Support Vector Machine	93.40	87.91
3	Decision Tree Classifier	100.00	78.02
4	Random Forest Classifier	100.00	82.42
5	XGBoost Classifier	98.58	83.52

Рис. 8. Результати точності для всіх моделей

У результаті дослідження було виявлено, що зменшення кількості атрибутів не завжди призводить до підвищення ефективності знаходження вірного рішення.

Висновки. Загальна мета дослідження полягала у визначенні різних методів аналізу даних, корисних для ефективного прогнозування серцевих захворювань та здійснення ефективного і точного прогнозування з оптимальною кількістю атрибутів. У цьому дослідженні було розглянуто 14 основних атрибутів, було застосовано шість методів класифікації: Logistic Regression, K-nearest neighbors, Support Vector Machine, Decision Tree Classifier, Random Forest Classifier та XGBoost Classifier. Дані були попередньо оброблені, а потім використані в моделях.

Загалом, жоден алгоритм не «кращий» за інший. Існує теорема «No Free Lunch» [14]. У ній стверджується, що будь-які два алгоритми оптимізації є еквівалентними, якщо їх продуктивність усереднена для всіх можливих проблем. Проте з практичної точки зору можна стверджувати, що Logistic Regression показує кращу точність, тому що він дуже швидко класифікує невідомі записи та є менш схильним до перенавчання (overfitting). Що стосується K-nearest neighbors, то у випадку нелінійних даних класифікатор є дуже ефективним і забезпечує високу точність, також він є стійким до зашумлених навчальних даних (noisy training data). Support Vector Machine є ефективним на невеликих наборах даних, SVM надає налаштування дуже корисного параметра kernel і за допомогою застосування відповідної функції ядра ми можемо вирішити будь-яку складну проблему. Також SVM зазвичай не страждає від перенавчання та у порівнянні з іншими класифікаторами має кращу обчислювальну складність, і навіть якщо кількість позитивних та негативних прикладів неоднакова, можна використовувати SVM, оскільки він має можливість нормалізації. Дані переваги класифікатора SVM, згідно досліджень, забезпечили найкращу точність, яка становить 87,91 % на тестовому наборі.

Список використаних джерел

1. World Health Organization // Cardiovascular diseases. – World Health Organization. 2022 [Electronic resource]. – Accessed mode: https://www.who.int/health-topics/cardiovascular-diseases/#tab=tab_1.
2. Ansari M. F. A prediction of heart disease using machine learning algorithms / Ansari M. F., Alankar B., Kaur H. // International conference on image processing and capsule networks. – 2020. – Pp. 497-504.
3. Ramya Perumal. Early Prediction of Coronary Heart Disease from Cleveland Dataset using Machine Learning Techniques [Electronic resource] / Ramya Perumal, Kaladevi AC. // International Journal of Advanced Science and Technology. – 2020. – Vol. 29(06). – Pp. 4225-4234. – Accessed mode: <http://sersec.org/journals/index.php/IJAST/article/view/16428>.
4. Latha C. B. C. Improving the accuracy of prediction of heart disease risk based on ensemble classification techniques / Latha C. B. C., Jeeva S. C. // Informatics in Medicine Unlocked. – 2019. – Vol. 16. – Atr. 100203.
5. Ananey-Obiri D. Predicting the presence of heart diseases using comparative data mining and machine learning algorithms / Ananey-Obiri D., Sarku E. // International Journal of Computer Applications. – 2020. – Vol. 176(11). – Pp. 17-21.

6. Kumar N. K. Analysis and prediction of cardio vascular disease using machine learning classifiers / Kumar N. K., Sindhu G. S., Prashanthi D. K., Sulthana A. S. // 2020 6th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS). IEEE. – 2020, March. – Pp. 15-21.
7. UCI Machine Learning Repository [Electronic resource] / Janosi A., Steinbrunn W., Pfisterer M., Detrano R. – 1988.– Accessed mode: <https://archive-beta.ics.uci.edu/ml/datasets/heart+disease>.
8. Maini E. Machine learning–based heart disease prediction system for Indian population: An exploratory study done in South India / Maini E., Venkateswarlu B., Maini B., Marwaha D. // *Medical Journal Armed Forces India*. – 2021. – Vol. 77(3). – Pp. 302-311.
9. A comprehensive investigation and comparison of machine learning techniques in the domain of heart disease / Pouriyeh S., Vahid S., Sannino G., De Pietro G., Arabnia H., Gutierrez J. // 2017 IEEE symposium on computers and communications (ISCC). – 2017, July. – Pp. 204-207.
10. Support vector machine classification of microarray data / Mukherjee S., Tamayo P. A. S. D., Slonim D., Verri A., Golub T., Mesirov J., Poggio T. // *AI Memo*. – 1677, Massachusetts Institute of Technology, 1999.
11. Priyam A. Comparative analysis of decision tree classification algorithms / Priyam A., Abhijeeta G. R., Rathee A., Srivastava S. // *International Journal of current engineering and technology*. – 2013. – Vol. 3(2). – Pp. 334-337.
12. Cardiovascular risk prediction method based on CFS subset evaluation and random forest classification framework / Xu S., Zhang Z., Wang D., Hu J., Duan X., Zhu T. // 2017 IEEE 2nd International Conference on Big Data Analysis (ICBDA). – 2017, March. – Pp. 228-232.
13. Chen T. Xgboost: A scalable tree boosting system / Chen T., Guestrin C. // *Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining*. – 2016, August. – Pp. 785-794.
14. Wolpert D. H. No free lunch theorems for optimization / Wolpert D. H., Macready W. G. // *IEEE transactions on evolutionary computation*. – 1997. – Vol. 1(1). – Pp. 67-82.

References

1. World Health Organization. (2022). Cardiovascular diseases. World Health Organization. https://www.who.int/health-topics/cardiovascular-diseases/#tab=tab_1.
2. Ansari, M. F., Alankar, B., & Kaur, H. (2020, May). A prediction of heart disease using machine learning algorithms. In *International conference on image processing and capsule networks* (pp. 497-504). Springer, Cham.
3. Ramya Perumal, Kaladevi AC. (2020). Early Prediction of Coronary Heart Disease from Cleveland Dataset using Machine Learning Techniques. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 29(06), 4225-4234. <http://sersc.org/journals/index.php/IJAST/article/view/16428>.
4. Latha, C.B.C., & Jeeva, S.C. (2019). Improving the accuracy of prediction of heart disease risk based on ensemble classification techniques. *Informatics in Medicine Unlocked*, 16, 100203.
5. Ananey-Obiri, D., & Sarku, E. (2020). Predicting the presence of heart diseases using comparative data mining and machine learning algorithms. *International Journal of Computer Applications*, 176(11), 17-21.
6. Kumar, N.K., Sindhu, G.S., Prashanthi, D.K., & Sulthana, A.S. (2020, March). Analysis and prediction of cardio vascular disease using machine learning classifiers. In *2020 6th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)* (pp. 15-21). IEEE.
7. Janosi, A., Steinbrunn, W., Pfisterer, M., Detrano, R. (1988). UCI Machine Learning Repository. <https://archive-beta.ics.uci.edu/ml/datasets/heart+disease>.
8. Maini, E., Venkateswarlu, B., Maini, B., & Marwaha, D. (2021). Machine learning–based heart disease prediction system for Indian population: An exploratory study done in South India. *Medical Journal Armed Forces India*, 77(3), 302-311.
9. Pouriyeh, S., Vahid, S., Sannino, G., De Pietro, G., Arabnia, H., & Gutierrez, J. (2017, July). A comprehensive investigation and comparison of machine learning techniques in the domain of heart disease. In *2017 IEEE symposium on computers and communications (ISCC)* (pp. 204-207). IEEE.
10. Mukherjee, S., Tamayo, P. A. S. D., Slonim, D., Verri, A., Golub, T., Mesirov, J., & Poggio, T. (1999). Support vector machine classification of microarray data. *AI Memo 1677*, Massachusetts Institute of Technology.

11. Priyam, A., Abhijeeta, G. R., Rathee, A., & Srivastava, S. (2013). Comparative analysis of decision tree classification algorithms. *International Journal of current engineering and technology*, 3(2), 334-337.
12. Xu, S., Zhang, Z., Wang, D., Hu, J., Duan, X., & Zhu, T. (2017, March). Cardiovascular risk prediction method based on CFS subset evaluation and random forest classification framework. In *2017 IEEE 2nd International Conference on Big Data Analysis (ICBDA)* (pp. 228-232). IEEE.
13. Chen, T., & Guestrin, C. (2016, August). Xgboost: A scalable tree boosting system. In *Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining* (pp. 785-794).
14. Wolpert, D.H., & Macready, W.G. (1997). No free lunch theorems for optimization. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 1(1), 67-82.

Отримано 25.11.2022

UDC 629.7:519.2

Artem Volokita¹, Bohdan Hereha²

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Computer Engineering
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: artem.volokita@kpi.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9069-5544>

²student of the 6th year of the Faculty of IOT
National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute
named after Igor Sikorsky" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: bogdangerega19@gmail.com

COMPARATIVE ANALYSIS OF MACHINE LEARNING ALGORITHMS FOR CARDIOVASCULAR DISEASES PREDICTION SYSTEMS

Every year, around 20.5 million people die from cardiovascular disorders. People who are diagnosed with the disease early can alter their lifestyles and receive appropriate medical care. A model based on the learning algorithms Logistic Regression, K-nearest Neighbors, Support Vector Machine, Decision Tree Classifier, Random Forest Classifier, and XGBoost is presented in the paper along with various heart disease-related attributes. The Cleveland UCI database of heart disease patients is used in the model. There are 303 instances and 76 attributes in the data set. Only 14 of these 76 attributes—which are crucial to justifying the effectiveness of various algorithms—are taken into account during testing. The main contribution of this research work is the implementation of an intuitively understandable system of medical forecasts for the diagnosis of heart diseases using modern methods of machine learning. Algorithms used for predicting heart diseases are discussed in this work, and a comparison is made between existing systems. Six classification methods were used: Logistic Regression, K-nearest neighbors, Support Vector Machine, Decision Tree Classifier, Random Forest Classifier and XGBoost Classifier. 14 attributes were used to predict cardiovascular disease, which is a much better solution than using 5 or 10, as was the case in the reviewed papers. To ensure high accuracy, hyperparameters were adjusted for each classifier. As a result, good performance was obtained. In this work, the SVM classifier proved to be the most effective, providing an accuracy of 87.91 % on the test set. It was possible to achieve greater accuracy than in the studied works.

Keywords: machine learning; cardiovascular disease; prediction model; algorithm; classification; regression; dataset; attribute.

Fig.: 8. Table: 1. References: 14.

РОЗДІЛ III. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-4(30)-140-147

УДК 665

**Вікторія Воробйова¹, Георгій Васильєв², Інна Трус³,
Маргарита Скиба⁴, Олена Гнатко⁵**

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри фізичної хімії
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: vorobyovavika1988@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7479-9140>
ResearcherID: [J-5678-2017](https://orcid.org/0000-0001-7479-9140). Scopus Author ID: [55808771000](https://orcid.org/0000-0001-7479-9140)

²кандидат технічних наук, доцент кафедри технології електрохімічних виробництв
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: g.vasyliiev@kpi.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4056-5551>
ResearcherID: [I-3058-2018](https://orcid.org/0000-0003-4056-5551). Scopus Author ID: [56105504500](https://orcid.org/0000-0003-4056-5551)

³кандидат технічних наук, доцент кафедри екології та технології рослинних полімерів
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: inna.trus.m@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6368-6933>
ResearcherID: [I-3204-2017](http://orcid.org/0000-0001-6368-6933). Scopus Author ID: [56152219600](http://orcid.org/0000-0001-6368-6933)

⁴кандидат технічних наук, доцент кафедри екології та технології неорганічних речовин
ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (Дніпро, Україна)

E-mail: margaritaskiba88@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4634-280X>
ResearcherID: [AAH-8410-2019](https://orcid.org/0000-0003-4634-280X). Scopus Author ID: [57198771281](https://orcid.org/0000-0003-4634-280X)

⁵кандидат технічних наук, асистент кафедри механіки

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (Дніпро, Україна)
E-mail: olena.gnatko@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0588-0425>
Scopus Author ID: [55105211700](https://orcid.org/0000-0003-0588-0425)

ЕКСТРАКЦІЯ ПОЛІФЕНОЛЬНИХ СПОЛУК ІЗ ПРОДУКТІВ ПЕРЕРОБКИ ВИНОГРАДУ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИМ ЕВТЕКТИЧНИМ РОЗЧИННИКОМ БЕТАЇН-МОЛОЧНА КИСЛОТА

Синтезовано іонну рідину нового покоління – низькотемпературний евтектичний розчинник (НЕР) III типу системи молочна кислота – бетаїн (співвідношення 1:2 М). У роботі вивчено вплив води на в'язкість НЕР. Після додавання до НЕР 10 % води в'язкість суттєво зменшується (від 20000 до 4000 мПа × с). Проведені дослідження показали, що при введенні до 10 % води густина та в'язкості зменшуються, однак деградації НЕР не спостерігається, тому доцільним для екстракції природних метаболітів рослинної сировини є застосування НЕР із вмістом води до 10 %. Загальний вміст вилучених фенольних сполук та флаваноїдів при екстракції жому винограду НЕР збільшується ((80,75 ± 1,75) мг галової кислоти/г рослинного матеріалу; (47,41 ± 1,20) мг кверцетину/г рослинного матеріалу) порівняно з екстрактом отриманим 70%-им розчином етанолу.

Ключові слова: низькотемпературні евтектичні розчинники; екстракція; жом винограду; поліфенольні сполуки; хімічні технології.

Рис.: 3. Табл.: 2. Бібл.: 11.

Актуальність теми дослідження. Розвиток сучасної хімічної технології та інженерії спрямований на концепцію впровадження інноваційних «зелених» технологій і їх екологізації. Більшість процесів у галузі хімічних технологій отримання косметичних засобів, фармації та інших пов'язано з використанням токсичних та агресивних органічних розчинників або реакційних середовищ розчинників. Навіть для «зелених» технологій продовжують використовувати «традиційні» розчинники: метанол, ацетон, толуол, що суттєво обмежує поліфункціональність властивостей та галузі їх використання. З викладених вище міркувань привабливими є так звані низькотемпературні евтектичні розчинники, що загально визнані у світі як абсолютно безпечні (Generally Recognized as Safe), повністю відповідають принципам зеленої хімії та вважаються розчинниками 4 покоління для хімічної технології XXI сторіччя. Починаючи з 2008 року серед закордонних учених бурхливого розвитку набули «зелені» нанотехнології, у яких використовуються

© Вікторія Воробйова, Георгій Васильєв, Інна Трус, Маргарита Скиба, Олена Гнатко, 2022

саме вищезгадані глибоко евтектичні розчинники [1-5], що розглядаються як нове покоління дешевих та екологічно безпечних іонних рідин із низкою практично корисних властивостей, що характеризуються доступністю, варіативністю компонентів, простотою синтезу та унікальною комбінацією високої екстракційної здатності, термічної та хімічної стійкості, полярністю. Далі ці розчинники широко використовуються в різних сферах, для синтезу полімерів, осадження металів і в наноматеріалознавстві, як екстракційних і хроматографічних середовищ [3]. Однак, на відміну від органічних розчинників, НЕР в основному залежить від міжмолекулярних взаємодій між його компонентами, що робить НЕР легко залежними від різних факторів і передусім від вмісту води, температури. Тому першочергово для визначення потенційної області використання НЕР доцільно провести синтез та оцінити основні фізико-хімічні властивості НЕР, а саме в'язкість, густину, екстракційні властивості.

Постановка проблеми. Варіативність вихідних компонентів для створення НЕР зумовлює широку номенклатуру синтезованих іонних рідин, фізико-хімічні властивості яких сильно варіюються. Загальним недоліком для НЕР є їхня висока в'язкість, що обмежує сфери їх застосування. Тому практично важливим після синтезу нових НЕР є дослідити вплив води на основні характеристичні параметри та визначити, при якому вмісті води іонні рідини не деградують, але одночасно мають технологічно достатні в'язкість, густину, електропровідність. У попередній роботі [7] авторами синтезовано низку НЕР на основі молочної кислоти – бетаїну/проліну та визначено електропровідність розчинів НЕР із додаванням води до 25 %. Додавання води в кількості 1...25 % призводить до зменшення ширини електрохімічного вікна з 1,33 до 1,21 В та збільшення електропровідності. Вищевизначені параметри широко використовують для використання НЕР у технологіях електрохімічного осадження матеріалів. Водночас для використання НЕР як екстракційних і хроматографічних середовищ необхідним є вивчення зміни в'язкості та густини синтезованих НЕР. Незважаючи на популярність екстракції НЕР природних вторинних метаболітів із продуктів переробки винограду [4-5; 8], немає попередніх робіт, які б вивчали розчинники на основі молочної кислоти – бетаїну та проліну для вилучення природних сполук із продуктів переробки рослинної сировини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. НЕР як «зелені» розчинники розглядаються як нове покоління дешевих та екологічно безпечних іонних рідин із низкою практично корисних властивостей, що характеризуються доступністю, варіативністю компонентів, простотою синтезу, та унікальною комбінацією високої екстракційної здатності, термічної та хімічної стійкості, полярністю [1-3]. Тому вони набули широкого застосування в різних галузях [3; 9-10]. В останніх роботах [4-6; 10] теоретичним методом COSMO-RS спрогнозовано екстракційну ефективність 45 типів НЕР проти виноградного жому та наголошено, що більш ефективним є системи молочної кислоти – бетаїну/проліну, а підвищення розчинності основних сполук, можна досягти при введенні води.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. На сьогодні не дослідженим є вплив води на в'язкість та густину НЕР на основі бетаїну та молочної кислоти, для визначення можливості його використання в екстракції вторинних метаболітів рослинної сировини. Перспективний напрям валоризації продуктів переробки рослинної сировини, а саме вилучення природних органічних сполук, при використанні НЕР також не досліджено. Отриманні дані дадуть змогу підвищити ефективність вилучення поліфенольних сполук із рослинної сировини. Рослині екстракти далі можуть бути використані для синтезу колоїдних розчинів наночастинок срібла, золота як відновник та стабілізатор, як активний антиоксидант для косметичної та харчової промисловості.

Метою роботи є вивчення впливу води на в'язкість та густину НЕР на основі бетаїну та молочної кислоти та оцінка їхньої екстракційної здатності поліфенольних сполук продуктів переробки рослинної сировини, а саме жому винограду.

Виклад основного матеріалу.

Приготування низькотемпературних евтектичних розчинників

При проведенні експериментів використовувалися такі вихідні речовини (х.ч.): молочна кислота та бетаїн. Їх змішували в герметичних скляних колбах ємністю 100 мл у відповідних молярних 1:2 співвідношеннях, виходячи з номера НЕР. Суміш поміщали на водяну баню та сплавили при температурі 70-80 °С до утворення однорідної, прозорої рідини. Перемішування проводили безперервно за допомогою магнітної мішалки зі швидкістю обертання 300 об/хв. Після утворення однорідної, прозорої рідини суміш охолоджували на повітрі до кімнатної температури. Було синтезовано системи НЕР з різним додаванням вмісту води (5-25 %).

Приготування екстракту

Висушений виноградний жом був придбаний у місцевого постачальника. Вміст вологи визначали шляхом сушіння трьох зразків при 80 °С до постійної ваги, і результат становив $(5,02 \pm 0,63)$ %, виражений у вологому стані. Порошок жому винограду додавали в НЕР у співвідношенні розчинник/тверда речовина 10/1. Це співвідношення маса/розчинник було обрано в процесі досліджень, оскільки забезпечує повне покриття рослинного матеріалу використовуваним розчинником (НЕР). Суміш екстрагували в ультразвуковій ванні з вхідною потужністю ультразвуку 30 Вт і частотою 30 кГц. Тривалість екстракції становила 60 хв при температурі 65 °С. Отриману суспензію декантували та фільтрували через паперовий фільтр.

Характеристика екстракту жому винограду

Аналіз та ідентифікація основних сполук отриманого екстракту був проведений за допомогою методів високоефективної рідинної хроматографії з детектором з діодною матрицею (HPLC-DAD) і високоефективної рідинної хроматографії – мас-спектрометрії (HPLC-MS). Використання різних методів аналізу зумовлена різницею в чутливості кожного методу [10]. Аналіз HPLC - DAD проводили на апараті Agilent Technologies 1260 Infinity HPLC, обладнаному колонкою Thermo Scientific Hypersil Golda Q C18 (150×4,6 мм, розмір частинок 5 μм) і детектором з діодною матрицею. Рухомими фазами були (А) 2,5 % об'єм/об'єм оцтової кислоти у воді та (В) 2,5 % об'єм/об'єм оцтової кислоти в метанолі, швидкість потоку становила 1 мл/хв, температура колонки становила 25 °С, а об'єм ін'єкції становив 10 μкл. Перед введенням зразків проводили 5-хвилинне врівноваження з 5% В. Елюювання проводили за лінійним градієнтом з такими умовами: 0 хв, 5 % В; 20 хв, 20 % В; 15 хв, 40 % В; 18 хв, 30 % В; 28 хв, 20 % В; 35 хв, 0 % В. Час роботи становив 35 хв, а дані реєстрували при 325 і 354 нм для ідентифікації фенольних кислот, флавонолів і флавоноїдів. Аналіз HPLC - MS аналізу джерело іонізації з електророзпиленням працювало в режимі негативних іонів під напругою 4,5 кВ і сканувалося від m/z 170 до 700. Температура трубки для перенесення іонів становила 355 °С, а температура випарника становила 350 °С.

Ідентифікацію екстрагованих сполук проведено за порівнянням часу утримування (RT), УФ- та мас-спектрів виявленої сполуки при певному піку утримання із зазначеними параметрами чистого стандарту модельних сполук [4, 8].

Визначення загального вмісту поліфенолів та флавоноїдів в екстракті

Загальний вміст поліфенолів (ЗВФС) в екстракті визначали спектрофотометричним методом із реактивом допомогою методу Фоліна-Чокальтеу [4]. 50 μкл екстракту змішували з 300 μкл реагенту Фоліна-Чокальтеу (2 Н). Потім додавали 4,7 мл розчину карбонату натрію (50 г/л) і струшували. Пробірки із сумішшю витримували в темряві протягом 90 хвилин при кімнатній температурі та вимірювали поглинання при 765 нм. Загальний вміст флавоноїдів (ЗВФ) визначали спектрофотометричним методом із реактивом алюмінію (III) хлориду [4]. Калібрувальні криві (5-100 мг галової кислоти та кверцетину на

літр) використовували для розрахунку загального вмісту поліфенолів екстракту та флавоноїдів відповідно. Результати вмісту поліфенолів виражали в міліграмах еквівалента галової кислоти та кверцетину на грам рослинного матеріалу.

Випробування в'язкості проводили з використанням віскозиметра 16983, тип U-подібної трубки з реверсом у термостатичній ванні TVB 445 (Labovisco B.V., Нідерланди) [2]. Зміну густини визначали за допомогою пікнометра.

Усі вимірювання проводили в трьох повторах. Результати досліджень виражені як середнє квадратичне відхилення трьох значень ($n = 3$).

Результати досліджень зміни в'язкості низькотемпературного евтектичного розчинника залежно від вмісту води.

У результаті значне зниження в'язкості НЕР при різному вмісті води (5, 10, 25 %) означає, що молекули води беруть участь у водневих зв'язках при формуванні НЕР (рис. 1). Висока в'язкість НЕР часто пояснюється наявністю інтенсивних водневих зв'язків між компонентами. Після додавання до НЕР 10 % води їх в'язкість зменшилася з 16000,00 до 3500,00 мПа \times с. Такий важливий вплив води може бути як позитивним, так і негативним, що сильно залежить від кінцевого застосування НЕР. Внесення 25 % суттєво впливає на в'язкість, яка експоненціально зменшується при збільшенні температури.

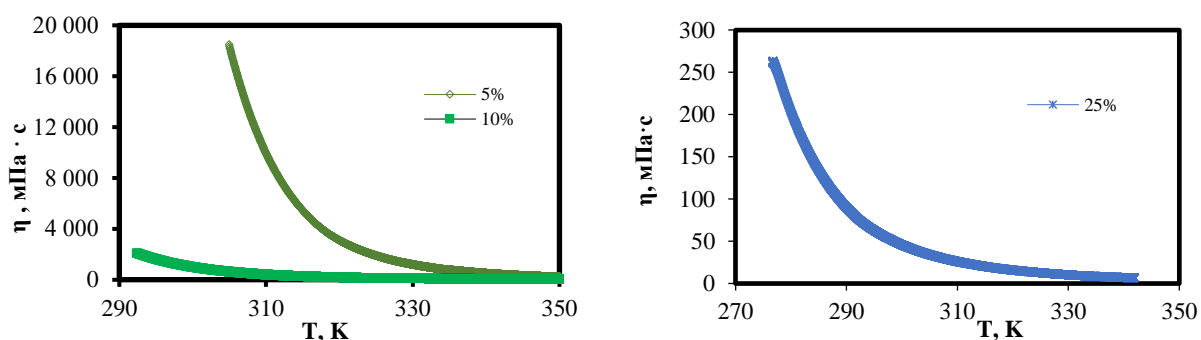


Рис. 1. Вплив температури і вмісту води на в'язкість НЕР

Визначені попередньо значення електропровідності, знайдені в попередньому дослідженні, корелюють зі значеннями в'язкості, оскільки найбільш в'язкі НЕР демонстрували низьку електропровідність та проявляють суттєве зниження електрохімічної стабільності при переході від 10 до 25 % води.

Вміст води також впливає на інші фізичні властивості, такі як густина (рис. 2). Таким чином, визначення основних фізико-хімічних властивостей свідчить, що для екстракції доцільним є використання НЕР із вмістом води до 10 %. Щільність НЕР зменшувалася лінійно зі збільшенням вмісту води.

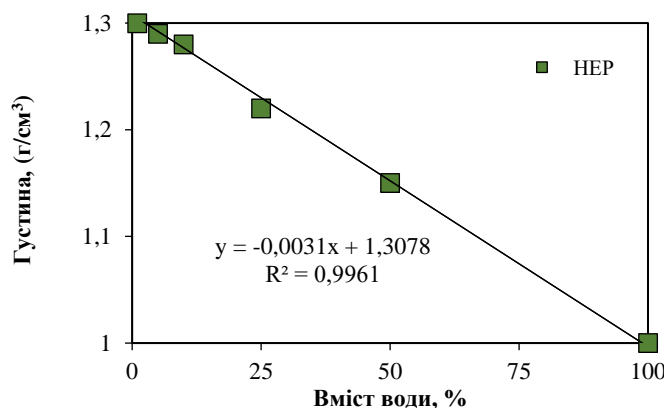


Рис. 2. Вплив вмісту води на густину НЕР

Отримані екстракти жому винограду були аналізовані методом рідинної хроматографії – мас-спектрометрії. Відносний час утримання (RT) та мас-спектри компонентного складу екстрактів порівнювали із часом автентичного зразка та мас-спектрами бібліотеки даних. Результати рідинної хромато–мас-спектрометрії екстракту жому винограду представлені на рис. 3 та в табл. 1.

Таблиця 1 – Компонентний склад екстракту жому винограду

Сполука	Пік	Отримані значення		
		Час утримання/ retention time (RT)	Відсотковий вміст розчинника	
			HEP	Вода/етанол (70%)
Антоціани				
дельфінідин 3-О-глюкозид	9	15,2	4,7	2,4
ціанідин-3-О-глюкозид	10	16,4	2,1	1,5
мальвідін 3-О-глюкозид	11	16,6	6,4	5,7
петунідин 3-О-глюкозид	12	17,1	6,0	4,7
Фенольні кислоти				
Галова кислота	1	1,8	10,4	11,2
протокатехінова кислота	2	4,7	4,1	4,9
п-гідроксibenзойна кислота	3	5,0	2,8	3,0
кутарова кислота	4	5,2	1,8	2,1
кавова кислота	5	6,4	6,5	12,8
епікатехін	6	7,3	8,1	5,2
сирингова кислота	7	7,7	4,0	5,8
р-кумарова кислота	8	8,0	2,7	3,0
Антоксантини і стилбени				
(+)-катехін	13	20,3	8,1	5,6
Кверцетин-3-О-глюкозид	14	20,5	1,5	1,4
Кверцетин-3-О-рутинозид	15	23,8	4,0	3,2
Кемпферол-3-О-глюкозид	16	24,5	3,0	2,7
кверцетин	17	25,0	3,7	2,5

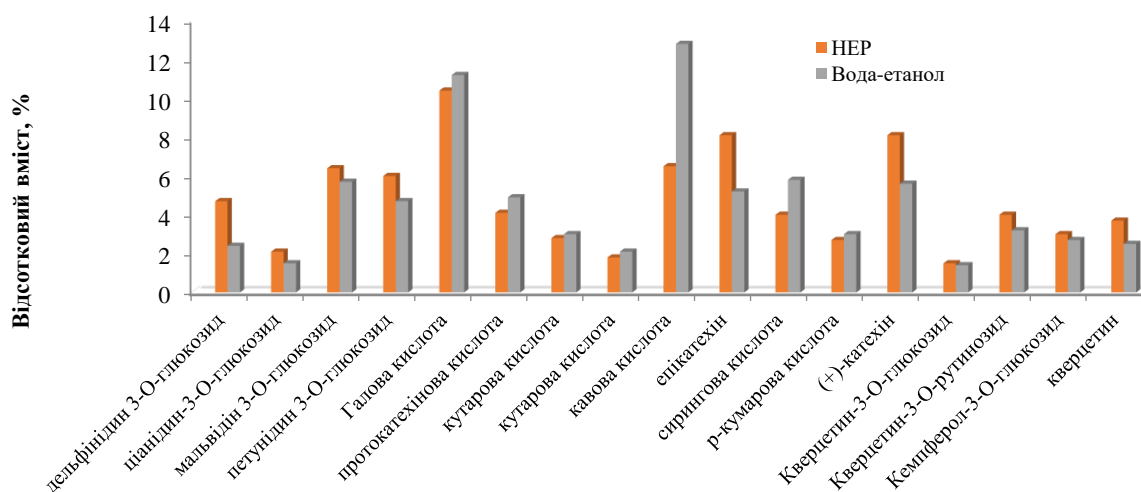


Рис. 3. Відсотковий вміст поліфенольних сполук, екстрагованих з екстракту жмиху винограду

Порівнюючи всі хроматограми, використаний метод дозволив розділити фенольні сполуки за часом утримання. Зокрема, гідроксикоричні кислоти елюються в перші 10 хвилин часу роботи, тоді як флавоноїди – пізніше. Крім того, гідроксикоричні кислоти показали більш високі піки інтенсивності при 325 нм, тоді як флавоноїди легше видно при 354 нм. Попередню ідентифікацію антоціанів і гідроксикоричних кислот проводили

за допомогою УФ-спектрів кожного піку, отриманих на хроматограмах DAD-LC, і порівнювали з УФ-спектрами стандартних сполук. Відмінності в профілях сполук на рисунках можна пояснити використаним розчинником. Так 70%-ий розчин етанолу дозволив екстрагувати флавоноли і гідроксикоричні кислоти, тому його використовували як еталон для оцінки різноманітності досліджуваних екстрагованих сполук з жому винограду.

При використанні 70%-ого розчину етанолу як розчинника очікується низький вміст флавоноїдів в екстрактах. Оскільки екстракція цим розчинником при рН близького до нейтрального сприятиме екстракції більш полярних та іонізованих біологічно активних сполук, таких як гідроксикоричні кислоти. Тоді як менш полярні сполуки, такі як флавоноли та флавоноїди розчиняються гірше. Наприклад, кавава та сиригіннова кислоти краще розчиняються у воді, ніж флавоноїди (див. табл. 1). Тому водно-спиртові екстракти мають вищий вміст гідроксикоричних кислот та нижчий вміст флавоноїдів, як показано на малюнку 3. У свою чергу, екстракція глибоким евтектичним розчинником, порівняно із традиційним розчинником, демонструє вищі піки. У результаті чого можна зробити висновок про підвищення виходу екстракції з використанням НЕР.

Для однозначної ідентифікації сполук, присутніх у кожному екстракті, використовувалася HPLC-DAD. Характеристичні фрагменти в спектрі МС та УФ-спектрах кожного піку використовувалися для ідентифікації як гідроксикоричних кислот, так і флавоноїдів. З використаних стандартів були ідентифіковані лише кавава кислота, (+)-катехін і кемпферол. У таблиці 2 показано кількість (мкг/г) ідентифікованих сполук та їхні відповідні хроматографічні характеристики. Основними компонентами екстракту жому винограду були гідроксикоричні кислоти, антоціани, антоксантини та стилбени. Результати HPLC-DAD показали вплив розчинника на склад екстракту. Були виявлені значні відмінності в профілі сполуки між екстракцією 70%-им розчином етанолу екстракцією з використанням НЕР. При екстракції з НЕР вдалося отримати складну суміш гідроксикоричних кислот і флавоноїдів, тоді як з традиційним розчинником – переважно гідроксикоричні кислоти.

Ефективність екстракції також було оцінено за допомогою спектрофотометричного визначення вмісту фенольних сполук (ЗВФС) та флавоноїдів (ЗВФ) в екстракті жому винограду (табл. 2).

Таблиця 2 – Загальний вміст фенолів і флавоноїдів в екстрактах жому винограду

Розчинник	Загальний вміст фенольних сполук (ЗВФС)	Загальний вміст флавоноїдів (ЗВФ)
НЕР	80,75±1,75	47,41±1,20
Вода/етанол (70%)	45,10±1,75	12,15±1,20

Таблиця 2 показує результати варіації ЗВФС екстракту. Еталонна екстракція 70%-им розчином етилового спирту дала ЗВФС 45,10±1,75 мг галової кислоти/г рослинного матеріалу, що відповідає нижчому значенню, ніж отримано при екстракції з НЕР. Достовірно вищий вміст флавоноїдів спостерігався у системі НЕР (47,41±1,20) мг кверцетину/г сухої ваги) порівняно з традиційним розчинником (70 % етанолом) (12,15±1,20) мг кверцетину/г сухої ваги).

Висновки. Синтезовано низькотемпературний евтектичний розчинник III типу, а саме НЕР молочна кислота – бетаїн (співвідношення 1:2 М). Встановлено, що при додавання до НЕР 25 % води в'язкість суттєво зменшується від 20000 до 4000 мПа × с при зменшенні температури від 290 до 350 К. Введення 25 % води суттєво зменшує в'язкість до 250 мПа × с при 290 К. Щільність НЕР зменшується лінійно зі збільшенням вмісту води і при вмісті до 10% залишається близькою до НЕР. Проведені дослідження показали, що при введенні до 10% води в'язкості зменшується, деградації НЕР не спостерігається, тому можливим для екстракції рослинної сировини є застосування НЕР із вмістом води до 10 %. За допомогою ВЕРХ та спектрофотометричних методів досліджень визначений якісний та кількісний склад фенольних сполук та флавоноїдів у екстракті. Показано, що отриманий екстракт на основі НЕР має порівняно вищий вміст вие зазначених сполук порівняно із використаним 70%-им розчином етанолу.

Список використаних джерел

1. Solubility of metal oxides in deep eutectic solvents based on choline chloride / A. P. Abbott, G. Capper, D. L. Davies, K. J. McKenzie, & S. U. Obi // *Journal of Chemical & Engineering Data*. – 2006. – Vol. 51(4). – Pp. 1280-1282.
2. Modeling the physicochemical properties of natural deep eutectic solvents / A. Kovács, E. C. Neyts, I. Cornet, M. Wijnants & P. Billen // *ChemSusChem*. – 2020. – Vol. 13(15). – Pp. 3789-3804.
3. Natural deep eutectic solvents: properties, applications, and perspectives / Y. Liu, J. B. Friesen, J. B. McAlpine, D. C. Lankin, S. N. Chen, & G. F. Pauli // *Journal of natural products*. – 2018. – Vol. 81(3). – Pp. 79-690.
4. Selin Deniz. Ultrasound-assisted natural deep eutectic solvent extraction of phenolic compounds from apple pomace / Selin Deniz, Ayşe Ezgi Ünlü & Serpil Takaç // *Separation Science and Technology*. – 2023. – Vol. 58. – № 2. – Pp. 302-313.
5. Natural Deep Eutectic Solvents (NADESS) Combined with Sustainable Extraction Techniques: A Review of the Green Chemistry Approach in Food Analysis / Cannavacciuolo C., Pagliari S., Frigerio J., Giustra C. M., Labra M., Campone L. // *Foods*. – 2023. – Vol. 12 (1). – P. 56.
6. Deep eutectic solvents as sustainable extraction media for plants and food samples: A review / Soukaina Kaoui, Bouchra Chebli, Safa Zaidouni, Khadija Basaid, Youssef Mir // *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. – 2023. – Vol. 31. – P. 100937.
7. Дослідження компонентного складу та антиоксидантних властивостей екстракту продукту переробки томата / В. Воробйова, М. Скїба, І. Трус, С. Кирїй, С. Сїренко // *Технічні науки та технології*. – 2021. – № 1(23). – С. 145-151.
8. Extraction of Polyphenolic Antioxidants from Red Grape Pomace and Olive Leaves: Process Optimization Using a Tailor-Made Tertiary Deep Eutectic Solvent / Athanasiadis V., Palaioiannis D., Poulianiti K., Bozinou E., Lalas S.I., Makris D.P. // *Sustainability* – 2022. – Vol. 14. – P. 6864.
9. Екстракція жмиху томату «зеленим» розчинником та оцінка антиоксидантних властивостей / В. І. Воробйова, М. І. Скїба, І. М. Трус, Г. С. Васильєв // *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження»*. – 2021. – № 2. – С. 59–65.
10. COSMOtherm as an Effective Tool for Selection of Deep Eutectic Solvents Based Ready-To-Use Extracts from Graševina Grape Pomace / Panić M., Gunjević V., Radošević K., Cvjetko Bubalo M., Ganić K. K., Redovniković I. R. // *Molecules*. – 2021. – Vol. 26(16). – P. 4722.
11. Визначення електрохімічних властивостей природних іонних рідин нового покоління / В. Воробйова, Г. Васильєв, І. Трус, О. Лїнючева // *Технічні науки та технології*. – 2022. – № 2(28). – С. 88-95.

References

1. Abbott, A.P., Capper, G., Davies, D.L., McKenzie, K.J., & Obi, S.U. (2006). Solubility of metal oxides in deep eutectic solvents based on choline chloride. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 51(4), 1280-1282.
2. Kovács, A., Neyts, E. C., Cornet, I., Wijnants, M., & Billen, P. (2020). Modeling the physicochemical properties of natural deep eutectic solvents. *ChemSusChem*, 13(15), 3789-3804.
3. Liu, Y., Friesen, J.B., McAlpine, J.B., Lankin, D.C., Chen, S.N., & Pauli, G.F. (2018). Natural deep eutectic solvents: properties, applications, and perspectives. *Journal of natural products*, 81(3), 679-690.
4. Selin Deniz, Ayşe Ezgi Ünlü & Serpil Takaç. (2023). Ultrasound-assisted natural deep eutectic solvent extraction of phenolic compounds from apple pomace, *Separation Science and Technology*, 58(2), 302-313.
5. Cannavacciuolo, C., Pagliari, S., Frigerio, J., Giustra, C.M., Labra, M., Campone, L. (2023). Natural Deep Eutectic Solvents (NADESS) Combined with Sustainable Extraction Techniques: A Review of the Green Chemistry Approach in Food Analysis, *Foods*, 12(1), 56.
6. Soukaina Kaoui, Bouchra Chebli, Safa Zaidouni, Khadija Basaid, Youssef Mir. (2023). Deep eutectic solvents as sustainable extraction media for plants and food samples: A review. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 31, 100937.
7. Vorobyova, V., Sciba, M., Trus, I., Kyrii, S., & Sirenko, S. (2021). Research of component composition and antioxidant properties of tomato processed product extract. *Technical Sciences and Technology*, 1(23), 145–151.
8. Athanasiadis, V., Palaioiannis, D., Poulianiti, K., Bozinou, E., Lalas, S.I., Makris, D.P. (2022). Extraction of Polyphenolic Antioxidants from Red Grape Pomace and Olive Leaves: Process Optimization Using a Tailor-Made Tertiary Deep Eutectic Solvent. *Sustainability*, 14, 6864.

9. Vorobyova, V., Skiba, M., Trus, I., & Vasyliyev, H. (2021). Extraction of tomato pomace with "green" solvents and evaluation of antioxidant properties. *Proceedings of the NTUU "Igor Sikorsky KPI". Series: Chemical Engineering, Ecology and Resource Saving*, (2), 59–65.

10. Panić, M., Gunjević, V., Radošević, K., Cvjetko, Bubalo M., Ganić, K.K., Redovniković, I.R. (2021). COSMOtherm as an Effective Tool for Selection of Deep Eutectic Solvents Based Ready-To-Use Extracts from Graševina Grape Pomace. *Molecules*, 26(16), 4722.

11. Vorobyova, V., Vasyliyev, G., Trus, I., Linyucheva, O. (2022). Electrochemical properties of natural ionic liquids of new generation. *Technical Sciences and Technology*, 2(28), 88–95.

Отримано 14.12.2022

UDC 665

**Viktoriia Vorobyova¹, Georgii Vasyliyev², Inna Trus³,
Margarita Sciba⁴, Olena Gnatko⁵**

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Department of Physical Chemistry
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: vorobyovavika1988@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7479-9140>

ResearcherID: [J-5678-2017](https://orcid.org/0000-0001-7479-9140). **Scopus Author ID:** [55808771000](https://orcid.org/0000-0001-7479-9140)

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Department of Electrochemical Production Technology
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: g.vasyliyev@kpi.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4056-5551>

ResearcherID: [I-3058-2018](https://orcid.org/0000-0003-4056-5551). **Scopus Author ID:** [56105504500](https://orcid.org/0000-0003-4056-5551)

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Department of ecology and technology of plant polymers
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: inna.trus.m@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-6368-6933>

ResearcherID: [I-3204-2017](http://orcid.org/0000-0001-6368-6933). **Scopus Author ID:** [56152219600](http://orcid.org/0000-0001-6368-6933)

⁴PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Department of ecology and technology of inorganic substances
Ukrainian State University of chemical technology (Dnipro, Ukraine)

E-mail: margaritaskiba88@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4634-280X>

ResearcherID: [AAH-8410-2019](https://orcid.org/0000-0003-4634-280X). **Scopus Author ID:** [57198771281](https://orcid.org/0000-0003-4634-280X)

⁵PhD in Technical Sciences, Assistant of Department of applied mechanics
Ukrainian State University of chemical technology (Dnipro, Ukraine)

E-mail: olena.gnatko@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0588-0425>

Scopus Author ID: [55105211700](https://orcid.org/0000-0003-0588-0425)

**EXTRACTION OF POLYPHENOLIC COMPOUNDS
FROM GRAPE PROCESSING PRODUCTS BY LOW-TEMPERATURE
EUTECTIC SOLVENT BETAINE-LACTIC ACID**

The development of modern chemical technology and engineering is aimed at the concept of greening. Therefore, the search for effective green solvents for the extraction of natural organic compounds from vegetable raw materials is urgent. The use of DES is appropriate and is of increasing interest due to its environmental, technological, and economic features. DES are prepared from readily available materials with high purities, low cost, nontoxicity, non-flammability, biocompatibility, and biodegradability. In the work, the effect of water on the viscosity of deep eutectic solvent (DES) based on betaine and lactic acid was studied, and an assessment of polyphenolic compounds of grape pomace processing products was carried out with a water content of up to 10 %. When 10 % of water was added to DES, the viscosity decreased from 16,000.00 to 3,500.00 mPa s, when 25 % of water was added, the viscosity decreased exponentially with increasing temperature. Research results showed that water content also affects other physical properties, such as density, with the density of DES decreasing linearly with increasing water content. When performing liquid chromatography-mass-spectrometry during extraction with DES, compared to a traditional solvent, higher peaks are observed, which indicates an increase in the yield of extraction using DES. The main components of grape pomace extract are hydroxycinnamic acids, anthocyanins, anthoxanthins and stilbenes. When determining the influence of the solvent on the composition of the extract, significant differences in the compound profile were found between extraction with a 70 % ethanol solution and extraction using DES. A complex mixture of hydroxycinnamic acids and flavonoids was obtained during extraction with DES, while with a traditional solvent - mainly hydroxycinnamic acids. The extractive capacity of DES can be correlated with their physicochemical properties, including H-bonding interactions, polarity, and pH.

Keywords: deep eutectic solvents; extraction; grape pomace; polyphenolic compounds; chemical technologies.

Fig.: 3. Table: 2. References: 11.

Сергій Пристинський¹, Юрій Будаш², Вікторія Плаван³, Роман Шуляк⁴

¹аспірант кафедри прикладної екології, технології полімерів і хімічних волокон
Київський національний університет технологій та дизайну (Київ, Україна)
E-mail: s.prystynskiy@outlook.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1387-8352>

²доктор технічних наук, професор
професор кафедри прикладної екології, технології полімерів і хімічних волокон
Київський національний університет технологій та дизайну (Київ, Україна)
E-mail: budash.yo@knutd.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8718-1577>
ResearcherID: [H-6012-2018](https://orcid.org/0000-0001-8718-1577) SCOPUS Author ID: [9134072100](https://orcid.org/0000-0001-8718-1577)

³доктор технічних наук, професор
завідувач кафедри прикладної екології, технології полімерів і хімічних волокон
Київський національний університет технологій та дизайну (Київ, Україна)
E-mail: plavan.vp@knutd.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9559-8962>
Researcher ID: [I-5852-2015](https://orcid.org/0000-0001-9559-8962) SCOPUS Author ID: [6603130130](https://orcid.org/0000-0001-9559-8962)

⁴інженер-технолог цеху лиття пластмас
ТОВ «Костал Україна» (Переяслав, Україна)
E-mail: r.shuliak@kostal.com

**ВПЛИВ ОСНОВНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ
НА СТАБІЛЬНІСТЬ ПРОЦЕСУ ЛИТТЯ ПІД ТИСКОМ
МУЛЬТИКОМПОНЕНТНИХ ВІДХОДІВ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙ**

У роботі здійснено порівняльний аналіз основних технологічних параметрів, а також стабільності процесу лиття під тиском первинного склонаповненого (30 %) поліаміду 6 та вторинної композиції із суміші склонаповненої поліамід 6/полікарбонат. Показано, що використання вторинної композиції потребує збільшення часу та температури сушки, параметра подушки розплаву в порівнянні з первинним матеріалом. При цьому інші параметри процесу не зазнали суттєвих змін. Встановлено, що стабільність процесу лиття при використанні вторинної композиції не зазнала статистично значущих змін у порівнянні з первинним матеріалом та знаходиться в межах допустимих обмежень. Отримані результати доводять можливість повторної переробки мультикомпонентних відходів полімерних композицій методом лиття під тиском без їх сепарування із позитивними результатами валідації процесу.

Ключові слова: поліамід 6; полікарбонат; лиття під тиском; полімерна композиція; вторинна переробка; стабільність процесу; валідація.

Табл.: 2. Рис.: 5. Бібл.: 25.

Актуальність теми дослідження. У сучасному світі дедалі набуває популярність використання полімерних композиційних матеріалів в різноманітних галузях від простих побутових засобів до аерокосмічного будівництва завдяки їхнім унікальним властивостям [1]. Це дає змогу також обрати методи переробки в тому числі й адитивний метод [2], який стає особливо популярним у наші часи, та завдяки можливості модифікацій полімерів для отримання компонентів, які задовольняють високим вимогам безпеки експлуатації [3]. Усе це обумовлює невідоме зростання споживання полімерних виробів у промисловості та побуті. Наслідком такого споживання є зростання об'єму відходів. За даними Timmy Thiounn та Rhett C. Smith [4], у США станом на 2015 рік успішно переробляється лише 9 % пластиків відходів. Необхідно зазначити, що автомобільна промисловість є основним споживачем полімерних матеріалів, переважна більшість з яких є композиціями. Це свідчить про те, що використання пластику, особливо за останні 30 років, стає глобальною екологічною проблемою [5]. Необхідно відзначити й глобальний вплив трансформаційних процесів, які відбуваються в автомобільній галузі стосовно розробок нових екологічних приводних систем із більш широким використанням полімерних композитів [6]. Проте можливість повторного використання отриманих сумішей із багатокомпонентних відходів залишаються недостатньо вивченими як в Україні, так і у світі.

Постановка проблеми. Нині активно досліджуються можливості переробки сумішей полімерів методом лиття під тиском шляхом проведення морфологічного аналізу та оцінки впливу температури переробки на суміш композицій і, як наслідок, на фізико-механічні властивості [7]. З іншого погляду, вважається, що під час повторної переробки

наповнених полімерних композицій відбувається погіршення їх фізико-механічних властивостей. Це зумовлює розробку шляхів збереження цих властивостей, незалежно від числа циклів переробки [8]. Одними із методів є модифікація вторинної полімерної сировини мінеральними наповнювачами [9], або деревиною [10], що дає можливість переробляти відходи не лише полімерів, але й деревообробної промисловості.

Крім можливостей технологічних процесів, також активно досліджується і вплив вторинної сировини на основні параметри процесу лиття під тиском, зокрема на стабільність та якість процесу й можливості вибору оптимальних параметрів [11], на екологічні та фінансові аспекти з використанням каскадного підходу [12]. Приділяють увагу й механічним методам переробки відходів, які утворилися під час основних процесів виготовлення компонентів із полімерних матеріалів [13], а також оптимізація процесів переробки [14].

В автомобілебудуванні популярними є багатокомпонентні пластикові вироби. Зокрема можна виділити наявність таких компонентів в одній деталі, як склонаповнений поліамід 6 (PA6GF), який має також характерний вплив на параметри технологічного процесу [15] та полікарбонат (PC), полікарбонат плюс акрилонітрилбутадієнстирол (PC+ABS) та модифікований ABS+PC-X15. Подрібнюючи відходи чи некондиційну продукцію, зазвичай отримують суміш із цих полімерних композицій, яка не використовується повторно через відсутність практичного досвіду та складних і вартісних процесів сепарування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У технологічному процесі лиття під тиском важливо отримувати компоненти належного рівня якості з мінімальними втратами. Саме тому стабільність процесу (C_{PK}) та обладнання (в нашому випадку литтєвої машини) (C_{MK}) відіграють ключову роль у сучасному виробництві. Адже стабільність процесу й машин забезпечують отримання продукції, яка на 100 % відповідає вимогам клієнта й, зокрема, стандарту в галузі автомобілебудування *IATF 16949* [16].

Вимірювання стабільності є однією з методологій *6SIGMA*, що дає змогу досягати бажаних результатів багатьох складових процесів лиття пластмас під тиском, таких як: величина усадки, підбір раціональних параметрів [17]; профілів швидкості та тиску впрскування, що забезпечує певний рівень свободи для оптимізації і управління процесом [18]. Прийнятний рівень стабільності обладнання (C_{MK}), зокрема для литтєвої машини у світовому автомобілебудуванні має бути більшим за 1,67 або можна записати, як $C_{MK} \geq 1,67$ [19; 20; 21]. Показник стабільності процесу (C_{PK}) можна записати, як $C_{PK} > (1,33-2,0)$, тобто ідеально стабільним процес вважається зі рівня $C_{PK} > 2,0$, хоча допустимим прийнятним нижнім рівнем можна вважати $C_{PK} = 1,33$. У галузі автомобілебудування рекомендовано досягати $C_{PK} > 2,0$, що гарантує виготовлення якісної продукції [22; 23]. У литті пластмас під тиском, особливо компонентів із високим рівнем вимог стосовно розмірів, показник стабільності процесу відіграє ключову роль не лише при запуску серійного виробництва, а й впродовж усього циклу життя продукту. Ефективність застосування таких методів доводить свою практичну значущість і в наші часи, покращуючи рівень якості отриманих компонентів [22], а також оцінці стану та спроможності процесу [24]. Варто зазначити, що використання методики *6SIGMA* для управління та оптимізації виробничого процесу може суттєво покращити рівень його якості [25].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Необхідно зауважити, що вплив використання вторинних полімерних композиційних матеріалів на параметри й показники процесу, а особливо з багатокомпонентних відходів, досліджений недостатньо. Це зумовлює необхідність проведення комплексних досліджень процесу лиття під тиском та аналізу впливових факторів при переробці відходів мультикомпонентних полімерних матеріалів.

Мета дослідження – аналіз впливу основних технологічних параметрів на стабільність процесу лиття під тиском при повторному використанні нерозділених мультикомпонентних відходів полімерних композицій PA6GF30/PC.

Виклад основного матеріалу. Як вихідний матеріал у роботі були використані некондиційні мультикомпонентні деталі автомобілів, отримані на гібридній литтєвій машині «*ENGEL e-victory 200H/80V/120*». Чорний елемент деталі відливається зі склонаповненого поліаміду (PA6GF30) марки «*Durethan BG30X*», білий елемент із полікарбонату (PC) марки «*Makrolon 2407*». Подрібнення деталей здійснювали механічним методом на подрібнювачі «*Rapid 200*».

Зовнішній вигляд деталі та подрібненого грануляту, наведені на рис. 1.



Рис. 1. Загальний вигляд полімерного мультикомпонентного виробу та подрібненого матеріалу, отриманого з нього

Згідно зі співвідношенням компонентів у початковому зразку (90/10 мас.%), після механічної переробки отримували суміш частинок з нерозділених компонентів PA6GF30/PC. Отриманий гранулят висушували на сушарці «*Farragtech SCARD 35*» при температурі 110°C впродовж 4,5 год. Далі, гранулят використовували для лиття чорного компоненту деталі без додавання оригінальної полімерної композиції PA6GF30 на тій же самій литтєвій машині «*ENGEL*». Статистичні дані для визначення стабільності процесу та литтєвої машини отримували з програмного модуля «*Q Table*», який входить у програмне забезпечення системи керування «*Engel CC300*». Дані досліджень були оброблені методом *6SIGMA* з отриманням відповідних результатів стабільності процесу.

Порівнюючи основні властивості окремих компонентів суміші матеріалів, можна бачити, що вихідні полімерні компоненти (PA6GF30 та PC) мають суттєві відмінності таких фізико-механічних властивостей як модуль пружності та ударна в'язкість. Здебільшого таку відмінність можна пояснити наявністю в поліаміді 30 мас.% скловолокнистого наповнювача. Водночас PA6GF30 має порівняно широкий діапазон температур переробки (270-290 °C), граничні відмінності верхньої межі яких на 10 °C менші за PC. Це дає можливість безпечно провести експеримент без потенційних втрат якості продукту.

Відливання деталей з отриманої суміші багатокомпонентних відходів полімерних композиційних матеріалів здійснювали на стандартних серійних параметрах технологічного процесу лиття під тиском з подальшою оцінкою та їх частковим коригуванням для досягнення оптимальної стабільності процесу та рівня якості. При цьому було встановлено, що якість отриманих деталей із подрібнених полімерних відходів відповідає основним критеріям якості та специфікаціям замовника: візуальним (без пошкоджень та із відповідною структурою, наповненою, без додаткових елементів чи облоїв), тактильним (вмонтовано в готовий виріб та перевірено відчуття перемикування) та геометричним (відповідність до креслення). Це свідчить про те, що незначне коригування процесу в повному обсязі задовольняє всім вимогам до якості компонентів.

У процесі дослідження встановлено статистично значущі зміни за середнім значенням двох показників процесу лиття під тиском, а саме тиску впорскування (P) та подушки розплаву (C) для вторинної суміші PA6GF30/PC у порівнянні з використанням первинного PA6GF30 (табл. 1, рис. 2).

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз змін показників технологічного процесу в розрізі циклів

№ циклу	Тиск впорскування, бар (РА6GF30)	Тиск впорскування, бар (РА6GF30/PC)	Різниця, %	Подушка розплаву, см ³ (РА6GF30)	Подушка розплаву, см ³ (РА6GF30/PC)	Різниця, %
1	885,4	982	11,92	4,83	4,76	19,25
2	890,8	985,5	11,53	4,81	5,81	20,79
3	897,3	986,6	9,95	4,85	5,48	12,99
4	886,7	977,8	10,27	4,84	5,85	20,87
5	897,4	980,0	9,23	4,56	5,68	24,56
6	887,4	988,1	11,35	4,92	5,98	21,54
7	890,0	986,9	10,89	4,51	5,72	26,83
8	887,8	985,1	10,96	4,60	5,94	29,13
9	900,3	981,1	8,97	4,73	5,73	21,14
10	891,4	982,7	10,24	4,91	5,91	20,37
X_{ср}	891,5	985,3	10,52	4,76	5,79	21,66
С_{мк}	2,68	2,38	-11,19	1,67	1,62	-2,99
С_{рк}	2,17	2,11	-2,77	2,02	2,01	-0,50

Із результатів, представлених у табл. 1, видно, що середнє значення тиску впорскування для суміші РА6GF30/PC склало 985,3 бар, а подушки розплаву становило 5,79 см³, що на 10,5 та 21,7 % відповідно більше в порівнянні з первинним РА6GF30.

Відмінності, що продемонстровані на рис. 2 можна пояснити тим, що при температурних умовах процесу лиття (280-290⁰С), PC має більшу в'язкість за РА6GF30, що обумовлює зростання тиску впорскування та подушки розплаву (об'єму розплаву, який має залишатись до кінця фази підживлення перед головкою шнека) для суміші РА6GF30/PC.

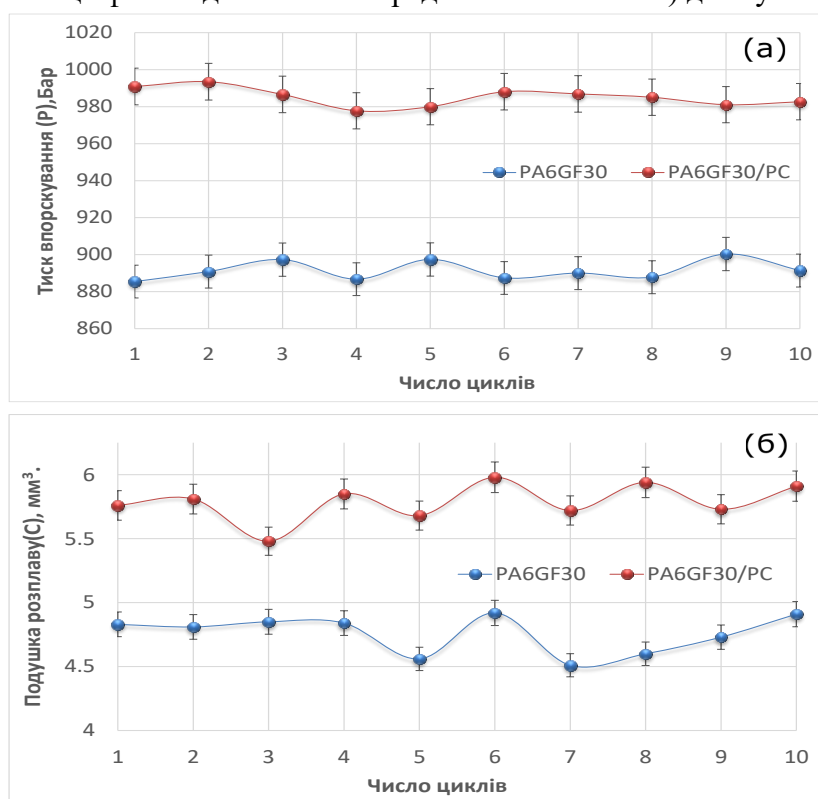


Рис. 2. Динаміка зміни тиску впорскування (а) та подушки розплаву (б) у розрізі циклів при переробці композицій РА6GF30 та РА6GF30/PC

У табл. 2 наведені відмінності параметрів процесу лиття під тиском композицій РА6GF30 та РА6GF30/PC.

Було з'ясовано, що вторинна суміш РА6GF30/PC потребує більшого часу (на 12,5 %) та температури (на 37,5 %) сушки в порівнянні з РА6GF30 (табл. 2). Такі зміни, ймовірно, пов'язані з кумулятивним гігроскопічним ефектом, який проявляється в суміші.

Таблиця 2 – Основні та відкориговані параметри процесу лиття під тиском композицій PA6GF30 та PA6GF30/PC

Параметри процесу	PA6GF30	PA6GF30/PC	Різниця, %
Мінімальний час сушки, год	4,0	4,5	+12,5
Температура сушки, °C	80,0	110,0	+37,5
I зона нагріву циліндру, °C	290,0	290,0	0,0
II зона нагріву циліндру, °C	290,0	290,0	0,0
III зона нагріву циліндру, °C	280,0	280,0	0,0
IV зона нагріву циліндру, °C	275,0	275,0	0,0
Час впорскування, с	0,67	0,67	0,0
Час дозування, с	4,0	4,0	0,0
Час дії тиску підживлення, с	2,5	2,5	0,0
Час охолодження, с	9,0	9,0	0,0
Час циклу, с	24,5	24,5	0,0
Макс. тиск впорскування, бар	1250	1250	0,0
Протитиск, бар	70	70	0,0
Швидкість впорскування, мм/с	41,0	41,0	0,0
Швидкість підживлення, мм/с	33,0	33,0	0,0
Хід дозування, мм	28,0	28,0	0,0
Об'єм подушки розплаву, мм ³	4,5	5,5	22,2
Швидкість декомпресії, мм/с	5,0	5,0	0,0

У таблиці 2 також показано збільшення для PA6GF30/PC показника подушки розплаву (на 22,2 %), що також пов'язано із підвищенням тиску впорскування з незмінним параметром дії протитиску.

У ході дослідження, було зафіксовано зміни у стабільності роботи машини та процесу. На рис. 3 наведені результати вимірювань зміни тиску впорскування при переробці первинної та вторинної сировини залежно від числа циклів роботи литтєвої машини.

Попри встановлені зміни тиску впорскування, стабільність машини S_{MK} відповідає стандартам галузі ($S_{MK} \geq 1,67$). Для обох композицій (незважаючи на більший розкид при використанні вторинної суміші PA6GF30/PC) значення S_{MK} зазнало статистично значущих змін у сторону зменшення на 11,9 % (табл. 1) та стабілізації впродовж подальших серійних виробничих циклів лиття під тиском.

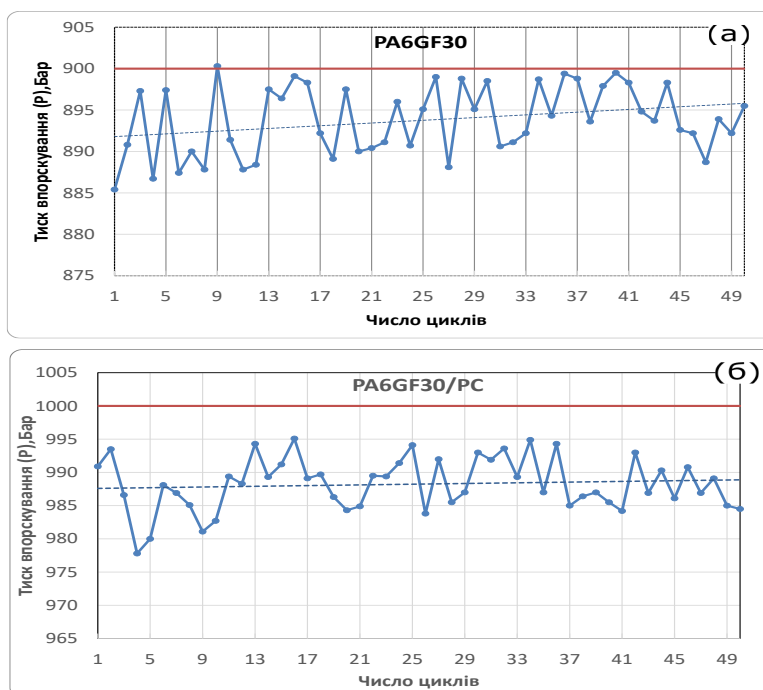


Рис. 3. Стабільність тиску впорскування при переробці первинної (а) та вторинної (б) сировини

На рис. 4 наведені результати вимірювань зміни об'єму подушки розплаву при переробці первинної та вторинної сировини залежно від числа циклів роботи литевої машини. Як можна бачити, стабільність подушки розплаву зазнала незначних змін у процесі для PA6GF30/PC (рис. 4, б) у порівнянні з первинним PA6GF30 (рис. 4, а).

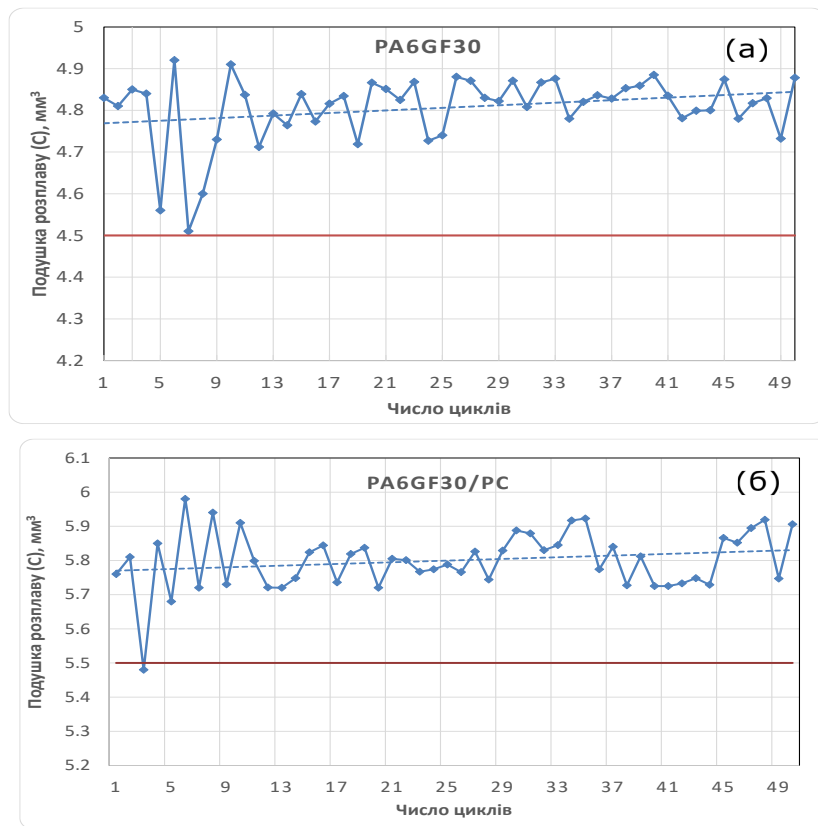


Рис. 4. Стабільність подушки розплаву при переробці первинної (а) та вторинної (б) сировини

На рис. 5 наведені результати статистичного аналізу стабільності процесу лиття по відхиленню розміру деталей при використанні вторинної композиції PA6GF30/PC.

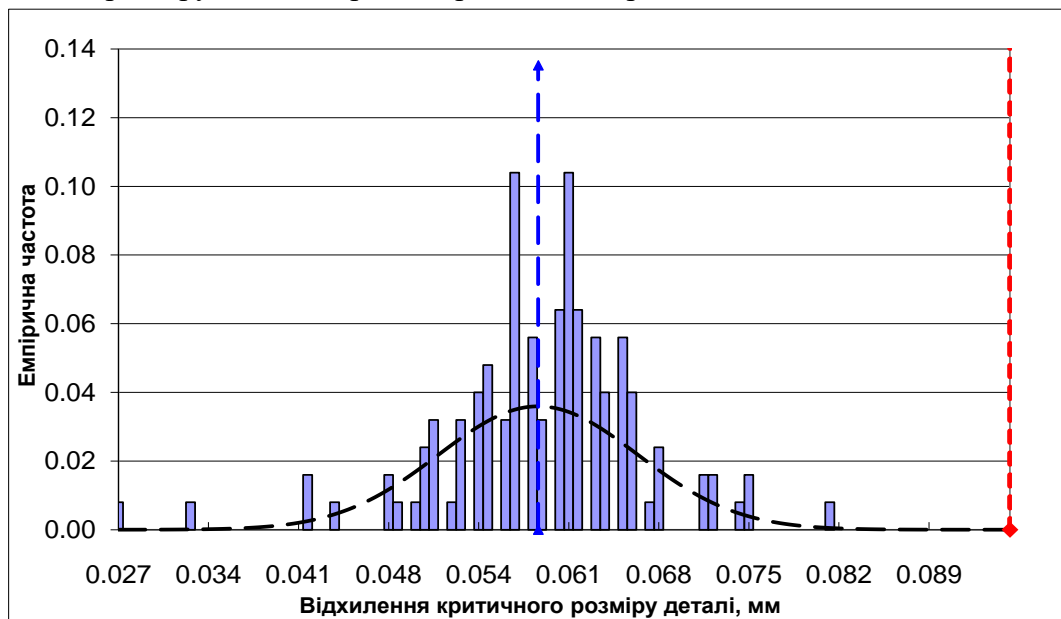


Рис. 5. Гістограма розподілу відхилення критичного розміру деталі при переробці композиції PA6GF30/PC

Вони свідчать, що стабільність процесу лиття не зазнала статистично значимих змін у порівнянні з первинним PA6GF30 та знаходиться в межах допустимих обмежень. Це вказує на придатність вторинної композиції PA6GF30/PC для стабільного процесу лиття під тиском з урахуванням скоригованих технологічних параметрів.

Висновки. Визначено вплив основних технологічних параметрів на стабільність процесу лиття під тиском при повторному використанні нерозділених мультикомпонентних відходів полімерних композицій PA6GF30/PC.

Показано, що використання суміші PA6GF30/PC потребує збільшення часу (на 12,5 %) та температури (на 37,5%) сушки, параметра подушки розплаву (на 22,2 %) у порівнянні з первинним PA6GF30. При цьому інші параметри процесу не зазнали суттєвих змін.

Встановлено, що стабільність процесу лиття при використанні вторинної композиції PA6GF30/PC не зазнала статистично значимих змін у порівнянні з первинним PA6GF30 та знаходиться в межах допустимих обмежень.

Отримані результати доводять можливість повторної переробки мультикомпонентних відходів полімерних композицій методом лиття під тиском. Це може знизити собівартість продукції за рахунок зменшення витрат на сировину, зменшити частку неперероблених полімерних відходів, що своєю чергою позитивно вплине на екологічні аспекти навколишнього середовища.

Список використаних джерел

1. Recent advances in drilling of carbon fiber–reinforced polymers for aerospace applications: a review / Amir Muhammad, et al. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 105.5. Pp. 2289-2308.
2. Froes Francis, Boyer Rodney, Dutta B. Introduction to aerospace materials requirements and the role of additive manufacturing. *Additive manufacturing for the aerospace industry*. Elsevier. 2019. Pp. 1-6.
3. Polymer composite for antistatic application in aerospace / Yadav Ramdayal, et al. *Defence Technology*. 2020. Vol. 16.1. Pp. 107-118.
4. Thiounn Timmy, Smith Rhet C. Advances and approaches for chemical recycling of plastic waste. *Journal of Polymer Science*. 2020. Vol. 58.10. Pp. 1347-1364.
5. Bergqvist Tobias, Lannö Jonathan. Managing Sustainability Transformations: barriers for implementing recycled plastics in the automotive industry. 2020. 56 p.
6. Krause, Michael. Technologies and Innovations for the Plastics Industry: Polymer 2030. *Innovative Technologies for Market Leadership*. Springer, Cham. 2020. Pp. 233-243.
7. Kuzmanović Maja, et al. The effect of injection molding temperature on the morphology and mechanical properties of PP/PET blends and microfibrillar composites. *Polymers*. 2016. Vol. 8.10. Pp. 355.
8. De Kort G. W., Bouvrie L. H. C., Rastogi S., Wilsens C. H. R. M. Thermoplastic PLA-LCP Composites: A Route toward Sustainable, Reprocessable, and Recyclable Reinforced Materials. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 2020. Vol. 8. Pp. 624–631.
9. Sliptsova I., Savchenko B., Sova N., Sliptsov A. Polymer sand composites based on the mixed and heavily contaminated thermoplastic waste. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 111, No. 1. Pp. 012027.
10. Pogrebnyak I. L., Sova N. V., Savchenko B. M., Pakharenko V. A., Moisyuk V. S. A wood-filled composite based on recycled polyethylene terephthalate. Production and properties. *International Polymer Science and Technology*. 2015. Vol. 42(1). Pp. 41-44.
11. Huang M. S., Nian S. C. Robust parameter search for IC tray injection molding using regrind resin. *Journal of Polymer Engineering*. 2020. Vol. 40. Pp. 876–885.
12. Bozzelli J. Injection Molding: Another way to deal with regrind. *Plastics Technology*. 2015. Vol. 61. Pp. 38–41.
13. Datta Janusz, Głowińska Ewa, Włoch Marcin. Mechanical Recycling via Regrinding, Rebonding, Adhesive Pressing, and Molding. *Recycling of Polyurethane Foams*. William Andrew Publishing. 2018. Pp. 57-65.

14. Woo Wan Nee. Optimization Of Injection Molding Parameters For 80: 20 Virgin-Reground Blended ABS Plastic Material. 2018. 24 p.
15. Пристинський С. В., Будащ Ю. О., Ступа В. І., Пустовойт І. О. Особливості переробки наповнених поліамідних композицій методом лиття під тиском. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки*. 2019. С. 71-80.
16. IATF16949:2016 Quality management system requirements for automotive production and relevant service parts organizations. 1st Edition.
17. Chou S., Chen J. Six Sigma-Based Optimization of Shrinkage Accuracy in Injection Molding Processes. *Int. J. Ind. Manuf. Eng.* 2018. Vol. 5, № 3.
18. Dong S., Chunsheng E., Fan B., Danai K., Kazmer D. O. Process-driven input profiling for plastics processing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*. 2007. Vol.129. Pp. 802–809.
19. Prístavka Miroslav, Bujna Marián. Monitoring the capability of production equipment in organization. *Acta technologica agriculturae*. 2014. Vol. 17.2. Pp. 39-43.
20. Automotive quality requirements and process capability in the production of electric motors / Kampker Achim, et al. *2017 7th International Electric Drives Production Conference (EDPC). IEEE*. 2017. Pp. 1-8.
21. Statistical process control in automotive industry / Korenko Maroš, et al. *Acta technologica agriculturae*. 2013. Vol. 16.2. Pp. 39-42.
22. Ambarwati Dewi. Analisis pengendalian kualitas produk injection molding part rivet x menggunakan metode dmaic dan fmea di perusahaan spare part automotive : PhD Thesis. Universitas Mercu Buana Jatisampurna, 2020.
23. De Siqueira, Sílvio Sérgio Silveira. Use of DMAIC and Lean Six Sigma to Reduce Body Defects in an Automotive Factory. *International Joint conference on Industrial Engineering and Operations Management. Springer. Cham*, 2020. Pp. 367-379.
24. Dobránsky Jozef, Pollák Martin, Doboš Zigmund. Assessment of production process capability in the serial production of components for the automotive industry. *Management systems in production engineering*. 2019. Vol. 27.4. Pp. 255-258.
25. A Study on Dimension Optimization of Injection-molded Automotive Bumper by Six Sigma / Kim Joo-Kwon, et al. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*. 2017. Vol. 16.6. Pp. 109-116.

References

1. Aamir, Muhammad, et al. (2019). Recent advances in drilling of carbon fiber–reinforced polymers for aerospace applications: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 105.5, 2289-2308.
2. Froes, Francis, Boyer, Rodney, Dutta, B. (2019). Introduction to aerospace materials requirements and the role of additive manufacturing. *Additive manufacturing for the aerospace industry. Elsevier* (pp. 1-6).
3. Yadav, Ramdayal, et al. (2020). Polymer composite for antistatic application in aerospace. *Defence Technology*, 16.1, 107-118.
4. Thiounn, Timmy, Smith, Rhett C. (2020). Advances and approaches for chemical recycling of plastic waste. *Journal of Polymer Science*, 58.10, 1347-1364.
5. Bergqvist, Tobias, Lannö, Jonathan. (2020). Managing Sustainability Transformations: barriers for implementing recycled plastics in the automotive industry.
6. Krause, Michael. (2020). Technologies and Innovations for the Plastics Industry: Polymer 2030. In: *Innovative Technologies for Market Leadership. Springer, Cham* (pp. 233-243).
7. Kuzmanović, Maja, et al. (2016). The effect of injection molding temperature on the morphology and mechanical properties of PP/PET blends and microfibrillar composites. *Polymers*, 8.10, 355.
8. De Kort, G. W., Bouvrie, L. H. C., Rastogi, S., Wilsens, C. H. R. M. (2020). Thermoplastic PLA-LCP Composites: A Route toward Sustainable, Reprocessable, and Recyclable Reinforced Materials. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 8, 624–631.

9. Sliptsova, I., Savchenko, B., Sova, N., & Sliptsov, A. (2016). Polymer sand composites based on the mixed and heavily contaminated thermoplastic waste. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 111, No. 1, p. 012027). IOP Publishing.
10. Pogrebnyak, I.L., Sova, N.V., Savchenko, B.M., Pakharenko, V.A., & Moisyuk, V.S. (2015). A wood-filled composite based on recycled polyethylene terephthalate. Production and properties. *International Polymer Science and Technology*, 42(1), 41-44.
11. Huang, M. S., Nian, S. C. (2020). Robust parameter search for IC tray injection molding using regrind resin. *Journal of Polymer Engineering*. 40, 876–885.
12. Bozzelli J. (2015). Injection Molding: Another way to deal with regrind. *Plastics Technology*. 61, 38–41.
13. Datta, Janusz, Głowińska, Ewa, Włoch, Marcin. (2018). Mechanical Recycling via Regrinding, Rebonding, Adhesive Pressing, and Molding. *Recycling of Polyurethane Foams*. William Andrew Publishing (pp. 57-65).
14. Woo, Wan Nee. (2018). Optimization Of Injection Molding Parameters For 80: 20 Virgin-Regrind Blended ABS Plastic Material.
15. Prystynskyi, S.V., Budash, Yu.O., Stupa, V.I., Pustovoi, I.O. (2019). Osoblyvosti pererobky napovnenyh poliamidnyh kompozytsii metodom lyttia pid tyskom [Features of processing filled polyamide compositions by injection molding method]. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnologii ta dyzainu. Seriya Tekhnichni nauky – Bulletin of the Kyiv National University of Technology and Design. Series Technical sciences*, (6(140)), 71-80.
16. IATF16949:2016 Quality management system requirements for automotive production and relevant service parts organizations. 1st Edition.
17. Chou S., Chen J. (2018). Six Sigma-Based Optimization of Shrinkage Accuracy in Injection Molding Processes. *Int. J. Ind. Manuf. Eng.*, 5(3).
18. Dong, S., Chunsheng, E., Fan, B., Danai, K., Kazmer, D.O. (2007). Process-driven input profiling for plastics processing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 129, 802–809.
19. Prístavka, Miroslav, Bujna, Marián. (2014). Monitoring the capability of production equipment in organization. *Acta technologica agriculturae*, 17.2, 39-43.
20. Kampker, Achim, et al. (2017). Automotive quality requirements and process capability in the production of electric motors. *2017 7th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*. IEEE (pp. 1-8).
21. Korenko, Maroš, et al. (2013). Statistical process control in automotive industry. *Acta technologica agriculturae*, 16.2, 39-42.
22. Ambarwati, Dewi. (2020). *Analisis pengendalian kualitas produk injection molding part rivet x menggunakan metode dmaic dan fmea di perusahaan spare part automotive* [PhD Thesis]. Universitas Mercu Buana Jatisampurna.
23. De Siqueira, Sílvia Sérgio Silveira. (2020). Use of DMAIC and Lean Six Sigma to Reduce Body Defects in an Automotive Factory. *International Joint conference on Industrial Engineering and Operations Management*. Springer, Cham (pp. 367-379).
24. Dobránsky Jozef, Pollák Martin, Doboš Zigmund. (2019). Assessment of production process capability in the serial production of components for the automotive industry. *Management systems in production engineering*, 27.4, 255-258.
25. Kim, Joo-Kwon, et al. (2017). A Study on Dimension Optimization of Injection-molded Automotive Bumper by Six Sigma. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 16.6, 109-116.

Отримано 17.11.2022

Serhii Prystynskiy¹, Yurii Budash², Viktoriia Plavan³, Roman Shuliak⁴

¹Postgraduate of the Department of Applied Ecology, Technology of Polymers and Chemical Fibers
Kyiv National University of Technology and Design (Kyiv, Ukraine)

E-mail: s.prystynskiy@outlook.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1387-8352>

²Doctor of technical sciences, professor

Professor of the Department of Applied Ecology, Technology of Polymers and Chemical Fibers
Kyiv National University of Technology and Design (Kyiv, Ukraine)

Email: budash.yo@knutd.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8718-1577>

ResearcherID: [H-6012-2018](https://orcid.org/0000-0001-8718-1577). SCOPUS Author ID: [9134072100](https://orcid.org/0000-0001-8718-1577)

³Doctor of Technical Sciences, Professor

Head of the Department of Applied Ecology, Technology of Polymers and Chemical Fibers
Kyiv National University of Technology and Design (Kyiv, Ukraine)

Email: plavan.vp@knutd.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9559-8962>

ResearcherID: [I-5852-2015](https://orcid.org/0000-0001-9559-8962). SCOPUS Author ID: [6603130130](https://orcid.org/0000-0001-9559-8962)

⁴Process engineer in the injection molding department

Kostal Ukraine Ltd (Pereiaslav, Ukraine)

E-mail: r.shuliak@kostal.com

THE INFLUENCE OF THE MAIN TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON THE STABILITY OF INJECTION MOLDING PROCESS OF MULTICOMPONENT WASTE POLYMER COMPOSITIONS

In the work, a comparative analysis of the main technological parameters, as well as the stability of the injection molding process of the primary glass-filled (30 %) polyamide 6 and the secondary composition of the mixture of glass-filled polyamide 6/polycarbonate was carried out.

Non-standard multi-component car parts obtained on the hybrid casting machine "ENGEL" were used as the starting material. The black element of the part is cast from glass-filled polyamide (PA6GF30), the white element - from polycarbonate (PC). Grinding of parts was carried out by a mechanical method on a "Rapid 200" shredder. After mechanical processing, a mixture of particles was obtained from unseparated PA6GF30/RS components in the ratio of 90/10 wt.%. The granulate was used to cast the black component of the part without adding the original polymer composition on the "ENGEL" casting machine. Statistical data for determining the stability of the process and the machine were obtained using the Q Table software module. The results of the research were processed by the 6SIGMA method to obtain the appropriate indicators of process stability.

It is shown that the use of the secondary mixture requires an increase in the drying time and temperature, the parameter of the melt cushion in comparison with the primary material. At the same time, other parameters of the process did not undergo significant changes. At the same time, the stability of the casting process when using the secondary composition did not undergo statistically significant changes compared to the primary material and is within the permissible limits. The obtained results prove the possibility of reprocessing multicomponent waste polymer compositions by injection molding. This can reduce the cost of production by reducing the cost of raw materials, reduce the share of unprocessed polymer waste, and have a positive impact on the ecological aspects of the environment.

Keywords: polyamide 6; polycarbonate; injection molding; polymer composition; secondary processing; process stability, validation.

Table: 2. Fig.: 5. References: 25.

Лариса Рибчук

доктор філософії за спеціальністю 181 «Харчові технології»,
старший викладач кафедри технології і організації ресторанного господарства
Державний торговельно-економічний університет (Київ, Україна)

E-mail: l.a.rybchuk@knu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6282-7295>. Scopus ID: [57221081256](https://scopus.org/57221081256)

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЦЕПТУРНОГО СКЛАДУ ЦУКРОВИХ ПАСТ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ШЛЯХОМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Стабільно зростаючий попит серед виробників кондитерської продукції мають цукрові пасти (мастики), що обґрунтовано їх невисокою собівартістю. Проте вітчизняні традиційні технології тривалий час не удосконалювались, тому не повною мірою задовольняють потребу споживачів, у результаті чого актуальним стає розробка інноваційних технологій цукрових паст.

В Україні великий попит на цукрові пасти задовольняється переважно імпортними поставками, тому на сьогодні виробники мають вирішувати важливі питання щодо конкурентної спроможності. Виникає потреба пошуку нових рецептурних компонентів у складі цукрових паст, що створює передумови для розширення асортименту оздоблювальних напівфабрикатів багатофункціонального призначення з покращеним нутрієнтним складом і виробництво вітчизняної конкурентоздатної продукції із заданими функціонально-технологічними властивостями.

У наукових публікаціях показана перспективність використання молочної сироватки сухої демінералізованої в технологіях оздоблювальних напівфабрикатів для кондитерських виробів.

Відсутні критерії оцінювання структурних характеристик цукрових паст багатофункціонального призначення. Не вивчений вплив молочної сироватки сухої демінералізованої на функціонально-технологічні властивості цукрових паст, що формують напрями їх технологічного використання.

Розробити критерії оцінювання структурних характеристик цукрових паст багатофункціонального призначення, що формують напрями їх технологічного використання. Оптимізувати рецептурний склад цукрових паст, що дозволить розробити технологію оздоблювальних напівфабрикатів багатофункціонального призначення з бажаними (заданими) функціонально-технологічними властивостями.

Розроблені еталонні шкали сенсорних дескрипторів відповідно до напрямку технологічного використання цукрових паст. Згідно розроблених дескрипторів проаналізовано структурні характеристики цукрових паст. Визначено раціональні концентрації молочної сироватки сухої демінералізованої та додаткових компонентів, що дозволяють отримати бажані функціонально-технологічні характеристики. Шляхом математичного моделювання оптимізовано рецептурний склад цукрових паст. Розроблені й затверджені рецептури та технологічні інструкції на нові види оздоблювальних напівфабрикатів багатофункціонального призначення.

Встановлено, що молочна сироватка суха демінералізована у концентрації 20, 30, 50 % (від маси сухих компонентів) при масовій частці гліцерину 5 % дозволяє отримати бажані структурно-технологічні характеристики консистенції цукрових паст в залежності від напрямку їх технологічного використання.

Ключові слова: цукрові пасти; багатофункціональність використання; молочна сироватка суха демінералізована; гліцерин.

Табл.: 8. Рис.: 3. Бібл.: 10.

Актуальність теми. Цукрові оздоблювальні напівфабрикати для кондитерських виробів мають стабільно зростаючий попит серед виробників кондитерської продукції. Найбільш поширеними серед них є цукрові пасти (мастики), що пояснюється передусім їхньою невисокою собівартістю. Проте цукрові пасти не повною мірою задовольняють потреби споживачів, переважно через високу енергетичну цінність, глікемічний індекс, коефіцієнт солодкості, а також низьку харчову і біологічну цінність, адже на 90 % складаються з цукру.

Традиційна технологія і рецептурний склад цукрових паст тривалий час не удосконалювалась. Така паста не має відповідних функціонально-технологічних властивостей для створення сучасних оздоблювальних напівфабрикатів, що використовуються для декорування кондитерських виробів. Тому актуальним є розробка інноваційних технологій цукрових паст.

Постановка проблеми. Станом на сьогодні український ринок представлений широким асортиментом цукрових паст закордонного виробництва з різними функціонально-технологічними властивостями, залежно від технологічного використання, зокрема: цукрова паста ТМ «Herco Foods Bvba» (Бельгія), Vizon (Туреччина), «Blue Bead» (Туреччина), ТМ «Katsan Ovalette» (Туреччина), ТМ "Мастер Мартини» (Італія),

«Madame Loulou» (Італія), ТМ «Modacor» (Італія), ТМ "Steensma" (Швеція), «Альта Топдекор» ТМ "IPSA" (Італія), ТМ «Zeelandia» (Нідерланди), Петтинис (Швеція), МоделПласт (Італія), «Стіато» (Ізраїль), Вандерпласт (Італія), «Дама Топ» PWR (Італія) тощо. Залежно від структурних характеристик консистенції кондитерських паст встановлено 3 основних напрями їх технологічного використання: 1 – цукрові пасти, що використовуються для покриття кондитерських виробів (ПКВ), де основним показником консистенції є розтяжність; 2 – цукрові пасти, що використовуються для виготовлення квітів, як декоративного елементу для борошняних кондитерських виробів (ВЦК), де основним показником консистенції є рівноцінне співвідношення розтяжності та формувальної здатності; 3 – цукрові пасти, що використовуються для моделювання фігурних виробів, як декоративного елементу для борошняних кондитерських виробів (МФВ), де основним показником консистенції є формувальна здатність. Великий попит на цю продукцію задовольняється переважно імпортними поставками, в той час встановлений лише один український виробник – ПП «Фабрика кондитерських прикрас» ТМ «Украза» (м. Рівне). Тому на сьогодні вітчизняні виробники мають вирішувати важливі питання щодо конкурентної спроможності.

Виникає потреба пошуку нових рецептурних компонентів у складі цукрових паст, що створює передумови для розширення асортименту оздоблювальних напівфабрикатів багатофункціонального призначення з покращеним нутрієнтним складом і виробництво вітчизняної конкурентоздатної продукції із заданими функціонально-технологічними властивостями.

Аналіз досліджень та публікацій. За результатами аналізу літературних джерел перспективним інгредієнтом для нових видів цукрових оздоблювальних напівфабрикатів є молочна сироватка суша демінералізована (МССД) [1; 2]. Це обумовлено її високою харчовою [3] і біологічною цінністю, низькою калорійністю, прийнятними сенсорними характеристиками та сприятливими функціонально-технологічними властивостями [4; 5].

З метою підтвердження доцільності використання МССД у технологіях цукрових паст проведено експериментальні дослідження. За результатами досліджень підтверджена можливість внесення МССД у концентрації 50 % від загальної маси сухих компонентів (цукрова пудра). Встановлена концентрація дозволяє збалансувати нутрієнтний склад цукрових паст. Покращується амінокислотний скор, загальний міст білка збільшується більш ніж у 7 разів. Суттєво змінюється вуглеводний склад, вміст сахарози зменшується на 65 %, вміст лактози складає 30 %, що сприяє зниженню енергетичної цінності цукрових паст на 25 %. Мінеральний склад цукрових паст покращується за рахунок збільшення вмісту калію, кальцію, фосфору, магнію. Серед вітамінів спостерігається суттєве зростання холіну (В4), пантотенової кислоти (В5), біотину (В7) [6].

Також встановлений позитивний вплив МССД на структурно-механічні властивості цукрових паст. Досліджено, що МССД у концентрації 50 % дозволяє суттєво покращити формувальну здатність цукрових паст. Зокрема, за рахунок зниження пружно-еластичних деформаційних характеристик та підвищення пластичних [7].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Відсутні критерії оцінювання структурних характеристик цукрових паст багатофункціонального призначення. Не вивчений вплив МССД на функціонально-технологічні властивості цукрових паст, що формують напрями їх технологічного використання.

Мета статті: Розробити критерії оцінювання структурних характеристик цукрових паст багатофункціонального призначення, що формують напрями їх технологічного використання. Оптимізувати рецептурний склад цукрових паст, що дозволить розробити технологію оздоблювальних напівфабрикатів багатофункціонального призначення з бажаними (заданими) функціонально-технологічними властивостями.

Виклад основного матеріалу. Враховуючи основні характеристики консистенції цукрових паст розроблені диференційовані еталонні шкали сенсорних дескрипторів (табл. 1). Показники консистенції характеризуються 4 дескрипторами: 1 – міцність та щільність, 2 – м'якість, 3 – розтяжність, 4 – липкість, що мають різні коефіцієнти вагомості, в залежності від напряму технологічного використання цукрових паст. Для ПКВ співвідношення коефіцієнтів вагомості за показником консистенції становить 0.1:0.1:0.7:0.1, для ВЦК – 0.2:0.2:0.3:0.3, для МФВ – 0.3:0.2:0.2:0.3. Здатність до формування та ступінь виявлення даного показника визначає технологічність цукрових паст. Коефіцієнт вагомості даного показника у співвідношенні до коефіцієнта вагомості консистенції і визначає напрямок технологічного використання кондитерських паст, що становить для ПКВ 0.6:0.4, ВЦК – 0.5:0.5, МФВ – 0.4:0.6.

Таблиця 1 – Диференційовані еталонні шкали сенсорної оцінки консистенції цукрових паст

Комплексні показники	Коефіцієнт вагомості			Одиничні показники	Коефіцієнт вагомості			Характеристики	Рівень якості бали
	ПКВ	ВЦК	МФВ		ПКВ	ВЦК	МФВ		
Консистенція	0,6	0,5	0,4	Щільність, міцність	0,1	0,2	0,3	Помірно ущільнена	5
								Ущільнена	4
								Щільна	3
								Дуже щільна	2
								Тверда	1
				Липкість	0,1	0,3	0,3	Середня	5
								Помірна	4
								Задовільна	3
								Висока	2
								Надто висока	1
				М'якість	0,1	0,2	0,2	Помірно м'яка	5
								М'якувата	4
								Помірно тверда	3
								Тверда	2
								Надто тверда	1
				Розтяжність	0,7	0,3	0,2	Відмінна	5
								Добра	4
								Середня	3
								Слабка	2
								Дуже слабка	1
–	1,0	1,0	1,0	–	–	–	–		
Здатність до формування	0,4	0,5	0,6	Ступінь виявлення	1,0	1,0	1,0	Відмінно	5
								Добре	4
								Задовільно	3
								Незадовільно	2
								Погано	1
–	1,0	1,0	1,0	–	–	–	1,0	–	

Коефіцієнти вагомості визначали експертним методом за умов:

$$\sum_{i=1}^n m_{ij} = 1, \quad (1)$$

де m_{ij} – коефіцієнт вагомості i -го показника j -ої групи ($m_i > 0$);

n – число показників якості продукції.

Коефіцієнт вагомості m_{ij} визначали за формулою:

$$m_{ij} = \frac{m_{ijcp}}{\sum_{i=1}^n m_{ijcp}}, \quad (2)$$

де m_{ijcp} – середнє арифметичне значення оцінок експертів i -го показника якості j -ої групи.

Середнє значення m_{ijcp} визначали за формулою:

$$m_{ijcp} = \frac{1}{n} \sum_{z=1}^N m_{ijz}, \quad (z = 1, 2, 3 \dots N), \quad (3)$$

де N – кількість експертів;

m_{ijz} – оцінка i -го показника якості j -ої групи, даного z -м експертом ($z = 1, 2, 3 \dots N$) [8; 9].

З метою дослідження впливу МССД на структурні характеристики консистенції цукрових паст її додавали у концентрації 10...60 % від маси цукрової пудри (табл. 2). За контроль прийнято цукрову пасту виготовлену за традиційною технологією [10].

Таблиця 2 – Рецептурний склад модельних композицій цукрових паст з МССД, на 100 г

Найменування сировини	Контроль	Зразки з додаванням МССД, %					
		10	20	30	40	50	60
Цукрова пудра	93,0	84,0	73,0	65,0	56,0	46,0	37,0
Патока	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Желатин	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Вода	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
МССД	-	9,0	20,0	28,0	37,0	47,0	56,0

Аналіз структурних характеристик консистенції модельних композицій цукрових паст проводили на кафедрі технології і організації ресторанного господарства Державного торговельно-економічного університету (ДТЕУ, Україна) комісією у складі 15 осіб, які володіли професійними знаннями, сенсорною здатністю, властивостями оцінюваного продукту й технологією його виробництва (табл. 3).

Таблиця 3 – Структурні показники консистенції модельних композицій цукрових паст з МССД

Найменування показника	Коефіцієнт вагомості			Характеристика	Номер дескриптора	Коефіцієнт вагомості			Контроль	Зразки з додаванням МССД, %					
	ПКВ	ВЦК	МФВ			ПКВ	ВЦК	МФВ		10	20	30	40	50	60
Консистенція	0,6	0,5	0,4	Щільність, міцність	1	0,1	0,2	0,3	4,4	4,2	4,0	3,8	3,6	3,4	3,2
				Липкість	2	0,1	0,3	0,3	4,4	4,2	4,0	3,8	3,6	3,4	3,0
				М'якість	3	0,1	0,2	0,2	4,2	4,1	3,8	3,6	3,4	3,2	3,0
				Розтяжність	4	0,7	0,3	0,2	3,5	4,5	5,0	4,9	4,8	4,4	4,0
Сумарна оцінка за дескрипторами ПКВ									3,75	4,40	4,68	4,55	4,42	4,08	3,72
Підсумкова оцінка за показником ПКВ									2,25	2,64	2,80	2,73	2,65	2,44	2,23
Сумарна оцінка за дескрипторами ВЦК									4,09	4,27	4,36	4,12	3,92	3,66	3,34
Підсумкова оцінка за показником ВЦК									2,04	2,13	2,18	2,06	1,96	1,83	1,67
Сумарна оцінка за дескрипторами МФВ									4,18	4,24	4,16	4,0	4,52	3,8	3,46
Підсумкова оцінка за показником МФВ									1,67	1,69	1,66	1,60	1,80	1,52	1,38
Здатн, до формув,	0,4	0,5	0,6	Ступінь виявлення	1	1,0	1,0	1,0	4,2	4,4	4,6	4,8	4,9	5,0	3,2
Сумарна оцінка за дескрипторами ПКВ									4,2	4,4	4,6	4,8	4,9	5,0	3,2
Підсумкова оцінка за показником ПКВ									1,68	1,76	1,84	1,92	1,96	2,0	1,28
Сумарна оцінка за дескрипторами ВЦК									4,2	4,4	4,6	4,8	4,9	5,0	3,2
Підсумкова оцінка за показником ВЦК									2,1	2,2	2,3	2,4	2,45	2,5	1,6
Сумарна оцінка за дескрипторами МФВ									4,2	4,4	4,6	4,8	4,9	5,0	3,2
Підсумкова оцінка за показником МФВ									2,52	2,64	2,76	2,88	2,94	3,0	1,92
Загальна оцінка ПКВ									3,93	4,4	4,64	4,65	4,61	4,44	3,51
Загальна оцінка ВЦК									4,14	4,33	4,48	4,46	4,41	4,33	3,27
Загальна оцінка МФВ									4,19	4,33	4,42	4,48	4,74	4,52	3,3

За результатами дослідження встановлений позитивний вплив МССД на структурні характеристики консистенції цукрових паст у концентрації 10...50 %. Збільшення МССД до концентрації 20 % дає змогу покращити показники розтяжності цукрових паст, що у 1,4 раза більше в порівнянні з контролем. З підвищенням концентрації МССД знижується м'якість та підвищується міцність і щільність, у результаті чого покращується формувальна здатність. Підвищення концентрації МССД понад 50 % недоцільно через суттєве підвищення липкості, втрати формувальної здатності, за рахунок надмірного зміцнення і ущільнення структури.

Відповідно до розроблених дескрипторів найкращі структурні характеристики встановлені для ПКВ при концентрації МССД 20 %, для ВЦК – 30 %, для МФВ – 50 %.

Проте суттєве підвищення липкості ускладнює роботу з пастами, за для регулювання даного показника додавали гліцерин. З метою визначення раціональної концентрації гліцерину в рецептурному складі цукрових паст з МССД (ПКВ, ВЦК, МФВ), його додавали в концентрації 6 % від загальної маси (табл. 4).

Таблиця 4 – Рецептурний склад модельних композицій цукрових паст з МССД, на 100 г

Найменування сировини	Зразки з додаванням гліцерину, %					
	1	2	3	4	5	6
Цукрова паста ПКВ						
Цукрова пудра	63,0	62,0	61,0	60,0	59,0	58,0
Патока	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Желатин	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Вода	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
МССД	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
Гліцерин	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
Цукрова паста ВЦК						
Цукрова пудра	53,0	52,0	51,0	50,0	49,0	48,0
Патока	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Желатин	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Вода	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
МССД	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
Гліцерин	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
Цукрова паста МФВ						
Цукрова пудра	33,0	32,0	31,0	30,0	29,0	28,0
Патока	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Желатин	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Вода	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
МССД	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Гліцерин	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0

Досліджено вплив концентрації гліцерину на структурні характеристики консистенції модельних композицій цукрових паст з МССД (табл. 5) згідно з розробленою шкалою (табл. 1).

За результатами органолептичного аналізу встановлений позитивний вплив гліцерину у концентрації 1...5 % на консистенцію модельних композицій цукрових паст з МССД. З підвищенням концентрації гліцерину знижується липкість, міцність та щільність, відповідно підвищується м'якість, що характеризує пасту, як більш піддатливу в роботі. Проте підвищення концентрації гліцерину понад 5 % сприяє втраті формувальної здатності паст, за рахунок утворення надто м'якої консистенції. Збільшення вмісту гліцерину призводить до зниження показників розтяжності, що має негативні наслідки в першу чергу для цукрових паст ПКВ, оскільки це основний показник консистенції відповідно до напрямку технологічного призначення. За результатами аналізу структурних характеристик консистенції модельних композицій цукрових паст з МССД встановлено найкращі показники при концентрації гліцерину 5 %, де загальний бал відповідно до розроблених дескрипторів становить 4.88 для ПКВ, 4.85 – ВЦК, 4.92 – МФВ.

За результатами попередніх досліджень методом компромісних рішень визначено зони раціональних концентрацій МССД та гліцерину у складі цукрових паст відповідно до напрямку їх технологічного використання.

Таблиця 5 – Структурні показники консистенції модельних композицій цукрових паст з МССД та гліцерином

Найменування показника	Коефіцієнт вагомості	Характеристика	Номер дескриптора	Коефіцієнт вагомості	Зразки з додаванням гліцерину, %					
					1	2	3	4	5	6
Цукрова паста ПКВ										
Консистенція	0,6	Щільність, міцність	1	0,1	4,0	4,2	4,4	4,8	5,0	5,0
		Липкість	2	0,1	4,0	4,4	4,6	4,8	5,0	5,0
		М'якість	3	0,1	3,8	4,0	4,4	4,8	5,0	5,0
		Розтяжність	4	0,7	5,0	5,0	5,0	4,9	4,8	4,4
Сумарна оцінка за дескрипторами ПКВ					4,68	4,76	4,84	4,86	4,87	4,58
Підсумкова оцінка за показником ПКВ					2,80	2,85	2,90	2,91	2,92	2,74
Здатність до формування	0,4	Ступінь виявлення	1	1,0	4,6	4,8	4,9	4,9	4,9	3,5
Сумарна оцінка за дескрипторами ПКВ					4,6	4,8	4,9	4,9	4,9	3,5
Підсумкова оцінка за показником ПКВ					1,84	1,92	1,96	1,96	1,96	1,4
Загальна оцінка ПКВ					4,64	4,77	4,86	4,87	4,88	4,14
Цукрова паста ВЦК										
Консистенція	0,5	Щільність, міцність	1	0,2	3,8	4,0	4,4	4,8	5,0	5,0
		Липкість	2	0,3	3,8	4,0	4,4	4,8	5,0	5,0
		М'якість	3	0,2	3,6	3,8	4,0	4,6	5,0	5,0
		Розтяжність	4	0,3	4,9	4,6	4,4	4,2	4,0	3,8
Сумарна оцінка за дескрипторами ВЦК					4,09	4,14	4,32	4,58	4,7	4,64
Підсумкова оцінка за показником ВЦК					2,04	2,07	2,16	2,29	2,35	2,32
Здатність до формування	0,5	Ступінь виявлення	1	1,0	4,8	4,9	4,9	5,0	5,0	4,8
Сумарна оцінка за дескрипторами ВЦК					4,8	4,9	4,9	5,0	5,0	4,8
Підсумкова оцінка за показником ВЦК					2,4	2,45	2,45	2,5	2,5	2,4
Загальна оцінка ВЦК					4,44	4,52	4,61	4,79	4,85	4,72
Цукрова паста МФВ										
Консистенція	0,4	Щільність, міцність	1	0,3	3,4	3,8	4,0	4,4	4,8	5,0
		Липкість	2	0,3	3,4	3,8	4,2	4,8	5,0	5,0
		М'якість	3	0,2	3,2	3,8	4,2	4,8	5,0	5,0
		Розтяжність	4	0,2	4,4	4,6	4,8	4,6	4,4	4,2
Сумарна оцінка за дескрипторами МФВ					3,56	3,96	4,26	4,64	4,82	4,84
Підсумкова оцінка за показником МФВ					1,40	1,58	1,70	1,85	1,92	1,93
Здатність до формування	0,6	Ступінь виявлення	1	1,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Сумарна оцінка за дескрипторами МФВ					5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	4,6
Підсумкова оцінка за показником МФВ					3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	2,76
Загальна оцінка МФВ					4,40	4,58	4,70	4,85	4,92	4,69

Побудовано графічні залежності показників консистенції від вмісту компонентів для кожного типу цукрових паст у системі із трьома шкалами координат (рис. 1–3).

Визначені змінні фактори, критерії оптимізації, а також знайдена область визначення факторів. Обмеження заданих факторів та їх позначення наведені в таблиці 6.

Таблиця 6 – Параметри пошуку оптимальних компромісних областей масової частки МССД та гліцерину в цукрових пастах

Позначення	Фактор	Одиниця вимірювання	Обмеження по осях		
$Y_{1ПКВ}, Y_{1ВЦК}, Y_{1МФВ}$	Міцність	Бали	$3,5 \geq Y_{1ПКВ} \geq 4,5$	$4 \geq Y_{1ВЦК} \geq 3$	$5 \geq Y_{1МФВ} \geq 4$
$Y_{2ПКВ}, Y_{2ВЦК}, Y_{2МФВ}$	Розтяжність	Бали	$3,0 \geq Y_{2ПКВ} \geq 4,0$	$4 \geq Y_{2ВЦК} \geq 3$	$5 \geq Y_{2МФВ} \geq 4$
Y_3	Здатність до формування	Бали	$Y_3 \geq 4,5$	$Y_3 \geq 4,5$	$Y_3 \geq 4,0$

Для отримання математичних описів залежностей за показниками, проведено регресійний аналіз одержаного масиву експериментальних даних. У результаті отримано математичні рівняння, що описують вплив компонентів цукрових паст на їх показники консистенції.

Математичні моделі за показником міцності:

$$Y1_{ПКВ_3} = 8,4 \times 10^{0,30x} - 63,4; \quad Y1_{ПКВ_4} = 8,3 \times 10^{0,30x} - 28,2;$$

$$Y1_{ВЦК_3} = 8,5 \times 10^{0,33x} - 52,1; \quad Y1_{ВЦК_4} = 8,6 \times 10^{0,34x} - 102,7;$$

$$Y1_{МФВ_3} = 8,5 \times 100,33x - 32,2; \quad Y1_{МФВ_4} = 8,6 \times 100,34x - 87,7.$$

Математичні моделі за показником розтяжності:

$$Y2_{ПКВ_4} = -1,04x^2 + 4,57x + 3,11; \quad Y2_{ПКВ_3} = -0,95x^2 + 5,07x + 4,06;$$

$$Y2_{ВУК_5} = -1,08x^2 + 5,48x + 3,44; \quad Y2_{ВУК_4} = -0,62x^2 + 4,06x + 4,02;$$

$$Y2_{МФВ_5} = -0,85x^2 + 4,24x + 1,21; \quad Y2_{МФВ_4} = -0,62x^2 + 4,06x + 4,02.$$

Математичні моделі за показником здатності до формування:

$$Y3_{ПКВ} = -0,22x^2 + 1,53x + 4,19;$$

$$Y3_{ВУК} = -0,19x^2 + 1,47x + 3,46;$$

$$Y3_{МФВ_4,5} = -0,17x^2 + 1,47x + 3,4.$$

Отримані математичні моделі дали можливість графічно визначити оптимальне співвідношення компонентів розроблених цукрових паст (рис. 1–3). Параметри оптимізації рецептурних компонентів цукрових паст згідно з напрямком технологічного призначення (табл. 7).

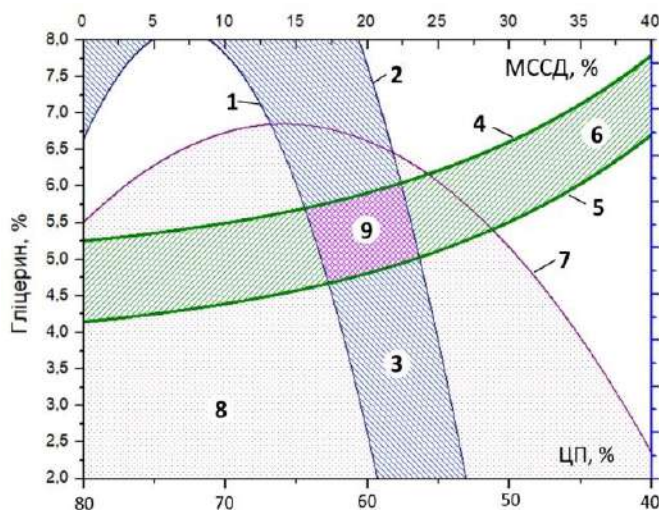


Рис. 1. Компромісні оптимальні області вмісту гліцерину та МССД у цукрових пастах ПКВ

- 1 – (рівність 18, за умови $Y1_{ПКВ} = 46$); 2 – (рівність 18, за умови $Y1_{ПКВ} = 56$);
 3 – ($46 \geq Y1_{ПКВ} \geq 56$); 4 – (рівність 20, за умови $Y2_{ПКВ} = 46$); 5 – (рівність 20, за умови $Y2_{ПКВ} = 56$); 6 – ($46 \geq Y2_{ПКВ} \geq 56$); 7 – (рівність 22, за умови $Y3_{ПКВ} = 4.56$);
 8 – ($Y3_{ПКВ} \geq 4.56$); 9 – область компромісних значень X_1 , X_2 та X_3

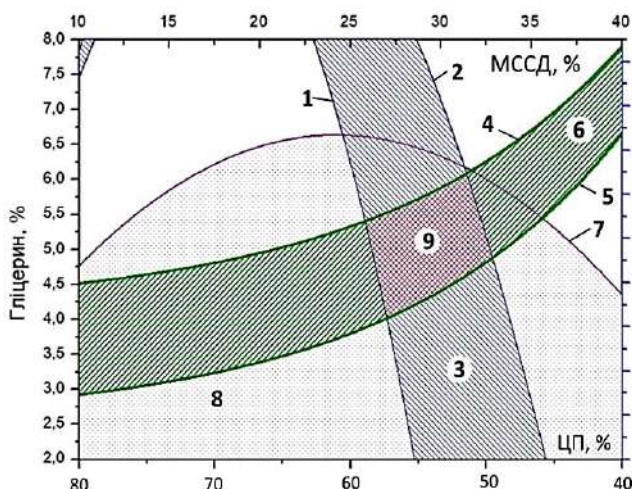


Рис. 2. Компромісні оптимальні області вмісту гліцерину та МССД у цукрових пастах ВЦК

- 1 – (рівність 18, за умови $Y1_{ВЦК} = 4б$); 2 – (рівність 18, за умови $Y1_{ВЦК} = 5б$);
- 3 – ($4б \geq Y1_{ВЦК} \geq 5б$); 4 – (рівність 20, за умови $Y2_{ВЦК} = 4б$); 5 – (рівність 20, за умови $Y2_{ВЦК} = 5б$); 6 – ($4б \geq Y2_{ВЦК} \geq 5б$); 7 – (рівність 22, за умови $Y3_{ВЦК} = 4.5б$);
- 8 – ($Y3_{ВЦК} \geq 4.5б$); 9 – область компромісних значень X_1, X_2 та X_3

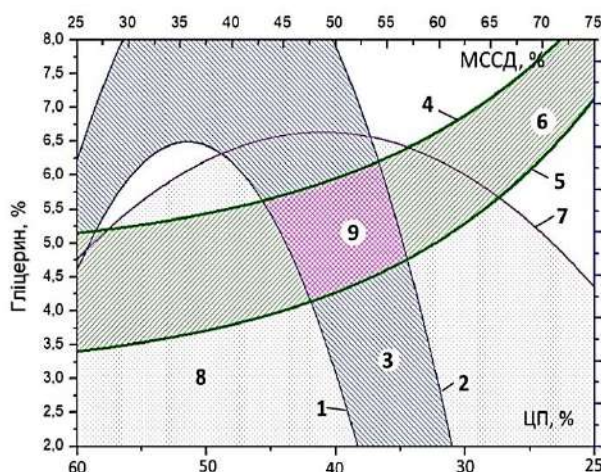


Рис. 3. Компромісні оптимальні області вмісту гліцерину та МССД у цукрових пастах МФВ

- 1 – (рівність 1, за умови $Y1_{МФВ} = 4б$); 2 – (рівність 2, за умови $Y1_{МФВ} = 5б$);
- 3 – ($4б \geq Y1_{МФВ} \geq 5б$); 4 – (рівність 3, за умови $Y2_{МФВ} = 4б$); 5 – (рівність 20, за умови $Y2_{МФВ} = 5б$); 6 – ($4б \geq Y2_{МФВ} \geq 5б$); 7 – (рівність 4, за умови $Y3_{МФВ} = 4.5б$);
- 8 – ($Y3_{МФВ} \geq 4.5б$); 9 – область компромісних значень X_1, X_2 та X_3

Таблиця 7 – Параметри оптимізації рецептурних компонентів цукрових паст

Зразки	Гліцерин, %			МССД, %		
	мінімальне значення	максимальне значення	оптимальне значення	мінімальне значення	максимальне значення	оптимальне значення
ПКВ	4,8	5,3	5,0	17,5	22,7	20,0
ВЦК	4,8	5,3	5,0	27,5	33,7	30,0
МФВ	4,9	5,4	5,0	44,8	51,1	50,0

Оптимальні значення обрані шляхом заокруглення оптимізованих значень в межах компромісних областей, з метою полегшення дозування рецептурних компонентів цукрових паст у виробничих умовах. Розрахунок рецептури цукрової пасту проводили з урахуванням попереднього обґрунтування співвідношень рецептурних компонентів (табл. 8).

Таблиця 8 – Рецептурний склад цукрових паст з МССД та гліцерином

Найменування сировини	Витрати сировини на 10 кг готової продукції, г			
	Цукрова паста (контроль)	Цукрова паста ПКВ (дослід)	Цукрова паста ВЦК (дослід)	Цукрова паста МФВ (дослід)
Цукрова пудра	9300	5900	4900	2900
Патока мальтозна	500	500	500	500
Желатин	100	100	100	100
Вода	1000	1000	1000	1000
МССД	-	2000	3000	5000
Гліцерин	-	500	500	500
Вихід	10000	10000	10000	10000

За результатами досліджень розроблені рецептури (РЦУ) і технологічні інструкції (ТІУ) на виробництво цукрових паст з МССД та затверджені об'єднанням підприємств хлібопекарської промисловості «Всеукраїнська асоціація пекарів»: ТІУ 10.71-01566117-001:2018 «Цукрова паста з молочною сироваткою сухою демінералізованою для покриття кондитерських виробів», ТІУ 10.71-01566117-002:2018 «Цукрова паста з молочною сироваткою сухою демінералізованою для виготовлення квітів», ТІУ 10.71-01566117-003:2018 «Цукрова паста з молочною сироваткою сухою демінералізованою для моделювання фігурних виробів», ТІУ 10.71-01566117-004:2018.

Висновки. Розроблені еталонні шкали сенсорних дескрипторів відповідно до напряму технологічного використання цукрових паст. Згідно з розробленими дескрипторами проаналізовано їхні структурні характеристики. Встановлено, що молочна сироватка суха демінералізована у концентрації 20, 30, 50 % (від маси сухих компонентів) при масовій частці гліцерину 5 % дозволяє отримати бажані структурно-технологічні характеристики консистенції цукрових паст в залежності від напряму їх технологічного використання. Шляхом математичного моделювання оптимізовано рецептурний склад цукрових паст. Розроблені й затверджені рецептури та технологічні інструкції на нові види оздоблювальних напівфабрикатів багатофункціонального призначення.

Список використаних джерел

1. Talebi S. Fouling and in-situ cleaning of ion-exchange membranes during the electro dialysis of fresh acid and sweet whey / S. Talebi // Journal of food Engineering. – 2018. – Vol. 5(555). – Pp. 185-196.
2. George Q. Chen. Removal of lactic acid from acid whey using electro dialysis / George Q. Chen. // Separation and Purification Technology. – 2016. – № 158. – Pp. 230-237.
3. Ana G. Ortiz Quezada. Optimization of conditions for Greek style yogurt acid whey demineralization and its effects on filterability / Ana G. Ortiz Quezada // International Dairy Journal. – 2021. – Vol. 123. – Pp. 105-163.
4. Romanchuk I. Physical-chemical composition and technological properties of demineralized milk whey received by membrane methods / Romanchuk I. // Agricultural science and practice. – 2018. – № 5. – Pp. 33-39.
5. Merkel A. The impact of integrated nanofiltration and electro dialytic processes on the chemical composition of sweet and acid whey streams / A. Merkel // Journal of Food Engineering. – 2021. – Vol. 298. – Pp. 110-125.
6. Кравченко М. Нові види оздоблювальних кондитерських напівфабрикатів / М. Кравченко, Л. Рибчук // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – 2019. – Vol. 3(19). – С. 255-271.
7. Кравченко М. Структурно – механічні властивості цукрових паст / М. Кравченко, Л. Рибчук // Товари і ринки. – 2018. – № 3(27). – С. 77-90.
8. Методи визначення параметрів вагомості показників якості продукції / Т. З. Бубела, Т. Г. Бойко, Є. В. Походило, П. Г. Столярчук // Методи та прилади контролю якості. – 2007. – № 18. – С. 20-23.

9. Гришук Ю. С. Основи наукових досліджень / Ю. С. Гришук. Харків : НТУ «ХПІ», 2008. 232 с.
10. Гуленко Л. Рецептури: торти, тістечка бісквітні, перекладенці, рулети / Л. Гуленко, Е. Сібілева, Л. Животкевич. Київ : Укрхлібпром, 2013. 600 с.

References

1. Talebi, S. (2018). Fouling and in-situ cleaning of ion-exchange membranes during the electro dialysis of fresh acid and sweet whey. *Journal of Food Engineering*, 5(555), 185-196.
2. George, Q. Chen. (2016). Removal of lactic acid from acid whey using electro dialysis. *Separation and Purification Technology*, (158), 230-237.
3. Ana, G. Ortiz Quezada. (2021). Optimization of conditions for Greek style yogurt acid whey demineralization and its effects on filterability. *International Dairy Journal*, (123), 105-163.
4. Romanchuk, I. (2018). Physical-chemical composition and technological properties of demineralized milk whey received by membrane methods. *Agricultural science and practice*, (5), 33-39.
5. Merkel, A. (2021). The impact of integrated nanofiltration and electro dialytic processes on the chemical composition of sweet and acid whey streams. *Journal of Food Engineering*, (298), 110-125.
6. Kravchenko, M., Rybchuk, L. (2019). Novi vydy ozdobiuvalnykh kondyterskykh napivfabrykativ [New types of decorative confectionery semi-finished products]. *Pratsi Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu – Proceedings of the Tavri State University of Agrotechnology*, 3(19), 255-271.
7. Kravchenko, M., Rybchuk, L. (2018). Strukturno – mekhanichni vlastyvoli tsukrovyykh past [Structural and mechanical properties of sugar pastes]. *Tovary i rynky – Goods and markets*, 3(27), 77-90.
8. Bubela, T.Z., Boyko, T.G., Pokhodylo, E.V., Stolyarchuk, P.G. (2007). Metody vyznachennia parametriv vahomosti pokaznykiv yakosti produktsii [Methods of determining the weighting parameters of product quality indicators]. *Metody ta prylady kontroliu yakosti – Quality control methods and devices*, (18), 20-23.
9. Hryshuk, Yu.S. (2008). *Osnovy naukovykh doslidzhen [Fundamentals of scientific research]*. NTU “KhPI”.
10. Gulenko, L., Sibileva, E., Zhivotkevich, L. (2013). *Retseptury: torty, tistechka biskvitni, perekkladentsi, rulety [Recipes: cakes, sponge cakes, rolls, rolls]*. Ukrhlibprom.

Отримано 23.11.2022

UDC 637.344:664.68

Larysa Rybchuk

PhD, Senior Lecturer of the Department of Technology and Organization of the Restaurant Industry
State University of Trade and Economics (Kyiv, Ukraine)

E-mail: l.a.rybchuk@knute.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6282-7295>. Scopus ID: [57221081256](https://scopus.com/authid/detail.uri?authorid=57221081256)

OPTIMIZATION OF THE RECIPE COMPOSITION OF MULTIFUNCTIONAL SUGAR PASTE BY MATHEMATICAL MODELING

Relevance of the topic of research. Sugar pastes (mastics) have a steadily growing demand among confectionery manufacturers, which is justified by their low cost. However, domestic traditional technologies have not been improved for a long time, so they do not fully satisfy the needs of consumers, as a result of which the development of innovative sugar paste technologies becomes urgent.

Statement of the problem: In Ukraine, the high demand for sugar pastes is met mainly by imported supplies, so today manufacturers have to solve important issues regarding competitiveness. There is a need to find new recipe components in the composition of sugar pastes, which creates prerequisites for expanding the assortment of decorative semi-finished products of multifunctional purpose with improved nutrient composition and the production of domestic competitive products with specified functional and technological properties.

Analysis of recent research and publications. The scientific publications show the perspective of using dry demineralized whey in the technologies of finishing semi-finished products for confectionery products.

Highlighting unexplored parts of the general problem. There are no criteria for evaluating the structural characteristics of multifunctional sugar pastes. The influence of MSSD on the functional and technological properties of sugar pastes, which shape the directions of their technological use, has not been studied.

Setting objectives. To develop criteria for evaluating the structural characteristics of multifunctional sugar pastes, which shape the direction of their technological use. To optimize the recipe composition of sugar pastes, which will allow to develop the technology of decorative semi-finished products of multifunctional purpose with the desired (given) functional and technological properties.

Outline of the main material: Developed reference scales of sensory descriptors according to the direction of technological use of sugar pastes. According to the developed descriptors, the structural characteristics of sugar pastes were analyzed. Rational concentrations of dry demineralized whey and additional components, which allow obtaining the desired functional and technological characteristics, have been determined. The recipe composition of sugar pastes was optimized by means of mathematical modeling. Developed and approved recipes and technological instructions for new types of multifunctional decorative semi-finished products.

Conclusions according to the article. It was established that dry whey demineralized in a concentration of 20, 30, 50 % (from the weight of dry components) with a mass fraction of 5 % glycerin allows to obtain the desired structural and technological characteristics of the consistency of sugar pastes, depending on the direction of their technological use.

Key words: sugar pastes; multifunctional use; dry demineralized whey; glycerin.

Table: 8. Fig.: 3. References: 10.

Мирослава Коваль¹, Наталія Романенко²

¹кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімічних технологій та водоочищення
Черкаський державний технологічний університет (Черкаси, Україна)

E-mail: m.koval@chdту.edu.ua. ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9680-8052>

²доктор технічних наук, професор, професор кафедри дизайну

Черкаський державний технологічний університет (Черкаси, Україна)

E-mail: romanenko_n_g@ukr.net. ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2161-5736>

**ПРИНЦИП ПОВТОРНОГО ВИКОРИСТАННЯ СТИЧНИХ ВОД
У ПРОЦЕСАХ ФАРБУВАННЯ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Обґрунтовано принцип повторного використання стічних вод фарбувально-опоряджувального виробництва в процесах фарбування текстильних матеріалів. Наведені результати експериментальних досліджень, апробованих у реальних виробничих умовах фарбувально-опоряджувального виробництва, доводять достовірність висунутого принципу в межах критерію оптимізації забарвлення тканини (інтенсивності забарвлення в порівнянні з еталоном). Уперше наведені алгоритми можливого повторного використання стічної води (очищеної та концентрованої) у процесах фарбування текстильних матеріалів.

Ключові слова: фарбувально-опоряджувальне виробництво; стічна вода; фарбування; текстильні матеріали; барвник; цеоліт; адсорбція.

Табл.: 3. Рис.: 7. Бібл.: 15.

Актуальність теми дослідження. Підприємства текстильної галузі легкої промисловості є самостійними структурними підрозділами із замкненим технологічним циклом переробки рослинної й тваринної сировини, хімічних і синтетичних волокон у тканину, надання їй відповідних споживацьких якостей та дизайну. Увесь комплекс опорядження і кінцевої обробки текстильної продукції здійснюється на фарбувально-опоряджувальних виробництвах текстильних підприємств.

Конкурентоспроможність текстильної продукції визначається її економічними та екологічними показниками. Текстильна продукція, яка нині випускається в Україні, характеризується високою собівартістю, значними витратами таких ресурсів, як вода, барвники, допоміжні речовини, теплова та електрична енергія. Це викликає необхідність у вирішенні науково-практичного завдання щодо створення нових ресурсозберігальних технологій фарбування текстильних матеріалів, які б забезпечували зниження собівартості текстильної продукції та зменшення екологічного впливу на водні ресурси країни.

Постановка проблеми. Відомо [1], що традиційні технології фарбування текстильних матеріалів пов'язані як зі споживанням матеріальних та енергетичних ресурсів, так і з утворенням відходів. У процесах опорядження тканин одним із основних матеріалів, що широко використовується, є вода. Близько 300 м³ води споживається на кожен тону текстильного матеріалу. Це споживання залежить від типу волокон, ткацької структури полотна, природи процесів опорядження та обладнання. Стоки фарбувально-опоряджувальних виробництв, де здійснюються процеси підготовки тканини до друку й фарбування (відварювання, біління тощо), власне процеси фарбування, кінцеве оздоблення містять суміш залишків синтетичних барвників та допоміжних речовин, усереднюють, направляючи до біологічного очищення [2]. Однак навіть після цього, маючи невелике біохімічне окислення, синтетичні барвники є серйозною небезпекою. Вони належать до отрут місцевої дії, яка має токсичний та гальмуючий вплив на організм [3]. Тож, актуальною є проблема очищення мультикомпонентної промислової стічної води до того ступеня очищення, щоб в подальшому використовувати її повторно як оборотну в процесі фарбування тканини.

Створюючи ризики для навколишнього водного середовища через його забруднення, концентрована стічна вода, утворена безпосередньо після процесу фарбування тканини з обладнання періодичної дії, що містить у середньому 25-40 % текстильних барвників – це якісна вторинна сировина, яка може бути повторно використана в технології фарбування текстильних матеріалів.

Треба зазначити, що однією з важливих стратегічних цілей розвитку Черкаської області на період 2021-2027 роки є «Висока якість життя: екологія, безпека, інфраструктура» [4, с. 62]. Нагальне питання цієї стратегії – створення технологій, які б забезпечували зниження собівартості продукції та зменшення екологічного навантаження під час її виготовлення та обробки. До розв'язання вищезазначеної проблематики доєдналися науковці Черкаського державного технологічного університету та фахівці ПрАТ «Черкаський шовковий комбінат» («ЧШК») (м. Черкаси, Україна).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існують дослідження, які висвітлюють адсорбційне очищення стічної води, забрудненої барвниками, використовуючи, як адсорбент, активоване вугілля, бентонітову глину, цеоліти тощо. Так, активованим вугіллям доцільніше адсорбувати ті барвники, які мають невелику молекулярну масу і легше проникають в пори сорбенту [5]. Недоліком таких досліджень є використання дороговартісного сорбенту та використання для очищення лише модельних розчинів барвників, а не реальної стічної води виробництва.

Науковці Херсонського національного технічного університету [6], досліджуючи процеси очищення стічних вод після фарбування активними барвниками природним сорбентом А сорбційним, коагуляційним та хімічним способами, довели, що повторне використання очищених стічних вод можливе в процесі фарбування тканини активними барвниками, але при цьому суттєво знижується якість пофарбованих тканин.

Мамитова А.Д. (Південно-Казахський державний університет, Казахстан) досліджувала адсорбційні властивості активованої шкарлупи кісточок у процесі очищення стічних вод фарбувально-опоряджувального виробництва [7]. Визначено, що запропонований адсорбент гарно знижує кольоровість стічної води, але вода потребує доочищення, використання коагулянтів.

Професор М. С. Мальований із науковцями Львівської політехніки [8] проводили дослідження щодо використання природних сорбентів бентонітів та палигорскітів у процесі очищення модельних розчинів текстильного барвника аніонного червоного. Вибір для досліджень саме цих адсорбентів зумовлений їхньою невеликою вартістю в порівнянні з іншими, водночас адсорбційна ємність достатня для використання сорбентів в природоохоронних технологіях. Встановлено вигляд кінетичної кривої у випадку використання для цього процесу різних типів природних сорбентів.

Дослідження щодо вивчення адсорбційних властивостей природного цеоліту описано в наукових роботах [9; 10]. Відомо, що для покращення адсорбційної здатності цеоліту, його попередньо потрібно кислотно модифікувати. Так, Ю. І. Тарасевич [11, с. 69-70] рекомендує проводити хімічну модифікацію прожареного цеоліту 0,3 н розчином хлоридної кислоти.

Отже, саме адсорбційне очищення відносно недорогими природними матеріалами дозволяє очистити промислові стічні води з метою повернення їх у технологічний процес фарбування.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Аналіз фахових видань за останні п'ять років та незначна кількість публікацій за темою показали, що проблема повторного використання стічної води у процесах фарбування текстильних матеріалів досліджувалася недостатньо, що обґрунтовує актуальність роботи, практичну перспективність і значущість отриманих експериментальних результатів.

Метою експериментальних досліджень є отримання емпіричних результатів, що доводять можливість повторного використання адсорбційно очищених та концентрованих стічних вод у технологіях фарбування текстильних матеріалів, створення нових алгоритмів процесу фарбування тканини, що прогнозовано призведе до ресурсозбереження та захисту довкілля.

Виклад основного матеріалу. Досліджувалися два шляхи повторного використання стічної води в процесі фарбування тканин:

- використання усередненої стічної води фарбувально-опоряджувального виробництва, очищеної адсорбційним способом із використанням природних сорбентів;
- використання концентрованої стічної води, утвореної безпосередньо після процесу фарбування тканини з обладнання періодичної дії.

Експериментальні дослідження щодо адсорбційного очищення стічної води та підготовки її до фарбування включали два етапи:

- 1) фізико-хімічний аналіз стічних вод;
- 2) вибір сорбенту.

Для можливого очищення промислових стічних вод фарбувально-опоряджувального виробництва, досліджувалася адсорбційна дія двох природних сорбентів: бентонітової глини (с. Дашуківка Черкаської обл., Україна) та цеоліту (с. Сокирниця, Закарпатської обл., Україна). Фото сорбентів представлені на рис. 1.



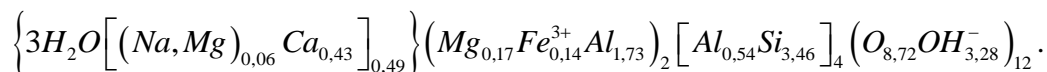
а

б

Рис. 1. Природні адсорбенти:

а – бентонітова глина фракцією 2–5 мм, б – цеоліт фракцією 2–5 мм

Бентонітові глини (бентоніти) — це тонкодисперсні високопластичні гірські породи смектитового складу (головним чином монтморилоніт та бейделіт), яким у різному ступені властиві зв'язуючі та сорбційні властивості. Фізико-хімічними дослідженнями встановлено, що глини Дашуківського родовища Черкаської області – світло коричневі, без запаху сірководню, мають вологість 57 %, напругу зсуву 821,59 Па. За хімічним складом водна витяжка бентонітів відноситься до сульфатно-гідрокарбонатного магнієво-кальцієвого-натрієвого типу або складного катіонного складу з мінералізацією 0,26 г/дм³. Зразки глини відзначаються високими значеннями питомої теплоємності (2,75 кДж/(кг·К)), об'ємної теплоємності (3,60 кДж/(кг·К)) та високою поглинальною здатністю, що і відображено високим значенням коефіцієнта адсорбції (0,98). Хімічна формула монтморилоніту бентонітової проби має вигляд [12]:



Цеоліти є природними водними алюмосилікатами, що містять оксиди лужних чи лужноземельних металів. Ці адсорбенти відрізняються регулярною структурою пор, розміри яких подібні з розмірами молекул, що поглинаються. Особливість цеолітів полягає в тому, що адсорбційні поверхні з'єднані між собою комірками певного діаметра, через які можуть проникати тільки молекули меншого розміру. Сорбент володіє підвищеною пористістю, що додає матеріалу високих гідродинамічних характеристик. Пориста структура цеоліту містить активні обмінні центри й зумовлює унікальні адсорбційні, катіонообмінні та каталітичні властивості. Природний цеоліт (сокирніт) Сокирницького родовища Закарпатської області (Україна) має мінеральний склад: клиноптилоліт (65-80 %),

монтморилоніт (2-4 %), кварц (до 10 %), плагіоклаз (5-10 %), карбонат (3%), гідрослюда (1-3%). Загальна молекулярна формула має вигляд [13]: $Mx/n[(Al_2O_3)_x(SiO_2)_y]WH_2O$.

Дослідженню підлягали нативні та термічно активовані сорбенти. Сорбцію усередненої стічної води здійснювали двома способами: з використанням лопатевої електричної мішалки та за допомогою колонки іонітового типу. Ступінь очищення стічної води визначали фотоколориметричним методом дослідження з подальшими математичними розрахунками відповідно до основного закону світлопоглинання Бугера-Ламберта-Бера. Одержані результати наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Ступінь очищення усередненої стічної води досліджуваними адсорбентами

Природний адсорбент	Ступінь очищення стічної води, %			
	нативний адсорбент		термічно активований адсорбент	
	Спосіб очищення за допомогою лопатевої мішалки	спосіб очищення за допомогою колонки іонітового типу	спосіб очищення за допомогою лопатевої мішалки	спосіб очищення за допомогою колонки іонітового типу
Бентонітова глина	22,7	18,3	38,9	21,1
Цеоліт	16,5	23,1	43	71,6

Графічні форми наведених даних з таблиці 1 представлені діаграмами на рисунках 2, 3.

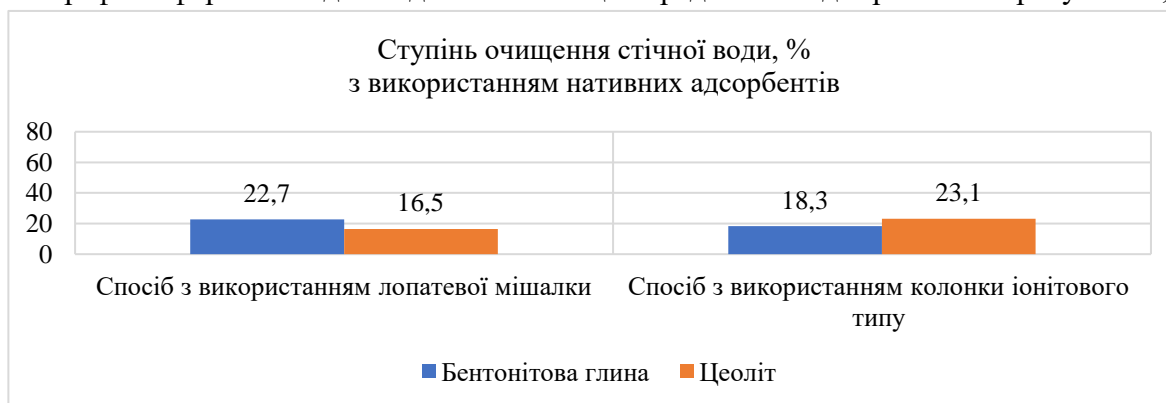


Рис. 2. Ступінь очищення стічної води з використанням нативних природних адсорбентів

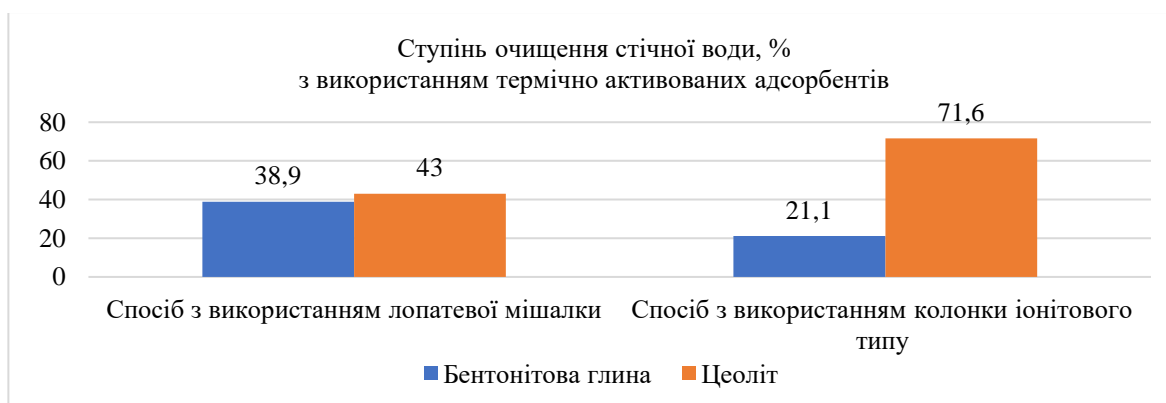


Рис. 3. Ступінь очищення стічної води з використанням термічно активованих природних адсорбентів

За результатами досліджень можна зробити висновок, що при застосуванні природних сорбентів для очищення промислових стічних вод, цеоліти мають кращу адсорбційну здатність, порівняно з бентонітовими глинами. Проте ефективність очищення на рівні

71,6 % досить низька для повторного використання очищених стічних вод як технологічних у процесі фарбування текстильних матеріалів. З метою більш глибокого та повного очищення, термічно активованій цеоліт піддавали кислотній модифікації, що призвело до ступеня очищення стічної води цеолітом 91 % [14]. Саме така очищена вода була використана повторно як оборотна в технології фарбування текстильних матеріалів.

Експериментальні дослідження щодо підготовки очищеної стічної води до фарбування включали такі етапи:

- 1) фізико-хімічний аналіз очищеної стічної води;
- 2) порівняльний аналіз показників очищеної та пом'якшеної технологічної води з подальшим визначенням інтенсивності забарвлення;
- 3) визначення відповідності пофарбованих зразків еталонним параметрам і показникам якості одержаних забарвлень.

Процес очищення стічної води здійснювали через шар нерухомого кислотно модифікованого сорбенту цеоліту з подальшою коагуляцією та флокуляцією до ступеня очищення, прийняттого до використання в технологіях фарбування тканини [14; 15]. Очищену стічну воду аналізували та порівнювали з технологічною пом'якшеною водою фарбувально-опоряджувального виробництва.

Повторне використання очищеної адсорбційним шляхом усередненої стічної води здійснювалося для фарбування поліефірної тканини дисперсними барвниками. Фарбування поліефірної тканини артикула 033 виробництва ПрАТ «ЧШК» здійснювали періодичним способом на лабораторній фарбувальній машині «Ahiba nuance top speed» (США) барвником дисперсним темно-синім 3 відповідно до технологічного циклу. Колірні характеристики одержаних забарвлень наведені в таблиці 2. На рисунку 4 зображені фото одержаних пофарбованих зразків тканини.

Таблиця 2

Колірні характеристики пофарбованої тканини «Поліефір» (арт. 033) барвником дисперсним темно-синім 3 порівняно з існуючою технологією ПрАТ «ЧШК»

Водні умови фарбування	Світлість dL	Відтінок (червоно-зелений) dA	Відтінок (жовто-синій) dB	Кольорова відмінність dE*	Інтенсивність забарвлення, % відповідно до еталона (100%)
Технологія з повторним використанням стічної води	-0,01	+0,05 червоніший	-0,19 більш насичений синій	0,2	99,9

Примітка. Кольорова відмінність – математичне уявлення, що дає змогу чисельно виразити відмінність між двома кольорами в колориметрії. dE не має перевищувати 2, що приблизно відповідає мінімально помітній для людського ока відмінності між кольорами.

Якість та стійкість одержаних забарвлень визначалися шляхом їх порівняння з еталоном (зразки ПрАТ «ЧШК») та визначенням стійкості фарбування згідно з чинними державними стандартами України (ГОСТ 9733.0-83, ГОСТ 9733.27-83, ГОСТ 9733.4-83 «Шкала сірих еталонів»). Стійкість забарвлення вимірювали на приладі «Stainingtester» (Угорщина). Стійкість забарвлення отриманих зразків у порівнянні з еталоном, бали: сухе тертя – 2/2; мокре тертя – 2/2; дія мила – 4/4.

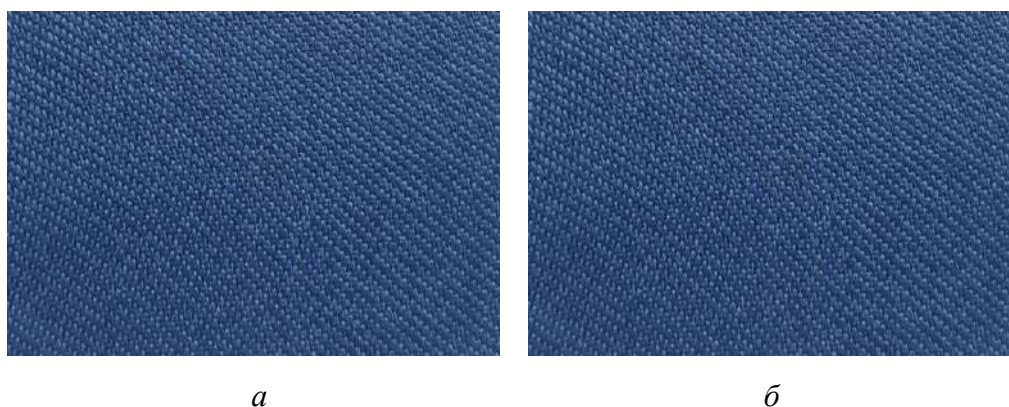


Рис. 4. Зразки пофарбованої тканини «Поліефір» (арт. 033) барвником дисперсним темно-синім 3: а – за існуючою технологією; б – з використанням адсорбційно очищеної стічної води

Алгоритм технологічних дій, за якими пропонується здійснювати процес фарбування текстильних матеріалів із повторним використанням стічних вод адсорбційно очищених промислових стоків, наведений на рисунку 5.

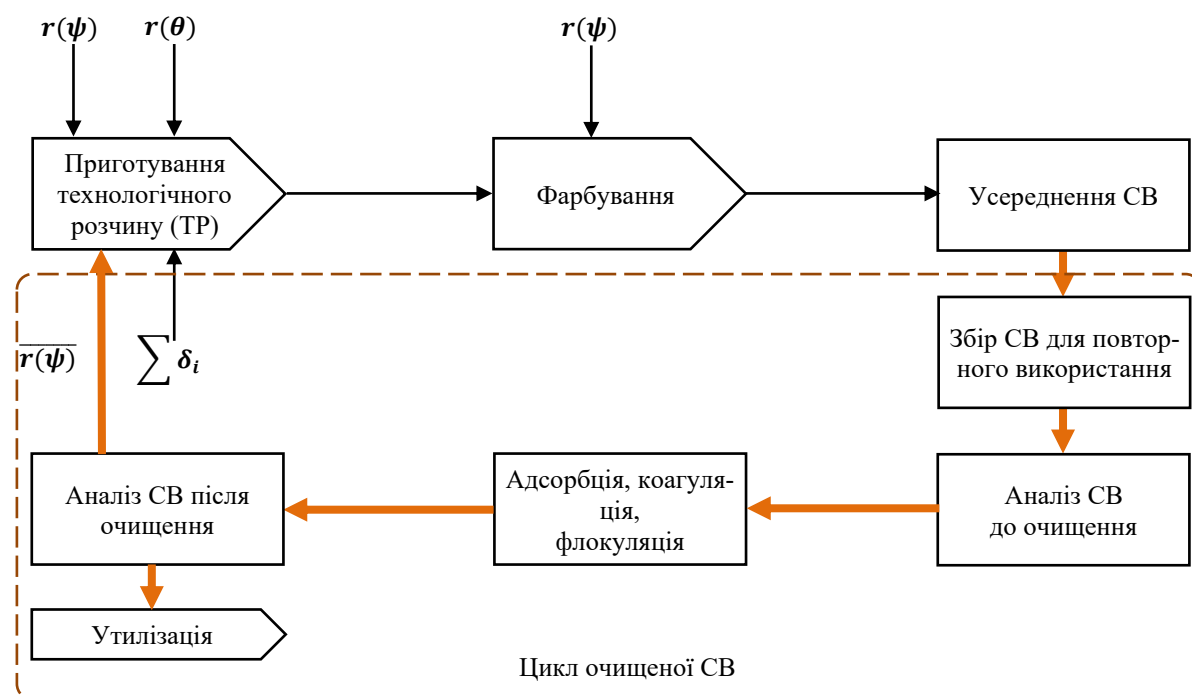


Рис. 5. Алгоритм процесу фарбування тканини із застосуванням принципу повторного використання стічною водою (СВ), очищеною способом адсорбції:

$r(\psi)$ – керуюча дія початкового використання ресурсу води; $r(\theta)$ – керуюча дія початкового використання ресурсу барвника; $\overline{r(\psi)}$ – керуюча дія циклічного використання ресурсу води; $\overline{r(\theta)}$ – керуюча дія циклічного використання ресурсу барвника; $\sum \delta_i$ – керуюча дія сукупності допоміжних речовин

Отримані результати за стійкістю фарбування знаходяться в межах норми. Увесь масив експериментальних даних містить результати кількісних і якісних показників фарбування тканин дисперсними, прямими та активними барвниками.

Другий спосіб повторного використання стічної води полягає у використанні концентрованих стічних вод з обладнання періодичної дії, де мають місце залпові скиди.

Після плюсування тканини фарбувальним розчином і забезпечення відповідного кольору згідно з технологічним режимом, коли сорбція барвника волокном досягла максимуму, залишкові фарбувальні ванни, що підлягають скидам, мають концентрацію барвника 1,5–2,0 г/л, що відповідає втратам барвника на рівні 25–40 %.

Повторне використання концентрованої стічної води здійснювалася для фарбування віскозної тканини прямими барвниками. Експериментальні дослідження включали такі етапи:

- фізико-хімічний аналіз та розрахунок залишкової концентрації барвника в концентрованій воді;
- забезпечення параметрів оптимальних умов для сорбції барвника волокном і концентрації фарбувального розчину;
- фарбування текстильних матеріалів із подальшим визначенням інтенсивності забарвлення;
- визначення відповідності пофарбованих зразків еталонним параметрам і показникам якості одержаних забарвлень.

Можливість повторного використання концентрованої стічної води досліджувалася в лабораторних умовах при фарбуванні віскозних підкладкових тканин на лабораторній фарбувальній машині «Ahiba nuance top speed» (США) барвником прямим червоним світлостійким та перевірялася у виробничих умовах. Забезпечення умов максимальної сорбції прямих барвників до волокна витримувалися за наступних технологічних вимог процесів фарбування: барвник – 2 % від ваги тканини, електроліт – 15 г/л, сода – 0,3 г/л.

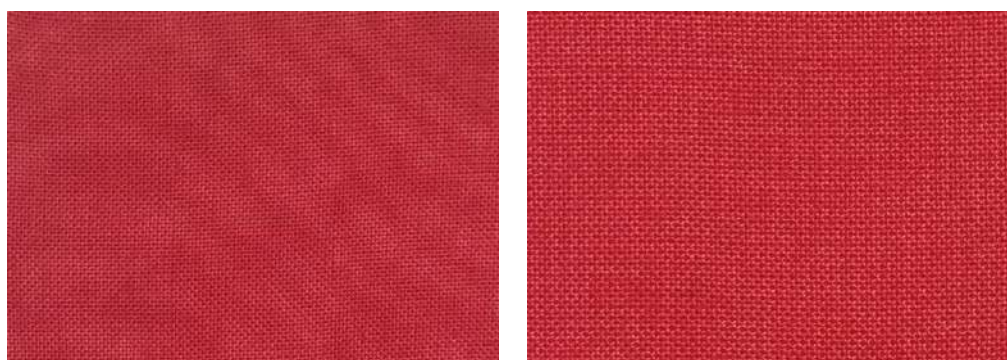
Колірні характеристики одержаних забарвлень наведені в таблиці 3. На рисунку 6 зображені фото одержаних пофарбованих зразків тканини.

Таблиця 3

Колірні характеристики пофарбованої тканини «Віскоза» (арт. 3324) барвником прямим червоним світлостійким 3 порівняно з існуючою технологією ПрАТ «ЧШК»

Водні умови фарбування	Світлість dL	Відтінок червоно-зелений dA	Відтінок (жовто-синій) dB	Кольорова відмінність dE*	Інтенсивність забарвлення, % відповідно до еталона (100%)
Технологія з повторним використанням стічної води	+0,37 світліший	+1,07 червоніший	+0,43 жовтіший	1,22	96,3

Примітка. Кольорова відмінність – математичне уявлення, що дає змогу чисельно виразити відмінність між двома кольорами в колориметрії. dE не має перевищувати 2, що приблизно відповідає мінімально помітній для людського ока відмінності між кольорами.



а

б

Рис. 6. Зразки пофарбованої тканини «Віскоза» (арт. 3324) барвником прямим червоним світлостійким:

а – за існуючою технологією; б – з повторним використанням концентрованої стічної води

Стійкість забарвлення отриманих зразків, бали: сухе тертя – 3/3-4; мокре тертя – 2/2-3; дія мила – 3/3.

Алгоритм технологічних операцій, за якими пропонується здійснювати процес фарбування текстильних матеріалів з повторним використанням концентрованої стічної води, наведений на рисунку 7.

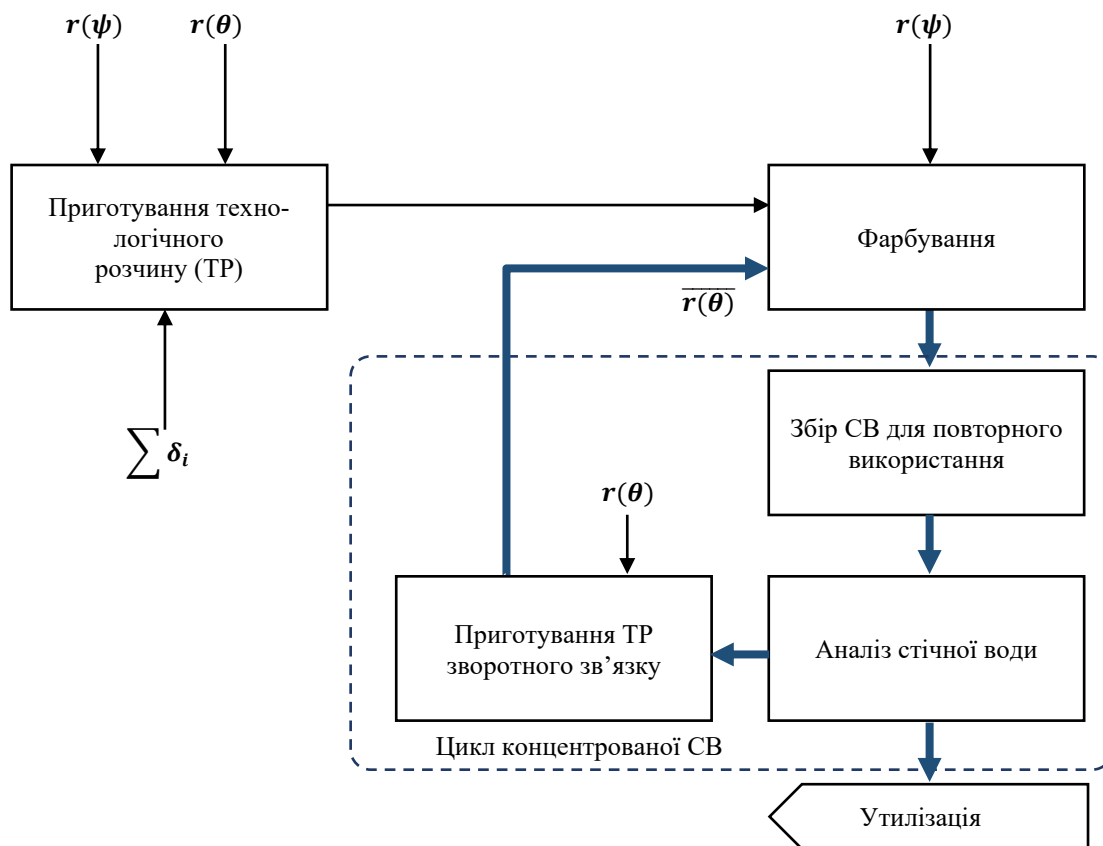


Рис. 7. Алгоритм процесу фарбування тканини із застосуванням принципу повторного використання концентрованої стічною води:

$r(\psi)$ – керуюча дія початкового використання ресурсу води; $r(\theta)$ – керуюча дія початкового використання ресурсу барвника; $\overline{r(\psi)}$ – керуюча дія циклічного використання ресурсу води; $\overline{r(\theta)}$ – керуюча дія циклічного використання ресурсу барвника;

$\sum \delta_i$ – керуюча дія сукупності допоміжних речовин

Отримані результати експериментальних досліджень можуть слугувати для створення наукових основ ресурсозбереження в технологіях фарбування текстильних матеріалів, які ґрунтуються на виборі методу очищення стічних вод природними сорбентами, створення технологічної схеми із повторним використанням стічних вод (очищених та концентрованих) в технології фарбування текстильних матеріалів.

Два наведені алгоритми, в основу яких покладений принцип повторного використання стічних вод, є складовими частинами однієї комплексної технології фарбування текстильних матеріалів. Функціональні зв'язки та компоненти наведених алгоритмів є самодостатніми та за своїм складом і призначенням елементів взаємно не суперечать, тому до них можна застосувати метод математичної композиції.

Характерною особливістю кожної із наведених схем алгоритмів є наявність процесу утилізації в ланцюгах зворотних зв'язків, як ланки в циклі повторного використання ресурсів, у якій оцінюються показники зворотної води, їх відповідність до рецептурних ви-

мог та приймається рішення на вихід із циклу за умов, заданих відповідними алгоритмічними параметрами. Відсутність такої оцінки створює умови для нескінченної чисельності ітерацій циклів (повторів) виконання, що є неможливим насамперед з точки зору технічного виконання, тому така технологія не може бути реалізованою з необхідним рівнем ефективності. Тобто при алгоритмічно заданих умовах цикли повинні перериватися. Необхідність наявності ланки утилізації з таким алгоритмічним змістом обґрунтовано науково, емпіричним шляхом. У представленій роботі це доводиться результатами серії експериментів. Встановлено, що застосування принципу повторного використання одного об'єму очищеної стічної води знаходиться в межах $K_{max} = 3$, або $1 \leq k_i \leq 3$, де K_{max} – максимальна кількість повторних циклів, k_i – i -та ітерація в циклі, $i = \overline{1, 3}$. Доведено, що при такому застосуванні повторного використання стічної води як ресурсу в технологіях фарбування, при $K_{max} = 3$ досягається головний критерій процесу фарбування тканин, а саме – інтенсивність забарвлення тканини не може виходити за межі 95% (згідно з еталоном), де фарбування вважається не виконаним. А саме:

$$95\% < \omega^{ij} < 100\%, \text{ при } \omega^{ij} \in \Omega,$$

де ω^i – значення інтенсивності фарбування i -того зразку для j -ого фарбування;

Ω – множина еталонів зразків фарбування.

Висновки. Традиційна технологія фарбування текстильних матеріалів має основний недолік – утилізації підлягають значні обсяги ресурсів (барвників, води), які можна повторно використати, що за своєю значимістю суттєво впливає на собівартість готової продукції.

Серією експериментальних досліджень вперше визначено можливість повторного використання адсорбційно очищеної та концентрованої стічних вод в процесі фарбування текстильних матеріалів на прикладі барвників дисперсного темно-синього 3 та прямого червоного світлостійкого, що науково доводить можливість повторного використання таких ресурсів, як барвники та вода, із максимальною відповідністю до критерію інтенсивності забарвлення в межах 95 %.

Вперше в роботі у вигляді схем наведені алгоритми процесів фарбування тканини із застосуванням принципу повторного використання адсорбційно очищеної та концентрованої стічних вод.

Список використаних джерел

1. Барсуков В. З. Глубіш Петро Андрійович / В. З. Барсуков // Енциклопедія Сучасної України [Електронний ресурс] / редкол.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк [та ін.] ; НАН України, НТШ. – К. : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2006. – Режим доступу: https://esu.com.ua/search_articles.php?id=30470.
2. Романенко Н. Г. Экологическая оптимизация процессов крашения / Н. Г. Романенко. // Вестник Херсонского государственного технического университета, 1998. – № 3 (3). – С. 337-339.
3. Краснобородько И. Г. Деструктивная очистка сточных вод от красителей / И. Г. Краснобородько. – Л. : Химия, 1988. – 192 с.
4. Стратегія розвитку Черкаської області на період 2021-2027 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ck-oda.gov.ua/wp-content/uploads/2022/08/18082022.pdf>.
5. Сорбенты в очистке сточных вод красильно-отделочного производства / М. В. Пыркова, И. И. Меньшова, Е. А. Фролова, Э. М. Чупартинова // Бутлеровские сообщения. – 2014. – Т. 37. – № 2. – С. 52-56.
6. Нестерова Л. А. Разработка технологии очистки сточных вод после процесса крашения текстильных материалов активными красителями. / Л. А. Нестерова, Л. Н. Кондратюк, Г. С. Сарыбеков // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 5/6 (47). – С. 35-37.
7. Мамитова А. Д. Разработка и исследования технологии очистки сточных вод красильно-отделочных производств / А. Д. Мамитова, Р. А. Атаханова // Геология, география и глобальная энергия. – 2010. – № 2 (37). – С. 144-147.
8. Петрушка І. М., Леськів Г. З., Плахтій Г. І. Очищення стічних вод від барвників природними сорбентами / І. Петрушка, Г. Леськів, І. Плахтій // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2003. – № 488. – С. 230–233.

9. Shoumkova A. Zeolites for water and wastewater treatment: An overview / A. Shoumkova // Res. Bull. Aust. Inst. High Energetic Mater. Spec. Issue Glob. Fresh Water Short. – 2011. – Vol. 2. – Pp. 10–70.
10. Natural Zeolites in Water Treatment – How Effective is Their Use [Electronic resource] / Karmen Margeta, Nataša Zabukovec Logar, Mario Šiljeg, Anamarija Farkaš // Water Treatment. – 2013. – 394 p. – Accessed mode: <http://dx.doi.org/10.5772/50738>.
11. Тарасевич Ю. И. Природные сорбенты в процессах очистки воды от дисперсных примесей / Ю. И. Тарасевич. – К. : Либідь, 1981. – 208 с.
12. Овчаренко Ф. Д. Черкасское месторождение бентонитовых и палыгорскитовых глин / Ф. Д. Овчаренко, Н. Г. Кириченко., А. Б. Островская. – К. : Наукова думка, 1966. – 126 с.
13. Мала гірнича енциклопедія: у 3 т. Т. 3: С – Я. / за ред. В. С. Білецького. – Д. : Східний видавничий дім, 2013. – 644 с.
14. Пат. 151829 У Україна. МПК C02F 1/28 (2006.01) Спосіб очищення мультикомпонентних стічних вод фарбувально-оздоблювального виробництва. / М. Г. Коваль, В. Г. Кузьменко, Н. Г. Романенко (Україна). – Заявник та патентовласник Черкаський державний технологічний університет – № u2021 05931; заявл. 22.10.2021; опубл. 21.09.2022; Бюл. № 38. – 5 с.
15. Пат 151832 У Україна. МПК D06P 1/00 D06P 7/00 C02F 1/00 C02F 1/463 (2006.01) C02F 1/52 (2006.01). Технологічна система комплексу очищення стічних вод фарбувально-оздоблювального виробництва природним цеолітом / М. Г. Коваль, В. Г. Кузьменко. – Заявник та патентовласник Черкаський державний технологічний університет - № u2021 06700; заявл. 26.11.2021; опубл. 21.09.2022; Бюл. № 38. – 4 с.

References

1. Barsukov, V.Z. (2006). Hlubish Petro Andriiovych. In I. M. Dziuba, A. I. Zhukovskyi, M. H. Zhelezniak (Eds.), *Entsyklopediia Suchasnoi Ukrainy – Encyclopedia of Modern Ukraine*. https://esu.com.ua/search_articles.php?id=30470.
2. Romanenko, N.H. (1998). Ekolohycheskaia optimizatsiia protsessov krasheniia [Ecological optimization of dyeing processes]. *Vestnyk Khersonskoho hosudarstvennoho tekhnicheskoho unyversyteta – Bulletin of the Kherson State Technical University*, (3(3)), 337-339.
3. Krasnoborodko, I.H. (1988). *Destruktivnaia ochistka stochnykh vod ot krasitelei [Destructive wastewater treatment from dyes]*. Khymyia.
4. Stratehiia rozvytku Cherkaskoi oblasti na period 2021-2027 [Strategy for the development of the Cherkasy region for the period 2021-2027]. <https://ck-oda.gov.ua/wp-content/uploads/2022/08/18082022.pdf>.
5. Pyrkova, M.V., Menshova, I.I., Frolova, E.A., & Chupartinova, E.M. (2014). Sorbenty v ochistke stochnykh vod krasilno-otdelochnogo proizvodstva [Sorbents in wastewater treatment of dyeing and finishing production]. *Butlerovskie soobshcheniia – Butlerov Communications*, 37(2), 52-56.
6. Nesterova, L.A., Kondratiuk, L.N., & Sarybekov, H.S. (2010). Razrabotka tekhnologii ochistki stochnykh vod posle protsessa krasheniia tekstylnykh materialov aktivnymi krasiteliamy [Development of wastewater treatment technology after the process of dyeing textile materials with active dyes]. *Vostochno-evropeiskiy zhurnal peredovykh tekhnologii – Eastern European Journal of Advanced Technologies*, (5/6(47)), 35-37.
7. Mamitova, A.D., Atakhanova, R.A. (2010). Razrabotka i issledovaniia tekhnologii ochistki stochnykh vod krasilno-otdelochnykh proizvodstv [Development and research of wastewater treatment technologies for dyeing and finishing productions]. *Heolohyia, heohrafiya y hlobalnaia enerhyia – Geology, geography and global energy*, (2(37)), 144-147.
8. Petrushka, I.M., Leskiv, H.Z., Plakhtii, H.I. (2003). Ochyshchennia stichnykh vod vid barvnykivpryrodnymy sorbentamy [Purification of wastewater from dyes with natural sorbents]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu “Lvivska politekhnika” – Bulletin of the National University “Lviv Polytechnic”*, (488), 230–233.
9. Shoumkova, A. (2011). Zeolites for water and wastewater treatment: An overview. *Res. Bull. Aust. Inst. High Energetic Mater. Spec. Issue Glob. Fresh Water Short.*, 2, 10–70.
10. Karmen Margeta, Nataša Zabukovec Logar, Mario Šiljeg, Anamarija Farkaš. (2013). Natural Zeolites in Water Treatment – How Effective is Their Use. *Water Treatment*. <http://dx.doi.org/10.5772/50738>.

11. Tarasevych, Yu.Y. (1981). *Prirodnye sorbenty v protsessakh ochistki vody ot dispersnykh primesei [Natural sorbents in water purification processes from dispersed impurities]*.
12. Ovcharenko, F.D., Kyrychenko, N.H., & Ostrovskaia, A.B. (1966). *Cherkasskoe mestorozhdenie bentonitovykh i palyhorskitovykh glin [Cherkassy deposit of bentonite and palygorskite clays]*. Naukova dumka.
13. Biletskyi, V. S. (Ed.). (2013). *Mala hirnycha entsyklopediia [Small mining encyclopedia]* (Vol. 3). Skhidnyi vydavnychiy dim.
14. Koval, M.H., Kuzmenko, V.H., & Romanenko, N.H. (2022). Sposib ochyshchennia multykomponentnykh stichnykh vod farbuvalno-ozdobliuvalnoho vyrobnytstva [The method of cleaning multicomponent wastewater of dyeing and finishing production]. (Pat. 151829 U Ukraine. IPC C02F 1/28 (2006.01)). Derzhavna sluzhba intelektualnoi vlasnosti Ukrainy.
15. Koval, M.H., & Kuzmenko, V.H. (2022). Tekhnolohichna systema kompleksu ochyshchennia stichnykh vod farbuvalno-ozdobliuvalnoho vyrobnytstva pryrodnym tseolitom [Technological system of the wastewater treatment complex of dyeing and finishing production with natural zeolite]. (Pat 151832 U Ukraine. IPC D06P 1/00 D06P 7/00 C02F 1/00 C02F 1/463 (2006.01) C02F 1/52 (2006.01)). Derzhavna sluzhba intelektualnoi vlasnosti Ukrainy.

Отримано 03.12.2022

UDC 677.027.4:[628.3:66.081.3]

Myroslava Koval¹, Nataliya Romanenko²

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemical Technology and Water Treatment
Cherkasy State University of Technology, (Cherkasy, Ukraine)

E-mail: m.koval@chdtu.edu.ua. ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9680-8052>

²Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Design Department
Cherkasy State University of Technology, (Cherkasy, Ukraine)

E-mail: romanenko_n_g@ukr.net. ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2161-5736>

THE PRINCIPLE OF REUSE OF WASTEWATER IN THE PROCESSES OF DYEING TEXTILE MATERIALS

The high cost of textile products and the significant consumption of water, dyes, auxiliary substances, heat and electricity during their production prompt the creation of new resource-saving technologies for dyeing textile materials that would reduce the cost of textile products and reduce the environmental impact on the country's water resources.

Multicomponent wastewater from dyeing and finishing plants contains a mixture of synthetic dye residues (25-40% on average) and auxiliary substances, which is a serious hazard. Therefore, the problem of treating wastewater to a degree of purification that can be reused as recycled water in the fabric dyeing process is urgent. While posing risks to the environment through water pollution, wastewater is a high-quality secondary raw material that can be reused in the process of dyeing textile materials.

The analysis of research and publications on the reuse of wastewater from dyeing and finishing production in the processes of dyeing textile materials showed that the topic covered was not sufficiently studied, which justifies the relevance of the work, practical prospects and significance of the experimental results obtained.

The purpose of the experimental research is to obtain empirical results proving the possibility of reusing adsorption-treated and concentrated wastewater in textile dyeing technologies, to create new algorithms for the fabric dyeing process, which will predictably lead to resource conservation and environmental protection.

A series of experimental studies has for the first time determined the possibility of reusing adsorption-treated and concentrated wastewater in the process of dyeing textile materials on the example of dispersed dark blue and direct red lightfast dyes, which scientifically proves the possibility of reusing such resources as dyes and water with maximum compliance with the color intensity criterion within 95%.

For the first time, the paper presents algorithms for fabric dyeing processes using the principle of reuse of adsorption-treated and concentrated wastewater in the form of diagrams.

Keywords: dyeing and finishing production; wastewater; dyeing; textile materials; dye; zeolite; adsorption.

Table: 3. Fig.: 7. References: 15.

РОЗДІЛ IV. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-4(30)-180-186

УДК 69.003.13

Інна Данилюк¹, Ольга Романовська²

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри технології та організації готельно-ресторанного бізнесу, Чернівецький торговельно-економічний інститут Державного торговельно-економічного університету (Чернівці, Україна)

E-mail: cherep_inna@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3407-8813>

²кандидат технічних наук, доцент кафедри технології та організації готельно-ресторанного бізнесу, Чернівецький торговельно-економічний інститут Державного торговельно-економічного університету (Чернівці, Україна)

E-mail: romaolga35@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4027-560X>

РИЗИКИ В ІНЖИНІРИНГУ БУДІВЕЛЬ: СУТНІСТЬ, ПРИЧИНИ, НАПРЯМКИ ВИРІШЕННЯ

У статті досліджено фактори ризику, що виникають на різних етапах будівництва інженерних споруд. Визначені проєктні ризики, які впливають на ефективність виконаних будівельних робіт. У результаті дослідження визначені найбільш значущі види ризиків та фактори, що впливають на якість виконаних будівельних робіт. До таких факторів, зокрема, належать досвід та кваліфікація працівників, фінансові ризики (незаплановані витрати), дотримання графіку будівництва, ведення проєктної документації, людський фактор тощо. Надані рекомендації щодо уникнення різних видів ризиків під час проєктування та будівництва.

Ключові слова: інжиніринг будівель; ризики; будівництво; будівельні проєкти; інвестори; підрядник.

Рис.: 1. Табл.: 1. Бібл.: 10.

Актуальність теми дослідження. Інжиніринг будівель здійснюється в декілька етапів, усі з яких включають небезпеку, нестабільність та ризики. Більшість будівельних проєктів несуть певний рівень ризику, і для того щоб їх визначити та управляти ними, потрібно знати їхню сутність, причини виникнення, ретельно планувати будівельний процес та забезпечити можливість швидкого прийняття правильних рішень на кожному з етапів будівельного процесу [1].

Будівельні проєкти є унікальними, у зв'язку з чим складно передбачити, у який момент з'явиться дефект, тому аналіз ризиків продовжує залишатися головною частиною успіху будівельного проєкту. Ризики впливають на ефективність проєкту щодо вартості, тривалості та якості будівництва, тому визначення сутності, причин та напрямків їх вирішення є важливим та актуальним напрямом на шляху реалізації успішного будівельного проєкту [2].

Постановка проблеми. На сьогодні в умовах економічної нестабільності суб'єкти господарювання змушені здійснювати господарську діяльність в умовах наростаючої невизначеності ситуації і мінливості економічного середовища. Це призводить до загрози бюджету, не прибутковості, зниження ефективності роботи, виникнення труднощів в отриманні бажаного результату – і як наслідок зростання ризику непередбачених витрат. Особливо це властиво будівельній галузі, яка порівняно з багатьма іншими галузями знає більших ризиків через унікальні особливості будівельної діяльності, такі як тривалий період, складні процеси, несприятливе середовище, фінансові ризики та конкурентні будівельні організації. Тому визначення сутності ризиків, їх причин та ефективних методів їх управління є дуже важливим для забезпечення успішної реалізації будівельних проєктів [3; 4; 5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематикою ризиків господарюючих суб'єктів у різних напрямках економіки займалась низька як вітчизняних, так і закордонних науковців, результати досліджень яких відображені в численних наукових працях. Серед дослідників-теоретиків, що зробили вагомий внесок у розвиток теорії ризику, можна виділити таких учених, як Дж. М. Кейнс, А. Маршалл, О. Моргенштейн, Ф. Найт, Дж. Нейман, Б. А. Райзберг, В. В. Черкасов.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проте аналіз наявних праць дозволяє стверджувати, що здебільшого теоретичні дослідження присвячені аналізу причин виникнення, класифікації та методам кількісної оцінки ризиків, менше уваги приділяється питанням ризиків залежно від діяльності підприємств, зокрема ризикам у сфері будівництва приділена незначна увага. Тому проведення досліджень сутності ризиків та напрямків їх управління на всіх етапах будівельного проєкту зумовлює актуальність обраного напрямку.

Тому мета статті полягає в розгляді ризиків в будівництві, їх причин та напрямків вирішення на шляху до успішної реалізації будівельного проєкту, з мінімізацією фінансових втрат. Основним завданням є виявлення та аналіз ризиків, пов'язаних із розробкою будівельних проєктів, з погляду зацікавлених сторін та на всіх етапах будівельного процесу.

Виклад основного матеріалу. Слово «ризик» вживається з різними значеннями, зокрема Європейська комісія припускає, що ризиком є будь-який фактор, подія чи вплив, що загрожує успішному завершенню проєкту з погляду часу, витрат та якості.

Кожен проєкт унікальний та індивідуалізований, зі своїми проблемами та результатами. Ризики можуть проявлятися у будь-якій формі та на будь-якій стадії будівельного процесу.

Аналіз та оцінка ризиків посідають важливе місце в управлінні будівництвом, оскільки проблема ризику і реалізації будівельної продукції – одна з ключових в інжинірингу будівель, зокрема на всіх етапах будівельного процесу та його фінансуванні. Світова практика банкрутства показала, що фінансова нестабільність підприємств залежить на 25–30 % від зовнішніх факторів і на 70–75 % – від внутрішніх [6, с. 363].

Для учасників інвестиційного процесу будівництва, а саме інвестора, підрядника (субпідрядника) заощадження витрат і ефективність часу мають важливе значення. Саме до основних причин ризиків у будівельних проєктах належать затримка та невиконання робіт у зазначені терміни будівництва, адже строки будівництва є ключовим фактором як для підрядника, так і для інвестора будівельного об'єкта.

Існує багато джерел нестабільності в будівельних проєктах, які включають результати діяльності будівельних організацій, наявність ресурсів, екологічні умови, участь інших сторін, договірні відносини тощо. У результаті цього будівельні проєкти можуть зіткнутися з проблемами, які спричиняють затримку під час завершення проєкту [6].

У процесі будівництва одночасно можуть виникати декілька типів факторів ризику, зокрема несподіване зростання вартості будівельних матеріалів, виконаних робіт, затримки з дотриманням термінів будівельних проєктів спричинені інвестором, підрядником, середовищем, непередбачувані ситуації тощо.

Будівництво будівель і споруд є відкритою динамічною системою, тому схильне до значних ризиків. Ризики в процесі будівництва існують для всіх учасників інвестиційного процесу. Найбільш серйозні ризики інвестора і ризики підрядника, хоча загалом аналіз ризиків у будівельній галузі ще вимагає докладного вивчення. Треба виділяти незалежні ризики і ризики вторинні, що виникають як наслідок первинних ризиків.

Як свідчить вітчизняний та світовий досвід, розрізняють два основні види ризиків у будівництві. Перший із них належить до так званих «класичних» ризиків: від збитків при пожежах, вибухах, ударах блискавки, землетрусах, пандемій, війни, інших стихійних лихах, а також від розкрадань та протиправних дій. Для управління такими ризиками будівельні компанії укладають зі страховими компаніями угоди страхування майна. Другий вид ризиків належить до специфічних ризиків, які притаманні діяльності суб'єктів інвестиційно-будівельної діяльності (рис. 1) [7].

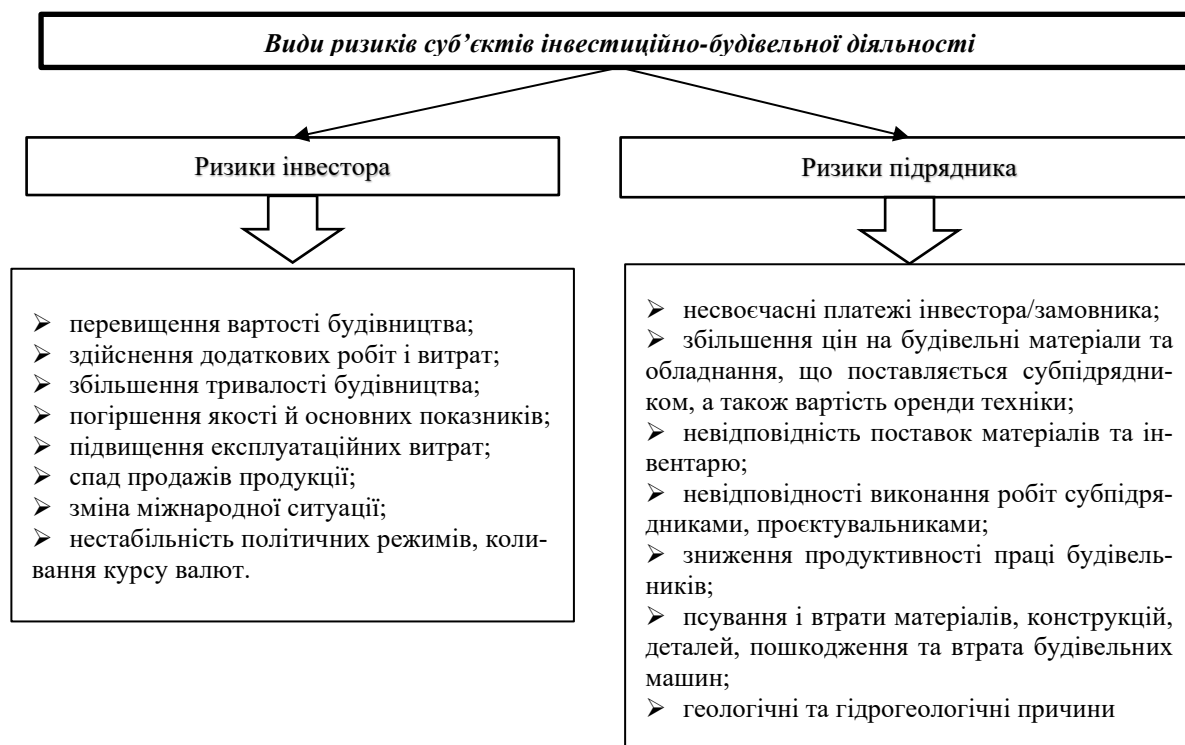


Рис. 1. Види ризиків суб'єктів інвестиційно-будівельної діяльності

Джерело: розроблено автором на основі джерела (Прав Ю. Г., 2020)

На сьогодні в умовах економічної нестабільності суб'єкти господарювання функціонують під впливом ризиків, які значно збільшуються у зв'язку зі світовою пандемією, що підтверджується даними про збитковість підприємств різних галузей, у тому числі будівельної.

Будівельна галузь отримала багато викликів за останній час, зокрема ті з якими боролися протягом 2020-2021 років і, які перенеслися у 2022 рік. Саме світова пандемія COVID-19 створила складну мережу ризиків та викликів для будівельної галузі, з якими зараз доводиться боротися інвесторам, підрядникам та іншим зацікавленим сторонам. Глобальна пандемія COVID-19 вплинула на будівельні проєкти на багатьох рівнях, зокрема затримки, нестабільність та невизначеність, представили відповідні проблеми, і як наслідок спричинили збільшення витрат на будівництво. Тому, важливо визначити, які підходи варто застосовувати для управління даним ризиком як для активних будівельних проєктів, так і тих, які тільки плануються.

Як показали відгуки інвесторів та підрядників вплив COVID-19 на будівельні проєкти є значний, зокрема карантинні обмеження призвели до затримок із завершенням проєктів та збільшення вартості завершення проєктів.

Понад 50 % будівельних майданчиків України залишилися працювати під час пандемії COVID-19, зі створенням безпечних умов праці для своїх працівників та мінімізації ризику поширення інфекції, зокрема компаніями було застосовано соціальне дистанціювання і скорочення персоналу.

COVID-19 вразив більшу частину будівельної галузі, роботодавцями та підрядниками більшості будівельних компаній вжиті превентивні заходи щодо підготовки та реагування на юридичні та комерційні ризики, а також на виклики, з якими вони зіткнулися внаслідок цієї безпрецедентної події. Досвід роботи будівельної галузі отриманий під час пандемії безсумнівно є важливим, проте негативний для ефективної роботи та розвитку будівельної галузі. З метою зниження ймовірності виникнення ризиків для суб'єктів господарювання необхідно проаналізувати сучасний стан і динаміку розвитку будівельної галузі, ступінь впливу й інтереси держави у цій галузі. Правові засади будівельного процесу

ктування визначені в Законах України, зокрема, «Про основи містобудування», «Про планування і забудову територій», «Про архітектурну діяльність», «Про регулювання містобудівної діяльності», «Про інвестиційну діяльність», «Про відповідальність за правопорушення у сфері містобудівної діяльності», «Про ціни і ціноутворення» тощо. Зазначені закони відображають основні засади та вимоги до будівництва у загальному розумінні, але не вказано саме ризики, з якими зіштовхуються суб'єкти господарювання. Тому, ефективність будівельних проєктів значною мірою будуть залежати від наявності гармонізованих міжнародних стандартів, зокрема, керівництво до зводу знань з управління проєктами – Project Management Body of Knowledge (PMBoK) та ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013 «Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику».

Міжнародні стандарти PMBoK та ДСТУ ІЕС/ISO включають розділи, у яких містяться рекомендації щодо управління ризиками проєкту. У пропонованих стандартах представлені загальна схема процесів управління ризиками проєктів у вигляді діаграм та схем, у якій вказані входи, інструменти, методи і виходи. Стандарт PMBoK створений на основі досвіду міжнародних будівельних компаній і тому його рекомендовано використовувати на будівельних підприємствах в розрізі проєктної діяльності [8; 9]. За результатами проведених теоретичних досліджень проаналізовані найпоширеніші фактори ризику під час реалізації будівельних проєктів та надано рекомендації щодо їх управління (див. табл.).

Таблиця

Фактори ризику під час реалізації будівельних проєктів та рекомендації

Види ризику	Сутність	Напрямки вирішення
1	2	3
Нестача продуктивної робочої сили	Відсутність достатньої кількості працівників та рівня їхньої кваліфікації для досягнення цілей завершення проєкту	Укладання договорів із будівельно-монтажними організаціями, які мають високорозвинену індустріальну базу та висококваліфіковані кадри
Небезпека для здоров'я та безпека	Несподівані небезпеки, які створюють проєктні ризики, зокрема аварії, можуть призвести до серйозних травм або летальних наслідків, до зупинки або затримки роботи, зниження продуктивності праці	Забезпечення безпеки працівників, вкладання коштів у навчання, інженерний контроль. Переконайтесь що підрядники розуміють необхідність безпеки та проводять навчання своїх працівників перед початком роботи. Розробка плану безпеки проєкту
Долучення субпідрядника	Робота з субпідрядником, який не виконує проєкт, є основним фактором ризику для генеральних підрядників на будівництві	Вкладання договору субпідряду на виконання робіт чи проєкту
Незаплановані матеріальні витрати	Для отримання більш точних оцінок необхідно ретельно відстежувати фактичні години роботи та виробничі одиниці. Точність також може зменшити перевищення оцінок робочого часу та надмірне замовлення матеріалів. Крім того, існують інші ризики, які не підконтрольні, наприклад, у власника не вистачає грошей для завершення проєкту	Відстеження фактичних годин роботи та виробничих одиниць виконаних робіт, що дасть змогу зменшити підвищення вартості оплати робочого часу та надмірне замовлення матеріалів. Пошук додаткових інвесторів, які б могли профінансувати завершення робіт та здачі об'єкта в експлуатацію.
Дотримання графіку будівництва	Недотримання термінів виконання проєкту, може призвести до збільшення тривалості та фінансування проєкту, погіршення зв'язків з акціонерами, клієнтами та робітниками	Суб'єкти господарювання проєкту діють з метою зменшення ймовірності виникнення або впливу ризику. Вона передбачає зменшення ймовірності та / або впливу несприятливого ризику до прийнятних граничних рівнів [10]
Неадекватний рух грошових коштів	Не вистачає виплат підрядникам, працівникам та постачальникам протягом строку будівництва; що іноді призводить до поганого руху грошових коштів	Щоб запобігти цьому або керувати поганим грошовим потоком, потрібно правильно скласти кошторис проєктів

Закінчення табл.

1	2	3
Поломки обладнання та машин	Призводять до затримок та невиконання графіку робіт	Технічне обслуговування та ремонт обладнання та машин, допоможе уникнути проблем та забезпечить безперебійну роботу
Документообіг	Існує велика кількість документів, з якими мають справу будівельні компанії. Важливо, щоб цими документами ефективно управляли.	Використання сучасних технологічних інновацій. Наприклад, програмне забезпечення для управління документами може допомогти скоротити час, витрачений на сортування файлів
Викрадення та вандалізм	Незахищені робочі місця та будівельний майданчик може призвести до неконтрольованого входу сторонніх осіб, пошкодження майна та його крадіжок	Огородження будівельного майданчика та його добре освітлення, охорона за допомогою системи відеонагляду може зменшити шанси крадіжок та вандалізму

Джерело: розроблено авторами на основі джерел (Сміт А., 2008; Кавун В. А., 2017).

Аналізуючи дані таблиці, можна зазначити, що будівельні проекти регулярно потерпають від значних інцидентів, які пов'язані як з фінансовою складовою, так і з великою кількістю аварійних ситуацій. Ефективне управління будівельними ризиками вимагає наполегливої уваги до деталей і навчання робочої сили з метою уникнення небажаних ситуацій під час будівництва, зокрема якісне будівництво, запобігання нещасним випадкам. Значно відрізняються міжнародні стандарти управління ризиками, і майже завжди є місце для їх вдосконалення. Інфраструктурні проекти, стають дедалі складнішими і потребують більш складних методів контролю над ними та управління ризиками. Коли проєктні роботи не відповідають стандартам будівництва, вартість ремонту та пов'язані з цим роботи можуть бути надзвичайно високими. Тому страховики, підрядники і клієнти повинні бути зацікавлені у мінімізації втрат і сприймати ризик-інжиніринг як спосіб позитивного внеску в процес досягнення кращого управління ризиками.

Відповідно до міжнародного стандарту РМВоК ризики будівельних проєктів, причини та напрямки їх вирішення повинні реєструватися, тобто вчасне реагування на негативні ризики сприяє безперебійному виконанню будівельних робіт без фінансових втрат.

Висновок. Отже, проведено аналіз ризиків в будівництві і визначені фактори ризику, які впливають на ефективність виконаних робіт щодо реалізації проєкту. Описані найбільш значущі види ризиків, що впливають на якість виконаних будівельних робіт, які виникають на різних етапах будівництва інженерних споруд. Встановлено, що для їхнього запобігання, будівельні компанії мають врахувати досвід та кваліфікацію працівників, фінансові ризики (незаплановані витрати), дотримання графіку будівництва, ведення проєктної документації, людський фактор тощо. Для уникнення впливу таких чинників, необхідно укладати договори з будівельно-монтажними організаціями, які зарекомендували себе на високому рівні, забезпечити вчасну оплату працівників та будівельного проєкту, використовувати автоматизовані системи, пов'язані з документообігом. Важливо охопити всі потенційні ризики в будівельних проєктах та вжити всіх необхідних заходів, щоб створити умови для усунення або запобігання їх виникненню.

Список використаних джерел

1. Шевчук К. І. Інжиніринг як інструментарій підвищення ефективності будівництва / К. І. Шевчук // Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. – 2020. – Вип. 44. – С. 56-66.
2. Шевчук К. І. Розвиток вартісного інжинірингу в будівництві / К. І. Шевчук // Будівельне виробництво : міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2015. – № 59. – С. 78-82.
3. Harriet Eliufoo. Risk Factors in Cost Estimation: Building Contractor's Experience / Harriet Eliufoo // American Journal of Civil Engineering and Architecture. – 2020. – Vol. 6, No. 3. – Pp. 123-128.

4. Akintoye S. S. Risk analysis and management in construction / S. S. Akintoye, M. J. Macleod // *International Journal of Project Management*. – 1997. – Pp. 31-38.
5. Abdul-Rahman H. Risk identification and mitigation for architectural, engineering, and construction firms operating in the Gulf region / Abdul-Rahman H., Loo S.C., Wang C. // *Canadian Journal of Civil Engineering*. – 2011. – № 39(1). – Pp. 55-71.
6. Сміт А. Дослідження про природу та причини багатства народів (книги I-V) / А. Сміт. – М. : Директмедіа Паблішинг, 2008. – 677 с.
7. Прав Ю. Г. Управління ризиками інвестиційно-будівельних проєктів / Ю. Г. Прав // *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія : Державне управління*. – 2020. – Т. 31 (70), № 3. – С. 175-180.
8. Керівництво до зводу знань з управління проєктом [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://kniga.biz.ua/pdf/25559-Rukovodstvo.pdf>.
9. Richard Radevsky. Risk Engineering for major construction projects [Electronic resource]/ Richard Radevsky // *International Association of Engineering Insurers 44th Annual Conference*. – Amsterdam, 2011. – 21 p. – Accessed mode: <https://www.imia.com/wp-content/uploads/2013/05/GP27-2011-Risk-Engineering-for-construction-projects.pdf>.
10. Кавун В. А. Проєктні ризики будівельних підприємств [Електронний ресурс] / В. А. Кавун // *Ефективна економіка*. – 2017. – № 9. – Режим доступу: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=5775>.

References

1. Shevchuk, K.I. (2020). Inzhynirynh yak instrumentarii pidvyshchennia efektyvnosti budivnytstva [Engineering as a tool for improving construction efficiency]. *Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti budivnytstva v umovakh formuvannia rynkovykh vidnosyn – Ways to increase construction efficiency in the conditions of market relations formation*, 44, 56-66.
2. Shevchuk, K.I. (2015). Rozvytok vartisnoho inzhynirynhu v budivnytstvi [Development of value engineering in construction]. *Budivelne vyrobnytstvo : mizhvidomchyi naukovo-tekhnichnyi zbirnyk – Construction production: interdepartmental scientific and technical collection*, 59, 78-82.
3. Harriet Eliufoo. (2020). Risk Factors in Cost Estimation: Building Contractor's Experience. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 6(3), 123-128.
4. Akintoye, S.S., & Macleod, M.J. (1997). Risk analysis and management in construction. *International Journal of Project Management*, 31-38.
5. Abdul-Rahman, H., Loo, S. C., & Wang, C. (2011). Risk identification and mitigation for architectural, engineering, and construction firms operating in the Gulf region. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 39(1), 55-71.
6. Smit, A. (2008). *Doslidzhennia pro pryrodu ta prychny bahatstva narodiv (knyhy I-V) [Research on the nature and causes of the wealth of nations]*. Dyrektmedia Pabliushynh.
7. Prav, Yu.H. (2020). Upravlinnia ryzykamy investytsiino-budivelnykh proektiv [Management of risks of investment and construction projects]. *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Serii: Derzhavne upravlinnia – Scientific notes of TNU named after V. I. Vernadskyi. Series: Public administration*, 31 (70), 3, 175-180.
8. *Kerivnytstvo do zvodu znan z upravlinnia proektom [Guide to project management body of knowledge]*. <https://kniga.biz.ua/pdf/25559-Rukovodstvo.pdf>.
9. Radevsky, R. (2011). Risk Engineering for major construction projects. *International Association of Engineering Insurers 44th Annual Conference*, Amsterdam. <https://www.imia.com/wp-content/uploads/2013/05/GP27-2011-Risk-Engineering-for-construction-projects.pdf>.
10. Kavun, V.A. (2017). Proektни ryzyky budivelnykh pidpriemstv [Project risks of building enterprises]. *Efektivna ekonomika – Scientific notes of TNU named after V. I. Vernadskyi. Series: Public administration*, 9. <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=5775>.

Отримано 25.11.2022

UDC 69.003.13

Inna Danyliuk¹, Olha Romanovska²¹PhD in Engineering Sciences,Associate Professor of the Department of Technologies and Organization of Hotel and Catering Business
Chernivtsi Institute of Trade and Economics of State University of Trade and Economics (Chernivtsi, Ukraine)**E-mail:** cherep_inna@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3407-8813>²PhD in Engineering Sciences,Associate Professor of the Department of technologies and organization of Hotel and Catering Business
Chernivtsi Institute of Trade and Economics of State University of Trade and Economics (Chernivtsi, Ukraine)**E-mail:** romaolga35@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4027-560X>**RISKS IN CONSTRUCTION ENGINEERING: ESSENCE, CAUSES,
SOLUTION DIRECTIONS**

Most construction projects carry a certain level of risk, and in order to determine and manage them, it is necessary to know their essence, causes, carefully plan the construction process and ensure the ability to quickly make the right decisions at each stage of the construction process [1]. Therefore, determining the essence of risks, their causes and effective methods of their management is extremely important to ensure the successful implementation of construction projects [3; 4; 5].

During the construction process, several types of risk factors may arise simultaneously, in particular, an unexpected increase in the cost of construction materials, completed works, delays in meeting the deadlines of construction projects caused by the investor, contractor, environment, etc. As shown by the feedback of investors and contractors, the impact of COVID-19 on construction projects is significant, in particular, quarantine restrictions led to delays in the completion of projects and an increase in the cost of their completion.

Analyzing the research data, it can be noted that construction projects regularly suffer from significant incidents, which are related to both the financial component and a large number of emergency situations. Effective construction risk management requires persistent attention to detail and training of the workforce to avoid undesirable situations during construction, including quality construction, accident prevention. International risk management standards vary widely, and there is almost always room for improvement. Infrastructure projects are becoming more and more complex and require more complex methods of control over them. When design work does not meet construction standards, the cost of repairs and associated risks can be extremely high. Therefore, insurers, contractors and clients should be interested in minimizing losses and perceive risk engineering as a way of positive contribution to the process of achieving a better result and as a result of a worthy investment in the future project.

According to the PMBoK international standard, the risks of construction projects, their causes and solutions must be recorded, that is, timely response to negative risks contributes to the smooth execution of construction works without financial losses.

Keywords: building engineering; risks; construction; construction projects; investors; contractor.

Fig.: 1. **Tabl.:** 1. **References:** 10.

Марина Барбаш

старший викладач кафедри технологій зварювання та будівництва
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: m_barbash@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2784-5030>. ResearcherID: [F-4729-2016](https://orcid.org/0000-0003-2784-5030)

**ARCHICAD В ІНЖЕНЕРНО-БУДІВЕЛЬНІЙ ГРАФІЦІ
БУДІВЕЛЬНИКІВ ТА АРХІТЕКТОРІВ**

У роботі проаналізовано сучасні тенденції застосування BIM-технологій у частині архітектурно-будівельного проектування в програмному продукті ArchiCAD компанії Graphisoft. Визначено перелік чинників, що впливають на швидкість і якість проектування при розробці та редагуванні архітектурно-будівельного проекту та шляхи удосконалення системи ефективного проектування від Graphisoft. Створено алгоритм розробки дизайн-проекту на прикладі конкретного житлового приміщення ЖК «Придеснянський» в м. Чернігові. Стаття є публікацією науково-методичного характеру.

Ключові слова: проектування; план квартири; інтерактивні каталоги; інженерні мережі; інтер'єр; технології інформаційного моделювання.

Рис.: 9. Бібл.: 8.

Актуальність теми дослідження. На даний час BIM технології є каталізатором змін в розробці та управлінні будівельними проектами. Об'єднання етапів життєвого циклу проекту одним програмним продуктом забезпечує прогнозованість результатів та спрощує внесення змін при необхідності редагування. Тривимірний модель «віртуальної будівлі» (Virtual building) побудована зручними та функціональними засобами ArchiCAD дозволяє автоматичне отримання планів, розрізів, фасадів, розгорток приміщень, що суттєво спрощує та полегшує процес проектування та зменшує фінансові витрати на виготовлення проектно-кошторисної документації, підвищуючи якість виконання архітектурно-будівельного або дизайн-проекту.

Постановка проблеми. На практиці зміна попереднього сценарію проекту за новими побажаннями замовника, наприклад, перепланування, корективи стилістики інтер'єру, оздоблювальних матеріалів вимагає розробки кількох варіантів рішення, що значно уповільнює процес проведення основних ремонтно-оздоблювальних робіт.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Минулого року в нашій країні на державному рівні анонсовано підтримку впровадження сучасних інформаційно-комп'ютерних технологій [1] у будівельну галузь. Зокрема, розпорядженням Кабінету Міністрів України від 17 лютого 2021 року № 152-р схвалено Концепцію впровадження технологій будівельного інформаційного моделювання (BIM-технологій) в Україні та затверджено план заходів з її реалізації. Використання галузевих колекцій САПР при розробці дизайн-проектів [2] у контексті зазначеної Концепції може розглядатися як один із інструментів для подальшого реформування, модернізації та цифрової трансформації будівельної галузі України [3].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Застосування ArchiCAD як зручної, функціональної програми з достатньо простим інтерфейсом, заснованої на технології інформаційного моделювання досить вагоме як у вітчизняному будівництві, так і при підготовці здобувачів вищої освіти відповідної галузі знань, але не в частині обміну даними та співпраці з МЕР-спеціалістами та інженерами-конструкторами, наприклад, розширення MEP Modeler для створення тривимірних інженерних мереж повітроводів, трубопроводів, електрики стало вбудованим в ArchiCAD лише з 24 версії (2020 року) [4].

Метою статті є дослідження можливостей об'єктноорієнтованої тривимірної САПР ArchiCAD для вирішення архітектурно-будівельних задач на прикладі житлового комплексу «Придеснянський» в місті Чернігові.

Виклад основного матеріалу. Сучасне викладання спецкурсів з інженерної графіки для здобувачів вищої освіти за спеціальностями «Будівництво та цивільна інженерія», «Архітектура та містобудування», «Дизайн середовища» спрямоване на забезпечення спеціа-

льних фахових компетентностей та досягнення результатів навчання, передбачених відповідними освітніми програмами, базується на вивченні спеціалізованих САПР з інтегрованими інструментами BIM: ArchiCAD [5], AutoCAD Architecture, Revit, Civil 3D та ознайомленні з програмним забезпеченням для візуалізації проєктів, наприклад, 3ds Max.

Особливостями викладання в умовах обмеженої кількості аудиторних годин на дисципліну є чітке формулювання ключових налаштувань кожного з досліджуваних програмних продуктів на початковому етапі для швидкого старту та подальшої повноцінної роботи в редакторах за різними напрямками в плані архітектури, від концептуального проєктування, візуалізації, створення робочої документації до дизайну інтер'єру.

Для формування вхідних даних обрано кутову квартиру типового поверху житлового комплексу «Придеснянський» (рис. 1.) збудованого ДП «УкрСіверБуд» в місті Чернігові. Вказаний об'єкт дослідження знаходиться в стані «від забудовника» – з передчистою обробкою, внутрішніми комунікаціями, лічильниками та вимагає розробки повного дизайн-проєкту.



Рис. 1. Загальний вигляд комплексу та його квартирографія [2]

Початковою інформацією для проєктування в ArchiCAD від Graphisoft є відомості технічного паспорта квартири: план квартири, її технічна характеристика, експлікація приміщень та матеріали сайту забудовника: матеріал зовнішніх стін – цегла, перекриття – залізобетонні плити, вікна та панорамні вікна – 5-камерний профіль RENAУ та 2-камерний склопакет 44 мм. Приміщення забезпечене комунікаціями та лічильниками. Наявна індивідуальна система опалення з установкою котла марки «Protherm».

Відштовхуючись від наявних матеріалів та завдяки інтуїтивно зрозумілому інтерфейсу ArchiCAD проведено швидку побудову обмірного плану квартири (рис. 2) та після аналізу початкової візуалізації (переходу в 3D вид) прийнято рішення про перепланування шляхом демонтажу гіпсокартонної перегородки ГКЛ та об'єднання приміщень № 2 (кімнати) та № 4 (кухні).

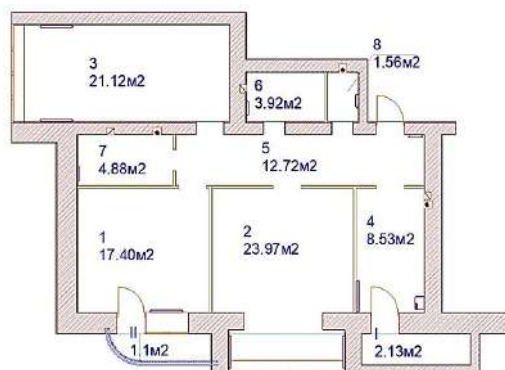


Рис. 2. План квартири та його візуалізація в ArchiCAD 24

Для подальшої роботи в програмі доцільне заповнення брифу на розробку проекту. Визначення стилістики, функціональності та технічного наповнення інтер'єру для подальшого їх втілення вимагатиме глибокого занурення в програмний продукт, що дозволить набутти загальні та інтегральні компетентності: здатність розв'язувати складні спеціалізовані задачі у процесі навчання, що характеризується комплексністю та невизначеністю умов, знання та розуміння предметної області та професійної діяльності, навички використання інформаційних технологій.

Для забезпечення функціональності та ергономічності інтер'єру основні планувальні рішення повинні відповідати ДБН В.2.2-15:2019 «Будинки і споруди. Житлові будинки. Основні положення» зі змінами №1 від 01.09.2022 [3], у відповідності до вказаних будівельних норм виконуємо план перепланування (рис. 3) та план монтажу (рис.4.) перегородок з ГКЛ С11 ПН75, радіаторів RODA R 22 500x1000 та систем життєзабезпечення і електрики за допомогою MEP Modeler, який з 24-ї версії є вбудованим у пакет та з використанням функції Трасування. Відповідно до плану поквартирної розводки монтаж пластикових труб системи опалення та водопостачання виконано на відстані 300 мм від стін відповідно до ДСТУ Б В.2.7-144:2007.



Рис. 3. План перепланування та оновлена експлікація приміщень

Одночасно доцільне створення інтерактивних відомостей та каталогів (рис.5.) та розрахунок кошторису відповідно до ресурсних елементних кошторисних норм на ремонтно-будівельні роботи згідно Ресурсних елементних кошторисних норм на ремонтно-будівельні роботи. Перегородки (Збірник 5) [6] та Прорізи (Збірник 6) [7]. Необхідно зазначити, що відсутність динамічного зв'язку технічної документації з моделлю робить недоцільними всі етапи роботи в програмному продукті бо збільшить відсоток похибки під час розрахунку кількості необхідних оздоблювальних матеріалів та призведе до появи проблем при ремонтно-опоряджувальних роботах. Наявність 3Д зображень на креслениках полегшує подальше ведення дизайн-проєкту для всіх учасників процесу.

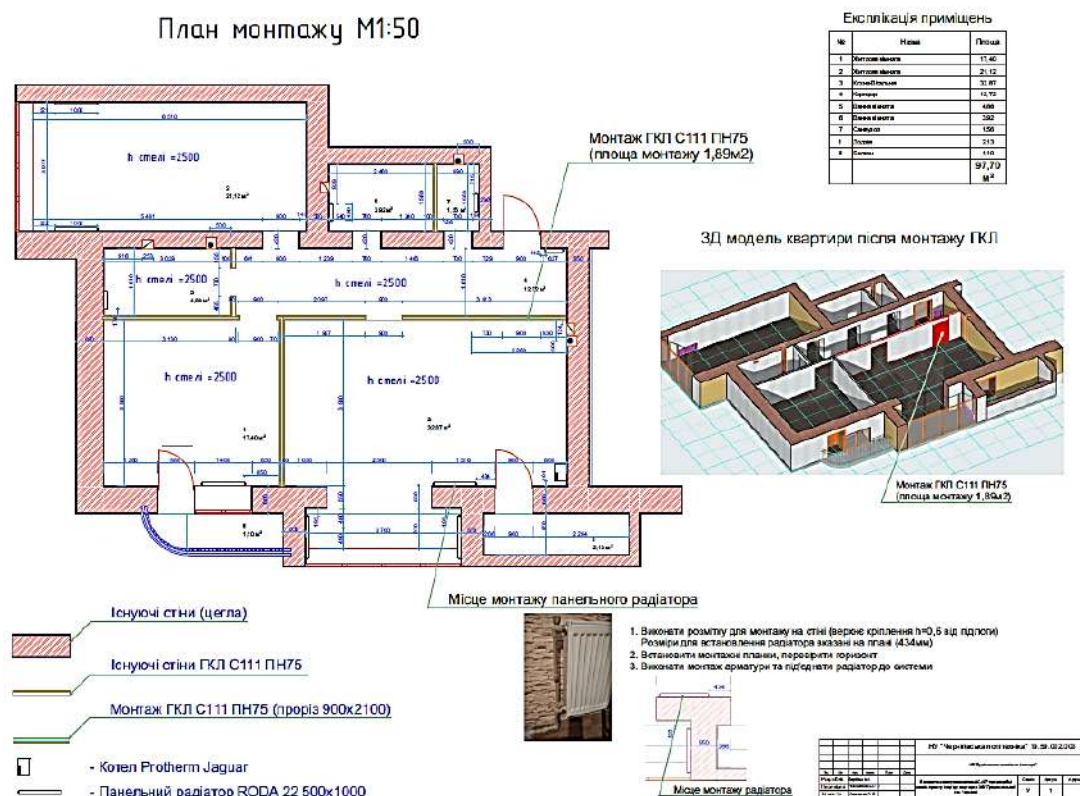


Рис. 4. План монтажу перегородок та радіаторів

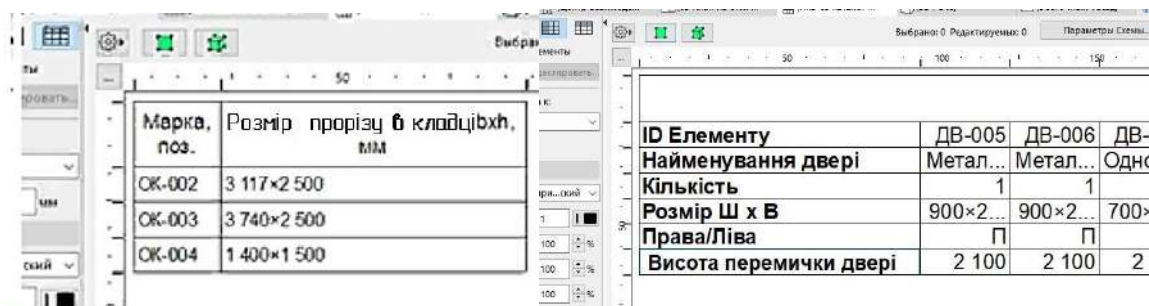


Рис. 5. Інтерактивні каталоги прорізів та дверей

Для поглибленого вивчення можливостей моделювання на цьому етапі доцільне ознайомлення з інструментом Морф середовища ArchiCAD. Застосування цього інструменту дозволить виконати максимально реалістичну візуалізацію оздоблення приміщення матеріалами, обраними замовником за власними уподобаннями з сайтів виробників (рис. 6) та закріплення навичок точних побудов. Це дозволяє також почати формувати власну бібліотеку в доповнення до Вбудованої та Зв'язаних бібліотек ArchiCAD (Основної, Візуалізації та Бібліотеки Розширень) в частині Умеблювання, Декоративних профілів в конструкції будівлі та 2Д елементів (механічних, електричних та графічних символів). Робота з даним інструментом не є інтуїтивно зрозумілою, вимагає більш глибокого занурення у вивчення можливостей ArchiCAD і дозволяє більш високо оцінити виконання проекту.



Рис. 6. Морф плитки (а), тиражування (б) та результат розкладки (в)

Збереження такого морфа як бібліотечного елемента започаткує створення власної бібліотеки проєктувальника, можливість використання її в наступних проєктах та збільшує різноплановість робіт власного портфолію для демонстрації робочих знань, умінь та професійних навичок.

Розведення розеток (рис. 7) та вимикачів (рис. 8) виконано за допомогою підключення зовнішньої бібліотеки GDL [8] – об'єктів (Geometric Description Language) Рамка ЕІ. Недоліком роботи в програмі є неможливість стандартними засобами отримати план електрики та автоматично отримати специфікацію.



Рис. 7. План розеток та візуалізація

1. Використання стандартного шаблону ArchiCAD (на початковому етапі роботи не вносити зміни в набори шарів, реквізити елементів).
2. Дослідження системи вимірювання, прив'язок та точних побудов за розмірами.
3. Використання лише вбудованих бібліотек та моделювання інструментом Морф; мінімізація 2Д креслення на протигагу 3Д моделюванню.
4. Раціональна організація Карти Видів з плану типового поверху Карти Проекту.
5. Збереження створених об'єктів в Обраному для оптимізації роботи.

Розвиток програмного забезпечення для технологій інформаційного моделювання, зумовлений значним попитом на ВІМ продукти за кордоном, зумовлює необхідність спрямувати вектор навчання на підготовку профільних спеціалістів з володінням даними технологіями.

Список використаних джерел

1. What's new in Archicad 25 [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу: <https://graphisoft.com/solutions/archicad/archicad-25>.
2. Комфортне житло для Вас на березі Десни [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу: <https://ukrsiverbud.com.ua/portfolio/komfortne-zhitlo-dlja-vas-na-berezi-desn>.
3. Державні будівельні норми України. Будинки і споруди. Житлові будинки. Основні положення: ДБН В.2.2-15:2019 Зміна № 1. – [Чинні від 01.09.2022 р.] // Офіційний сайт Міністерства розвитку громад та територій України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2022/06/zmina-%E2%84%961-dbn-v.2.2-15_2019-6_removed.pdf.
4. GRAPHISOFT Center. Продукти. ARCHICAD 24. MEP Modeler. BIMx [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://graphisoft.com.ua/uk/produkty>.
5. Collaborative practices for building design and construction [Electronic resource]. – 2021. – Accessed mode: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Collaborative_practices_for_building_design_and_construction.
6. Кошторисні норми України. Ресурсні елементні кошторисні норми на ремонтно-будівельні роботи. Перегородки (Збірник 5). – [Чинні від 15.06.2021 р.] // Офіційний сайт Міністерства розвитку громад та територій України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2021/07/zbirnyk-%E2%84%965.doc?_cf_chl_tk=Wb0BI2rI6v.P0pa05rIM4HbOqj4Ghkx9EQ9fm5cWsGw-1673365460-0-gaNycGzNCpE.
7. Кошторисні норми України. Ресурсні елементні кошторисні норми на ремонтно-будівельні роботи. Прорізи (Збірник 6). – [Чинні від 15.06.2021 р.] // Офіційний сайт Міністерства розвитку громад та територій України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2021/07/zbirnyk-%E2%84%966.doc>.
8. GDL-об'єкти, створені GRAPHISOFT [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу: https://graphisoft.com/downloads/parametric_objects.

References

1. What's new in Archicad 25. (2021). <https://graphisoft.com/solutions/archicad/archicad-25>.
2. Komfortne zhytlo dlia Vas na berezi Desny [Comfortable housing for you on the banks of the Desna River]. (2021). <https://ukrsiverbud.com.ua/portfolio/komfortne-zhitlo-dlja-vas-na-berezi-desn>.
3. Derzhavni budivelni normy Ukrainy. Budynky i sporudy. Zhytlovi budynky. Osnovni polozhenia: DBN V.2.2-15:2019 Zmina № 1 [State building regulations of Ukraine. Buildings and structures. Residential buildings. Main provisions: DBN V.2.2-15:2019 Amendment No. 1]. (01.09.2022). *Ofitsiynyi sait Ministerstva rozvytku hromad ta terytorii Ukrainy*. https://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2022/06/zmina-%E2%84%961-dbn-v.2.2-15_2019-6_removed.pdf.
4. GRAPHISOFT Center. Produkty. ARCHICAD 24. MEP Modeler. BIMx. (2021). <https://graphisoft.com.ua/uk/produkty>.
5. Designing Buildings. (2021). Collaborative practices for building design and construction. [Collaborative practices for building design and construction]. https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Collaborative_practices_for_building_design_and_construction.

6. Koshtorysni normy Ukrainy. Resursni elementni koshtorysni normy na remontno-budivelni roboty. Perehorodky (Zbirnyk 5) [Estimated norms of Ukraine. Resource elemental estimate standards for repair and construction works. Partitions (Collection 5)]. (15.06.2021). *Ofitsiyni sait Ministerstva rozvytku hromad ta terytorii Ukrainy*. https://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2021/07/zbirnyk-%E2%84%965.doc?_cf_chl_tk=Wb0BI2rI6v.P0pa05rlM4HbOqj4Ghkx9EQ9fm5cWsGw-1673365460-0-gaNycGzNCpE.

7. Koshtorysni normy Ukrainy. Resursni elementni koshtorysni normy na remontno-budivelni roboty. Prorizy (Zbirnyk 6) [Estimated norms of Ukraine. Resource elemental estimate standards for repair and construction works. Slots (Collection 6)] (15.06.2021). *Ofitsiyni sait Ministerstva rozvytku hromad ta terytorii Ukrainy*. <https://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2021/07/zbirnyk-%E2%84%966.doc>.

8. GDL-obiekty, stvoreni GRAPHISOFT [GDL objects created by GRAPHISOFT]. (2021). https://graphisoft.com/downloads/parametric_objects.

Отримано 05.12.2022

UDC 514.182

Marina Barbash

Senior lecturer of the Department of Welding Technologies and Construction
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: m_barbash@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2784-5030>. ResearcherID: [F-4729-2016](https://orcid.org/0000-0003-2784-5030)

ARCHICAD IN ENGINEERING AND CONSTRUCTION GRAPHICS OF BUILDERS AND ARCHITECTS

Urgency of the research. Currently, BIM technologies is a catalyst for changes in the development and management of construction projects. Combining the stages of the project life cycle with one software product ensures the predictability of results, simplifies the introduction of changes when editing is necessary, and reduces financial costs for the production of design and estimate documentation, increasing the quality of execution of an architectural project

Target setting. In practice, changing the previous scenario of the project according to the new wishes of the customer, for example, re-planning, corrections of the interior style, finishing materials requires the development of several solution options, which significantly slows down the project implementation

Actual scientific researches and issues analysis. In Ukraine, at the state level, the concept of the implementation of construction information modeling technologies and the plan of measures for its implementation were approved. The use of sectoral CAD collections in the development of design projects in the context of the mentioned concept can be considered as one of the tools for further reforming, modernization and digital transformation of the construction industry of Ukraine.

The purpose of the article is to study the possibilities of object-oriented three-dimensional CAD ArchiCAD for solving architectural and construction problems using the example of the "Prydesnyanskyi" housing complex in the city of Chernihiv.

The statement of basic materials. The current trends in the use of BIM technologies in architectural and construction design in the ArchiCAD software product of the Graphisoft Company were analyzed. Architectural, planning and constructive solutions of the interior design project have been completed. The design project development algorithm has been created on the example of a specific living space. Ways to improve the effective design system from Graphisoft are defined.

Conclusions. The created template for the development of a design project provides such advantages as reduction of financial costs for the production of design and estimate documentation, reduction of time and avoidance of errors when making changes to the project.

The development of software for information modeling technologies is due, first of all, to the significant demand for VIM products abroad. This creates prerequisites for directing the training vector to the training of specialized specialists who will be able to apply the mentioned technologies in the development of real projects. The article is a publication of scientific and methodical character:

Keywords: design; apartment plan; interactive catalogs; engineering networks; interior; information modeling technologies.

Fig.: 9. **References:** 8.

Юлія Квашук

кандидат технічних наук, старший викладач кафедри екології та охорони природи
Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка (Чернігів, Україна)
E-mail: kvashukj@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8361-5657>. Scopus Author ID: [56856864100](https://orcid.org/0000-0001-8361-5657)

СТРУКТУРА АНТРОПОГЕННИХ ЛАНДШАФТІВ МІСТА НОВГОРОД-СІВЕРСЬКИЙ

На основі сучасних методів дослідження та програмного забезпечення було проведено картографування досліджуваної території міста Новгород-Сіверський, опрацьовано космознімок та виділено структуру антропогенних ландшафтів. В результаті проведених досліджень отримано результат у вигляді даних щодо площі та відсоткового співвідношення ландшафтів різного функціонального призначення. Проведено аналіз чинників, які впливають на формування та подальше використання цих територій.

Ключові слова: антропогенний ландшафт; космознімок; картографування; урбосистема; досліджувана територія; урбоекологія.

Табл.: 1. Рис.: 2. Бібл.: 7.

Актуальність теми дослідження. На сьогодні спостерігається стрімкий розвиток науки «урбоекологія». Значна кількість наукових досліджень присвячена вивченню та аналізу ландшафтно-урбаністичної структури міста. Кожне місто – це своєрідне поєднання різних типів антропогенних ландшафтів з осередками природних, що формують середовище існування людини. Не виключення і м. Новгород-Сіверський, яке характеризується певними фізико-географічними умовами та особливостями господарської діяльності населення.

Постановка проблеми. В умовах урбанізованого середовища спостерігається суттєва трансформація природних ландшафтів. У результаті складної взаємодії природних і штучних компонентів міста формуються специфічні антропогенні ландшафти, ландшафтно-техногенні комплекси та техногенні об'єкти. Виділення структури антропогенних ландшафтів урбосистеми дозволяє розробити механізми раціонального землекористування та функціонального зонування міста. Згідно з механізмом еколого-господарського балансу територій для всіх категорій земель встановлюється ступінь антропогенного навантаження, розраховуються коефіцієнти відносної та абсолютної напруженості. Такий підхід дозволяє за рахунок оптимального поєднання земель різного призначення підтримувати екологічну рівновагу територій. Так само саморегуляція території тим більша, чим більше її ландшафтне різноманіття за рахунок раціонального розподілу, використання та максимального збереження природних компонентів антропогенних ландшафтів. Об'єкт дослідження – територія м. Новгород-Сіверський з її фізико-географічними умовами та особливостями господарської діяльності як осередок формування різних типів антропогенних ландшафтів. Предмет дослідження – антропогенні ландшафти м. Новгород-Сіверський.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останні роки на базі Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка були проведені дослідження щодо виділення структури антропогенних ландшафтів м. Чернігова за участю студентів Л. В. Гомон [1], О. А. Дорошенко [2], смт. Козелець – О. М. Руднік [3] (Науковий керівник – к.т.н. Ю. В. Квашук).

Численні наукові праці Л. М. Тимуляк присвячено дослідженню передгірських урбанізованих ландшафтів, зокрема [4]. Таксонометричні одиниці антропогенного ландшафту та основні терміни наведено в роботах [5; 6].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Вперше створена карта антропогенних ландшафтів м. Новгород-Сіверський, відтворено відсоткове співвідношення різних типів ландшафтів досліджуваної території міста, вказане їх функціональне призначення. Результати дослідження отримані в ході виконання науково-дослідної роботи І. С. Потапчуком (Науковий керівник – к.т.н. Ю. В. Квашук) [7].

Метою статті є представлення результатів картографування ландшафтно-урбаністичної структури м. Новгород-Сіверський згідно з класифікацією та їх відсоткового співвідношення.

Виклад основного матеріалу. Згідно з ДБН Б.2.2-12:2019 м. Новгород-Сіверський належить до малих міст України. Вивчення ландшафтів міст важливе згідно Закону України «Про благоустрій населених пунктів». Місто Новгород-Сіверський розташоване в природній області Поліської мішанолісової фізико-географічної провінції. У геоструктурному відношенні пов'язане з південно-західним схилом Воронезького масиву. Ландшафтні особливості Новгород-Сіверського зумовлені геолого-геоморфологічними умовами, а саме: наявністю крейдових відкладів, слабкою потужністю антропогенних відкладів, значною глибиною ерозійного розчленування поверхні, незначною глибиною залягання ґрунтових вод та більш континентальним кліматом порівняно з іншими областями зони. Серед мішанолісових ландшафтів переважають моренно-водно-льодовикові, що характеризуються залісненістю понад 30 % і заболоченістю до 20 %, розвитком прохідних долин і карстових западин. Фоновими урочищами тут є плоскі та слабохвилясті межиріччя, складені малопотужними пісками з прошарками оглинених пісків, дерново-слабопідзолистими ґрунтами під суборами, та слабоврізані широкі заболочені долини, зайняті низинними торфовищами [7].

Лісостепові ландшафти, що займають понад 15 % території, представлені дуже розчленованими лісовими рівнинами, розміщені невеликими ділянками переважно на правобережжі Десни. Типовими тут є складні урочища свіжих і сирих глибоких балок з крутими схилами із грабово-дубовими та кленово-липово-дубовими лісами, подекуди з суборами. Заплавні місцевості (близько 5%) добре розвинуті в долині Десни, а також її лівобережних притоках. Їх використовують здебільшого під сіножаті та пасовища. Поширені високі, хвилясті, звужені заплави з дерновими слабоглеюватими ґрунтами під злаково-різнотравними луками та низькі, плоскі, розширені заплави, складені низинними торфовищами під вологотравно-осоковими угрупованнями, із заболоченими притерасними комплексами під чорновільховими лісами та осоково-болотною рослинністю [7]. У місті переважає господарське і гірничо-видобувне природокористування, що впливає на формування ландшафтів.

За допомогою програми QGIS (Quantum GIS) був оброблений космознімок міста Н-Сіверський (рис. 1) та створена карта антропогенних ландшафтів даної території зі всіма статистичними даними (рис. 2).

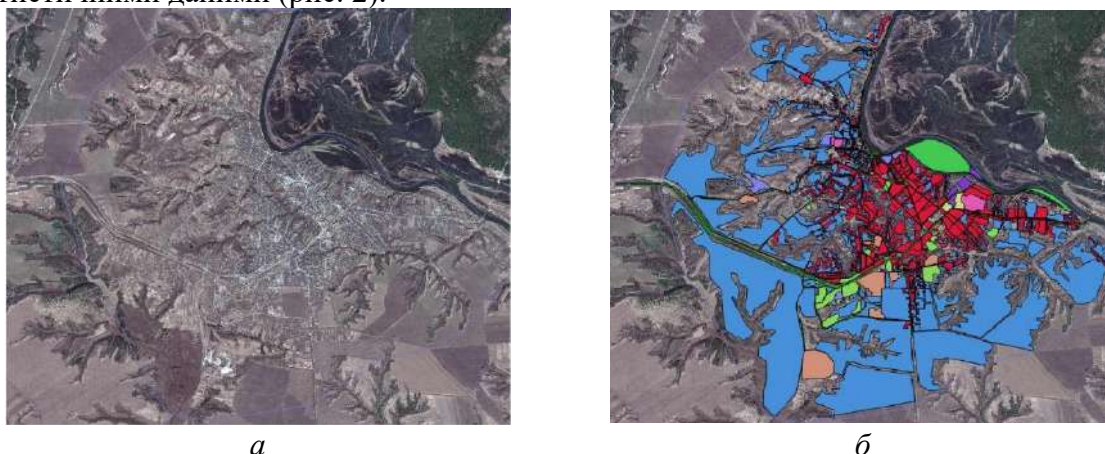


Рис. 1. Космознімки території м. Новгород-Сіверський:
а – до та б – після опрацювання

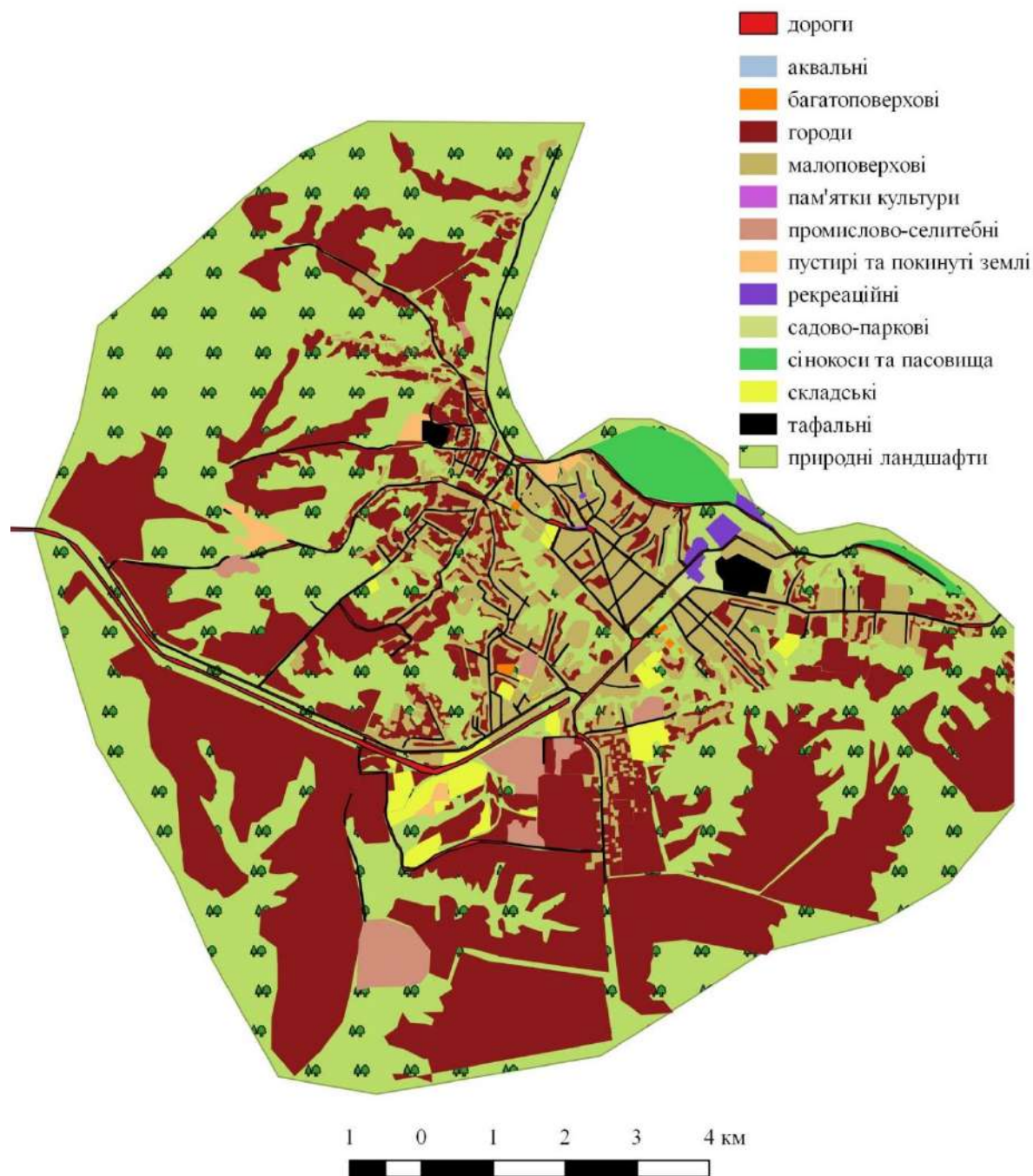


Рис. 2. Карта антропогенних ландшафтів м. Новгород-Сіверський

На території міста Новгород-Сіверський під час дослідження було визначено 13 антропогенних ландшафтів різного функціонального призначення (табл. 1). Об'єкт під номером 14 в таблиці відображає природні ландшафти. Природні ландшафти є цілісною частиною ландшафтно-урбаністичної структури міста, як результату складної й тривалої взаємодії основних компонентів. Середовищеформуючі компоненти в свою чергу є результатом взаємодії людини і природи (будівництво, землеробство, гірничо-видобувна діяльність) в певних специфічних умовах урбосистеми. У результаті картографування ландшафтно-урбаністична структура м. Новгород-Сіверський набула просторового характеру.

Таблиця 1

Антропогенні ландшафти м. Новгород-Сіверський

№	Тип ландшафту	Площа, га	Площа, %
1.	Аквальні	1,29	0,02
2.	Багатоповерхові	5,22	0,07
3.	Городи	2627,2	37,1
4.	Малоповерхові	659,07	9,3
5.	Пам'ятки культури	0,6	0,01
6.	Промислово-селитебні	115,46	1,61
7.	Пустирі та покинуті землі	32,95	0,46
8.	Рекреаційні	21,25	0,29
9.	Садово-паркові	11,86	0,17
10.	Сінокоси та пасовища	97,51	1,37
11.	Складські	90,33	1,24
12.	Тафальні	25,82	0,36
13.	Дороги	136,1	1,81
14.	Природні ландшафти	3283,09	46,19

1. Аквальні ландшафти – 1,3 га. Це невелика набережна для стоянки катерів та барж, а також декілька невеликих причалів.

2. Багатоповерхові ландшафти – 5 га. На території міста лише 5 % будівель мають 3 або більше поверхів. В основному це адміністративні будівлі.

3. Городи – 2627 га. На досліджуваній території у більшості жителів міста є своя територія, на якій люди ведуть землеробство. Також на території міста здійснює свою діяльність агропромисловий холдинг «РОСТОК».

4. Малоповерхові – 657 га. Новгород-Сіверський – невелике місто, яке має приблизно 95 % малоповерхових будівель (не більше двох поверхів) від загальної кількості будівель.

5. Пам'ятки культури – 0,6 га. Визначні споруди, археологічні об'єкти та витвори мистецтва, що є частиною культурного надбання міста.

6. Промислово-селитебні ландшафти – 115 га. У межах міста присутні такі підприємства: ПрАТ «Новгород-Сіверський сирзавод»; СП «Новгород-Сіверський хлібокомбінат»; ДП «Новгород-Сіверське лісове господарство»; ВАТ «Новгород-Сіверська ПМК-86»; ЗАТ «Новгород-Сіверський завод будівельних матеріалів» (Крейдяний кар'єр – Червона гірка); ВАТ «Новгород-сіверський льонозавод».

7. Пустирі та покинуті землі – 33 га. Землі, що не використовуються у зв'язку зі зменшенням або припиненням діяльності підприємств.

8. Рекреаційні ландшафти – 21 га. До таких ландшафтів віднесено пляж, стадіон.

9. Садово-паркові ландшафти – 12 га. В місті є великий парк ім. Т.Г.Шевченка, декілька садів, Новгород-Сіверська науково-дослідна станція.

10. Сінокоси та пасовища – 98 га. Території заплави річки Десна, котрі використовуються для випасу худоби та заготівлі кормів тваринам.

11. Складські ландшафти – 90 га. Складські приміщення підприємств, які здійснюють свою діяльність на території міста.

12. Тафальні ландшафти (кладовища) – 26 га. У межах міста знаходяться 2 кладовища.

13. Дороги – 136 га. Дороги є невід'ємною частиною будь-якої урбанізованої території. Їх кількість залежить від рельєфу території, наявності промислових комплексів та заводів. Також на території міста є залізнична колія.

14. Природні ландшафти – 3283 га. У місті Новгород-Сіверський дуже розповсюджений мезорельєф, тому на його території наявна велика кількість ярів та пагорбів не змічених людиною у процесі життєдіяльності.

Висновки. Отже, у процесі дослідження урбосистеми Новгород-Сіверського було виділено 14 типів ландшафтів, з'ясовано їх функціональне призначення, відтворено просторове розташування таксонометричних одиниць ландшафтно-урбаністичної структури міста, виокремлено складові елементи антропогенних ландшафтів та проаналізовано фактори впливу на формування тих чи інших типів ландшафтів.

Список використаних джерел

1. Гомон Л. В. Ландшафтно-рекреаційне зонування та перспективи розбудови міського середовища Чернігова: кваліфікаційна робота освітнього ступеня «бакалавр»: 101 Екологія / Л. В. Гомон // Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка. – Чернігів, 2020. – 50 с.
2. Дорошенко О. А. Сучасна ландшафтно-урбаністична структура території м. Чернігів та напрямки її розвитку: кваліфікаційна робота освітнього ступеня «бакалавр»: 101 Екологія / О. А. Дорошенко // Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка. – Чернігів, 2020. – 43 с.
3. Руднік О. М. Структура антропогенних ландшафтів смт. Козелець та шляхи її оптимізації: кваліфікаційна робота освітнього ступеня «бакалавр»: 101 Екологія / Руднік О. М. // Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка. – Чернігів, 2021. – 43 с.
4. Тимуляк Л. М. Передгірські урбанізовані ландшафти: структура, функціонування, дослідження для прикладних цілей : монографія / Л. М. Тимуляк. – К., 2013. – 172 с.
5. Урбоекологія : підручник / І. А. Василенко, О. А. Півоваров, І. М. Трус, А. В. Іванченко. – Дніпро : Акцент ПП, 2017. – 309 с.
6. Клименко М. О. Екологія міських систем : підручник / М. О. Клименко, Ю. В. Пилипенко, О. С. Мороз. – Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2012. – 294 с.
7. Потапчук І. С. Антропогенні ландшафти урбосистеми Новгород-Сіверського: кваліфікаційна робота освітнього ступеня «бакалавр»: 6.040106 Екологія, охорона природи та збалансоване природокористування / І. С. Потапчук // Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка. – Чернігів, 2019. – 40 с.

References

1. Homon, L.V. (2020). *Landshaftno-rekreatsiine zonuvannia ta perspektyvy rozbudovy miskoho seredovyshcha Chernihova* [Landscape and recreational zoning and prospects for the development of the urban environment of Chernihiv]. Natsionalnyi universytet «Chernihivskiy kolehium» imeni T. H. Shevchenka.
2. Doroshenko, O.A. (2020). *Suchasna landshaftno-urbanistychna struktura terytorii m. Chernihiv ta napriamky yii rozvytku* [Modern landscape-urban structure of the territory of Chernihiv and directions of its development]. Natsionalnyi universytet «Chernihivskiy kolehium» imeni T. H. Shevchenka.
3. Rudnik, O.M. (2021). *Struktura antropohennykh landshaftiv smt. Kozelets ta shliakhy yii optymizatsii* [The structure of anthropogenic landscapes of Kozelets and ways of its optimization]. Natsionalnyi universytet «Chernihivskiy kolehium» imeni T.H. Shevchenka.
4. Tymuliak, L.M. (2013). *Peredhirski urbanizovani landshafty: struktura, funktsionuvannia, doslidzhennia dlia prykladnykh tsilei* [Foothill urbanized landscapes: structure, functioning, research for applied purposes].
5. Vasylenko, I.A., Pivovarov, O.A., Trus, I.M., & Ivanchenko, A.V. (2017). *Urboekolohiia* [Urboecology]. Aktsent.
6. Klymenko, M.O., Pylypenko, Yu.V., & Moroz, O.S. (2012) *Ekolohiia miskykh system* [Ecology of urban systems]. OLDI-PLIUS.
7. Potapchuk, I.S. (2019). *Antropohenni landshafty urbosystemy Novhoroda-Siverskoho* [Anthropogenic landscapes of the urban system of Novhorod-Siverskyi]. Natsionalnyi universytet «Chernihivskiy kolehium» imeni T. H. Shevchenka.

Отримано 18.12.2022

Yuliia Kvashuk

PhD in Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Ecology and Nature Protection

T. H. Shevchenko National University «Chernihiv Colehium» (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: kvashukj@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8361-5657>. **Scopus Author ID:** [56856864100](https://orcid.org/0000-0001-8361-5657)

**THE STRUCTURE OF ANTHROPOGENIC LANDSCAPES
OF NOVHOROD-SIVERSKYI**

Each city with certain physical-geographical conditions and economic activity of the population is a unique combination of various types of anthropogenic landscapes with natural centers that form the human habitat.

Highlighting the structure of anthropogenic landscapes of the urban system allows to develop mechanisms of rational land use and functional zoning of a city. The main features for highlighting anthropogenic landscapes are the type of infrastructure, the presence of artificial surfaces, water bodies, vegetation, infills nature, etc.

The analysis of research and publications in this direction showed the perspective of the spatial representation of anthropogenic landscapes of Ukrainian cities with the aim of developing the principles of preserving the ecological balance of territories.

The purpose of the article is to present the results of mapping the landscape-urban structure of Novhorod-Siverskyi.

The work was performed using modern software and methodical approaches for highlighting and classification of anthropogenic landscapes in the conditions of an urbanized environment.

During the study of the urban system of Novhorod-Siverskyi, 14 types of landscapes were identified, their functional purpose was clarified, the spatial arrangement of taxonomic units of the landscape-urban structure of the city was reproduced, the constituent elements of anthropogenic landscapes were singled out, and the influencing factors on the formation of certain types of landscapes were analyzed.

Keywords: anthropogenic landscape; space photo; mapping; urban system; studied area; urban ecology.

Table: 1. Fig.: 2. References.: 7.

Тарас Гуцул¹, Іван Жежера², Владислав Ткач³

¹кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник
Навчально-науковий інститут біології, хімії та біоресурсів

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича (Чернівці, Україна)

E-mail: t.gutsul@chnu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7192-3289>, ResearcherID: [R-8012-2017](https://orcid.org/0000-0002-7192-3289)

²кандидат технічних наук,

Національний аерокосмічний університет імені Миколи Єгоровича Жуковського "ХАІ" (Харків, Україна)

E-mail: i.zhezhera@khai.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2638-6445>

³аспірант кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки,

Навчально-науковий інститут фізико-технічних та комп'ютерних наук

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича (Чернівці, Україна)

E-mail: v.tkach@chnu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5444-5919>, ResearcherID: [HLG-2702-2023](https://orcid.org/0000-0001-5444-5919)

ОСОБЛИВОСТІ КЛАСИФІКАЦІЇ ТА МЕТОДІВ ВИБОРУ БПЛА

Безпілотні літальні апарати активно впроваджуються в різні сфери людської діяльності, демонструючи відмінні результати. Складність задач та різноманітність вимог відображається на множині модельного ряду. Незважаючи на оптимальність їх застосування, вони й досі залишаються відносно дорогим обладнанням. Переконливою альтернативою стає ринок комплектуючих для самостійної конструкції, який може значно зменшити їхню вартість, відкидаючи послуги спеціалістів з цього питання за умови належного фахового підходу.

Розглянуто питання існуючих класифікацій БПЛА. Встановлено відсутність єдиного підходу до класифікації та переважну орієнтацію наявних класифікацій на військові потреби. З'ясовано наявні методи вибору БПЛА. Запропоновано власне бачення розв'язання цієї ситуації.

Стаття є оглядово-інформаційною.

Ключові слова: БПЛА; дрон; класифікація; коптер; моніторинг.

Бібл.: 35.

Актуальність теми дослідження. Створення і використання безпілотних літальних апаратів (далі – БПЛА) стало серйозним проривом у сфері інтелектуальних досягнень. Інновації проявляються в усіх елементах: від сучасних композитних матеріалів до новітнього навігаційного обладнання та програмного забезпечення. Аналіз фізичних процесів, які лежать в основі польоту БПЛА, з урахуванням типових співвідношень між технічними параметрами вузлів, наявних на сьогоднішній день, дозволяє спростити як розрахунок так і підбір ефективних комбінацій. Тому розробка фізичних основ розрахунку параметрів систем є актуальним теоретичним дослідженням.

Очікуваний обсяг світового ринку БПЛА до 2024 р. повинен скласти 67,3 млрд дол. На виробничий сектор прогнозовано 35,6 млрд дол., з яких – 13,7 млрд дол. (38,5 %) на БПЛА великої тривалості польоту на середніх висотах; на тактичні БПЛА – 8,6 млрд дол. (24,1 %); на БПЛА великої тривалості польоту, які будуть використовуватися на великих висотах – 7,3 млрд дол. (20,5 %); на БПЛА вертикального зльоту і приземлення – 3,0 млрд дол. (8,4 %); на ударні БПЛА – 1,7 млрд дол. (4,8 %); на портативні БПЛА – 1,3 млрд дол. (3,6 %) [1].

До кінця поточного десятиліття реалізація «безпілотників» у світі сягне рівня 100 млрд дол., при цьому значна частина зароблених коштів (65 %) будуть реінвестовані в R&D (Teal Group, forecast 2030). Лідерами будуть сектори безпілотних систем для бізнесу (B2B), держави (B2G) та військової сфери (Military). Продаж комерційним клієнтам в роздріб (B2C) майже не зазнає змін.

Нині застосування безпілотних БПЛА дозволяє людям не перебувати в загрозованих життєвих умовах, провадити діяльність за межами фізичних та психофізіологічних здібностей особи, а також відкриває широкий перелік функцій, які раніше могли здаватися нереальними.

Постановка проблеми. Нині існує понад 1500 серійних моделей БПЛА різних типів. Їхня загальна кількість за останні кілька років потроїлася. Таке різноманіття типів можна пояснити широким спектром варіантів застосування. Особливості їх конструкції

дозволяють розв'язувати конкретні задачі ефективніше. Розробка та практичне застосування БПЛА потребують з'ясування їх класифікації. Класифікація повинна спрощувати та полегшувати процес вибору того певного способу експлуатації БПЛА, який розкриває значення місця застосування та очікуваних показників ефективності.

У наказі Мініборони України від 8 грудня 2016 р. № 661, яким затверджено [2], наведено Класифікацію безпілотних літальних апаратів безпілотних авіаційних комплексів, яка є загальною для державної безпілотної авіації України.

Вітчизняна класифікація в основному притаманна військовій сфері, та обмежено – сфері цивільного захисту [3], що створює невизначеність під час спроб класифікації БПЛА для інших сфер застосування.

Міжнародною асоціацією по безпілотним літальним системам UVSI (Association for Unmanned Vehicle Systems International) запропоновано універсальну класифікацію БПЛА. Вона полягає у поділі БПЛА на групи та категорії (малі, тактичні, стратегічні, спеціального призначення) і їх відповідність критеріям: злітної маси, дальності, висоти та тривалості польоту. Наведена класифікація на сьогодні розповсюджується на існуючі та концептуальні моделі БПЛА. Її не можна вважати сталою, так як вона постійно переглядається та доповнюється. Крім того, багато типів апаратів із нестандартними комбінаціями параметрів важко віднести до певного існуючого класу.

Класифікація, діюча в НАТО в своїй основі передбачає поділ БПЛА за висотою (радіусом дії) і тривалістю польоту.

російська класифікація БПЛА ґрунтується на військовому використанні БПЛА. Вони поділяються на категорії та відрізняються злітною масою і дальністю польотів.

Розробники звертають увагу на той факт, що лише одним типом БПЛА неможливо вирішити перелік поставлених завдань. Не буває універсальних та ефективних рішень. Виходячи із широкого переліку існуючих на сьогодні пристроїв, вибір потрібно зупинити на тих, які повною мірою задовольняють технічні умови [4].

Донедавна розробку й впровадження БПЛА в Україні можна було охарактеризувати як нескоординовану та стихійну через відсутність державної програми. Розробники погано розуміли потреби органів національної безпеки [4]. Каталізатор швидкого зростання обсягів конструювання та виробництва БПЛА спричинений збройною агресією російської федерації. Згідно аналітичних оцінок, повітряна розвідка разом з вогнем ствольної й реактивної артилерії спричинила 85 % усіх втрат сил антитерористичної операції [5; 6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Традиційне проектування БПЛА опирається на адекватні функціональні математичні моделі, які враховують вплив серії факторів на аеродинаміку, міцність конструкції, точність керування та експлуатаційну ефективність. Інтуїтивно-емпіричний підхід опирається на рівень знань та досвіду учасників проектування і допомагає серед множини аналогів технічних рішень обрати раціональні варіанти або продовжити обґрунтований пошук технічних ідей. Відсутність уніфікованого науково обґрунтованого підходу до проектування БПЛА на основі методів оптимізації суттєво погіршує ситуацію [7].

Авторами [8] запропоновано систему підтримки прийняття рішень (СППР) для вибору БПЛА, котра дозволяє проводити порівняльну оцінку та вибір оптимальних варіантів БПЛА згідно з заданими показниками. Необхідність використання СППР обумовлена постійним зростанням об'ємів інформації (щодо нових моделей БПЛА та їхніх технічних характеристик) і потребою аналізу та врахуванням великої кількості взаємопов'язаних факторів і вимог, що впливають на такий вибір.

Питання вибору типу та конструкції БПЛА за своєю природою є багатокритеріальним оцінюванням, котре ґрунтується на оцінювання альтернатив та використанні часткових методів ранжування альтернатив. До них відносять методи: максимальних відстаней,

справедливого компромісу, головного критерію, лексикографічної оптимізації, використання апроксимаційних і багатокритеріальних оптимізаційних математичних моделей, оцінювання і порівнювання ефективності функціонування однотипних організацій, оцінювання якості засобів на підставі використання двох гіпотетичних еталонів – гіршої і кращої якості. Такі дослідження розглянуто в [9; 10; 11; 12].

Дослідження системного підходу в управлінні проектом створення БПЛА цивільного застосування розглянуто в [13]. Методи управління змістом і якістю проекту базуються на теорії точного вагового потрапляння та філософії ощадливого виробництва (lean manufacturing).

Особливості балансу маси безпілотного літального апарату (БПЛА) та маси засобів безпеки БПЛА досліджено в [14]. Отримано рівняння балансу мас БПЛА та залежність злітної маси БПЛА від відомих навантажень і відносних мас частин БПЛА з урахуванням безпеки та льотної придатності.

Різноманітність сучасних польотних місій БПЛА та збільшення їх складності вимагають створення надійних систем управління польотом БПЛА. На основі параметричних, а також структурних методів синтезу систем алгоритми та програми для автопілотів БПЛА управляють законами в режимах стабілізації напрямку, швидкості та висоти, а також для управління наведенням, включаючи траєкторію руху. Науковцями НАУ були створені алгоритми планування та маршрутизації під час польоту в умовах атмосферних змін. Застосування параметричного синтезу дозволяє визначити оптимальну настройку існуючих автопілотів, забезпечуючи компроміс між стійкістю та працездатністю систем, в той час як структурний синтез дозволяє знайти перспективні закони управління автопілотами, включаючи закони управління з елементами штучного інтелекту [15].

Особливості ергодизайну повітряних суден та похідні від нього науково-методичні проблеми і шляхи їх розв'язання містяться в [16], і характерні для переважної більшості ситуацій, що виникають в ході розробки нових моделей БПЛА.

Мета дослідження. Проаналізувати критерії для класифікації та сучасні методи для вибору безпілотних літальних апаратів.

Виклад основного матеріалу. «Дрон» і «БПЛА» – сучасні назви безпілотних апаратів, які часто вживають некоректно під час опису будь-яких непілотованих транспортних засобів. Поняття «дрону» застосовується до широкої категорії транспортних засобів (автономні машини з дистанційним керуванням, підводні човни та ін.), тоді як БПЛА – саме до літаючих. Тобто, БПЛА називають дроном, при цьому не кожен дрон буде БПЛА.

Правила технічної експлуатації безпілотних авіаційних комплексів дають визначення безпілотного літального апарату (далі – БПЛА) – як повітряного судна, керування польотом якого і контроль за яким здійснюється дистанційно за допомогою пункту дистанційного пілотування, розташованого поза повітряним судном, або повітряним судном, що здійснює політ автономно за відповідною програмою [17].

Основні елементи БПЛА: повітряна платформа зі спеціальною системою посадки, силова установка, джерело живлення, система електроживлення, бортове радіоелектронне обладнання (бортове обладнання управління та електронні елементи цільового навантаження). Бортове обладнання включає бортову електронно-обчислювальну машину, приймач сигналів радіонавігаційної системи, висотомір, гіровертикаль, бортову систему зв'язку та передачі даних, рульову машинку [18].

Множина класифікаційних ознак БПЛА охоплює поділ [19]: за масштабом розв'язуваних задач, за масою; за тривалістю польоту; за практичною стелею польоту; за типом літального апарату; за базуванням; за використанням; за типом системи керування; за правилами польоту; за типом крила; за напрямком; за паливною системою; за типом паливного бака; за кількістю використань та за радіусом дії [18].

За масштабом розв'язуваних задач БПЛА бувають тактичні (можливість польоту на відстань до 80 км), оперативно-тактичні (дальність до 300 км) та оперативно-стратегічні (дальність до 700 км).

До основних льотно-технічних характеристик сучасних БПЛА належать: висотно-швидкісні; масогабаритні; дальності й тривалості польоту.

Наведені властивості знаходяться у кореляційному зв'язку та взаємозалежності, що дозволяє одразу зіставити їх з чіткою класифікаційною групою. За окремо встановленими характеристиками з високим рівнем ймовірності можна передбачати параметри інших.

За **масою БПЛА** діляться на малорозмірні – до 200 кг, середньорозмірні – 200-2000 кг, великорозмірні – 2000-5000 кг, важкі – понад 5000 кг [20].

Умовно виділяють два типи БПЛА – універсальні та спеціалізовані. Спеціалізовані призначені для використання певних задач, а універсальні – виключно для перенесення корисного навантаження. На основі даних про параметри корисного навантаження визначається операційна дальність для мультироторних систем [21].

Розрахункові дані, підтвержені результатами експериментальних досліджень та льотних випробувань, показують, що використання композиційних матеріалів дозволяє знизити вагу планера літального апарату на 30-40% порівняно з вагою планера виконаного з традиційних металевих матеріалів [22].

Все це забезпечує отримання резерву ваги, який може бути використаний для збільшення дальності польоту або корисного навантаження. Використання композиційних матеріалів в авіаційній промисловості значно знижує матеріаломісткість конструкцій, збільшує до 90% коефіцієнт використання матеріалу, зменшує кількість оснастки та різко знижує трудомісткість виготовлення конструкцій за рахунок зменшення у кілька разів кількості деталей, що входять до них [23].

За **тривалістю польоту БПЛА** поділяються на малу – менше 6 год., середню – 6-12 год та велику – понад 12 год [24].

Практична стеля польоту БПЛА згідно категорій наступна: маловисотні – менше 1 км, середньовисокі – 1-4 км, висотні – 4-12 км, стратосферні – більше 12 км [25].

По типу БПЛА поділяються на реалізовані за літаковою аеродинамічною схемою, за гелікоптерною аеродинамічною схемою, мультироторні та гібридні (так звані апарати вертикального зльоту та посадки – VTOL).

За типом силової частини: електричні, з двигуном внутрішнього згорання та реактивні.

БПЛА можуть бути електричними або бензиновими. Перший варіант функціональніший, в деяких модифікаціях може працювати спільно з сонячними батареями, однак потребує постійної зарядки апаратів, а тому тривала безперебійна робота потребує кількох резервних батарей та їх почергової експлуатації. Бензинові варіанти триваліші в роботі, стійкіші до поривів вітру завдяки додатковій масі. Однак при зіткненні з поверхнею вони можуть розбитися або спалахнути.

По базуванню БПЛА поділяються на наземні, які пересуваються земною поверхнею, морські, призначені для діяльності у водному середовищі, космічні, спрямовані до виходу у космічний простір [26].

За використанням БПЛА бувають: військовими, промисловими, цивільними та антитерористичними. В свою чергу цивільні поділяються на: державні, комерційні, транспортні [27].

За типом системи керування БПЛА поділяються на дистанційно пілотовані керовані оператором в межах видимості та дистанційно керовані, що працюють автономно та/або з допомогою оператора та повністю автоматичні літальні апарати.

Зв'язок з БПЛА в польоті відбувається через радіоканали. Частотний діапазон таких каналів становить від 433 МГц до 5,2 ГГц. Іноді через радіоканал можуть передавати відео та фотоматеріали, отримані в процесі зйомки. Габаритні характеристики антен та їх конструктивні особливості впливають на аеродинамічність [28].

БПЛА згідно правил польотів бувають візуальні та приладові. Перші знаходяться та здійснюють контроль польоту в межах прямої видимості пілота. Зазвичай така робота триває в світлий час доби. За умови наявності сліпих зон, оптимально перейти до автоматичного режиму та опиратися на візуальні та приладові правила в процесі польоту [26].

За типом крила БПЛА виділяють фіксовані – літакового (нерухоме крило) та коптерного (роторні) типів, плаваючі (гібридні) – використовуються в конвертипланах [27]. Тенденція розвитку БПЛА спрямована переважно на використання літакового і вертолітного типів порівняно з іншими моделями [25].

БПЛА з нерухомим крилом (швидкість руху приблизно 50-180 км/год.) енергоефективні порівняно з мультироторними. Це зумовлено створенням підйомної сили за допомогою аеродинамічних сил, що з'являються на поверхні крила під час руху з порівняно нижчими енерговитратами силової частини. Ключовий недолік – потреба в злітно-посадковій смузі через горизонтальний зліт і посадку, та неможливість «зависання» над фіксованими локаціями.

В основі мультироторних апаратів (швидкість польоту 40-100 км/год., що менше, ніж у літаків) принцип вертикального зльоту і посадки. Їм легше «зависати» над фіксованими точками, а тому вони оптимальніше взаємодіють з стільниковим покриттям на певних територіях. Ключовий недолік – обмеженість мобільності та значне споживання енергії.

Для мультикоптерів кількість гвинтів є дуже важливою характеристикою. Досі здавалося, що кількість гвинтів позначається на стабільності польоту. Очевидно, що коптери з 8 гвинтами літали набагато стабільніше 4-х і 6-ти гвинтових. Проте сьогодні розвиток алгоритмів польоту дозволяє на коптерах стабілізувати політ навіть у випадку відмови одного із гвинтів [28]. Аналіз існуючих і перспективних автоматичних систем управління літальними апаратами (СУЛА) вказує, що в умовах зростаючих вимог до функціонування малогабаритних літальних апаратів необхідно виконання польотного завдання з заданими показниками якості та підвищення ймовірності повернення об'єкта [29].

Напрямок мультикоптерів (систем вертолітного типу) стрімко розвивався протягом останніх 5-7 років. На перших порах професійні рішення на базі коптеїв коштували тисячі і навіть десятки тисяч \$, то зараз масова розповсюдженість спричинила суттєве зниження їх цінних меж. Масова поява на ринку систем, розроблених і виготовлених в країнах Азії зміцнила цю тенденцію. Таким чином, сьогодні за суму в 1-2 тис. \$ можна придбати систему БПЛА, з дальністю виконання польотів до 3-5 км. Такі системи дають змогу щодо передачі зображень високої якості, одержуваних з бортової камери, встановленої на стабілізованому підвісі. Попри означене навантаження можливості подібних апаратів дозволяють потенційно розмістити і інші корисні навантаження. Експериментально було продемонстровано можливість використання мультикоптерних БПЛА з доставки невеликих вантажів, наприклад, засобів порятунку, аптечок першої допомоги тощо, опрацьовуються також питання по доставці кореспонденції та інших невеликих комерційних вантажів [31].

В основі мультироторних апаратів принцип вертикального зльоту і посадки, що дозволяє здійснювати зависання в фіксованому місці та забезпечує оптимальніше покриття стільниковим зв'язком в певних областях. Інколи в необхідних місцях мультироторні БПЛА з високою точністю і влучністю виконують функцію базових станцій. Проте їх незначна в часі мобільність обходиться споживанням великої кількості енергії.

БПЛА з гібридним крилом (використовують вертикальну підймальну силу або горизонтальну тягову) з'явилися у продажу нещодавно. Ці апарати з фіксованим/обертвовим крилом спроможні оперативного добиратися до точки інтересу, ковзаючи повітряним простором і зависаючи за допомогою чотирьох роторів.

За напрямком підйому БПЛА бувають – горизонтальні, вертикальні, мультипідйомні. Напрямок та підйомна сила залежать від типу крила, а також від можливості підійматися та сідати як самостійно, так і за допомогою допоміжної техніки [20]. По типу підйому/посадки: запускаємі використовують систему запуску, палубні підіймаються з палуби з використанням керівного крока або тросу [26].

Паливна система БПЛА поділяє їх на види: монозаправні – одноразова заправка паливної системи виконуються в промислових умовах виробником на заводі, полізаправочні – багаторазова заправка, яка може, в свою чергу, бути наземною – виконується на землі, платформною – морська (на борту морського судна) та бортовою (на борту пілотованого літального апарату) [27].

Збільшення кількості двигунів призводить до збільшення рівня живлення та потреби в більшій ємності батарей. Однак, більша кількість двигунів дозволяє збільшити вантажопідйомність та зменшити польотний час і радіус дії БПЛА. Збільшення кількості двигунів призводить до ускладнення керування апаратом, зростають його габарити та «вітрильність». Вітрові пориви на висоті частіше повертають літальний апарат, змінюють траєкторію його курсу. Тому, для підтримки вказаного оператором напрямку польоту буде затрачатися більше енергії [28].

Легкі БПЛА варто обладнувати електричними авіадвигунами із живленням від акумуляторів. На середніх ефективнішим буде поєднання електродвигунів із поршневіми та роторними двигунами [30].

Важливою конструкторською характеристикою є **тип паливного баку БПЛА**. Літальні апарати поділяються на ті, що мають основний паливний бак, та базово-резервні – поєднання основного та резервного паливних баків.

За кількістю використань БПЛА поділяються на одноразові та багаторазові. Одноразові, в яких не передбачено систему поділяються на одноразові безпосадкові БПЛА (без системи посадки) та одноразові посадкові (є система посадки та одноразова паливна система). Слід зауважити, що багаторазовими вважаються апарати з використанням не менше 10 разів [26].

Діяльність БПЛА може здійснюватися в великому **радіусі**. Існує п'ять категорій: ближній радіус – до 40 км, малий – до 70 км, середній – до 300 км, дальній – до 1500 км, великої тривалості польоту – не менше 1500 км [32].

У розв'язанні проблеми вибору оптимальної конструкції БПЛА може допомогти використання електронних програмних засобів, так званих електронних калькуляторів дронів. Їх достатньо багато, проте досить популярним є онлайн-ресурс *xcopter Calc* [33]. Він дозволяє по введеним компонентам виконати розрахунок технічних характеристик дронів: часу польоту, ваги коптера, корисного навантаження, електричної потужності та багато іншого. Не знаючи фізичних закономірностей та зв'язків між параметрами польоту досить складно підібрати оптимальну конструкцію, оскільки це тисячі доступних комбінацій.

У калькулятора немає обмежень щодо кількості двигунів, регуляторів швидкості чи ємності акумулятора, але для точного розрахунку необхідно встановити параметри квадрокоптерів, гексакоптерів, октакоптерів або дектокоптерів.

При аваріях, як правило, основна шкода завдається рамі (корпусу) і пропелерам. Низька вартість останніх, особливо коли мова йде про пропелер невеликого діаметра, не критична. Слід зазначити, що надійність роботи мультикоптерних систем зростає з кожним днем, з'являються додаткові ступені захисту, сенсорні датчики, автоматичні режими та інтелектуальне моделювання.

Відсоткова структура випадків відмов БПЛА пов'язана в основному з двигунами (37 %), системами управління (25 %), помилками операторів (17 %) та проблемами із зв'язком (11 %) [34].

Висновки. Інноваційність та тенденції стрімкого розвитку безпілотних технологій зумовлюють відсутність єдиної узагальненої класифікації БПЛА як у нашій, так і в інших країнах. Наявні класифікації малоефективні, оскільки не надають достатнього обсягу інформації та не розглядають інтегрований підхід до сучасних вимог і технічних характеристик БПЛА. Практично всі апарати були військовою розробкою, і більшість класифікацій на сьогодні орієнтовані саме на потреби військових.

Основним критерієм вибору схеми повинен бути перелік функцій і завдань, що повинні виконуватися, дальність і висота польотів, а також вимоги до вантажопід'ємності корисного вантажу та можливого бортового обладнання.

При розв'язанні задачі вибору раціонального типу і обладнання БПЛА оптимальним є підхід, що полягає на застосуванні математичного методу багатокритеріального оцінювання, такого як метод аналізу ієрархій [35].

Не варто забувати, що будь-який БПЛА буде здійснювати свій політ в умовах впливу на нього низки факторів: метеоумов (поривів вітру, опадів, температурного режиму, надзвичайних ситуацій), атмосферних явищ, пори року та часу доби, рівня освітленості, природних умов місцевості, навичок, класифікації та досвіду пілота, особливостей об'єкту спостереження.

Необхідна реалізація та впровадження функціонально стійких систем керування та вимірювання для забезпечення відмовостійкості БПЛА під час польоту.

Список використаних джерел

1. Безпілотні літальні апарати повітряного бою [Електронний ресурс] / Бурсала О., Горошко Д., Кульба П., Чуприна В. // Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. – 2019. – № 1(1). – С. 50-57. – Режим доступу: <https://dndivsovt.com/index.php/journal/article/view/184>.
2. Про затвердження Правил виконання польотів безпілотними авіаційними комплексами державної авіації України від 08.12.2016 № 661 : Наказ МО України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0031-17#Text>.
3. Класифікація, функції та завдання безпілотної авіації в сфері цивільного захисту України [Електронний ресурс] / С. Мосов та ін. // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. – 2021. – № 2(12). – С. 54-68. – Режим доступу: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.2\(12\).54-68](https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.2(12).54-68).
4. Білоус В. Класифікація безпілотних літальних апаратів та її значення для криміналістичної практики [Електронний ресурс] / В. Білоус // Теорія та практика судової експертизи і криміналістики. – 2016. – № 16. – С. 47-57. – Режим доступу: <https://doi.org/10.32353/khrife.2016.06>.
5. Хочеш #Перемогу – готовь беспилотник [Електронний ресурс] // Цензор.Нет. – 2016. – 15 лют. – Режим доступу <http://censor.net.ua>.
6. Виступ Президента України під час церемонії складання урочистої клятви ліцеїстами Київського військового ліцею імені Івана Богуна [Електронний ресурс] / Прес-центр Адміністрації Президента України. – 2016. – 14 жовт. – Режим доступу: www.president.gov.ua.
7. Раад Карім Кадем. Автоматизоване проектування безпілотних літальних апаратів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.13.12 «Системи автоматизації проектувальних робіт» / Раад Карім Кадем ; Нац. авіаційний ун-т. – К., 2011. – 19 с.
8. Підтримка прийняття рішень в системі управління безпілотного літального апарата / О. В. Самков, В. І. Сілков, О. П. Гожий, О. Є. Мавренков // Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації : щорічний наук.-теорет. та наук.-практ. зб. наук. пр. – 2012. – Вип. 8 (15). – С. 104-109.
9. Саати Т. Аналитическое планирование. Организация систем : пер. с англ. / Саати Т., Кернс К. – М. : Радио и связь, 1991. – 224 с.

10. Саати Т. Принятие решений – Метод анализа иерархий / Т. Саати. – М. : Радио и связь, 1993. – 320 с.
11. Бешелев С. Д. Экспертные оценки / С. Д. Бешелев, Ф. Г. Гурвич. – М. : Наука, 1973. – 161 с.
12. Експертне оцінювання стану матеріальнотехнічних засобів в умовах недостатнього фінансування / В. О. Абрашин, С. М. Новічонок, М. Б. Старостенко, О. Б. Куренко // Системи озброєння і військова техніка. – Харків: ХУПС, 2009. – № 3(19). – С. 110–113.
13. Крицкий Д. Системный подход к проектам создания беспилотной авиационной техники / Д. Крицкий, Е. Дружинин, Е. Яшина // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2013. – № 3. – С. 71–77.
14. Крицький Д. Особливості масової моделі безпілотного літального апарату [Електронний ресурс] / Д. Крицький, С. Яшин, С. Коба // Математичне моделювання та симуляція систем (MODS'2020). MODS 2020. Досягнення інтелектуальних систем і обчислень / за ред. Шкарлет С., Морозов А., Палагін А. – Springer, Cham, 2021. – Т. 1265. – Режим доступу: https://doi.org/10.1007/978-3-030-58124-4_29.
15. Бугайко Д. Інноваційні розробки безпілотних авіаційних систем Національного авіаційного університету / Д. Бугайко, О. Шевченко // Безпілотна авіація України: матеріали науково-практичної конференції в межах IV Міжнародного симпозиуму «Соціокультурний дискурс глобалізованого світу: наука, освіта, комунікація», 14 квітня 2021 р., Національний авіаційний університет. – К. : НАУ, 2021. – С. 8–12.
16. Ергодизайн безпілотних повітряних суден. Монографічне видання / М. П. Матійчик, А. Л. Рубцов, В. О. Свірко, В. П. Харченко, М. І. Фузік – К. : УкрНДІ ДЕ, 2019. – 193 с.
17. Про затвердження Правил технічної експлуатації безпілотних авіаційних комплексів I класу державної авіації України від 10.08.2018 № 401 [Електронний ресурс] : Наказ МО України. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1062-18#Text>.
18. Книш Б. Класифікація відомих видів безпілотних літальних апаратів [Електронний ресурс] / Б. Книш, П. Бровко, Д. Попіль // Modern engineering and innovative technologies. – 2017. – Т. 1, № 2. – С. 34–39. – Режим доступу: <http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/g117-004>.
19. Воронько І. Области застосування безпілотних літальних апаратів / І. Воронько, В. Воронько // Сучасний стан проведення наукових досліджень у IT-технологіях, галузях електроніки, інженерії, нанотехнологіях та транспортній сфері: кол. наук. монографія. – Вінниця, 2020. – С. 160. – Режим доступу: <https://publishing.logos-science.com/index.php/books/issue/view/14/9>.
20. Кутовий О. П. Тенденції розвитку безпілотних літальних апаратів / О. П. Кутовий // Наука і озброєння – 2014. – № 4. – С. 39 – 47.
21. Корисне навантаження дрону як підґрунтя для обґрунтування дальності польоту / І. Маладика та ін. // Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій : Матеріали XII Міжнар. науково-практ. конф., м. Черкаси, 8 січня 2021 р. – Черкаси, 2021. – С. 91–92.
22. Carbon nanotube scanning probe for profiling of deepultraviolet and 193 nm photoresist patterns / С. V. Nguyen et al. // Applied Physics Letters. – 2002. – Vol. 81. – P. 901.
23. Carbon nanotube tips: high-resolution probes for imaging biological systems / S. S. Wong et al. // Journal of the American Chemical Society. – 1998. – Vol. 120. – P. 603.
24. Стратегія розвитку вітчизняної авіаційної промисловості на період до 2020 року : [затверджена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2008 р. № 1656-р] [Електронний ресурс] // Урядовий портал: [сайт]. – Режим доступу: <https://www.kmu.gov.ua/npas/183540635>.
25. Глотов В. Аналіз і перспективи аерознімання з безпілотного літального апарата / В. Глотов, А. Церклевич // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Сер.: Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2014. – Вип. I (27). – С. 131-136.
26. Ростопчин В. В. Безпілотні авіаційні системи: основні поняття / В. В. Ростопчин, І. Е. Бурдун / ЕЛЕКТРОНІКА: Наука, Технологія, Бізнес. – 2016. – № 7. – С. 82-88.

27. Луцький М. Г. Розвиток міжнародного регулювання та нормативної бази використання безпілотних літальних апаратів / М. Г. Луцький, В. П. Харченко, Д. О. Бугайко // Вісник НАУ. – 2015. – № 4. – С. 5-14.

28. Яровий О. Системи управління безпілотними літальними апаратами для здійснення моніторингу наземних об'єктів [Електронний ресурс] / О. Яровий // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – 2018. – Т. 3, № 49. – С. 33–38. – Режим доступу: <https://doi.org/10.26906/sunz.2018.3.033>.

29. Жежера І. В. Моделі та методи забезпечення функціональної стійкості вимірювальних підсистем автономного малогабаритного літального апарата : дис. ... кан. техн. наук : 05.13.03 / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». – Харків, 2020. – 22 с.

30. Аналіз конструктивних особливостей і технічних характеристик основних типів силових установок для безпілотних літальних апаратів / О. Л. Шаповалов, Д. М. Колесник, Г. П. Болотов, О. В. Журахов // Технічні науки та технології. – 2018. – № 2(8). – С. 57–65.

31. Микитюк М. Роль та місце БПЛА при забезпеченні безпеки осіб під час проведення масових заходів [Електронний ресурс] / М. Микитюк // Наукові записки Львівського університету бізнесу та права. Серія Юридична. – 2017. – № 18. – С. 41–47. – Режим доступу: <https://nzlubp.org.ua/index.php/journal/article/view/33>.

32. Сальник Ю. П. Аналіз технічних характеристик і можливостей безпілотних авіаційних комплексів оперативно-тактичного та тактичного радіуса дії армій розвинених країн / Ю. П. Сальник, І. В. Матала // Військово-технічний зб. – 2013. – № 7 – С. 70–74.

33. Методика розрахунку БПЛА мультикоптерного типу / Ю. Ковальов та ін. // Управління високошвидкісними рухомими об'єктами та професійна підготовка операторів складних систем : матеріали VIII Міжнар. науково-практ. конф., м. Кропивницький, 20 грудня 2019 р. – Кропивницький, 2019. – С. 54–56.

34. Класифікація безпілотних літальних апаратів [Електронний ресурс] / О. Тимочко та ін. // Системи озброєння і військова техніка. – 2007. – № 1(9). – С. 61–66. – Режим доступу: <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/878899d8-b7a7-4481-af22-9835c0748ba0/content>.

35. Єфремов О. Методика вибору раціонального типу і варіанта обладнання безпілотних літальних апаратів для виконання завдань / О. В. Єфремов, О. А. Коршець // Системи управління, навігації та зв'язку : збірник наукових праць. – Полтава, 2018. – Т. 5 (51). – С. 3-7. – DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.5.003>.

References

1. Bursala, O., Horoshko, D., Kulba, P., & Chupryna, V. (2019). Bezpilotni litalni aparaty povitrianoho boiu [Air combat UAVS]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho naukovo-doslidnoho instytutu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki – Scientific Works of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification*, 1(1), 50-57. <https://dndivsovt.com/index.php/journal/article/view/184>.

2. Pro zatverdzhennia Pravyl vykonannia polotiv bezpilotnymy aviatsiinymy kompleksamy derzhavnoi aviatsii Ukrainy [On the approval of the Rules for the execution of flights by unmanned aviation complexes of the state aviation of Ukraine], Order of the Ministry of Defense of Ukraine. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0031-17#Text>.

3. Mosov, S., Khyzhniak, V., Litovchenko, A., & Yanchenko D. (2021). Klyasyfikatsiia, funktsii ta zavdannia bezpilotnoi aviatsii v sferi tsyvilnoho zakhystu Ukrainy [Classification, functions and tasks of unmanned aviation in the field of civil defence of Ukraine]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka – Scientific bulletin: Civil protection and fire safety*, (2(12)), 54–68. [https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.2\(12\).54-68](https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.2(12).54-68).

4. Bilous, V. (2016). Klyasyfikatsiia bezpilotnykh litalnykh aparativ ta yii znachennia dlia kryminalistychnoi praktyky [Classification of unmanned aerial vehicles and its significance for criminalistic practice]. *Teoriia ta praktyka sudovoi ekspertyzy i kryminalistyky – Theory and practice of forensic examination and forensics*, (16), 47–57. <https://doi.org/10.32353/khrife.2016.06>.

5. *Tsenzor.Net*. (2016). Khochesh #Peremohu – hotov bespylotnyk [If you want victory – prepare a drone]. <http://censor.net.ua>.

6. *Pres-tseñtr Administratsii Prezydenta Ukrainy [Press Center of the Administration of the President of Ukraine]*. (2016). Vystup Prezydenta Ukrainy pid chas tseremonii skladannia urochystoi kliatvy litseistamy Kyivskoho viiskovoho litseiu imeni Ivana Bohuna [Speech of the President of Ukraine during the solemn oath-taking ceremony by lyceum students of the Ivan Bohun Kyiv Military Lyceum]. www.president.gov.ua.

7. Raad Karim Kadem (2011). *Avtomatyzovane proektuvannia bezpilotnykh litalnykh aparativ [Automated design of unmanned aerial vehicles]* [PhD dissertation; Nats. aviatsiyni un-t n].

8. Samkov, O., Silkov I., Hozhyi, O., Mavrenkov O. (2012). Pidtrymka pryiniattia rishen v systemi upravlinnia bezpilotnogo litalnogo aparata [Support for decision-making in the control system of an unmanned aerial vehicle]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho naukovogo-doslidnogo instytutu aviatsii – Collection of scientific works of the State Research Institute of Aviation: Annual Science*, 8(15), 104–109.

9. Saaty, T., Kerns, K. (1991). *Analitycheskoe planirovanie. Organizatsiia sistem [Analytical planning. Organization of systems]*. Radio i sviaz.

10. Saaty, T. (1993) *Priniatie reshenii – Metod analiza yerarkhii [Decision-making – Hierarchical analysis method]*. Radio i sviaz

11. Beshelev, S., Hurvykh, F. (1973) *Ekspertnye otsenky [Expert assessments]*. Nauka.

12. Abrashyn, V., Novichonok, S., Starostenko, M., Kurenko, O. (2009). Ekspertne otsiniuvannia stanu materialnotekhnichnykh zasobiv v umovakh nedostatnoho finansuvannia [Expert assessment of the state of material and technical means in conditions of insufficient funding]. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika – Armament systems and military equipment*, (3(19)), 110–113.

13. Krytskyi, D., Druzhinin, E., Yashina, E. (2013). Sistemnyi podkhod k proektam sozdannia bespilotnoi aviatsionnoi tekhniki [A systematic approach to unmanned aircraft creation projects]. *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy – Science and technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*, (3), 71–77.

14. Krytskyi, D., Yashyn, S., Koba, S. (2021). Osoblyvosti masovoi modeli bezpilotnogo litalnogo aparatu [Features of the mass model of the unmanned aerial vehicle]. *Matematychni modeliuvannia ta symulatsiia system (MODS2020). MODS 2020. Dosiahnennia intelektualnykh system i obchyslen – Mathematical modeling and simulation of systems (MODS'2020). MODS 2020. Advances in intelligent systems and computing*, 1265. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58124-4_29.

15. Buhaiko, D., Shevchenko, O. (2021) Innovatsiini rozrobky bezpilotnykh aviatsiinykh system Natsionalnogo aviatsiinoho universytetu [Innovative developments of unmanned aircraft systems of the National Aviation University]. *Bezpilotna aviatsiia Ukrainy: materialy naukovopraktychnoi konferentsii v mezhakh IV Mizhnarodnogo sympoziumu «Sotsiokulturnyi dyskurs hlobalizovanoho svitu: nauka, osvita, komunikatsiia» – Unmanned aviation of Ukraine: materials of the scientific and practical conference within the IV International Symposium “Socio-cultural discourse of the globalized world: science, education, communication”*, Natioanal Aviation University.

16. Matiichyk, M., Rubtsov, V., Svirko, V. & Kharchenko, P. (2019). Erhodyzain bezpilotnykh povitriany suden [Ergonomic design of unmanned aircraft] [monograph]. *UkrNRI*, 1–193.

17. Pro zatverdzhennia Pravyl tekhnichnoi ekspluatatsii bezpilotnykh aviatsiinykh kompleksiv I klasu derzhavnoi aviatsii Ukrainy [On the approval of the Rules for the technical operation of unmanned aircraft complexes of the I class of the state aviation of Ukraine], Order of the Ministry of Defense of Ukraine. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1062-18#Text>.

18. Knysh, B., Brovko, P., Popil, D. (2017). Klyasifikatsiia vidomykh vydiv bezpilotnykh litalnykh aparativ [Classification of known types of unmanned aerial vehicles]. *Modern engineering and innovative technologies – Modern engineering and innovative technologies*, (2), 34–39.

19. Voronko I., Voronko, V. (2020). Oblasti zastosuvannia bezpilotnykh litalnykh aparativ [Fields of application of unmanned aerial vehicles]. In *Suchasnyi stan provedennia naukovykh doslidzhen u IT-tekhnologiiakh, haluziakh elektroniky, inzhenerii, nanotekhnologiiakh ta transportnii sferi – The current state of scientific research in IT technologies, electronics, engineering, nanotechnology and transport* (pp. 1–160).

20. Kutovyi, O. (2014). Tendentsii rozvytku bezpilotnykh litalnykh aparativ [Trends in the development of unmanned aerial vehicles]. *Nauka i ozbroiennia – Science and armament*, (4), 39–47.

21. Maladyka, I., Rotar, V., Pustovit, M. & Smovzhenko, O. (2021, January 8). Korysne navantazhennia dronu yak pidgruntia dlia obgruntuvannia dalnosti polotu [Drone payloads as proof to justify flight range]. *Teoriia i praktika hasinnia pozhezh ta likvidatsiyi nadzvychaynykh sytuatsii: Materialy XII Mizhnar. naukovo-prakt. konf. – Theory and practice of fire extinguishing and liquidation of emergency situations: Materials of the XII International. scientific and practical conference* (pp. 91-92).
22. Nguyen, C. (2002). Carbon nanotube scanning probe for profiling of deepultraviolet and 193 nm photoresist patterns. *Applied Physics Letters*, 81, 901. <https://doi.org/10.1063/1.1496139>.
23. Wong, S. (1998). Carbon nanotube tips: high-resolution probes for imaging biological systems. *Journal of the American Chemical Society*, 120, 603. <https://doi.org/10.1021/ja9737735>.
24. Stratehiia rozvytku vitchyznianoï aviatsiinoï promyslovosti na period do 2020 roku [Strategy for the development of the domestic aviation industry until 2020]. (2008, December 27). Government Portal. www.kmu.gov.ua/npas/183540635.
25. Hlotov, V., Tserklevych, A. (2014). Analiz i perspektyvy aeroxnimannia z bezpilotnoho litalnoho aparata [Analysis and perspectives aeroshooting process with unpiloted aircraft]. *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva – Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". Ser.: Modern achievements of geodetic science and production*, 1 (27), 131–136.
26. Rostopchyn, V., Burdun, I. (2016). Bezpilotni aviatsiini systemy: osnovni poniattia [Unmanned aerial systems: basic concepts]. *Elektronika: Nauka, Tekhnolohiia, Biznes – Electronics: Science, Technology, Business*, (7), 82–88.
27. Lutskyi, M., Kharchenko, V. & Buhaiko, D. (2015). Rozvytok mizhnarodnoho rehuliuвання ta normatyvnoi bazy vykorystannia bezpilotnykh litalnykh aparativ [Development of international regulation and regulatory framework for the use of unmanned aerial vehicles]. *Visnyk NAU – Bulletin of NAU*, (4), 5–14.
28. Iarovy, O. (2018). Systemy upravlinnia bezpilotnykh litalnykh aparatamy dlia zdiisnennia monitorynhu nazemnykh ob'ektiv. Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku [Control systems for unmanned aerial vehicles for monitoring ground objects]. *Systemy upravlinnya, navihatsiyi ta zviazku – Management, navigation and communication systems*, № 49, 33–38. <https://doi.org/10.26906/sunz.2018.3.033>
29. Zhezhera, I. (2020). Modeli ta metody zabezpechennia funktsionalnoi stiikosti vymiriuvalnykh pidsystem avtonomnoho malohabarytnoho litalnoho aparata [Models and methods of ensuring the functional stability of measuring subsystems of an autonomous small-sized aircraft] [PhD dissertation; Nats. aerokosm. un-t. im M. Ye. Zhukovskoho «Kharkiv. aviats. in-t»].
30. Shapovalov, O., Kolesnyk, D., Bolotov, H. & Zhurakhov, O. (2018). Analiz konstruktyvnykh osoblyvostei i tekhnichnykh kharakterystyk osnovnykh typiv sylovykh ustanovok dlia bezpilotnykh litalnykh aparativ [Analysis of design features and technical characteristics of the main types of power plants for unmanned aerial vehicles]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, (2(8)), 57–65.
31. Mykytiuk, M. (2017). Rol ta mistse BPLA pry zabezpechenni bezpeky osib pid chas provedennia masovykh zakhodiv [The role and place of UAVs in ensuring the safety of people during mass events]. *Naukovi zapysky Lvivskoho universytetu biznesu ta prava. Seriya Yurydychna – Scientific notes of the Lviv University of Business and Law. Legal series*, (18), 41–47. <https://nzlubb.org.ua/index.php/journal/article/view/33>.
32. Salnyk, Yu., Matala I. (2013). Analiz tekhnichnykh kharakterystyk i mozhlyvostei bezpilotnykh aviatsiinykh kompleksiv operatyvno-taktychnoho ta taktychnoho radiusa dii armii rozvynenykh krain [Analysis of technical descriptions and possibilities of UAV operational and tactical range of armies of developed countries]. *Viiskovotekhnichniy zbirnyk – Military technical collection*, (7), 70–74.
33. Kovalov, Yu. (20 dec. 2019). Metodyka rozrakhunku BPLA multykopternoho typu [Methodology for calculating UAV multicopter type]. *Upravlinnia vysokoshvydkisnymy rukhomymy ob'ektamy ta profesiina pidhotovka operatoriv skladnykh system – Management of high-speed moving objects and professional training of operators of complex systems: materials of VIII International. scientific and practical conference* (pp. 54-56).
34. Tymochko, O., Holubnychi, D., Tretiak, V. & Ruban, I. (2007). Klasyfikatsiia bezpilotnykh litalnykh aparativ [Classification of unmanned aerial vehicles]. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika – Weapon systems and military equipment*, (1(9)), 61–66.

35. Efremov, O., Korshets, O. (2018). Methodology for choosing a rational type and variant of equipment of unmanned aerial vehicles for the performance of tasks [The method of choosing a rational type and option of equipment of unmanned aerial vehicles for the performance of tasks]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku – Management, navigation and communication systems*, 5(51), 3-7. Retrieved from doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.5.003>.

Отримано: 03.02.2023

UDC 629.7.01

Taras Hutsul¹, Ivan Zhezhera², Vladyslav Tkach³

¹PhD in Technical Science, Associate Professor, Senior Research Fellow
Educational and Scientific Institute of Biology, Chemistry and Bioresources
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University (Chernivtsi, Ukraine)

E-mail: t.gutsul@chnu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7192-3289>. ResearcherID: [R-8012-2017](https://orcid.org/0000-0002-7192-3289)

²PhD in Technical Science

Mykola Yehorovich Zhukovsky National Aerospace University "KHAI" (Kharkiv, Ukraine)

E-mail: i.zhezhera@khai.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2638-6445>

³PhD student of the Department of Radio Engineering and Information Security,
Educational and Scientific Institute of Physical, Technical and Computer Sciences

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University (Chernivtsi, Ukraine)

E-mail: v.tkach@chnu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5444-5919>. ResearcherID: [HLG-2702-2023](https://orcid.org/0000-0001-5444-5919)

FEATURES OF UAV CLASSIFICATION AND SELECTION METHODS

Unmanned aerial vehicles (UAVs) are being actively adopted in various areas of human activity, demonstrating excellent results. Their usage allows to minimize the risks of people being in high-risk conditions, and integration with various systems expands the range of functions that previously seemed impossible.

There are currently over 1,500 different official UAV designs, and the number is growing rapidly. The effectiveness of choosing a specific model and its subsequent application for the specific tasks requires a clear classification. Domestic classification is mainly inherent in the military sphere and in the sphere of civil protection with a limited extent, which creates uncertainty for other possible spheres of application. Other classifications do not have sufficient completeness and do not consider an integrated approach to modern requirements and technical characteristics of UAVs.

Currently there is no single science-based systematic approach to the design of UAVs based on the use of optimization methods. It is clear that the problem of this kind is multi-criteria, and cannot do without optimization mathematical models and methods. However, the dynamics of the development of elements and solutions, the growth of information objects regarding new models and characteristics, the consideration of interrelated factors make this process impossible without decision support systems. The use of parametric synthesis allows to determine the compromise between stability and workability of systems.

Criteria analyze for classification and modern methods for selecting unmanned aerial vehicles.

The usage of electronic software tools, so-called electronic drone calculators, can help to solve the problem of choosing the optimal UAV design.

Most of the classifications today are oriented to the needs of the military. The main criterion for choosing a scheme depends on the list of expected functions and tasks, flight range and altitude, as well as requirements for cargo capacity and possible on-board equipment. The approach of the mathematical method of multi-criteria evaluation, such as the method of analyzing hierarchies, is optimal.

The article is an overview and information.

Keywords: UAV; drone; classification; copter; monitoring.

References.: 35.

**ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ
НАУКОВИХ СТАТЕЙ ДО НАУКОВОГО ЖУРНАЛУ
«ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ»**

Шановні дописувачі!

Для подання статті необхідно спочатку надіслати статтю та інформацію про автора, з яким контактувати щодо публікації статті, оформлені за встановленими вимогами, для попереднього розгляду редакційною колегією журналу «Технічні науки та технології». За умови відповідності статті спеціальностям, за якими акредитовано журнал, відповідності нормам академічної доброчесності за результатами перевірки на плагіат, позитивної незалежної рецензії від призначеного редакційною колегією рецензента, стаття розміщується в макеті журналу.

Редакційна колегія забезпечує розгляд та незалежне рецензування поданих до публікації матеріалів вченими, які мають науковий ступінь та здійснюють дослідження за спеціальністю, що відповідає тематиці поданого для публікації матеріалу, і є авторами (спів-авторами) загальною кількістю не менше трьох публікацій у наукових виданнях, включених до категорії «А» та/або категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України, та/або у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus за відповідною спеціальністю, оприлюднених упродовж останніх п'яти років.

Опублікування наукових статей у журналі «Технічні науки та технології» є платним. Вартість публікації наукової статті становить:

- **60 грн/1 сторінка** (за умови, якщо авторам потрібна паперова версія журналу);
- **40 грн/1 сторінка** (за умови, якщо авторам достатньо електронної версії журналу).

Остаточна вартість публікації формується після готовності електронного макету журналу та повідомляється автору, відповідальному за публікацію статті. Оплата підтверджується квитанцією.

**УМОВИ ПУБЛІКАЦІЇ, ВИМОГИ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ, РЕКВІЗИТИ
ОПЛАТИ ТА ОСТАННІ НОМЕРИ НАУКОВОГО ЖУРНАЛУ «ТЕХНІЧНІ НАУКИ
ТА ТЕХНОЛОГІЇ» РОЗМІЩЕНО НА САЙТІ»: <http://tst.stu.cn.ua/>**

Контактна інформація:

Мороз Наталія Вікторівна

Тел. моб.: (0462) 665-225

E-mail: tst.technical.sj@gmail.com

**Відповідальність за матеріали, наведені у статті, несе автор.
Неправильно оформлені автором стаття та супровідні документи,
що не відповідають зазначеним вимогам, розглядатися не будуть.**

*Редакція розглядає надходження публікації та супровідних документів
як згоду дописувача (ів) щодо передачі авторського права на використання твору
(тиражування, розповсюдження тощо).*

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

№ 4(30)

Відповідальний за випуск
Технічний редактор, відповідальна за випуск
Редактор

С. П. Сапон
Н. В. Мороз
О. С. Смелова

Підписано до друку 14.02.2023. Формат 60×84/8. Ум. друк. арк. – 26,75.
Тираж 100 пр. Замовлення № 20/22.

Редакційно-видавничий відділ Національного університету «Чернігівська політехніка»
14035, Україна, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95.
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції серія ДК № 7128 від 18.08.2020 р.