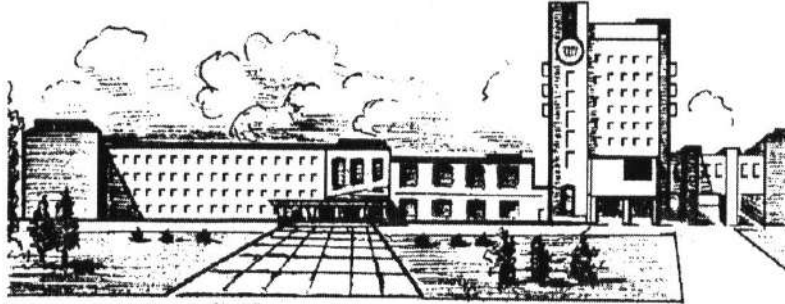


ISSN 2411-5363 (print)
ISSN 2519-4569 (online)

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



ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

№ 1(27)

Чернігів 2022

Друкується за рішенням вченої ради Національного університету «Чернігівська політехніка» (протокол № 4 від 30.05.2022 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 : Т38 НУ «Чернігівська політехніка», 2022. – № 1(27). – 212 с.

В 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.

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

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 Є. В., доктор технічних наук, доцент, Центральноросійський 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»;

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

Енергетика, електротехніка та електромеханіка

Вініков 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-Кадалвал Е., доктор технічних наук, професор, Університет Естремадури (Іспанія);

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

Хімічні та харчові технології

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

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;

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

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

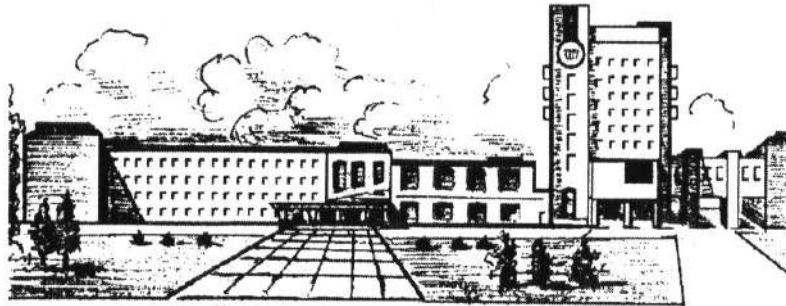
Шульц Р. В., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури;

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 № 1(27)

Chernihiv 2022

Published by the decision of the Academic Council of the Chernihiv Polytechnic National University (protocol № 4 dated 30.05.2021). 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. – № 1(27). – 212 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;

Dmytriiev 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 akademii;

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;

Povstianyi O. Yu., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Lutsk National Technical 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 «Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky»;

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

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

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 «Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky»;

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

Cheliabieva 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;

Palianysia 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;

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>Сахно Є.</i> Визначення основних параметрів модернізованого гідростатичного підшипника з урахуванням зміщення вала під навантаженням	7
<i>Батурін Є., Романченко О., Голубенко О., Соколов В.</i> Методика проектного розрахунку електрогідравлічного слідкуючого привода технологічного обладнання	16
<i>Лебедєв В., Тищенко В., Лой С.</i> Особливості структуроутворення металу при електродуговому механізованому наплавленні з модуляцією режимів	27
<i>Казмиренко Ю., Лебедєва Н., Макруха Т.</i> Корозійна стійкість і теплозахисні властивості композиційних покриттів, наповнених зольними мікросферами	38
<i>Марков О., Хващинський А., Мусорін А., Маркова М., Лисенко А.</i> Дослідження нового способу кування великих злитків на основі осадження профільованих заготовок	45
<i>Струтинський С., Семенчук Р.</i> Розроблення спеціальних математичних моделей дослідження точності реальних поверхонь зубчастих коліс циклоїдальних передач	54
<i>Гладський М., Барандич К., Фролов В., Юренко С.</i> Вплив концентрації напружень на деформування Сталі 20 при циклічних навантаженнях	60
<i>Гупало Ю., Бельмас І., Білоус О., Танцура Г.</i> Аналіз допустимих відхилень вузлів приєднання вантового канату до споруди	67
<i>Гаєвський В., Гаєвський О., Пічугін І.</i> Застосування індексу працездатності процесу при виборі зварювальних матеріалів	74
<i>Романенко В., Головка Л., Блощин М., Дубнюк В.</i> Виготовлення біметалевих матеріалів із застосуванням спеціальних утримуючих елементів	82
<i>Лебедєв В., Лой С., Сніхтаренко В.</i> Можливості покращення якості плазмового напилення при зміцненні та відновленні вузлів і деталей сільськогосподарської та іншої техніки	92
<i>Корбут Є., Парненко В., Ніколаєнко Т., Плівак О.</i> Дослідження точності отворів у волокнистих полімерних композиційних матеріалів при обробці свердлами з дискретними покриттями глобулярного типу на робочій поверхні	101

РОЗДІЛ II. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Корнієнко С., Корнієнко І., Дмитрієв В., Павленко А., Камак Д.</i> Оцінка інформаційної пов'язаності процесів при функціональному моделюванні системи випробувань	108
<i>Фролова Н., Михальчук І., Тищенко О.</i> Захист публічних точок доступу Wi-Fi	123
<i>Точилін С.</i> Продуктивність PHP CRUD Web-сервісів при роботі з даними PostgreSQL	136
<i>Клим В.</i> Електронне голосування: умови проектування та технології створення національної інформаційної системи	142

РОЗДІЛ III. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Твердохліб М., Трус І., Гомеля М., Толстенкова К.</i> Дослідження процесів очищення води від іонів мангану при використанні розчинів натрій гіпохлориту	152
--	-----

РОЗДІЛ IV. ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА
ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

<i>Vardyk E., Zakliuka I.</i> Complex modeling of technical condition and regimes of voltage regulation of control devices under load of power transformers	161
<i>Лобов В., Єфіменко Л., Бойко С., Городній О.</i> Методика проектування системи керування мікроклімату в приміщенні	172

РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

<i>Крусь Ю.</i> Зв'язок між напруженнями і деформаціями бетону за різних силових режимів короточасного осьового стиску	184
<i>Болотов Г., Цибуля С., Болотов М., Прибитько І., Юценко С.</i> Аналіз ефективності застосування мігруючих інгібіторів корозії (МІК) для підвищення експлуатаційної довговічності залізобетону	199
ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ СТАТЕЙ	211

CONTENT

SECTION I. APPLIED MECHANICS, MATERIALS SCIENCE
AND MACHINE BUILDING

<i>Sakhno Ye.</i> Determination of the main parameters of the upgraded hydrostatic bearing taking into account shaft displacement under load	7
<i>Baturin Ye., Romanchenko O., Golubenko O., Sokolov V.</i> Methodology of the design calculation of the electro-hydraulic servo drive of technological equipment	16
<i>Lebedev V., Tishchenko V., Loi S.</i> Features of structural formation of metal in electric ARC mechanized surfaces with modulation modules	27
<i>Kazymyrenko Yu., Lebedeva N., Makrukha T.</i> Corrosion resistance and heat protective properties of composite coatings filled with ash microspheres	38
<i>Markov O., Khvashchynskiy A., Musorin A., Markova M., Lysenko A.</i> Study new method of masive ingots upsetting of workpieces with conical faces	45
<i>Strutynskiy S., Semenchuk R.</i> Development of special mathematical models for research of accuracy of real surfaces of teeth wheels of cycloidal transmissions	54
<i>Gladskiy M., Barandych K., Frolov V., Yurenko S.</i> Influence of stress concentration on steel deformation 20 under cyclic loads	60
<i>Hupalo Yu., Belmas I., Belous O., Tantsuna A.</i> Algorithm for determining permissible deviations of cable rope connection nodes to structure	67
<i>Haievskiy V., Haievskiy O., Pichuhin I.</i> Application of the capability index of one process at choosing welding materials	74
<i>Romanenko V., Golovko L., Bloschchysyn M., Dubniuk V.</i> Production of bimetallic materials with the use of special holding elements	82
<i>Lebedev V., Loi S., Spihtarenko V.</i> Possibilities of improving the quality of plasma spraying when strengthening and renovating units and details agricultural and other machinery	92
<i>Korbut Ie., Parnenko V., Nikolayenko T., Plivakk O.</i> Investigation of accuracy of holes in fiber polymeric composite materials during treatment with drills, with the surface surfaced on their	101

SECTION II. INFORMATION AND COMPUTER TECHNOLOGIES

<i>Korniienko S., Korniienko I., Dmytriiev V., Pavlenko A., Kamak D.</i> Evaluation of information connectivity of processes in functional modeling of test system	108
<i>Frolova N., Mykhalchuk I., Tyshchenko O.</i> Protection of public Wi-Fi access points	123
<i>Tochilin S.</i> Performance of PHP CRUD Web services when working with PostgreSQL data	136
<i>Klym V.</i> Electronic voting: conditions of design and technology of the national information system creation	142

SECTION III. CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGIES

<i>Tverdohlib M., Trus I., Gomelya M., Tolstenkova K.</i> Investigation of manganese ions removal from water using sodium hypochlorite solutions	152
--	-----

SECTION IV. ELECTRIC POWER ENGINEERING,
ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTROMECHANICS

<i>Bardyk E., Zakliuka I.</i> Complex modeling of technical condition and regimes of voltage regulation of control devices under load of power transformers	161
<i>Lobov V., Efimenko L., Boiko S., Gorodny O.</i> Methodology for the indoor microclimate control system design	172

SECTION V. CONSTRUCTION AND GEODESY

<i>Krus Yu.</i> Connection between stresses and strains of concrete under different force modes of short-term axial compression	184
<i>Bolotov G., Tsybulya S., Bolotov M., Prybytko I., Yushchenko S.</i> Analysis of the efficiency of migrative corrosion inhibitors (MCI) usage in order to increase the exploitation duration of reinforced concrete	199

BASIC REQUIREMENTS FOR EXECUTION AND SUBMISSION OF MANUSCRIPTS OF SCIENTIFIC ARTICLES	211
--	-----

РОЗДІЛ I. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-1(27)-7-15

УДК 621.22

Євгеній Сахно

доктор технічних наук, професор, професор кафедри геодезії, картографії та землеустрою
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: evsakhno@ukr.net. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9789-7242>

ResearcherID: [M-3987-2016](https://orcid.org/0000-0002-9789-7242). SCOPUS Author ID: [57190493489](https://orcid.org/0000-0002-9789-7242)

ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ МОДЕРНІЗОВАНОГО ГІДРОСТАТИЧНОГО ПІДШИПНИКА З УРАХУВАННЯМ ЗМІЩЕННЯ ВАЛА ПІД НАВАНТАЖЕННЯМ

У статті наведені дослідження модернізованого гідростатичного підшипника, який на відміну від базового варіанта має додаткові канали, що виконані в перемичках і в які подається додатковий обсяг робочої рідини для компенсації тиску та витрат у підшипнику. Також у роботі розглянуто питання зміщення вала в підшипнику, в радіальному напрямку, під зовнішнім навантаженням для запобігання металевому контакту між спряженими поверхнями шийки вала із секціями гідростатичного вузла.

Ключові слова: гідростатичний підшипник; вал; зміщення.

Рис.: 3. Табл.: 1. Бібл.: 7.

Актуальність теми дослідження. Відомо, що однією з причин, що вимагає визначення конструктивних та режимних параметрів модернізованого гідростатичного підшипника, є вібрація, яка спричинена невірноваженістю технологічної системи. У цьому випадку конструктору доводиться зменшувати швидкість обертання шпинделя, що знижує ефективність високошвидкісної механічної обробки. Цей факт є вирішальним для багатьох виробників верстатних комплексів, які рекомендують проводити динамічні дослідження гідровузла з урахуванням зміщення вала під зовнішнім навантаженням. У такому випадку процес механічної обробки досягає максимальної ефективності, що виражається в підвищенні якості обробки поверхні й точності заданих розмірів, що подовжує термін служби шпиндельного вузла, інструменту і, зрештою, усього металорізального верстата.

Постановка проблеми. Одним із перспективних напрямів модернізації та ефективного функціонування гідростатичних підшипників (ГСП) є автоматичне регулювання жорсткості та їхньої несучої здатності, не змінюючи геометричних параметрів підшипника. У зв'язку з конструктивними особливостями вузлів машини та її агрегатів ГСП повинні відповідати встановленим нормативам, тому постає задача підвищення експлуатаційних параметрів опор через удосконалення конструктивних елементів гідростатичного вузла, використовуючи нову конструкцію для подачі робочої рідини до навантаженого вала, який обертається в гідростатичному підшипнику.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Так, у роботі [1] показано, що гідростатичні підшипники разом із підвищенням надійності та продуктивності обробки дозволяють забезпечити виключно високі показники якості деталей у порівнянні з іншими типами шпиндельних опор. Крім того, вони є найбільш перспективним типом шпиндельних підшипників для реалізації прецизійної високошвидкісної механічної обробки. Визначено закономірності формування жорсткості, витрат і втрат потужності в комбінованому шпиндельному підшипнику, залежно від в'язкості робочої рідини, зазорів у радіальних і упорних підшипниках, тиску насоса й розмірів опорних поверхонь. У роботі [2] розглянуто основні результати досліджень і експлуатації безконтактних опор шпинделів металорізальних верстатів і тенденції їхнього розвитку. Запропоновано нові

принципи конструювання безконтактних опор шпинделів верстатів для високопродуктивної точної обробки. У роботах [3; 4] визначено силові характеристики регульованого сферичного опорного вузла, який забезпечує сприйняття статичних зусиль і стабільності положення сфери. Розроблено схемне і конструктивне рішення опорного вузла поворотного стола та обґрунтовано метод струменевого регулювання положення сфери у гідростатичних опорах зі струменевим регулюванням. Також наведені теоретичні залежності для розрахунку зведеного радіального гідростатодинамічного підшипника з пружно-встановленими кільцями на диску при змінному зовнішньому навантаженні. У роботі [5] розглянуто особливості методики досліджень шпиндельних гідростатичних опор металорізальних верстатів. Наведено відомості про сучасні засоби досліджень для визначення основних характеристик шпиндельних гідростатичних опор.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Процес проектування систем автоматичного регулювання мікропереміщень вала в гідроопорі є досить складним через змінні навантаження, що виникають під час роботи роторного вузла. Ефективним підходом вирішення поставленої проблеми є застосування керованих опор, які поряд із високою жорсткістю і демпфуючою здатністю дозволяють управляти положенням вала під час роботи машини. При цьому геометричні параметри масляного шару в гідростатичній опорі визначають жорсткість і величину зношування опорних шийок, ступінь стабілізації положення осі обертання вала під впливом зовнішнього навантаження і додаткові витрати робочої рідини. При цьому для регулювання мікропереміщень вала в гідростатичному підшипнику, залежно від навантажень, що виникають під час роботи машини у процесі експлуатації, необхідно використовувати всю зону регулювання тиску в карманах і на перемичках ГСП, яка формується при подачі додаткового обсягу мастила в зазор між валом та підшипником.

Мета статті. Метою цієї роботи є розробка теоретичних підходів та практичних рекомендацій щодо проектування нової системи живлення гідростатичних опор для стабілізації положення вала при його зміщенні під навантаженням по всій площині гідростатичного підшипника.

Виклад основного матеріалу. При вирішенні завдання проектування систем автоматичного регулювання переміщень вала в гідростатичному підшипнику під час змінних навантажень виникає проблема управління процесом компенсації масляного клина у сполученні «вал – підшипник ковзання», рішення якої дозволяє зменшити коливання, силове навантаження на вал та зношування опорних шийок. Тому в процесі проектування систем автоматичного регулювання положення вала в гідростатичному підшипнику необхідно мати таку систему управління процесом мікропереміщень вала, яка б забезпечувала компенсацію тиску в зоні контакту вала з підшипником [1; 2]. Недоліком існуючого технічного рішення є обмежена зона регулювання тиску в кармані ГСП, яка формується за рахунок подачі додаткового обсягу робочої рідини в перемички, і як наслідок неможливість корегування мікропереміщеннями вала по всій площині гідростатичного підшипника при зміщенні вала під дією змінного навантаження, що виникає в системі під час експлуатації гідровузла. Тому в цій роботі запропоновано нову ідею щодо подачі робочої рідини в кармани ГСП.

Для вирішення поставлених задач пропонується новий регулятор, в якому існує основна і додаткова система подачі робочої рідини до карманів ГСП від насоса. В основній системі живлення рідина подається до карманів опори, а в додатковій системі живлення подача рідини відбувається через отвори, що виконані безпосередньо в перемичці гідропідшипника, чим і досягається ефект мікропереміщень вала під дією зовнішнього навантаження. Також у запропонованому пристрої додаткова система живлення має корпус, на який встановлюється електродатчики, що контактують з кільцем, з феромагнітними вставками, закріпленим на валу машини. У разі перекосу вала та взаємодії відповідного

датчика і феромагнітної вставки виникає електричний імпульсний сигнал, який підсилюється і подається на відповідний розподільник потоку рідини. У результаті цього плунжер золотника зміщується і додатковий об'єм робочої рідини подається у спряження «шийка вала – перемичка гідроопори», що підвищує тиск у конусній щілині й тим самим відбуваються мікропереміщення в гідростатичному підшипнику [6].

В основу технічної ідеї поставлено задачу вдосконалити регулятор жорсткості ГСП (див. патент України № 109810) шляхом збільшення зони регулювання тиску між валом і перемичками ГСП при перекосі вала в опорі, для здійснення мікропереміщень вала по всій площині гідростатичного підшипника залежно від напрямку прикладання ударних навантажень, які виникають під час роботи машини. Удосконалення полягає в тому, що в перемичках запропонованого підшипника (по периметру карманів) виконано n додаткових отворів, залежно від конструктивних, технологічних та експлуатаційних характеристик роторного вузла. При цьому в підшипнику існує основна і додаткова система подачі робочої рідини до карманів ГСП. В основній системі подача рідини відбувається постійно, а в додатковій подача відбувається порціонно у відповідні отвори в перемичках гідроопори залежно від напрямку зміщення вала під навантаженням, і тим самим забезпечуючи процес регулювання мікропереміщеннями вала в ГСП по всій площині контакту поверхонь. У результаті цього додатковий об'єм робочої рідини подається у спряження «шийка вала – перемичка гідроопори», що підвищує тиск в конусній щілині й запобігає металевому контакту вала з підшипником. При цьому треба мати на увазі, що витрати в додаткових отворах підшипника значно менші, ніж витрати через основні, і це виключає зміну нормального режиму роботи гідровузла. Слід зауважити, що додатковий об'єм рідини подається короткочасно, і після стабілізації ударного навантаження подача рідини припиняється. Подача додаткового об'єму робочої рідини безпосередньо в точці найбільшого контакту вала з перемичкою підшипника дає можливість своєчасної автоматичної компенсації витрат рідини змащування і регулювання положення вала в опорі з підвищенням жорсткості підшипника, зменшенням зносу шийки вала і секцій гідроопори.

Регульований гідростатичний підшипник складається з корпусу 1 з карманами 2 (рис. 1, а). При цьому кількість карманів зумовлена експлуатаційними характеристиками роторного вузла. Підшипник має основні отвори 3 для подачі робочої рідини в кармани ГСП, та додаткові отвори 4, які виконано в перемичках, а кількість додаткових отворів n встановлюється конструктором залежно від умов експлуатації гідровузла. Отвори виконуються в перемичках по периметру кармана, тим самим забезпечуючи збільшення площі регулювання тиску в спряженні «вал – підшипник», що дає можливість регулювати мікропереміщення практично по всьому об'єму підшипника. Підшипник має основну систему живлення 5 карманів (рис. 1) з регульованими дроселями 7 та додаткову систему живлення 6 з дроселями 8 для подачі додаткової кількості робочої рідини в отвори, що виконані в перемичках гідропідшипника. Канал 9 слугує для подачі додаткової кількості робочої рідини в отвори в перемичках, які на рис. 1 не показано.

Робота підшипника полягає в наступному. При запуску машини вал 10 починає обертатися в гідростатичному підшипнику. При цьому відбувається подача робочої рідини з основної системи живлення 5 через регульовані дроселя 7 до карманів 2 ГСП. У момент збільшення навантажень на вал машини він зміщується та відбувається його перекоєс у напрямку дії прикладених сил, що викликає металевий контакт між спряженими поверхнями та знос опорних шийок ротора та перемичок гідроопори. Для корегування положення вала в підшипнику через отвори, що виконані в перемичках підшипника, подається додаткова кількість робочої рідини, яка потрапляє в зону контакту вала й підшипника. При цьому подача робочої рідини відбувається саме в ті додаткові отвори 4,

які попадають у зону металевого контакту між валом і підшипником. Також отвори 4 можуть слугувати для видалення надлишків робочої рідини з гідровузла. Таким чином, змінюючи порядок подачі додаткової кількості рідини в отвори 4, можна управляти мікропереміщеннями вала в гідроопорі практично по всій робочій поверхні ГСП.

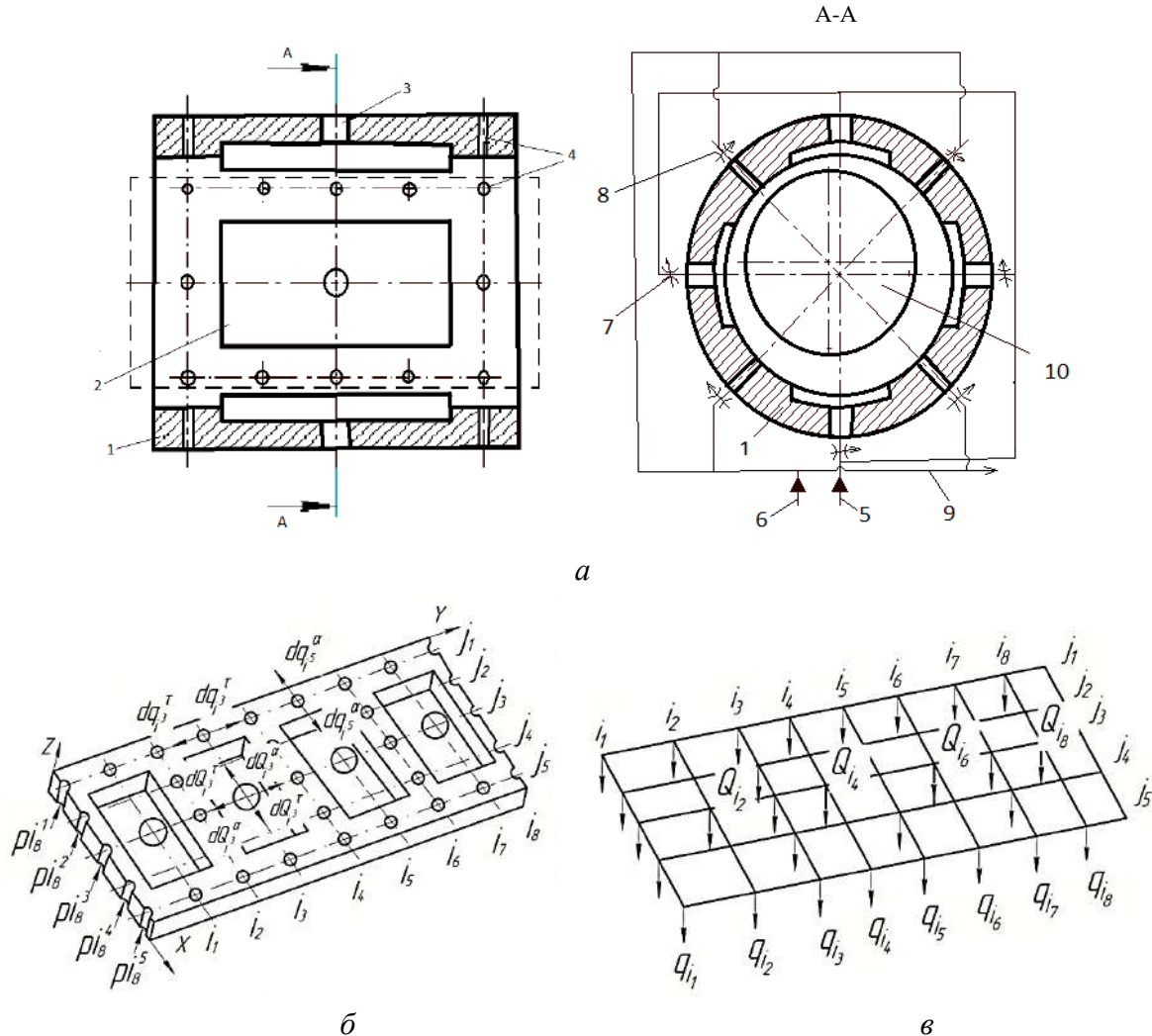


Рис. 1. Модернізований гідростатичний підшипник:

а – конструктивна схема; б – розгортка поверхні гідростатичного підшипника;

в – схема живлення гідростатичного підшипника

Джерело: розроблено автором.

Одним із напрямів модернізації гідростатичних опор є автоматичне регулювання жорсткості та їхньої несучої здатності, не змінюючи геометричні параметри підшипника. При зміщенні вала під навантаженням відбувається зменшення осьового зазору в опорі, і для уникнення металевого контакту між спряженими поверхнями в канали, що виконані в перемичках ГСО, подається додатковий обсяг робочої рідини. У додаткові отвори опори пропонується подавати додаткові змінні витрати рідини q_i , з тиском p_i , і внаслідок цього відбувається зміна тиску на перемичках опори. При цьому слід мати на увазі, що $q_i \ll Q_i$, і це виключає зміну звичайного режиму роботи всього гідровузла.

На рис. 1, б показана розгортка поверхні гідростатичного підшипника. Було обрано опору, яка має чотири кармани, а в перемичках виконано додаткові опори для струменевої подачі робочої рідини. На рис. 1 можна виділити площини осьових i_1-i_8 та радіальних

j_1 - j_5 отворів. Також на рис. 1 показано тиски та витрати робочої рідини в аксіальному та тангенціальному напрямках основних отворів dQ_i^a, dQ_i^r та додаткових отворів dq_i^a, dq_i^r . На рис. 1, в показана схема живлення ГСП у радіальній j_1 - j_5 та осьовій i_1 - i_8 площинах.

У таблиці представлено розподіл тисків та витрат робочої рідини в отворах живлення ГСП на перетині площин j_i та i_i . Жирним кольором виділено основні отвори живлення карманів ГСП.

Таблиця

Розподіл тисків та витрат робочої рідини в отворах живлення ГСП

$i \backslash j$	j_1	j_2	j_3	j_4	j_5
i_1	$p_{ij1}^1; q_{ij1}^1$	-	$P_{ij1}^3; Q_{ij1}^3$	-	$p_{ij1}^5; q_{ij1}^5$
i_2	$p_{ij2}^1; q_{ij2}^1$	$p_{ij2}^2; q_{ij2}^2$	$p_{ij2}^3; q_{ij2}^3$	$p_{ij2}^4; q_{ij2}^4$	$p_{ij2}^5; q_{ij2}^5$
i_3	$p_{ij3}^1; q_{ij3}^1$	-	$P_{ij3}^3; Q_{ij3}^3$	-	$p_{ij3}^5; q_{ij3}^5$
i_4	$p_{ij4}^1; q_{ij4}^1$	$p_{ij4}^2; q_{ij4}^2$	$p_{ij4}^3; q_{ij4}^3$	$p_{ij4}^4; q_{ij4}^4$	$p_{ij4}^5; q_{ij4}^5$
i_5	$p_{ij5}^1; q_{ij5}^1$	-	$P_{ij5}^3; Q_{ij5}^3$	-	$p_{ij5}^5; q_{ij5}^5$
i_6	$p_{ij6}^1; q_{ij6}^1$	$p_{ij6}^2; q_{ij6}^2$	$p_{ij6}^3; q_{ij6}^3$	$p_{ij6}^4; q_{ij6}^4$	$p_{ij6}^5; q_{ij6}^5$
i_7	$p_{ij7}^1; q_{ij7}^1$	-	$P_{ij7}^3; Q_{ij7}^3$	-	$p_{ij7}^5; q_{ij7}^5$
i_8	$p_{ij8}^1; q_{ij8}^1$	$p_{ij8}^2; q_{ij8}^2$	$p_{ij8}^3; q_{ij8}^3$	$p_{ij8}^4; q_{ij8}^4$	$p_{ij8}^5; q_{ij8}^5$

Джерело: розроблено авторами.

На основі таблиці складемо матрицю витрат та тисків у гідростатичному підшипнику:

$$P = \begin{pmatrix} p_{ij1}^1; q_{ij1}^1 & 0 & P_{ij1}^3; q_{ij1}^3 & 0 & p_{ij1}^5; q_{ij1}^5 \\ p_{ij2}^1; q_{ij2}^1 & p_{ij2}^2; q_{ij2}^2 & P_{ij2}^3; q_{ij2}^3 & p_{ij2}^4; q_{ij2}^4 & p_{ij2}^5; q_{ij2}^5 \\ p_{ij3}^1; q_{ij3}^1 & 0 & P_{ij3}^3; q_{ij3}^3 & 0 & p_{ij3}^5; q_{ij3}^5 \\ p_{ij4}^1; q_{ij4}^1 & p_{ij4}^2; q_{ij4}^2 & P_{ij4}^3; q_{ij4}^3 & p_{ij4}^4; q_{ij4}^4 & p_{ij4}^5; q_{ij4}^5 \\ p_{ij5}^1; q_{ij5}^1 & 0 & P_{ij5}^3; q_{ij5}^3 & 0 & p_{ij5}^5; q_{ij5}^5 \\ p_{ij6}^1; q_{ij6}^1 & p_{ij6}^2; q_{ij6}^2 & P_{ij6}^3; q_{ij6}^3 & p_{ij6}^4; q_{ij6}^4 & p_{ij6}^5; q_{ij6}^5 \\ p_{ij7}^1; q_{ij7}^1 & 0 & P_{ij7}^3; q_{ij7}^3 & 0 & p_{ij7}^5; q_{ij7}^5 \\ p_{ij8}^1; q_{ij8}^1 & p_{ij8}^2; q_{ij8}^2 & P_{ij8}^3; q_{ij8}^3 & p_{ij8}^4; q_{ij8}^4 & p_{ij8}^5; q_{ij8}^5 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Рішення матриці (1) відносно p та q дозволяє визначити необхідні технічні параметри ГСП залежно від зміни кута повороту вала в опорі й зовнішнього навантаження.

Для визначення тисків та витрат робочої рідини через основні та додаткові отвори в гідростатичному підшипнику проведемо дослідження зміщення вала під навантаженням за його довжиною. Так, пропонуються результати вимірювання радіального зміщення шпинделя під навантаженням в чотирьох різних перетинах (рис. 2, а) за допомогою індикаторів 1-4 з ціною поділки 0,001 мм. Радіальне статичне навантаження P в діапазоні 0,1-0,7 кН прикладалася на кінець вала. Досліди проводилися як при навантаженні шпинделя, так і при його розвантаженні. Для підвищення достовірності експерименту виміри фіксувалися при тому ж самому навантаженні три рази, а навантаження створювалася універсальним динамометром УДМ-1200. Сила P в дослідах була спрямована на середину карману (рис. 2, б). Окремо досліджувалося зміщення шпинделя при круговому навантаженні зі зміною напрямку вектора сили P .

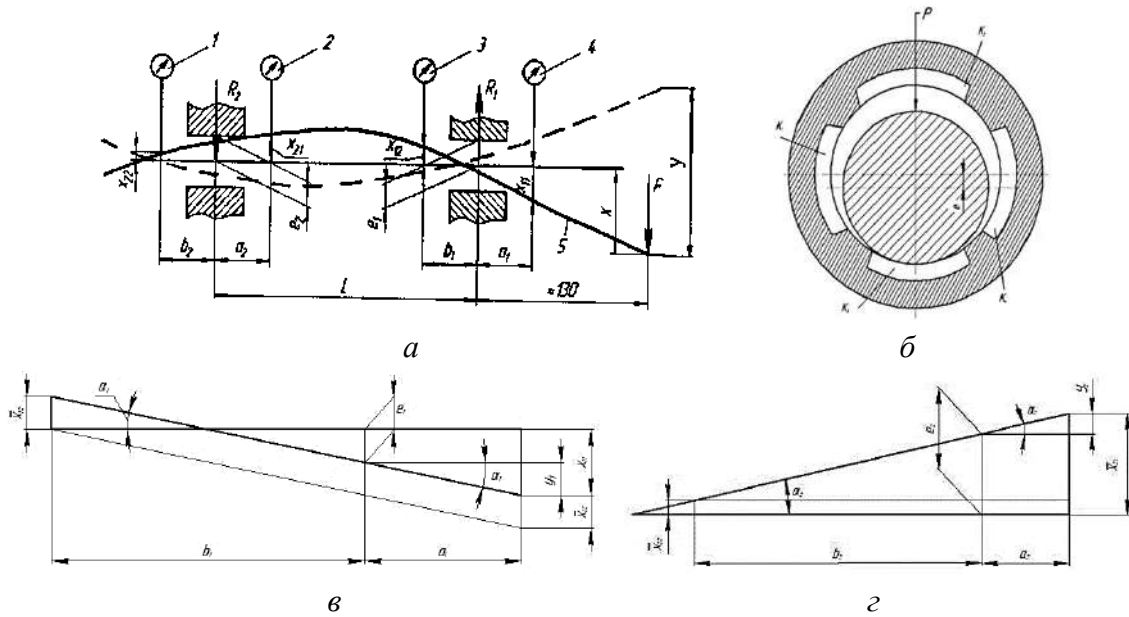


Рис. 2. Розрахунок зміщення шпинделя:

a – пружна лінія шпинделя; *б* – перетин шпинделя в підшипнику передньої опори:

К – кармани підшипника; *в, з* – розрахункові схеми

Джерело: розроблено автором.

За результатами показань індикаторів визначали середнє значення зміщення за формулою:

$$\bar{x}_{ij} = \sum_{i=1}^n \frac{x_{ij}}{n}, \tag{2}$$

де *n* – число вимірів, *i* = 1, 2 (1 – передній підшипник, 2 – задній підшипник).

Також визначали зміщення *e*₁ і *e*₂ в центрі передньої і задньої опори та зміщення кінця шпинделя в місці прикладання навантаження *P*. Розрахункові схеми для визначення *e*₁ і *e*₂ представлені на рис. 2, *в, з*. Якщо прийняти, що пружна лінія 5 шпинделя (рис. 2, *a*) лінійна на ділянках між індикаторами в передній і задній опор, то *e*₁ і *e*₂ можна знайти таким чином:

для передньої опори (рис. 2, *в*):

$$e_1 = \bar{x}_{11} - y_1,$$

де

$$y_1 = a_1 \operatorname{tg} \alpha_1 = a_1 \frac{\bar{x}_{11} + \bar{x}_{12}}{a_1 + b_1}; \tag{3}$$

для задньої опори (рис. 2, *з*):

$$e_2 = \bar{x}_{21} - y_2,$$

де

$$y_2 = \operatorname{tg} \alpha_2 = a_2 \frac{\bar{x}_{21} + \bar{x}_{22}}{a_2 + b_2}. \tag{4}$$

З урахуванням вищезазначеного зміщення кінця шпинделя буде:

$$x = \bar{x}_{11} + (130 - a_1) \operatorname{tg} \alpha_1 = \bar{x}_{11} + \frac{130 - a_1}{a_1 + b_1} (\bar{x}_{11} + \bar{x}_{12}) \tag{5}$$

Сили R_1 та R_2 (реакції в підшипниках) (див. рис. 2, а) визначалися з рівняння моментів сил, що діють на шпиндель відносно точок його опор, і алгебраїчної суми сил, що діють перпендикулярно до осі шпинделя.

Оскільки перетини шпинделя, у яких вимірювали зміщення і прикладали силу P , не збігалися, то для розрахунку залежності $x = f(P)$ (рис. 3, де x – зміщення кінця шпинделя) використовували формулу (5). Зміщення x кінця шпинделя є результатом податливості опор і згинальної деформації тіла шпинделя. Діаметри опорних шийок шпинделя при випробуваннях верстата становили 80 мм для переднього і 62 мм для заднього підшипників.

Для виявлення граничного навантаження P , при якій виникає металевий контакт, за формулою (3) визначали залежність $e_1 = f(R_1)$ (рис. 3, а). Отримані графіки $e_1 = f(R_1)$ (рис. 3, б) дозволяють визначити жорсткість передньої опори шпиндельної бабки, яка дорівнює відношенню $\Delta R_1 / \Delta e_1$.

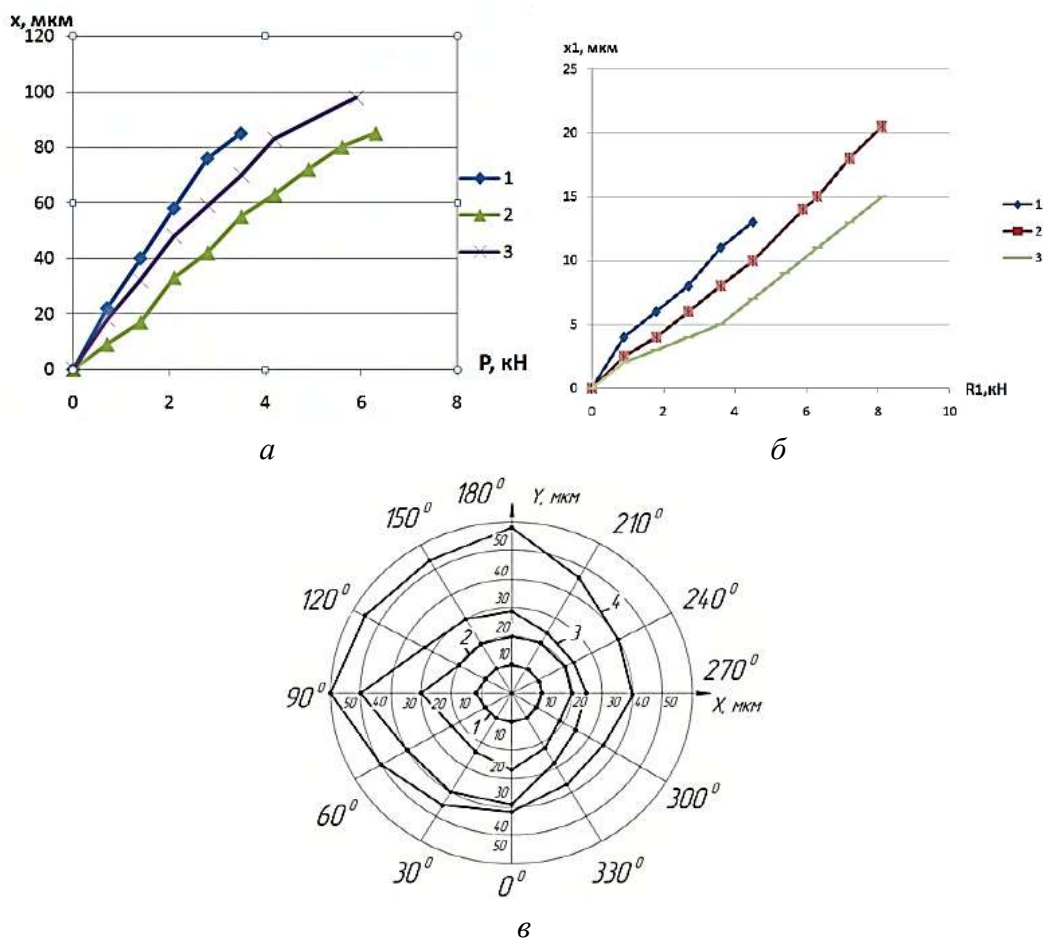


Рис. 3. Зміщення шпинделя під навантаженням для різних систем живлення опор, де 1,2- $p = const$, 3- $Q = const$: а – зміщення переднього кінця шпинделя x від зовнішнього навантаження P ; б – зміщення шпинделя під навантаженням R_1 ; в) кругова діаграма зміщення шпинделя: 1- $P = 0,7$ кН, 2- $P = 1,6$ кН, 3- $P = 2,5$ кН, 4- $P = 3,2$ кН
Джерело: розроблено авторами.

Діаграма кругового зміщення шпинделя показана на рис. 3, в. Несиметричність графіків зумовлена неоднаковою згинальною жорсткістю тіла шпинделя в різних напрямках, неточністю виготовлення шпиндельного вузла і вхідних дроселів подільника потоку робочої рідини.

Висновки. Таким чином, у цій роботі розглянуто питання щодо проектування нової системи живлення гідростатичних опор та здійснено моделювання процесів руху робочої рідини в підшипнику, які є досить актуальними, їх вирішення дозволяє управляти положенням вала під час роботи машини.

У роботі представлено теоретичні та практичні підходи проектування нової системи живлення гідростатичних підшипників. Проведено моделювання процесу формування тиску та витрат робочої рідини в перетині гідроопори при додатковій подачі робочої рідини у спряження «вал – підшипник». Побудовано кругова діаграма та залежності радіального зміщення вала під навантаженням за його довжиною, що дозволяє оцінити жорсткість усього шпиндельного вузла.

Список використаних джерел

1. Федориненко Д. Ю. Шпиндельні гідростатичні підшипники : монографія / Д. Ю. Федориненко, С. П. Сапон. – Чернігів : ЧНТУ, 2016. – 403 с.
2. Гордеев О. Ф. Напряжки та перспективи розвитку конструкцій шпиндельних опор верстатів для високошвидкісної та високопродуктивної обробки / О. Ф. Гордеев, П. О. Захаров // Наукові нотатки. – 2007. – Вип. 20, т. 1. – С. 96-101.
3. Струтинський С. В. Гідростатичний сферичний опорний вузол поворотного стола із струменевим приводом мікропереміщень / С. В. Струтинський // Вісник НТУ «ХПІ». – 2014. – № 60 (1102). – С. 130-138.
4. Назін В. І. Вплив демпфування пружної установки кілець на диску на динамічні характеристики гідродинамічного підшипника зведеного типу / В. І. Назін // Авиационно космическая техника и технология. – 2015. – № 5(122). – С. 11-15.
5. Тіхенко В. М. Методи досліджень шпиндельних гідростатичних опор / В. М. Тіхенко, В. Н. Тіхенко // Тези доповідей 53 наукової конференції молодих дослідників ОНПУ «Сучасні інформаційні технології та телекомунікаційні мережі». – Одеса : ОНПУ, 2018. – Вип. 53. – С. 18-21.
6. Сахно Є. Ю. Створення системи стабілізації радіального положення кривошипа в гідроопорі / Є. Ю. Сахно // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : збірник наукових праць. – Краматорськ, 2018. – № 42. – С. 72-79.
7. Никитин Г. А. Щелевые и лабиринтные уплотнения гидроагрегатов / Г. А. Никитин. – М. : Машиностроение, 1982. – 135 с.

References

1. Fedorinenko, D.Y., & Sapon, S.P. (2015). Shpyndelni hidrostatychni pidshypnyky [Spindle hydrostatic bearings]. Chernihiv. Nats. Technol. Un-t.
2. Gordyeyev, O.F., & Zaxarov, P.O. (2007). Napryamky ta perspektyvy rozvytku konstruktssii shpyndelnykh opor verstativ dlia vysokoshvydkisnoi ta vysokoproduktyvnoi obrobky [Trends and prospects in the development of designs spindle supports machines for high-speed and high-performance processing] *Naukovi notatky – Scientific notes*, 1(20), 96-101.
3. Strutinsky, S.V. (2014). Hidrostatychnyi sferychnyi oporny vuzol povorotnoho stola iz strumenevym pryvodom mikroperemishhen [Hydrostatic spherical rotary table Support Unit with micro-displacement jet drive]. *Visnyk NTU «XPI – Bulletin of NTU "KHPI"*, (60(1102)), 130-138.
4. Nazin, V.I. (2015). Vplyv dempfuvannia pruzhnoi ustanovky kilets na dysku na dynamichni karakterystyky hidrodynamichnoho pidshypnyka zdvoienoho typu [Effect of damping of the elastic installation of rings on the disk on the dynamic characteristics of a double-type hydrodynamic bearing] *Avyatsionno kosmicheskaia tekhnika i tekhnologiya – Aerospace engineering and technology*, (5(122)), 11-15.
5. Tikhenko, V.M. (2018). Metody doslidzhen shpyndelnykh hidrostatychnykh opor [Methods of research of spindle hydrostatic supports]. *Tezy dopovidej 53 naukovoї konferentsii molodykh doslidnykiv ONPU «Suchasni informatsiini tekhnologii ta telekomunikatsiini merezhi – Abstracts of the 53 rd scientific conference of young researchers of ONPU "Modern information technologies and telecommunications networks"* (vol. 53, pp. 18-21).

6. Sakhno, E.Yu. (2018). Stvorennia systemy stabilizatsii radialnoho polozhennia kryvoshypa v hidroopori [Creating a system for stabilizing the radial position of the crank in the hydraulic support]. *Nadiinist instrumentu ta optymizatsiia tekhnolohichnykh system – Tool reliability and optimization of technological systems*, (42), 72-79.

7. Nikitin, G.A. (1982). *Shchelevye i labirintnye uplotneniia gidroagregatov [Slotted and labyrinth seals of hydraulic units]*. Mashinostroenie.

Отримано 12.02.2022

UDC 621.92

Yevgeniy Sakhno

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: evsakhno@ukr.net. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9789-7242>

ResearcherID: [M-3987-2016](https://orcid.org/0000-0002-9789-7242). SCOPUS Author ID: [57190493489](https://orcid.org/0000-0002-9789-7242)

DETERMINATION OF THE MAIN PARAMETERS OF THE UPGRADED HYDROSTATIC BEARING TAKING INTO ACCOUNT SHAFT DISPLACEMENT UNDER LOAD

It is known that one of the reasons that requires determining the design and operating parameters of the upgraded hydrostatic bearing is vibration, which is caused by unbalance of the technological system. In this case, the designer has to reduce the speed of rotation of the spindle, which reduces the efficiency of high-speed machining.

One of the promising areas of modernization and efficient operation of hydrostatic bearings is automatic adjustment of stiffness and their load-bearing capacity without changing the geometric parameters of the bearing. Due to the design features of the machine components and its aggregates, bearings must meet the established standards, so the task is to increase the operational parameters of the supports by improving their structural elements.

Analysis of research and publications in the field of modernization of hydrostatic bearings has shown that the issues of controlling shaft movements under loads during rotation of the Rotary unit are currently given little attention in the scientific literature.

The aim of this paper is to develop theoretical approaches and practical recommendations for designing a new power supply system for hydrostatic supports to stabilize the position of the shaft when it is displaced under load along the entire plane of the hydrostatic bearing.

When solving the problem of designing automatic shaft movement control systems in a hydrostatic bearing during variable loads, the problem of controlling the oil gap compensation process in the shaft-bearing interface arises, which solution reduces vibrations, power load on a shaft and wear of its support necks.

In this paper, we consider the design of a new power supply system for hydrostatic supports and simulate the processes of movement of the working fluid in the upgraded bearing, which are quite relevant, and their solution allows you to control the position of the shaft during machine operation.

Keywords: hydrostatic bearing; shaft; offset.

Fig.: 3. Table: 1. References: 7.

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-1(27)-16-26

УДК 621.646:62-83:629

Євген Батурін¹, Олексій Романченко², Олександр Голубенко³, Володимир Соколов⁴¹аспірант

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (Северодонецьк, Україна)

E-mail: baturin2307@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0670-8320>²кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки
Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (Северодонецьк, Україна)E-mail: alexvromanchenko@snu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4327-1105>ResearcherID: [G-9873-2018](https://orcid.org/0000-0002-4327-1105). SCOPUS Author ID: [57217135670](https://orcid.org/0000-0002-4327-1105)³доктор технічних наук, професор, професор кафедри залізничного транспорту
Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (Северодонецьк, Україна)E-mail: olgol@snu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2221-6756>⁴доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри машинобудування та прикладної механіки
Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (Северодонецьк, Україна)E-mail: sokolov@snu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-00030459-1824>ResearcherID: [G-9766-2018](https://orcid.org/0000-00030459-1824). SCOPUS Author ID: [57191822948](https://orcid.org/0000-00030459-1824)

МЕТОДИКА ПРОЄКТНОГО РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНОГО СЛІДКУЮЧОГО ПРИВОДА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Представлено інженерну методику проєктного розрахунку електрогідравлічного сліdkуючого привода спеціалізованого технологічного обладнання. Розглянуто приводи із дросельним регулюванням технологічного обладнання, представленого в сучасному виробництві. Проведено аналітичний огляд основних параметрів електрогідравлічного сліdkуючого привода. У роботі наведена інженерна методика, яка дозволяє провести оцінювання основних параметрів та здійснити вибір головних елементів і пристроїв привода, спрогнозувати його статичні та динамічні характеристики. Наведено приклад проєктного розрахунку електрогідравлічного сліdkуючого привода спеціального технологічного обладнання. Розрахунки виконані за допомогою програмного забезпечення Simulink з пакета прикладних програм MATLAB.

Ключові слова: спеціальне технологічне обладнання; електрогідравлічний привод; сліdkуючий привод; дросельне регулювання; статичні характеристики; динамічні характеристики; розрахункова схема; перехідний процес; коригуюча ланка.

Рис.: 5. Бібл.: 15.

Актуальність теми дослідження. Сучасний рівень машинобудівних виробництв та підприємств з модернізації рухомого складу залізниць зумовлює всезростаючі вимоги до технічних та функціональних характеристик приводів технологічного обладнання [1; 2]. Якість виробів значно залежить від можливості реалізації оптимальних законів руху робочих органів, точності регулювання їх переміщень і стабільності швидкостей в умовах змінного навантаження.

Постановка проблеми. Досягнення довільної кінематики робочого органу, можливості програмної реалізації оптимальних законів його руху забезпечується застосуванням автоматичних електрогідравлічних приводів [3; 4] і, зокрема, електрогідравлічних приводів, що сліdkують (ЕГСП), з дросельним регулюванням у технологічному обладнанні потужністю до 8 кВт. Створення вискоефективних ЕГСП технологічного обладнання вимагають інженерних методик проєктного розрахунку, які дозволяють проводити оцінювання основних параметрів, вибір елементів та пристроїв привода, спрогнозувати його статичні та динамічні характеристики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У літературі [2; 3; 5] досить широко представлені окремі методики та процедури проєктування автоматичних електрогідравлічних приводів різного технологічного обладнання для механічної обробки, зокрема, обладнання для обробки матеріалів тиском, металорізальних верстатів та систем, обладнання інструментального виробництва тощо. Наявні методики не є універсальними, орієнтовані на різні класи устаткування, використовують різні вихідні дані, застосовують різні методи розрахунку і, як наслідок, мають різні результати розрахунку [5-7].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Безперервне удосконалення технологічного обладнання сучасних машинобудівних виробництв та підприємств з модернізації рухомого складу залізниць потребує загальноприйнятих інженерних методик проектного розрахунку ЕГСП технологічного обладнання.

Цикл робіт авторів [8-10], присвячених розробці автоматичних приводів технологічного обладнання, математичному моделюванню та дослідженню їхніх статичних та динамічних характеристик, корекції якості регулювання, дозволяють запропонувати єдину інженерну методику проектного розрахунку ЕГСП.

Метою статті є розробка інженерної методики проектного розрахунку ЕГСП з дросельним регулюванням технологічного обладнання, що дозволяє проводити оцінювання основних параметрів, вибір елементів та пристроїв привода, прогнозувати його статичні та динамічні характеристики.

Виклад основного матеріалу. Проведений вище аналіз літературних джерел показує, що з оцінки основних параметрів та вибору основних елементів і пристроїв ЕГСП з дросельним регулюванням як вихідних дані слід прийняти такі величини: R_{max} – максимальне навантаження (сила); V_{max} – максимальна швидкість слідкування без навантаження; ε_{max} – максимальна похибка стеження (або допустима похибка слідкування при максимальній швидкості); H – хід поршню; m – наведена маса рухомих елементів.

Тоді проектний розрахунок можна провести в такому порядку.

1. Побудова розрахункової схеми привода, вибір робочої рідини та номінального робочого тиску.

У розрахунковій схемі відображено основні елементи та пристрої ЕГСП, вказано зв'язки між ними. Привод призначений для відтворення із заданою точністю робочим органом сигналу, що керує, який змінюється довільним чином. ЕГСП має електричний вхідний керуючий сигнал U та електричний зворотний зв'язок у вигляді напруги U_{fb} . Принцип дії ЕГСП полягає в безперервному порівнянні вхідного сигналу з переміщенням вихідної ланки та у регулюванні потоку робочої рідини, що надходить до гідроциліндра, залежно від неузгодженості зазначених величин, що визначаються сигналом неузгодження $U_e = U - U_{fb}$.

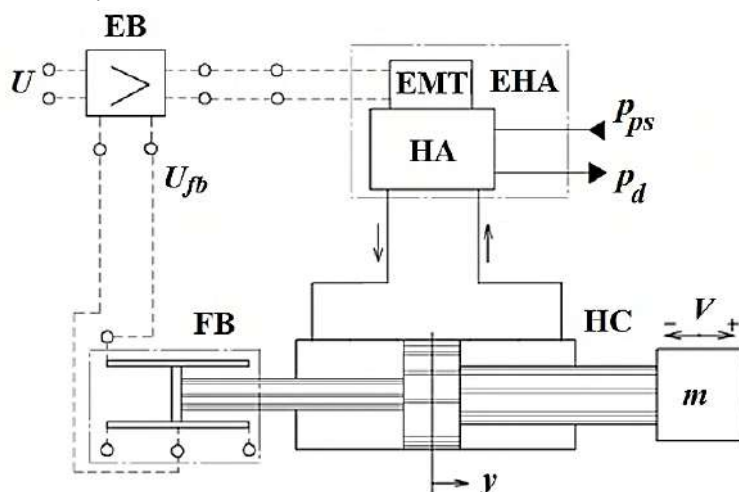


Рис. 1. Розрахункова сема ЕГСП

Джерело: розроблено авторами.

За основу може бути прийнята схема, представлена в роботі авторів [9] та наведена на рис. 1. На розрахунковій схемі представлено: HC – гідроциліндр; ЕНА – електрогідравлічний підсилювач, що включає електромеханічний перетворювач (ЕМТ) та

гідравлічний підсилювач (НА); FB – зворотний зв'язок; EB – електронний блок. Наступні основні параметри ЕГСП зазначено на схемі: U – вхідна (керуюча) напруга; U_{fb} – напруга FB; y , V – переміщення та швидкість поршня; p_{ps} , p_d – тиск насосної станції та на зливні.

Робоча рідина вибирається із технічних вимог [11; 12], що висуваються до технологічного обладнання, або рекомендацій, що містяться в технічних даних основних гідравлічних пристроїв [2].

Номінальний робочий тиск P_{nom} приймається відповідно до можливостей гідроагрегатів, що серійно випускаються для технологічного обладнання. Значення P_{nom} задається зі стандартного ряду, МПа: ...4; 6,3; 10; 12,5; 16; 20; 25; 32; 40 ...

2. Розрахунок конструктивних параметрів та вибір гідроциліндра.

Оцінюється ефективна площа гідроциліндра

$$F = (1,3...1,5) \frac{R_{max}}{P_{nom}}. \quad (1)$$

За значенням F визначається діаметр поршню D . Для гідроциліндра з двостороннім штоком необхідно враховувати співвідношення діаметрів штоку та поршню.

Розрахунковий діаметр поршню D округляється до стандартних значень [2], мм: 10; 12; 16; 20; 25; 32; (36); 40; (45); 50; (56); 63; (70); 80; (90); 100; (110); 125; (140); 160 ... та ін. (у дужках наведено значення додаткового ряду). Для штоків стандартні значення d_r , мм: 4; 5; 6; 8; 10; 12; (14); 16; (18); 20; (22); 25; (28); 32; (36); 40; (45); 50; (56); 63; (70); 80 ... та ін. Якщо розбіжність розрахункового діаметру поршню D з меншим стандартним перевищує 5%, приймається більше значення.

За параметрами P_{nom} , D , d_r та ходу поршню H з каталогів або довідкової літератури вибирається гідроциліндр, що випускається серійно. За відсутності відповідного двигуна, що серійно випускається, складається технічне завдання на розробку оригінального гідроциліндра.

У подальших розрахунках приймається уточнена ефективна площа

$$F = \frac{\pi}{4} (D^2 - d_r^2). \quad (2)$$

3. Вибір електрогідравлічного підсилювача.

Вибір ЕНА також здійснюється за каталогами або з довідкової літератури. Максимальний робочий тиск ЕНА повинен перевищувати або дорівнювати номінальному робочому тиску P_{nom} , прийнятому раніше,

$$P_{max} \geq P_{nom}. \quad (3)$$

Витрати ЕНА при перепаді тиску $\Delta P_{ЕНА}$, який зазначений у технічних даних, повинен відповідати умові

$$Q_{ЕНА} \geq (1,1...1,2) F V_{max} \sqrt{\frac{\Delta P_{ЕНА}}{P_{ap}}}, \quad (4)$$

де $P_{ap} = P_{ps} - P_d$ – підведений тиск (різниця тисків у напірній P_{ps} та зливній P_d лініях ЕНА (див. рис. 1).

На стадії проектного розрахунку рекомендується прийняти

$$P_{ap} = (0,75...0,85) P_{nom}. \quad (5)$$

Для вибраного ЕНА оцінюється коефіцієнт посилення витрати для ненавантаженого приводу, $m^3/(cA)$,

$$K_{Qi} = \frac{Q_{EHA}}{i_{nom}} \sqrt{\frac{P_{ap}}{\Delta P_{EHA}}} \tag{6}$$

де i_{nom} – номінальний струм управління, А.

4. Визначення параметрів зворотного зв'язку, визначення добротності привода та розрахунок коефіцієнта передачі електронного блока.

Найчастіше ФВ для аналізованих ЕГСП формується з допомогою датчиків лінійних переміщень. Для визначення коефіцієнта передачі ФВ вважають, що нульове переміщення ($y = 0$) вихідної ланки привода відповідає середньому положенню поршня, а максимальне переміщення становить $\pm H/2$ і відповідає максимальній напрузі вихідного сигналу датчика лінійних переміщень. Таке значення напруги на етапі проєктного розрахунку доречно прирівняти до максимального значення керуючого сигналу $\pm U_{max}$, яке можна прийняти рівним максимальній вихідній напрузі для ЕНА. Тоді коефіцієнт передачі ФВ визначається як, B/M ,

$$k_{fb} = \frac{2U_{max}}{H} \tag{7}$$

Добротність ЕГСП D_{EHSD} є коефіцієнтом посилення контура регулювання (розімкнутої системи) та призначається з урахуванням вимог до точності привода, $1/c$,

$$D_{EHSD} \geq (1,05...1,1) V_{max} / \varepsilon_{max} \tag{8}$$

За значенням D_{EHSD} визначається коефіцієнт передачі ЕВ, $1/O_M$,

$$k_{eb} = \frac{D_{EHSD} F}{k_{Qi} k_{fb}} \tag{9}$$

5. Оцінка статичних характеристик привода, розрахунок швидкісної та навантажувальної характеристик.

Статичними характеристиками ЕГСП є залежності, що встановлюють зв'язок швидкості вихідної ланки V , навантаження R та сигналу неузгодженості U_ε .

Рекомендується побудувати швидкісну $V(U_\varepsilon)$ та навантажувальні характеристики $V(R)$ за такою наближеною залежністю

$$V = U_\varepsilon \frac{D_{EHSD}}{k_{eb}} \sqrt{1 - \frac{R}{P_{ap} F} \text{sign} U_\varepsilon} \tag{10}$$

Швидкісна характеристика виходить при $R=0$ в діапазоні $-k_{fb} \varepsilon_{max} \leq U_\varepsilon \leq k_{fb} \varepsilon_{max}$, розрахунок навантажувальної характеристики виконується при $U_\varepsilon = \pm k_{fb} \varepsilon_{max}$ у діапазоні $-P_{ap} F \leq R \leq P_{ap} F$.

6. Побудова лінійної моделі привода, оцінка стійкості привода.

Оцінка параметрів лінійної моделі виконується відповідно до структурної схеми передачі керуючого сигналу, яка представлена на рис. 2 (тут s – змінна Лапласа).

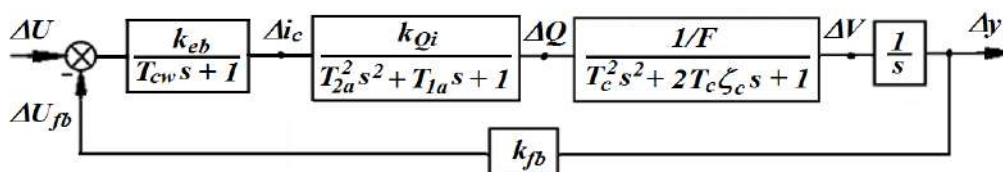


Рис. 2. Структурна схема передачі керуючого сигналу

Джерело: розроблено авторами.

Постійна часу обмотки управління ЕМТ, c ,

$$T_{cw} = L_c / R_e, \quad (11)$$

де L_c – індуктивність обмотки керування ЕМТ, R_e – активний опір електричного контура ЕВ-ЕМТ (рис. 1).

Постійні часу ЕНА, c ,

$$T_{2a} = \frac{1}{2\pi\nu_2}; T_{1a} = \frac{1}{2\pi\nu_1} - \frac{2\pi\nu_1}{(2\pi\nu_2)^2}, \quad (12)$$

де ν_1, ν_2 – частоти зсуву по фазі на 45° та 90° , значення яких представлені в паспортних даних ЕНА.

Механічна постійна часу гідроциліндра T_c , c ,

$$T_c = \sqrt{\frac{mH}{4E_c F}}, \quad (13)$$

де наведений модуль пружності гідроциліндра E_c для проектного розрахунку рекомендується прийняти

$$E_c = (0,85 \dots 0,95)E_f, \quad (14)$$

де E_f – модуль пружності вибраної робочої рідини.

Коефіцієнт відносного демпфування гідроциліндра ζ_c також приймається приблизно з діапазону

$$\zeta_c = 0,2 \dots 0,5. \quad (15)$$

Відповідно до структурної схеми (рис. 2), передавальна функція ЕГСП за керуючим сигналом має вигляд

$$W(s) = \frac{k_{yu}}{a^6 s^6 + a^5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + 1}, \quad (16)$$

де k_{yu} – коефіцієнт передачі ЕГСП, m/B ,

$$k_{yu} = 1 / k_{fb}; \quad (17)$$

$$a_1 = \frac{1}{D_{EHSD}}; a_2 = \frac{T_{cw} + T_{1a} + 2T_c \xi_c}{D_{EHSD}};$$

$$a_3 = \frac{T_{cw} T_{1a} + 2T_c \xi_c T_{cw} + T_{2a}^2 + 2T_c \xi_c T_{1a} + T_c^2}{D_{EHSD}}; \quad (18)$$

$$a_4 = \frac{T_{2a}^2 T_{cw} + 2T_c \xi_c T_{cw} T_{1a} + T_c^2 T_{cw} + 2T_c \xi_c T_{2a}^2 + T_{1a} T_c^2}{D_{EHSD}};$$

$$a_5 = \frac{2T_{2a}^2 T_c T_{cw} \xi_c + T_c^2 T_{cw} T_{1a} + T_{2a}^2 T_c^2}{D_{EHSD}}; a_6 = \frac{T_{2a}^2 T_c^2 T_{cw}}{D_{EHSD}}.$$

Оцінити стійкість можна різними методами [13; 14], зокрема, за критерієм Гурвіца. Для системи 6-го порядку, що має передатну функцію (19), необхідним при позитивних коефіцієнтах $a_1 \dots a_6$ є виконання нерівностей

$$\begin{cases} a_4 a_5 > a_3 a_6; \\ (a_4 a_5 - a_3 a_6)(a_2 a_3 - a_1 a_4) > (a_2 a_5 - a_1 a_6)^2. \end{cases} \quad (19)$$

У разі нестійкої системи необхідно виконати корекцію ЕГСП, про що сказано нижче.

7. Дослідження динамічних характеристик приводу та якості регулювання, корекція привода.

Виконується розрахунок перехідного процесу та частотних характеристик. Проводиться оцінювання показників якості регулювання, робляться висновки щодо необхідності корекції ЕГСП.

Розрахунки рекомендується виконувати безпосередньо в пакеті прикладних програм MATLAB та у підсистемі Simulink [15].

Питання вибору коригувальної ланки підвищення якості регулювання ЕГСП технологічного обладнання детально розглянуто в роботах авторів [8; 10]. Досить ефективним є послідовне встановлення в ланцюзі ЕМТ реальної пропорційно-диференціальної ланки

$$W_c = \frac{Ts + k}{T_{in}s + 1}, \quad (20)$$

де T, k – постійна часу та коефіцієнт передачі коригувального ланки; T_{in} – постійна часу, що характеризує інерційність ланки, що коригує.

Результати. Покажемо приклад проектного розрахунку ЕГСП спеціального технологічного обладнання для обробки матеріалів тиском для наступних вихідних даних: максимальне зусилля $R_{max} = 160 \text{ кН}$ та максимальна швидкість слідкування без навантаження $V_{max} = 0,05 \text{ м/с}$; максимальна похибка слідкування $\epsilon_{max} = 0,005 \text{ м}$; хід поршня $H = 0,5 \text{ м}$; наведена маса рухомих частин $m = 500 \text{ кг}$.

Використовуємо розрахункову схему, показану на рис. 1.

Як робочу рідину використовуємо гідравлічне мастило ІГП–30 [2]. Приймаємо номінальний робочий тиск $P_{nom} = 32 \text{ МПа}$.

Оцінюємо ефективну площу НС

$$F = (1,3 \dots 1,5) \frac{R_{max}}{P_{nom}} = 0,007 \text{ м}^2.$$

За значенням F визначаємо діаметр поршню. Для НС з двостороннім штоком та співвідношенням діаметрів штоку та поршню $d_r / D = 1/2$ отримуємо

$$D = 4 \sqrt{\frac{F}{3\pi}} = 0,109 \text{ м}.$$

Обираємо гідроциліндр НС125.63-02 ($D=125 \text{ мм}$, $d_r=63 \text{ мм}$) [2].

Уточнюємо

$$F = \frac{\pi}{4} (D^2 - d_r^2) = \frac{\pi}{4} (0,125^2 - 0,063^2) = 0,0091 \text{ м}^2.$$

Приймаємо

$$P_{ap} = (0,75 \dots 0,85) P_{nom} = 22,6 \text{ МПа}.$$

Орієнтуємось на ЕНА типу РП [2], для яких $\Delta P_{ЕНА} = 32 \text{ МПа}$.

Витрата ЕНА має бути

$$Q_{ЕНА} \geq (1,1 \dots 1,2) F V_{max} \sqrt{\frac{\Delta P_{ЕНА}}{P_{nom}}} = 6,23 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с} = 37,4 \text{ л/хв}.$$

Обираємо ЕНА – дроселюючий гідророзподільник – РП10, для якого $\Delta P_{ЕНА} = 32 \text{ МПа}$, $Q_{ЕНА} = 50 \text{ л/хв}$, $i_{nom} = 850 \text{ мА}$, $v_1 = 80 \text{ Гц}$, $v_2 = 125 \text{ Гц}$, $L_c = 1,0 \text{ Гн}$, $R_e = 100 \text{ Ом}$.

Оцінюємо коефіцієнт витрати для обраного ЕНА

$$K_{Qi} = \frac{Q_{ЕНА}}{i_{nom}} \sqrt{\frac{P_{ap}}{\Delta P_{ЕНА}}} = 0,516 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / (\text{с} \cdot \text{А}).$$

Приймаємо $U_{max} = 10 \text{ В}$. Тоді коефіцієнт передачі FB

$$k_{fb} = \frac{2U_{\max}}{H} = 40 \text{ В/м}.$$

Добротність ЕГСП

$$D_{EHSD} \geq (1,05 \dots 1,1) V_{\max} / \varepsilon_{\max} = 10,7 \text{ с}^{-1}.$$

Коефіцієнт передачі ЕВ

$$k_{eb} = \frac{D_{EHSD} F}{k_{Qi} k_{fb}} = 1,754 \text{ ом}^{-1}.$$

Маємо таку статичну характеристику ЕГСП

$$V = U_{\varepsilon} \frac{D_{EHSD}}{k_{eb}} \sqrt{1 - \frac{R}{p_{ap} F} \text{sign} U_{\varepsilon}} = 0,2675 U_{\varepsilon} \sqrt{1 - \frac{R}{2,057 \cdot 10^5} \text{sign} U_{\varepsilon}} \text{ м/с}.$$

Звідси при $R = 0$ маємо вираз для швидкісної характеристики

$$V = 0,2675 U_{\varepsilon},$$

яку будемо в діапазоні $-0,2 \leq U_{\varepsilon} \leq 0,2$.

Навантажувальна характеристика при $U_{\varepsilon} = \pm 0,2 \text{ В}$

$$V = 0,0535 \sqrt{1 - \frac{R}{2,057 \cdot 10^5}} \text{ м/с}, \text{ при } U_{\varepsilon} = 0,2 \text{ В};$$

$$V = -0,0535 \sqrt{1 + \frac{R}{2,057 \cdot 10^5}} \text{ м/с}, \text{ при } U_{\varepsilon} = -0,2 \text{ В};$$

яку будемо в діапазоні $-2,057 \cdot 10^5 \leq R \leq 2,057 \cdot 10^5 \text{ Н}$.

Швидкісна та навантажувальна характеристики ЕГСП представлені на рис. 3.

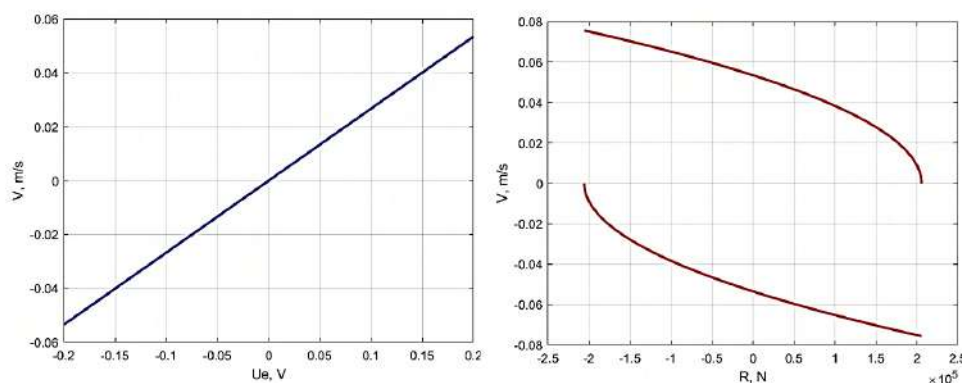


Рис. 3. Швидкісна та навантажувальна характеристики

Джерело: розроблено авторами.

Як видно, привод забезпечує задану максимальну швидкість слідкування без навантаження $V_{\max} = 0,05 \text{ м/с}$, а також задане максимальне зусилля $R_{\max} = 160 \text{ кН}$.

Виконуємо оцінку параметрів лінійної моделі.

Постійна часу обмотки управління ЕМТ

$$T_{cw} = L_c / R_e = 0,01 \text{ с}.$$

Постійні часу ЕНА

$$T_{1a} = \frac{1}{2\pi\nu_1} - \frac{2\pi\nu_1}{(2\pi\nu_2)^2} = 0,0011 \text{ с}; T_{2a} = \frac{1}{2\pi\nu_2} = 1,27 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

Механічна постійна часу гідроциліндра для наведеного модуля пружності $E_c = 10^9 \text{ МПа}$

$$T_c = \sqrt{\frac{mH}{4E_c F}} = 2,62 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Приймаємо коефіцієнт відносного демпфування гідроциліндра $\zeta_c = 0,25$.

Коефіцієнт передачі ЕГСП

$$k_{yu} = 1/k_{fb} = 0,025 \text{ м/В.}$$

Коефіцієнти передавальної функції

$$a_1 = \frac{1}{D_{EHSD}} = 0,0934; a_2 = \frac{T_{cw} + T_{1a} + 2T_c \zeta_c}{D_{EHSD}} = 0,0011;$$

$$a_3 = \frac{T_{cw} T_{1a} + 2T_c \zeta_c T_{cw} + T_{2a}^2 + 2T_c \zeta_c T_{1a} + T_c^2}{D_{EHSD}} = 3,26 \cdot 10^{-6};$$

$$a_4 = \frac{T_{2a}^2 T_{cw} + 2T_c \zeta_c T_{cw} T_{1a} + T_c^2 T_{cw} + 2T_c \zeta_c T_{2a}^2 + T_{1a} T_c^2}{D_{EHSD}} = 1,03 \cdot 10^{-8};$$

$$a_5 = \frac{2T_{2a}^2 T_c T_{cw} \zeta_c + T_c^2 T_{cw} T_{1a} + T_{2a}^2 T_c^2}{D_{EHSD}} = 1,05 \cdot 10^{-11}; a_6 = \frac{T_{2a}^2 T_c^2 T_{cw}}{D_{EHSD}} = 1,04 \cdot 10^{-14}.$$

Маємо передавальну функцію

$$W(s) = \frac{0,025}{1,04 \cdot 10^{-14} s^6 + 1,05 \cdot 10^{-11} s^5 + 1,03 \cdot 10^{-8} s^4 + 3,26 \cdot 10^{-6} s^3 + 0,0011 s^2 + 0,0934 s + 1}$$

Перевіряємо стійкість

$$a_4 a_5 = 1,08 \cdot 10^{-18} > a_3 a_6 = 3,39 \cdot 10^{-20};$$

$$(a_4 a_5 - a_3 a_6)(a_2 a_3 - a_1 a_4) = 2,144 \cdot 10^{-28} > (a_2 a_5 - a_1 a_6)^2 = 1,3 \cdot 10^{-28}.$$

Перехідна та амплітудно-фазова характеристики представлені на рис. 4.

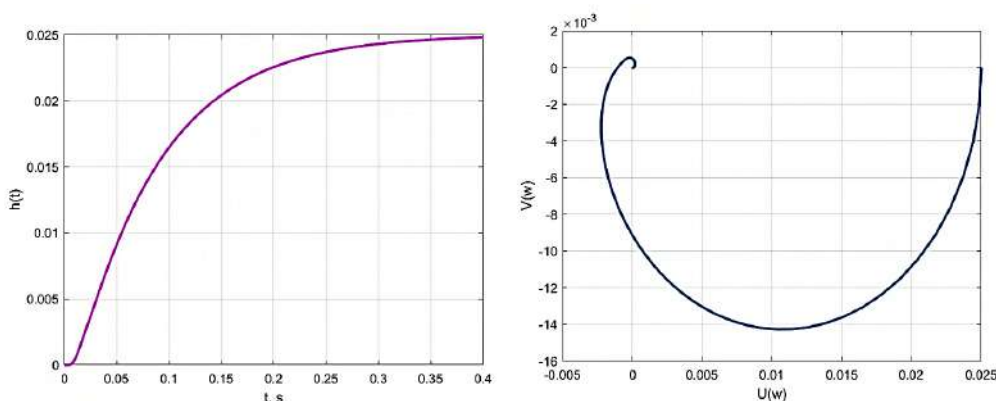


Рис. 4. *Перехідна та амплітудно-фазова характеристики ЕГСП*

Джерело: розроблено авторами.

Зазначимо, що перехідний процес має аперіодичний характер і не має перерегулювання, час перехідного процесу становить 0,28 с.

Для підвищення швидкодії приводу доцільно рекомендувати послідовне встановлення в ланцюгу ЕМТ реальної пропорційно-диференціальної ланки. Вибір оптимальних параметрів налаштування коригувальної ланки, зручно провести в підсистемі Simulink пакету прикладних програм MATLAB. Блок-діаграма для моделювання динамічних характеристик ЕГСП з коригуючою ланкою в середовищі Simulink представлена на рис. 5.

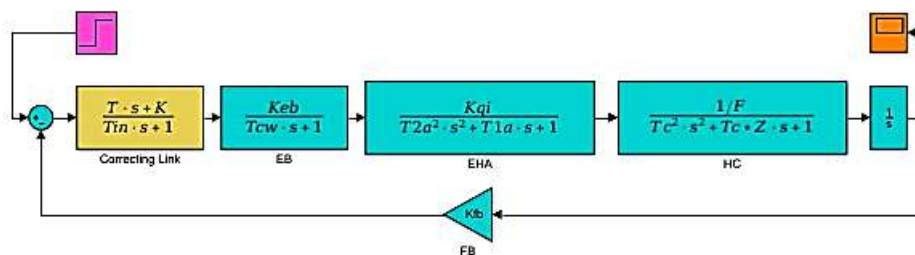


Рис. 5. Блок-діаграма для моделювання динамічних характеристик ЕГСП з коригуючою ланкою, в середовищі Simulink пакета MATLAB

Джерело: розроблено авторами.

Висновки. Таким чином, розроблено інженерну методику проектного розрахунку ЕГСП з дросельним регулюванням, адаптовану на приводи технологічного обладнання для механічної обробки матеріалів. Методика дозволяє проводити оцінку основних параметрів, вибір елементів та пристроїв приводу, прогнозувати його статичні та динамічні характеристики. Як вихідні дані розглядаються: максимальне навантаження (сила); максимальна швидкість стеження без навантаження; максимальна похибка стеження (або допустима похибка стеження за максимальної швидкості); хід поршню; наведена маса рухомих елементів. Використані підходи дозволяють підвищити достовірність проектного розрахунку.

Методика включає такі основні етапи: побудова розрахункової схеми приводу, вибір робочої рідини та номінального робочого тиску; розрахунок конструктивних параметрів та вибір НС; вибір ЕНА; визначення параметрів зворотного зв'язку, визначення добротності приводу та розрахунок коефіцієнта передачі електричного блока; оцінка статичних характеристик приводу, розрахунок швидкісної та навантажувальної характеристик; побудова лінійної моделі приводу; оцінка стійкості; дослідження динамічних характеристик приводу та якості регулювання; корекція приводу.

Наведено приклад проектного розрахунку ЕГСП спеціального технологічного обладнання для максимального зусилля 160 кН та максимальної швидкості стеження без навантаження 0,05 м/с. Наведено результати розрахунків статичних та динамічних характеристик приводу в середовищі пакету прикладних програм MATLAB. Результати розрахунків показують, що спроектований привід забезпечує задане максимальне зусилля та задану максимальну швидкість слідування без навантаження. Аналіз динамічних характеристик довів відсутність коливальності та перерегулювання вихідної ланки. Для підвищення швидкодії приводу було рекомендовано послідовне встановлення у ланцюгу ЕМТ пропорційно-диференціальної ланки.

Список використаних джерел

1. Петраков Ю. В. Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням : навч. посіб. / Ю. В. Петраков – К. : УкрНДІАТ, 2003. – 383 с.
2. Свешников В. К. Станочные гидроприводы : справочник / В. К. Свешников. – М. : Машиностроение, 2008. – 640 с.
3. Попов Д. Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем / Д. Н. Попов. – М. : Машиностроение, 1987. – 464 с.
4. Гидроприводы и гидропневмоавтоматика станков / В. А. Федорец, М. П. Педченко, А. Ф. Пичко, Ю. В. Пересадько, В. С. Лысенко. – К. : Вышш. школа, 1987. – 375 с.
5. Навроцкий К. Л. Теория и проектирование гидро- и пневмоприводов / К. Л. Навроцкий. – М. : Машиностроение, 1991. – 384 с.
6. Rydberg K. E. Hydraulic Servo Systems: Dynamic Properties and Control / K. E. Rydberg // Linköping University Electronic Press, Linköping, 2016.
7. Попов Д. Н. Механика гидро- и пневмоприводов : учеб. для вузов / Д. Н. Попов. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 320 с.

8. Соколов В. І. Корекція автоматичного електрогідравлічного приводу технологічного обладнання / В. І. Соколов, О. Г. Степанова, Є. О. Батурін // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2020. – № 4 (260). – С. 72-78.

9. Sokolov V. Determination of Transfer Functions for Electrohydraulic Servo Drive of Technological Equipment / V. Sokolov., O. Krol // *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2018 : Lecture Notes in Mechanical Engineering*. – Springer, Cham, 2021. – Pp. 364-373.

10. Sokolov V. Choice of Correcting Link for Electrohydraulic Servo Drive of Technological Equipment / V. Sokolov, O. Krol, O. Stepanova // *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019: Lecture Notes in Mechanical Engineering*. – Springer, Cham, 2020. – Pp. 702-710.

11. Основы технической механики жидкостей и газов : учеб. пособ. для вузов / А. А. Коваленко, В. И. Соколов, А. Х. Дымнич, П. Е. Уваров. – Луганск : ВУГУ, 1998. – 272 с.

12. Соколов В. І. Гідравліка / В. І. Соколов, О. С. Кроль, О. В. Єпіфанова. – Сєвєродонецьк : СНУ ім. В. Даля, 2017. – 160 с.

13. Петраков Ю. В. Теорія автоматичного управління в металообробці / Ю. В. Петраков. – К. : ІЗМН, 1998. – 212 с.

14. Лазарев Ю. Ф. Начала программирования в среде MatLAB : учеб. пособ. / Ю. Ф. Лазарев. – К. : НТУУ «КПИ», 2003. – 424 с.

15. Попович М. Г. Теорія автоматичного керування : підручник / М. Г. Попович, О. В. Ковальчук. – К. : Либідь, 2007. – 656 с.

References

1. Petrakov, Ju.V. (2003). *Avtomatychne upravlinnja procesamy obrobky materialiv rizannjam [Automatic control of process of materials processing by cutting]*. UkrNDIAT.

2. Sveshnikov, V.K. (2008). *Stanochnye gidroprivody [Machine tool hydraulic drives]*. Mashinostroenie.

3. Popov, D.N. (1987). *Dinamika i regulirovanie gidro- i pnevmosistem [Dynamics and regulation of hydraulic and pneumatic systems]*. Mashinostroenie.

4. Fedorets, V.A., Pedchenko, M.N., Pichko, A.F., Peresadko, Ju.V., & Lysenko, V.S. (1987). *Gidroprivody i gidropnevmoavtomatika stankov [Hydraulic drives and hydropneumautomatics of machine tools]*. Vysshaya shkola.

5. Navrotskii, K.L. (1991). *Teoriia i proektirovanie gidro- i pnevmoprivodov [Theory and design of hydraulic and pneumatic drives]*. Mashinostroenie.

6. Rydberg, K.-E. (2016). *Hydraulic Servo Systems: Dynamic Properties and Control*. Linköping University Electronic Press.

7. Popov, D.N. (2005). *Mehanika gidro- i pnevmoprivodov [Mechanics of hydraulic and pneumatic drives]*. MGTU im. N. Je. Baumana.

8. Sokolov, V.I., Stepanova, O.G., & Baturin, Je.O. (2020). Korektsiia avtomatichnoho elektrohidravlichnoho pryvodu tehnologichnoho obladdannja [Correction of automatic electro-hydraulic drive of technological equipment]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu im. V. Dalia – Bulletin of the East Ukrainian National University. V. Dahl*, (4(260)), 72-78.

9. Sokolov, V., & Krol, O. (2021). Determination of Transfer Functions for Electrohydraulic Servo Drive of Technological Equipment. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering* (pp. 364–373). Springer, Cham.

10. Sokolov, V., Krol, O., & Stepanova, O. (2020). Choice of Correcting Link for Electrohydraulic Servo Drive of Technological Equipment. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering* (pp. 702–710). Springer, Cham.

11. Kovalenko, A.A., Sokolov, V.I., Dymnich, A.H., & Uvarov, P.E. (1998). *Osnovy tehnichej mehaniki zhidkостей i gazov [Fundamentals of technical mechanics of liquids and gases]*. VUGU.

12. Sokolov, V.I., Krol, O.S., & Jepifanova, O.V. (2017). *Gidravlika [Hydraulics]*. SNU im. V. Dalia.

13. Petrakov, Ju.V. (1998). *Teoriia avtomatichnoho upravlinnja v metaloobrobci [Theory of automatic control in metal processing]*. IZMN.

14. Lazarev, Ju.F. (2003). *Nachala programmirovaniia v srede MatLAB [Start of programming in MatLAB environment]*. NTU «KPI».

15. Popovych, M.G., & Kovalchuk, O.V. (2007). *Teoriia avtomatichnoho keruvannia [Theory of automatic control]*. Lybid.

Отримано 26.01.2022

UDC 621.646:62-83:629

Yevhen Baturin¹, Oleksiy Romanchenko², Oleksandr Golubenko³, Volodymyr Sokolov⁴¹Postgraduate Student

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University (Severodonetsk, Ukraine)

E-mail: baturin2307@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0670-8320>²PhD in Technical Sciences, Associate Professor,

Associate Professor of Machinery Engineering and Applied Mechanics Department

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University (Severodonetsk, Ukraine)

E-mail: alexvromanchenko@snu.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4327-1105>**ResearcherID:** [G-9873-2018](https://orcid.org/0000-0002-4327-1105). **SCOPUS Author ID:** [57217135670](https://orcid.org/0000-0002-4327-1105)³Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Railway Transport Department

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University (Severodonetsk, Ukraine)

E-mail: olgol@snu.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2221-6756>⁴Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Machinery Engineering and Applied Mechanics Department

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University (Severodonetsk, Ukraine)

E-mail: sokolov.snu/edu.@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0459-1824>**ResearcherID:** [G-9766-2018](https://orcid.org/0000-0003-0459-1824). **SCOPUS Author ID:** [57191822948](https://orcid.org/0000-0003-0459-1824)

METHODOLOGY OF THE DESIGN CALCULATION OF THE ELECTRO-HYDRAULIC SERVO DRIVE OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

Machine-building industries and enterprises for modernization of railway rolling stock are constantly increasing the requirements for the technical and functional characteristics of technological equipment drives. The improvement of equipment drives ensures the implementation of the optimal laws of working bodies motion, the accuracy of regulation of their movements and the stability of speeds under variable load conditions, that has a direct impact on the quality of products and productivity.

The use of automatic drives of technological equipment, in particular electrohydraulic servo drives, ensures the achievement of arbitrary kinematics of the working body and the possibility of software implementation of the optimal laws of its motion. The development of high-performance electrohydraulic servo drives and their implementation in specialized technological equipment is a rather labor-intensive process and requires the use of engineering methods of project calculation that make it possible to evaluate the main parameters, select drive elements and devices, and predict its static and dynamic characteristics.

Currently, there are separate methods and procedures for designing of automatic electro-hydraulic drives for various technological equipment for mechanical processing, in particular equipment for processing materials by pressure, metal-cutting machine tools and systems, tool equipment, etc. The available methods are not universal, as a rule they are focused on different classes of both conventional and specialized equipment, they use different initial data, apply various calculation methods and, as a result, have incompatible calculation results.

The continuous improvement of the technological equipment of modern machine-building industries and enterprises for the modernization of rolling stock of railways requires the creation of generally accepted engineering methods of project calculation of electrohydraulic servo drives of technological equipment. Based on the works of the authors by design of automatic drives of technological equipment, mathematical modeling and research of their static and dynamic characteristics, as well as correction of the quality of regulation, a unified engineering method for the design calculation of servo electrohydraulic drives is proposed.

The work is devoted to the development of an engineering methodology for the project calculation of an electrohydraulic servo drive with a throttle adjustment of technological equipment, which makes it possible to evaluate the main parameters, select drive elements and devices, and predict its static and dynamic characteristics.

An engineering methodology of project calculation of an electrohydraulic servo drive with throttle control for specialized technological equipment of machine-building industries and enterprises for the modernization and repair of rolling stock of railways is presented. The application of engineering methodology involves setting of the following initial data: maximum load (force); maximum tracking speed without load; maximum tracking error (or allowable tracking error at maximum speed); piston stroke; the mass of moving elements. According to the methodology the calculations are made in the following order: design of a drive scheme, selection of a working fluid and nominal working pressure; calculation of design parameters and selection of a hydraulic cylinder; choice of electrohydraulic amplifier; determination of feedback parameters, determination of the quality factor of the drive and calculation of the transmission coefficient of electrical unit; assessment of drive static characteristics, calculation of speed and load characteristics; designing of drive linear model; durability assessment; study of drive dynamic characteristics and the quality of regulation; drive correction. An example of a project calculation of an electrohydraulic servo drive of specialized pressure processing equipment for a maximum force of 160 kN and a maximum tracking speed without load of 0,05 m/s is given. The results of calculations of the static and dynamic characteristics of the drive using the MATLAB application package are presented.

An engineering method for project calculation of an electrohydraulic servo drive for specialized technological equipment is proposed. An example of a project calculation of an electrohydraulic servo drive of specialized technological equipment is given.

Keywords: special technological equipment; electrohydraulic drive, servo drive; throttle control; static characteristics; dynamic characteristics; calculation scheme; transient process; correction link.

Fig.: 5. References: 15.

Володимир Лебедєв¹, Віктор Тищенко², Сергій Лой³¹доктор технічних наук, головний конструкторДержавне підприємство «Дослідне конструкторсько-технологічне бюро
Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України» (Київ, Україна)
E-mail: lebedevvladimir@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0391-6113>²провідний інженерІнститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України» (Київ, Україна)
E-mail: irvik1947@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6081-8531>³доцент кафедри зварюванняХерсонський навчально-науковий інститут
Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (Херсон, Україна)
E-mail: welding.kherson@nuos.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1936-6390>**ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ МЕТАЛУ
ПРИ ЕЛЕКТРОДУГОВОМУ МЕХАНІЗОВАНОМУ НАПЛАВЛЕННІ
З МОДУЛЯЦІЄЮ РЕЖИМІВ**

У статті досліджено особливості забезпечення твердості поверхневого зміцнення деталей машин та механізмів з використанням способу наплавлення модульованим струмом. Представлені та проаналізовані результати експериментальних досліджень, отримані при напавленні з модуляцією режимів дугового процесу з керованими характеристиками модульованого впливу. Розроблена математична модель залежностей твердості наплавлених шарів від основних параметрів модуляції. Для прикладу та візуалізації побудовані графіки таких залежностей. Розглянуті мікрошліфи наплавлень із визначенням особливостей структури металу.

Ключові слова: дугове наплавлення; електрод, що плавиться; модуляція режимів.

Рис.: 10. Табл.: 3. Бібл.: 11.

Актуальність теми дослідження. Збільшення терміну служби вузлів і деталей більшості виробничих машин у різних галузях промисловості, будівництва, сільського господарства тощо є однією головних проблем матеріалознавства ХХІ століття.

Відновлення та зміцнення вузлів і деталей різних машин і механізмів, що швидко зношуються, є завданням однієї з адитивних технологій, що отримали розвиток останнім часом. Одним із напрямів цієї технології є електродугове наплавлення із застосуванням певних матеріалів, технічних засобів та способів застосування.

Застосування цих способів наплавлення, як відомо [1], часто дозволяє отримати робочу поверхню деталей потрібної якості та з порівняно невеликими витратами. Реновація поверхонь із застосуванням електродугового наплавлення є досить відомою технологією з відомими і широко застосовуваними конструкціями зварювально-наплавного обладнання.

Постановка проблеми. Подальше застосування електродугового наплавлення може бути істотно розширено з введенням в цю технологію нових техніко-технологічних рішень, що дозволяють забезпечити міцніші наплавлені шари, отримати можливість управління геометричними параметрами наплавлених валиків, що, зокрема, знижує витрати на подальші роботи з надання результатам наплавлення необхідного товарно-експлуатаційного виду. Порівняно новим способом поліпшення показників електродугового наплавлення є застосування модуляції основних вузлів обладнання шляхом періодичної зміни їх вихідних параметрів, як одного з видів імпульсного впливу.

У системах модуляції та технології їх застосування є певні особливості, які вимагають подальшого вивчення та отримання рекомендаційних висновків.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Процес наплавлення з модуляцією параметрів постійно вивчається, що зазначено у вітчизняній та зарубіжній технічній літературі, наприклад [2]. Проте є ще напрями, які необхідно додатково вивчати.

Відомо [3], що кристалізація розплавленого металу у зварювальній ванні визначається фізико-хімічними характеристиками розплаву. Накладення на таку систему зовнішнього імпульсного впливу чи модуляції може запровадити істотні корективи при

кристалізації. Процес кристалізації ванни та утворення структурних складових у наплавленому металі при наплавленні модульованим струмом у багатьох складових має свої особливості, частково вже досліджені [4].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. До цього часу залишаються не до кінця дослідженими питання, пов'язані зі структурою металу наплавлених шарів, виконаних із застосуванням модуляції силових характеристик дугового процесу. При цьому дуже важливим є отримання результатів, які можуть бути основою для подальшого ходу досліджень, а також застосування при розробці технологічних процесів практичних робіт із наплавлення різних вузлів та деталей з їхніми специфічними особливостями.

Мета запропонованої роботи полягає у виявленні та описанні особливостей формування структури наплавленого металу модульованим струмом із подальшим використанням результатів дослідження для підвищення якісних показників наплавленних поверхонь. Для вирішення поставленої мети на основі комплексних експериментальних досліджень необхідно розглянути та проаналізувати основні можливості, які дає наплавлення з модуляцією режимів, що мають можливість широкого регулювання частот та шпаруватості з визначенням їхнього впливу на властивості наплавленого валика. При цьому важливою є розробка та побудова математичних моделей, що визначають вплив параметрів модуляції на одну з основних характеристик покриття – твердості.

Виклад основного матеріалу. Наплавлення як техніка та технологія реновації поверхонь може бути істотно розширене із введенням нових техніко-технологічних рішень, що дозволяють забезпечити міцніші наплавлені шари, отримати можливість управління геометричними параметрами наплавлених валиків, що, зокрема, знижує витрати на подальші роботи з надання результатам наплавлення необхідного товарно-експлуатаційного виду. Організація процесу модульованого наплавлення може бути здійснена за допомогою джерела зварювального струму, електродвигуна механізму подачі електродного дроту. Можна помітити, що інші системи зварювального обладнання можуть створювати періодичні зміни параметрів дугового процесу, наприклад, електричні й механічні коливальні дуги і виробі.

У процесі дослідження впливу параметрів наплавлених валиків і шарів при наплавленні модульованим струмом використовувався автомат А-874Н з випрямлячем ВДУ-506, Модуляція параметрів режиму проводилася за допомогою дослідної приставки модулятор ОІ-10 [5] - конструкції ІЕЗ ім. Є.О. Патона шляхом періодичної зміни частоти обертання вала приводного електродвигуна механізму подачі електродного дроту або за рахунок синхронізованого впливу на електричні ланцюги управління джерела живлення та електропривода двигуна подачі електродного дроту. При цьому змінюються за заздалегідь встановленими алгоритмами напруження джерела зварювального струму і швидкість подачі електродного дроту (струм дугового процесу). У модуляторі є два канали управління – для електропривода механізму подачі електродного дроту, а також датчики рівнів максимальної та мінімальної вихідної напруги та максимальної та мінімальної частот обертання вала приводного електродвигуна і відповідно струму зварювання. Є також два датчики часу дії імпульсу та паузи. На рис. 1 наведено приклади осцилограм струму та напруги дугового процесу при застосуванні модулятора для різних процесів та різних режимів наплавлення з використанням порошкового самозахисного електродного дроту ПП-АН-140 діаметром 2,0 мм.

Наплавлення виконували на стандартних зразках, виконаних з інструментальних сталей, переважно з матеріалів штампного інструменту, на основі спеціально розроблених матриць експериментів з подальшим металографічним аналізом перерізів отриманих валиків, а також вимірюванням механічних характеристик валиків і наплавлених шарів, у тому числі й багатошарових структур. Режими наплавлення вибиралися з умов стійкості дугового процесу та задовільного формування наплавлених валиків.

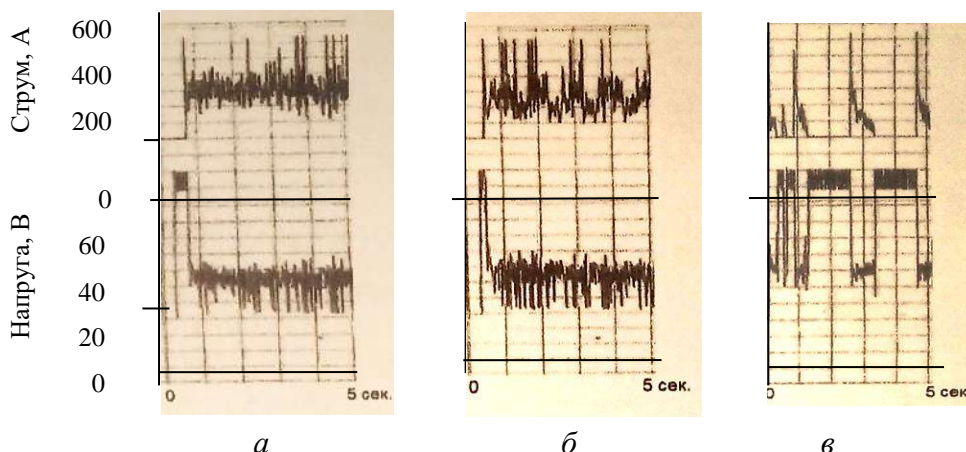


Рис. 1. Осцилограми процесу наплавлення з модуляцією струму за рахунок зміни частоти обертання вала приводного електродвигуна:

а – стаціонарна дуга, струм дуги $I_d = 290$; напруга дуги $U_d = 25$ В; швидкість зварювання; $v_{св} = 10,5$ М/год; виліт електродного дроту $L = 0,02$ М
 б – модульований струм: $I_d = 290$; $U_d = 25$ В; $v_{св} = 10,5$ М/год; $L = 0,02$ М; $t_i = 0,8$ С; $t_n = 0,2$ С;
 в – модульований струм: $I_d = 120$; $U_d = 29$ В; $v_{св} = 10,5$ М/год; $L = 0,02$ М; $t_i = 0,2$ С; $t_n = 0,8$ С
 Джерело: розроблено авторами.

Для вирішення техніко-технологічних завдань, а також прогнозування основних результатів наплавлення із застосуванням модуляції зварювального струму необхідний певний математичний та візуальний апарат. У цьому випадку запропоновано вирішити це завдання із застосуванням математичної моделі з графічним описом та отриманням виразів, що описують шукані залежності твердості наплавлених валиків від параметрів модуляції порівняно з наплавленням стаціонарною дугою.

Розробка математичної моделі залежності величин, твердості H , ударної в'язкості та результатів випробувань на вигин від відповідних значущих параметрів модуляції процесу наплавлення частоти імпульсів s , $H = f(s)$, жорсткості режиму модуляції $Q = t_n/t_u$, де t_n , t_u – час дії паузи та імпульсу відповідно і від співвідношення часів дії імпульсу та паузи $H = f(Q)$ базувалася на експериментальних дослідженнях результатів наплавлення із застосуванням методів регресійного аналізу зі складанням матриці планування експерименту.

Складено матрицю діючих факторів (плану експериментів), а також результатів вимірювання за методикою роботи [6], де x_1 , x_2 , – часи дії імпульсу та паузи відповідно; x_3 , x_4 , струм в імпульсі та паузі відповідно. Матриця представлена в табл. 1.

Таблиця 1
 Матриця плану експериментів та результати вимірів

№	Фактори				Твердість	Ударна в'язкість, KCV	Вигин σ
-	x_1	x_2	x_3	x_4	HRC	Дж/см ²	МПа
1	+	+	+	+	57	2,5	1100
2	-	+	+	-	53	4,0	2400
3	+	-	+	-	50	6,0	2650
4	-	-	+	+	56	8,0	2750
5	+	+	-	-	52	10,0	2850
6	-	+	-	+	6,1	12,0	2950
7	+	-	+	-	64	14,0	3200
8	-	-	-	-	54	18,0	3400

Рівняння регресії, складені на підставі розглянутої матриці мають вигляд:

$$HRC_s = 53,9 - 1,3125x_1 + 1,062x_2 - 1,875x_3 + 1,625x_4; \tag{1}$$

$$KCV = 9,3 + 1,8x_1 + 3,2x_2 + 12x_3 + 1,6x_4; \tag{2}$$

$$\sigma_{изг} = 2650 + 230x_1 + 38x_2 + 346x_3 + 268x_4. \tag{3}$$

Зазначимо, що твердість (мікротвердість) металу наплавлення вимірювалася на мікротвердомірі М400 фірми «LECO» з відповідним програмним забезпеченням при навантаженні 0,1 кг.

Вимірювання ударної в'язкості проводилося за Шарпом, а випробування на вигин виконувались за методикою ГОСТ 14019-2003.

Для реалізації результатів експерименту з візуалізації залежностей механічних характеристик наплавлених валиків від параметрів модуляції на рис. 2, 3, 4 та 5, представлені залежності $H = f(\Pi)$, які визначені на підставі матриці. Π – параметр, від якого залежить характеристики наплавленого валика. З-поміж таких характеристик визначені найважливіші з них: частота, жорсткість модуляції, співвідношення часів імпульс – пауза. Цифрами 1, 2, 3 на графіках позначені лінії при наплавленні стаціонарною дугою; лінія, одержана на підставі математичної регресійної моделі; лінія апроксимації відповідно.

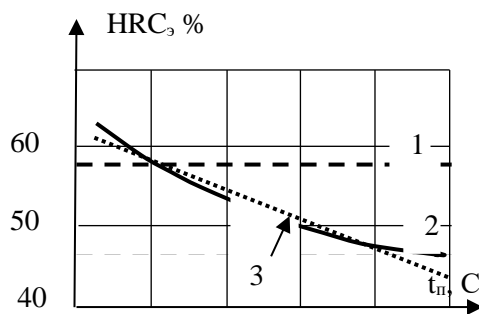


Рис. 2. Залежності твердості наплавленого металу від часу дії паузи при постійному часі дії імпульсу $t_i - 0,1$ с: 1 – стаціонарна дуга; 2 – модульований струм; 3 – лінія апроксимації

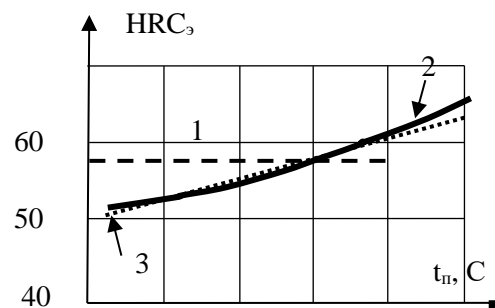


Рис. 3. Залежності твердості наплавленого металу від часу дії паузи при постійному часі дії імпульсу $t_i - 0,8$ с: 1 – стаціонарна дуга; 2 – модульований струм; 3 – лінія апроксимації

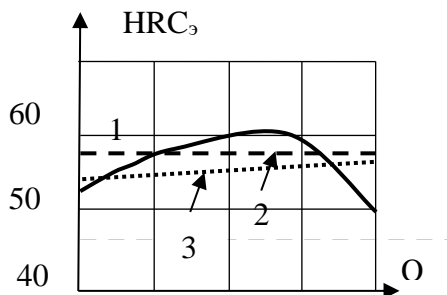


Рис. 4. Залежності твердості наплавленого металу від шпаруватості процесу Q зі стаціонарною дугою (1) і модульованим струмом (2); 3 – лінія апроксимації
Джерело: розроблено авторами.

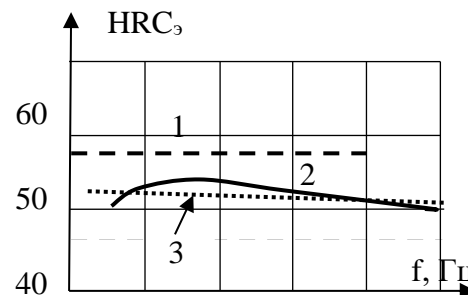


Рис. 5. Залежності твердості наплавленого металу від частоти процесу f зі стаціонарною дугою (1) і модульованим струмом (2); 3 – лінія апроксимації

Використовувалися режими наплавлення: струм – 220-240 А; напруга 24-26 В; швидкість ведення процесу – 10,5 м/годину; виліт електродного дроту – 0,02-0,025 м.

Можна відзначити, що показані залежності можуть з певним ступенем точності достатньої для оцінок та подальшого прогнозування описані звичайними лінійними рівняннями по лініях 3 на рис. 2-5 у вигляді

$$H = H_1 + \frac{(\Pi - \Pi_1)(H_2 - H_1)}{\Pi_2 - \Pi_1}. \quad (4)$$

Параметри H_1 , H_2 , P_1 , P_2 відповідають крайнім точкам прямих ліній апроксимацій 3 на рис. 2-5.

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок, що модуляція струму дугового процесу значною мірою впливає на одну з найважливіших характеристик наплавленого металу – твердість. Аналогічні результати характерні для досліджених характеристик ударної в'язкості та випробуваннях на вигин.

Основним фактором, зазначеним у технічній літературі [7], який впливає на міцність характеристики і твердість зокрема, є процеси кристалізації наплавленого валика. Ці процеси схильні до впливу періодичних змін режимів дугових процесів, що належить до різного виду імпульсних режимів основних систем зварювального обладнання. Це доказово розглянуто нашої роботі [8].

Наплавлення з модуляцією режимів належить до процесів, що значною мірою впливають на структуру наплавленого металу і металу навколошовної зони. Очевидно, зміна характеристик твердості, розглянута вище на підставі розроблених математичних моделей, є наслідком зміни структури наплавленого валика і кристалів зокрема.

Відмінною особливістю первинної структури наплавленого металу модульованим струмом є періодичність формування кристалізаційних шарів. Характерне формування цих шарів представлено в порівняльному вигляді на рис. 6, б, в. Зазначена періодичність проявляється в чергуванні «тонких» та «товстих» шарів за висотою наплавленого металу. При цьому товщина «товстих» шарів зменшується до вершу. Порівняльне зіставлення товщини аналогічних шарів показує, що при модульованому струмі в 2...3 рази тонше, ніж при наплавленні із застосуванням стаціонарного режиму.

Іншими важливими відмінними рисами металу при модульованому струмі є відсутність транскристалізаційних структур.

Спільним для первинних структур є наявність стовпчастих кристалітів орієнтованих у напрямку фронту кристалізації металу й шаруватість у вигляді темних і світлих смуг, що чергуються.

Розрізняються ці структури характером чергування та зміни товщини кристалізаційних шарів за висотою шва. Товщина кожного наступного по висоті шару кристалізаційного шару змінюється при віддаленні від кореня шва. Первинна структура металу наплавленого стаціонарною дугою характеризується наявністю грубих форм затвердіння.

Про вплив модульованого струму процесу наплавлення на умови кристалізації металу зварювальної ванни свідчить хвилеподібна форма на межі сплавлення шва з основним металом, виявлена на поздовжніх мікрошліфах шляхом зняття з них сірчаних відбитків за Бауменом (рис. 7). У результаті дослідження шліфів було встановлено, що кристалізація шарів розплаву при стаціонарному наплавленні відповідає відомому механізму природної періодичності процесу [9] полягає в тому, що зростання кристалітів пе-

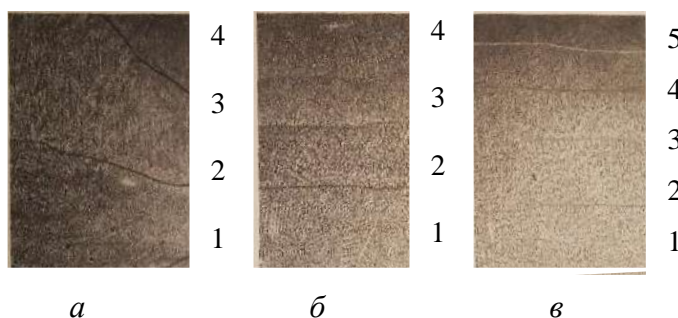


Рис. 6. Первинна структура наплавлених валиків (x32): а – стаціонарна дуга;

б – модульований струм частота 1,1 Гц;

в – модульований струм частота 2,5 Гц;

1 корінь шва; 2 та 3 – середина шва; 4, 5 верх шва
Джерело: розроблено авторами.

ріодично припиняється і відновлюється під дією теплових процесів у металі зварювальної ванни, причому на початку процесу кристалізації така періодична зміна швидкості зростання відбувається з більшою частотою, ніж на завершальній стадії кристалізації.

При наплавленні модульованим струмом характер кристалізації як періодичного процесу накладає відбиток імпульсний підведення тепла з боку зварювальної дуги. Під час «паузи» в результаті відносного охолодження розплаву середня швидкість кристалізації збільшується і градієнт температури на міжфазному кордоні різко зменшується.

Під час «імпульсу» відбувається деяке підплавлення металу, що закристилізувався, і збільшення градієнта температур на міжфазному кордоні. Таким чином, здійснюється примусова кристалізація. Треба зазначити, що термін «примусова кристалізація», наскільки нам відомо з технічної літератури використаний в аналізованому процесі вперше і може бути додатково обговорений.

Для визначення структури наплавленого металу був виконаний цикл порівняльних наплавів з наступними металографічними дослідженнями мікроструктур поперечних перерізів отриманих валиків на поперечних шліфах, вирізаних із середньої частини наплавленого металу.

Формування валиків досліджували плоских зразках зі сталі 45.

Погонну енергію процесу для наплавлення модульованим струмом розраховували за залежністю

$$g = \frac{60[I_u U_u c + I_n U_n (1 - c)]}{v_{cv}}, \quad (5)$$

де c шпаруватість імпульсу; v_{cv} – швидкість ведення дугового процесу.

Режими наплавлення наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Способи та режими процесу наплавлення щодо характеристик кристалізації

Характеристика способу наплавлення	Режим паузи				Режим імпульсу			Погонна енергія кДж/см
	I_n, A	U_n, B	t_n, C	$v_{cv}, M/C$	I_n, A	U_n, B	t_n, C	
	а	б	в		а	б	в	
Наплавлення стаціонарною дугою	290	25	-	18	-	-	-	46,4
Наплавлення модульованим струмом 1	260	26	0,8	18	120	29	0,1	25,96
Наплавлення модульованим струмом 2	260	26	0,1	18	120	29	0,8	13,36

Ряд експериментальних наплавів виконувався із застосуванням спеціально розробленого вимірювача витрат енергії [10]. Результати вимірювання витрат електроенергії на ведення процесу наплавлення представлені в табл. 2.

У табл. 2 I_n, I_n – струм зварювання (наплавлення) відповідно в імпульсі та паузі. U_n, U_n – напруга на дузі відповідно в імпульсі та паузі; t_n, t_n – тривалість відповідно імпульсу та паузи. Ці характеристики вибиралися за величиною такими, щоб процес наплавлення протікав стабільно, а формування валиків мало задовільний характер.

На рис. 8 представлені мікрошліфи наплавлених валиків, виконаних на поперечних зразках для стаціонарних і модульованих режимів. З метою виявлення у швах мікрохімічної та структурної неоднорідності використовували методику травлення зразків у розчинах, що обмежують, різної концентрації пікринової кислоти.

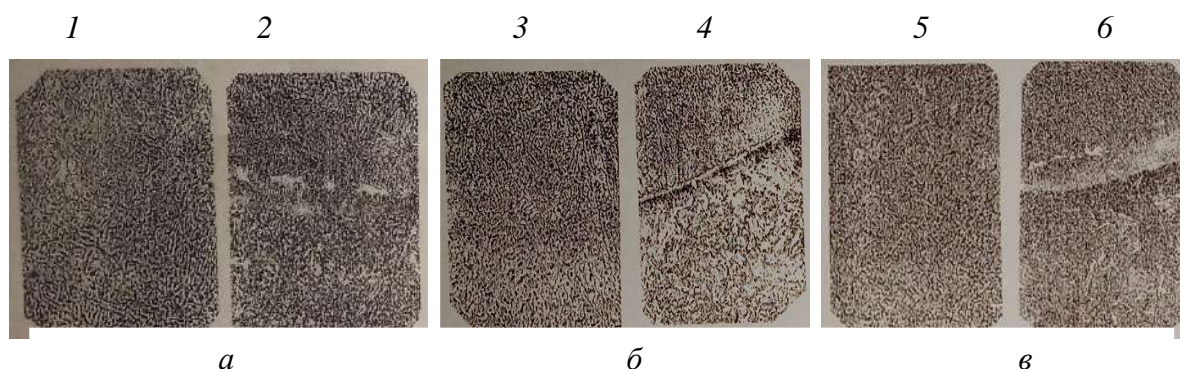


Рис. 8. Мікроструктура наплавленого металу (x240): а – наплавлення стаціонарною дугою: 1 – наплавлений метал; 2 – лінія сплаву; б, в – наплавлення модульованим струмом: 3, 5 – наплавлений метал; 4, 6 – лінія сплавлення

Джерело: розроблено авторами.

Дослідження зразків здійснювалося на оптичних мікроскопах Neophot 21 та Polyvar зі збільшенням Х50 - Х500. Фотографії мікрошліфів виконували за допомогою цифрової камери Olympus.

Видно істотні зміни в структурі металу наплавленого стаціонарною дугою і модульованим струмом. Структури із застосуванням модуляції являють собою мартенсит з помірним вмістом залишкового аустеніту та з великою кількістю карбідної та карбоборидної фази. Результати аналізу механічних властивостей наплавленого шару у значеннях твердості з розрахунковими величинами тепла у відповідність до рівняння (5) представлені в табл. 3.

Таблиця 3

Механічні властивості металу наплавленого валика

Режим подачі електродного дроту	Введена теплота процесу, Дж/С	Мікротвердість, Н	Твердість, HRC ₂	Ширина зони сплавлення, мкм
Стаціонарний	4460	590	57-59	26-52
Модульований із частотою 0,5 Гц	2225	677	60-63	26-62
Модульований із частотою 1,1 Гц	2597	502-509	46-49	12-30

Очевидно, що розглянута технологія наплавлення із застосуванням модуляції силових характеристик дугового процесу задає час формування ванни рідкого металу, а також умови й час її кристалізації. У цьому з урахуванням умов керованого температурного режиму формуються певні (оптимальні) структурно – фазові перетворення, які в досить широкому діапазоні впливають на процеси кристалізації як і в рідкій, так і у твердій фазах.

Зазначені відмінності в характері процесу кристалізації позначилися на формуванні елементів первинної структури.

Дуже важливим показником структури наплавленого металу є рівень частки основного металу порівняно з часткою електродного матеріалу, що має певні властивості, які необхідні для забезпечення експлуатаційних властивостей валика, що наплавляється, або шару загалом.

При одношаровому наплавленні використання можна вибрати режими дугового процесу, які дозволяють зменшити частку основного металу до 0,3-0,45. При використанні модульованих режимів роботи механізованого або автоматичного обладнання як показують наші дослідження хімічного складу наплавленого металу ця частка може бути зменшена до 0,25 і навіть менше.

Треба зазначити, що збільшення погонної енергії наплавлення, незалежно від варіанта використання технології, у півтора раза збільшує розміри кристалітів.

При експериментах із наплавленням модульованим струмом тривалість кристалізації одного шару металу, зумовлена імпульсним підведенням тепла у зварювальну ванну (примусова кристалізація) виявилася втричі менше періоду природної кристалізації при зварюванні (наплавленні) на стаціонарному режимі. Це означає, що за той час, протягом якого кристалізується один шар у режимі наплавлення на постійному струмі, при наплавленні модульованим струмом встигає закристалізуватися три і більше залежно від режиму модуляції – за рахунок нагрівання металу до температури вище температури плавлення протягом кожного імпульсу струму й охолодження нижче температури кристалізації з подальшим затвердінням шару протягом кожного циклу. Це є підставою вважати, що розміри кристалітів будуть значно меншими, ніж за звичайних умов наплавлення.

Проведений цикл досліджень з визначення ширини кристалізаційних шарів і ширини кристалітів у різних місцях наплавлених валиків при різних способах наплавлення представлений на рис. 9 та 10 відповідно. На рисунках літерами *a*, *б* позначені графіки ширини кристалітів (рис. 9) і ширини кристалізаційних шарів (рис. 10) у положеннях від кореня наплавлення до вершини валика з урахуванням середини: *a* – стаціонарна дуга; *б* – модульований процес частота 1,1 Гц; *в* – модульований процес частота 2,5 Гц. Треба зазначити – швидкість ведення процесу, яка встановлюється однаковою для всіх режимів та способів наплавлення.

Можна вказати, що виміряні та вказані на рис. 9 та 10 величини ширини шарів і розміри кристалітів свідчать про управління цими параметрами при використанні модульованих режимів наплавлення, а зниження цих параметрів підвищення механічних (експлуатаційних) характеристик результатів наплавлення.

Можна додатково відзначити, аналізуючи мікроструктури поперечних перерізів наплавлених валиків, що структура металу наплавленого з модуляцією струму більш щільна зі значним зниженням включень і з більшою дезорієнтацією кристалітів, ніж при наплавленні стаціонарною дугою.

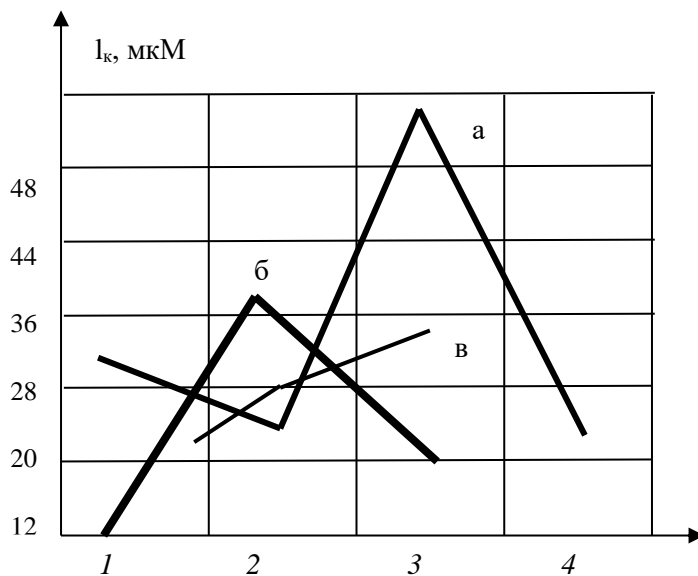


Рис. 9. Ширина кристалітів:
1 – корінь шва; 2 – середина шва; 3 – верх шва
Джерело: розроблено авторами.

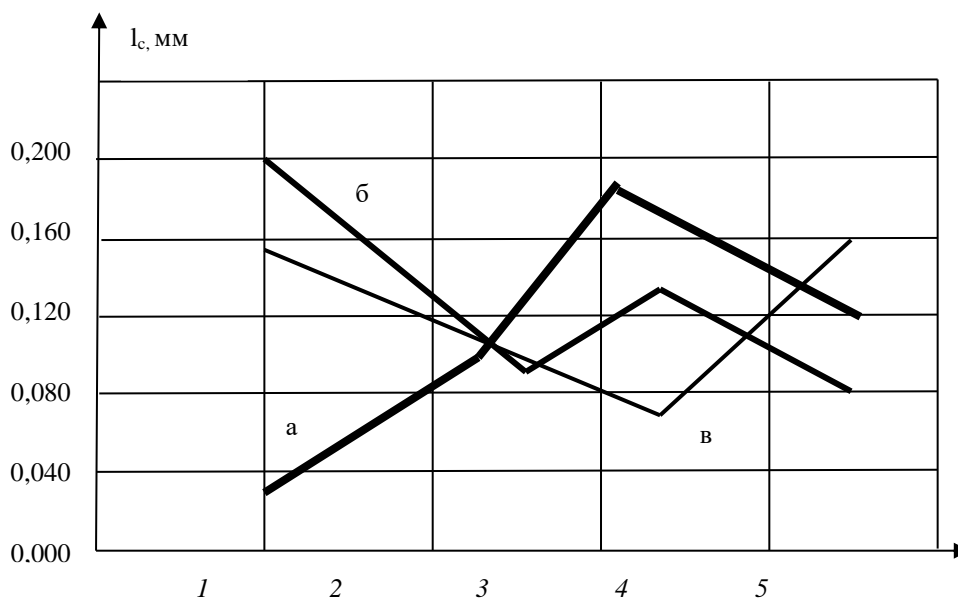


Рис. 10. Ширина кристалізованих шарів:

1 – корінь шва; 2, 3 – середина шва; 4 – верх шва

Джерело: розроблено авторами.

Модуляція зварювального струму може бути з успіхом застосована і при зварюванні, коли модульований забезпечується за рахунок механічного коливання зварювального інструменту поперек зварюваного або наплавлюваного виробу. Слід зупинитися ще на одному перспективному напрямі, яке забезпечує зварювання – наплавлення зі зміною параметрів горіння дуги рахунок механічних впливів. Це передусім модуляція дугових процесів з примусовими гармонічними коливаннями ванни розплавленого металу за рахунок цілеспрямованих рухів виробу, що наплавляється. Така технологія досить докладно описана в роботі [11].

Механічні впливи, крім отримання модулюючих режимів горіння дуги значно розширюють ширину наплавленого валика.

Застосування модуляції зварювального струму робить можливим розширення застосування розглянутих способів зварювання та наплавлення.

Висновки.

1. Імпульсний характер горіння дуги при зварюванні (наплавленні) порошковим дротом впливає на формування мікроструктури наплавленого металу.

2. При наплавленні модульованим струмом на досліджених режимах кристалізація металу зварювальної ванни відбувається більш дрібними порціями і з вищою швидкістю в кожному окремому шарі. Періодичність процесу кристалізації визначається параметрами імпульсів та умовами відведення тепла з ванни в основний метал. У разі наплавлення модульованим струмом відстань між окремими шарами кристалізації в 3 рази менше, а самі шари тонші.

3. Первинна структура металу швів, отриманих при наплавленні модульованим струмом, відрізняється високою дисперсністю. Значення таких параметрів структури, як відстань між осями дендридів, площа перерізу зерен аустеніту в цьому варіанті технології на 35-40 % менше, ніж при зварюванні (наплавленні) стаціонарною дугою.

4. Особливості термічного циклу при наплавленні модульованим струмом порівняно з наплавленням стаціонарною дугою зумовлюють гальмування процесу утворення великих кристалів. Можна вважати, що зазначені особливості формування структури є причиною зміни службових властивостей металу.

5. Регресійні математичні моделі впливу зміни параметрів модуляції на показники твердості наплавленого шару є основою для вибору найбільш ефективних значень частоти, шпаруватості процесу для досягнення мети: отримання певних якостей покриття, яке виконується електродуговим способом з використанням порошкового електродного дроту.

Список використаних джерел

1. Рябцев И. А. Теория и практика наплавочных работ / И. А. Рябцев, И. К. Сенченков. – К. : Екотехнологія, 2013. – 400 с.
2. Исследования и разработки ИЭС им. Е. О. Патона в области электродуговой сварки и наплавки порошковой проволокой (Обзор) / И. К. Походня, В. Н. Шлепаков, С. Ю. Максимов, И. А. Рябцев // Автоматическая сварка. – 2010. – № 12. – С. 34-43.
3. Александров В. М. Материаловедение и технология конструкционных материалов : учебное пособие. Часть 1. Материаловедение. Стандарт третьего поколения / В. М. Александров. – Архангельск : Северный (Арктический) федеральный университет, 2015. – 327 с.
4. Болдырев А. М. О механизме формирования структуры металла шва при введении низкочастотных колебаний в сварочную ванну / А. М. Болдырев // Сварочное производство. – 1976. – № 2. – С. 1-3.
5. Лебедев В. А. О выборе оборудования для наплавки пульсирующей дугой матриц штампов / В. А. Лебедев, В. А. Тищенко // Автоматическая сварка. – 1997. – № 8. – С. 51-52.
6. Губин С. В. Теория планирования экспериментов в энергетике : курс лекций для высших технических учебных заведений / С. В. Губин, А. И. Яковлев. – К. : Миллениум, 2009. – 158 с.
7. Морозов В. П. Особенности процесса кристаллизации металла расплавленной ванны при дуговой импульсно-периодической сварке [Электронный ресурс] / В. П. Морозов // Наука и Образование. – 2010. – № 8. – С. 1-16. – Режим доступа: <http://technomag.edu.ru>.
8. Определение параметров импульсного механического воздействия на сварочную ванну для структуризации металла при автоматической дуговой наплавке / В. А. Лебедев, С. В. Драган, А. Ф. Галь, О. А. Козырко // Збірник наукових праць НУК. Обробка матеріалів у машинобудуванні. – 2016. – № 1. – С. 19-26.
9. Флемингс М. Процессы затвердевания / М. Флемингс. – М. : Мир, 1977. – 424 с.
10. Лебедев В. А. Устройство для оценки энергоэффективности процессов / В. А. Лебедев, М. В. Гулый, Г. А. Плехотко // Сварка и диагностика. – 2011. – № 3. – С. 50-53.
11. Lebedev V. O. Influence of weld harmonic oscillations by frequency up to 4,5 Hz on to the metal structure formation of weld bead and heat affected zone / V. O. Lebedev, T. G. Solomiichuk, S. V. Novikov // Shipbuilding and marine infrastructure. – 2018. – № 2. – С. 168-172.

References

1. Ryabcev, I.A., & Senchenkov, I.K. (2013). *Teoriia i praktika naplavochnyh rabot [Theory and practice of surfacing]*. Ekotekhnologiya.
2. Pohodnya, I.K., Shlepakov, V.N., Maksimov, S.Yu., & Ryabcev, I.A. (2010). Issledovaniia i razrabotki IES im. E. O. Patona v oblasti elektroduhovoii svarki i naplavki poroshkovoii provolokoi (Obzor). *Avtomaticheskaya svarka – Automatic welding*, (12), 34-43.
3. Aleksandrov, V.M. (2015). Materialovedenie i tekhnologiiia konstruktsionnykh materialov. Chast 1. Materialovedenie. Standart tretogo pokoleniia [Materials science and technology of structural materials. Part 1. Materials science. Standard of the third generation]. *Severnyi (Arkticheskii) federalnyi universitet*.
4. Boldyrev, A.M. (1976). O mekhanizme formirovaniia struktury metalla shva pri vvedenii nizkochas totnyh kolebanii v svarochnyuyu vannu [On the mechanism of formation of the structure of the weld metal when low-frequency oscillations are introduced into the weld pool]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, (2), 1-3.
5. Lebedev, V.A., & Tishchenko V.A. (1997). O vybore oborudovaniya dlya naplavki pulsiruiushchei dugoi matric shtampov [On the choice of equipment for surfacing with a pulsed arc of die matrices]. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic welding*, (8), 51-52.
6. Gubin, S.V., & Yakovlev, A.I. (2009). Teoriia planirovaniya eksperimentov v energetike [Theory of planning experiments in the energy sector]. *Kurs lektzii dlia vysshih tekhnicheskikh uchebnykh zavedenii – Course of lectures for higher technical educational institutions*. Millenium.

7. Morozov, V.P. (2010). Osobennosti processa kristallizacii metalla rasplavlennoj vanny pri dugovoj impul'sno-periodicheskoj svarke [Features of the process of crystallization of the metal of the molten pool in arc pulse-periodic welding]. *Nauka i Obrazovanie – Science and Education*, (8), 1-16. <http://technomag.edu.ru>.

8. Lebedev, V.A., Dragan, S.V., Gal, A.F., & Kozyrko, O.A. (2016). Opredelenie parametrov impul'snogo mekhanicheskogo vozdeystviya na svarochnogo vannu dlya strukturizacii metalla pri avtomaticheskoy dugovoj naplavke [Determination of the parameters of pulsed mechanical action on the weld pool for metal structurization during automatic arc welding]. *Zbirnik naukovih prats NUK. Obrobka materialiv u mashinobuduvanni – Collection of scientific works of NUS. Processing of materials at machine-building*, (1), 19-26.

9. Flemings, M. (1977). *Processy zatverdevaniia [Solidification processes]*. Mir.

10. Lebedev, V.A., Gulyi, M.V., & Plekhotko, G.A. (2011). Ustroistvo dlia otsenki energoeffektivnosti processov [Device for assessing the energy efficiency of processes]. *Svarka i diagnostika – Welding and Diagnostics*, (3), 50-53.

11. Lebedev, V.O., Solomiichuk, T.G., & Novikov, S.V. (2018). Influence of weld harmonic oscillations by frequency up to 4,5 Hz on to the metal structure formation of weld bead and heat affected zone. *Shipbuilding and marine infrastructure*, (2), 168-172.

Отримано 15.02.2022

UDC 621.791.927.5

Vladimir Lebedev¹, Victor Tishchenko², Serhii Loi³

¹Doctor of Technical Sciences, Chief Designer SF “Experimental Design-Technological Office of the E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: lebedevvladimir@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0391-6113>

²Leading Engineer

E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: irvik1947@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6081-8531>

³Associate Professor of the Department of Welding

Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National Shipbuilding University (Kherson, Ukraine)

E-mail: welding.kherson@nuos.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1936-6390>

FEATURES OF STRUCTURAL FORMATION OF METAL IN ELECTRIC ARC MECHANIZED SURFACES WITH MODULATION MODULES

The article investigates the features of ensuring the hardness of surface hardening and restoration of machine parts and mechanisms using the method of modulated current surfacing. Preliminary research on methods and results of surface hardening has been studied. A cycle of experiments was planned and performed using a number of variable parameters of the arc process. The results of experimental researches received at surfacing with modulation of modes of arc process with the controlled characteristics of the modulated influence are presented and analyzed. All studies for comparison were performed with stationary and modulated processes. A mathematical model of the dependences of the hardness of the deposited layers on the main modulation parameters has been developed. Regression analysis is used to create a mathematical model. Graphs of such dependences are constructed for an example and visualization. Microsections of surfacing with definition of features of structure of metal are considered. It is established that the parameters of modulation of surfacing modes significantly affect the characteristics of the deposited layer and can be significantly improved. The research used common equipment - surfacing machine and current source, as well as a special modulator and flux cored wire. The microsections of the sections of the welded rollers made in comparison with the formation of certain conclusions about the structures of the surfacing metal are considered and studied. Substantiated conclusions about the increase of hardness are the consequences of structural transformations of the weld metal under the action of modulated influence. It is noted that the obtained results can serve as a basis for purposeful selection of parameters of the modulated surfacing process to obtain a coating with a better layer, as well as to predict the surfacing properties. Surfacing using a modulation cycle can be common in various industries.

Key words: arc surfacing; melting electrode; modulation of modes; parameters; experiments; processing of results; mathematical models.

Fig.: 10. Table: 3. References: 11.

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-1(27)-38-44

УДК 666.3:621.793

Юлія Казимиренко¹, Наталія Лебедєва², Тетяна Макруха³

¹доктор технічних наук, доцент, професор кафедри матеріалознавства і технології металів
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова (Миколаїв, Україна)

E-mail: u.a.kazimirenko@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7120-8226>. ResearcherID: [U-2788-2017](https://orcid.org/0000-0002-7120-8226)

²кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри матеріалознавства і технології металів
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова (Миколаїв, Україна)

E-mail: lebedeva@mksat.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4006-7889>. ResearcherID: [V-6670-2017](https://orcid.org/0000-0002-4006-7889)

³кандидат технічних наук, викладач кафедри матеріалознавства і технології металів
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова (Миколаїв, Україна)

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

КОРОЗИЙНА СТІЙКІСТЬ І ТЕПЛОЗАХИСНІ ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ, НАПОВНЕНИХ ЗОЛЬНИМИ МІКРОСФЕРАМИ

У статті висвітлено доцільність застосування електродугових покриттів з Св-08 і 65Г, наповнених зольними мікросферами алюмосилкатного складу, в технологіях захисту та відновлення деталей і конструкцій хімічного обладнання. Експериментально досліджено корозійну стійкість покриттів до нафталіну; наведено результати теоретичних розрахунків ефективних коефіцієнтів теплопровідності і термічного лінійного розширення для покриттів з різним наповненням мікросферами. Стабільність теплофізичних властивостей експериментально підтверджено дослідженнями термостійкості й термостабільності покриттів, напшених на сталеву підкладку з Ст3, в умовах циклічних навантажень при температурах 570 °С/10 °С.

Ключові слова: стійкість до нафталіну; теплозміни; термостійкість; термостабільність; структура; електродугове напшення.

Рис.: 1. Табл.: 1. Бібл.: 11.

Актуальність теми дослідження. Сучасні галузі хімічного виробництва, які пов'язані з розвитком продукції легкої промисловості, косметології, фармації, вимагатимуть впровадження нових матеріалів та покриттів із підвищеною корозійною стійкістю і теплозахисними властивостями.

Постановка проблеми. Створення нових поліфункціональних матеріалів і покриттів, здатних працювати в умовах корозійно активних середовищ та термоциклічних навантажень, є важливою науково-технічною проблемою сучасного матеріалознавства, шляхи вирішення якої ґрунтуються на впровадженні ресурсозберігаючих технологій. Реалізація цього напрямку полягатиме в пошуку дефіцитної сировинної бази. Перспективним наповнювачем композиційних матеріалів і покриттів вважаються зольні мікросфери – виробничі відходи теплоелектростанцій (ТЕС).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зольні мікросфери являють собою тонкостінні сферичні оболонки мінералогічного складу, які утворюються за механізмами пилувугільного спалювання твердого палива на вітчизняних ТЕС [1]. Ефективність їх застосування для виготовлення антикорозійних та зносостійких покриттів на епоксидній основі висвітлено авторами роботи [2]. За результатами випробувань епоксикомпозити показали стійкість до атмосферної корозії та в умовах агресивного середовища хлориду натрію, що підтверджує доцільність використання покриттів на об'єктах нафтопереробної і газотранспортної промисловості. Проте суттєвим недоліком епоксидних покриттів є горючість та термодеструкційні процеси при підвищених температурах. У роботі [3] наведено досвід додавання зольних мікросфер до складу тампонажних сумішей для цементування свердловин, де під час експлуатації в гірничо-геологічних умовах спостерігаються низькі та аномально низькі тиски, геостатичні температури в діапазоні 15...250 °С. Цементно-зольні тампонажні суміші з масовим вмістом 40...60 % зольних мікросфер Курахівської ТЕС мають високу термостійкість у температурному діапазоні 50...160 °С і корозійну стійкість в умовах полімінеральної агресії. Позитивний вплив не-

органічних мікросфер на теплоізоляційні властивості композиційних бетонів і їх міцність при руйнівних навантаженнях автори роботи [4] пояснюють формуванням певної комірчастої структури з наявністю чисельних границь розподілу фаз, що сприятиме накопиченню множинних осередків мікронапружень.

Завдяки складному хімічному і фазовому складу зольні мікросфери мають високі фізико-механічні й хімічні властивості. Залежно від ТЕС коефіцієнт теплопровідності мікросфер становить 0,162...0,190 Вт/(м×К), пористість стінок у воді – 38,8...43,5 %; температура початку розм'якшення склофазы – близько 1040 °С [1]. Позитивний вплив зольних мікросфер алюмосилікатного складу на міцнісні та вогнезахисні характеристики експериментально доведено на прикладі водно-дисперсійних лакофарбових покриттів [5]. На підставі вищевикладеного можна стверджувати, що завдяки поєднанню в одному складі зольних мікросфер із металами можна отримати композиції з новими властивостями, що сприятиме ефективній експлуатації в умовах термічного впливу. Теоретичними і практичними передумовами в цьому напрямі є дослідження авторів з електродугового напилення метал-скляних і метал-керамічних покриттів [6; 7], нанесення яких сприятиме підвищенню комплексно-захисних властивостей сталевих конструкцій.

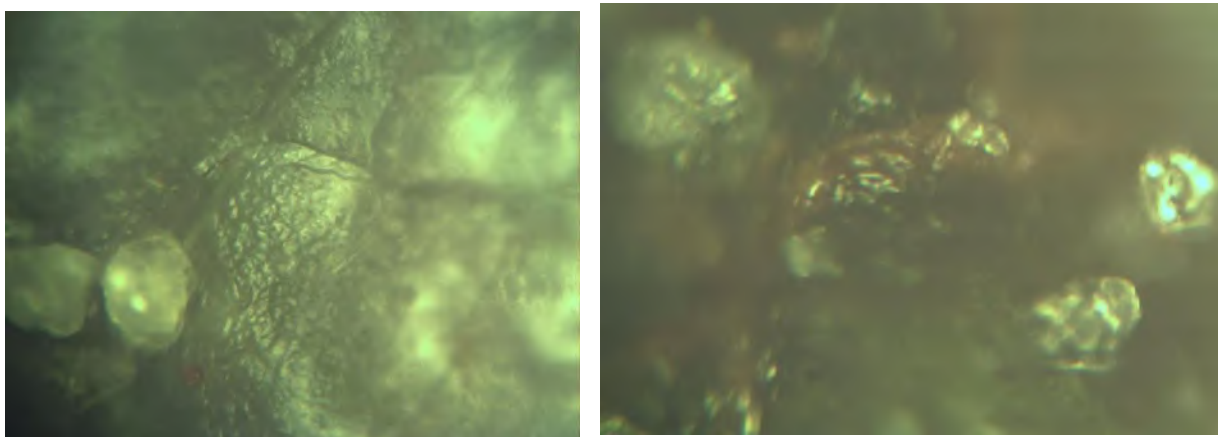
Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проте фізико-механічні та експлуатаційні властивості електродугових покриттів, наповнених зольними мікросферами, зокрема алюмосилікатного складу, ще не досліджувалися.

Мета роботи полягатиме в теоретично-експериментальних дослідженнях корозійної стійкості та теплозахисних властивостей металевих електродугових покриттів, наповнених зольними мікросферами алюмосилікатного складу, нанесених на сталеву поверхню.

Виклад основного матеріалу. Для експериментальних досліджень підготовлено зразки електродугових покриттів з Св-08 (ГОСТ 2246-70) та 65Г (ДСТУ 3671-97), напилених товщиною 1 мм на пластинку з Ст3 розміром 140×100×1,5 мм. Як наповнювач (10...25 % об'ємн.) до складу покриттів додано зольні порожні мікросфери алюмосилікатного складу марки МПк 200-400 (ТУ 5717-001-11842486-2006). Режимми напилення покриттів та підготовки поверхні наведено в роботі [7].

Можливість експлуатації в хімічно активному середовищі визначено шляхом корозійних випробувань у середовищі нафталіну – твердої кристалічної речовини 4 класу небезпеки, яка є продуктом переробки коксу і нафти [8]. Умови випробувань включали в себе занурювання покриттів, відокремлених від підкладки, у контейнери з нафталіном та витримці в них протягом 120...150 днів при температурі (18±2) °С. Дослідження мікроструктури проведено методом оптичної мікроскопії за допомогою мікроскопа БІОЛАМ-І, фазовий склад визначено за допомогою рентгеноструктурного аналізу (РСА), виконаного на установці ДРОН-3.0 у випромінюванні міді; масу зразків визначали на аналітичних важелях GR200. Дослідження показали, що при безпосередньому контакті зразків з корозійно активним середовищем спостерігається зміна кольору з срібло-сірого на зелений: результати РСА підтвердили утворення окисної плівки на поверхні покриттів без зміни фазового складу. Деградаційні ознаки структури полягають у збільшенні розмірів пор на 10...15 %, що є причиною розвитку осередків корозійних пошкоджень, проте викришування та руйнування включень з мікросфер не відбувається (рис. 1). Вимірювання маси зразків не показали суттєвих змін. Таким чином, одержані результати свідчать про корозійну стійкість покриттів з Св-08 і 65Г, наповнених зольними мікросферами алюмосилікатного складу, до нафталінового середовища.

Одержані результати можуть бути корисними для хімічних виробничих технологій, у яких нафталін застосовується для виготовлення парфумерних та фармакологічних засобів або продукції нафтохімічного синтезу, зокрема речовин для розчинення жирів, лаків (таких як тетралін), ненасичених полієфірних та алкідних смол (наприклад, фталієвого ангідриду).



а *б*
 Рис. 1. Оптична мікрофотографія ($\times 250$) поверхні покриттів
 після 120 діб витримування у нафталіні:
а – Св-08–АСПМ; *б* – 65Г–АСПМ

Джерело: розроблено авторами.

Суттєвим недоліком електродугового напилення є відсутність можливості точного дозування мікросфер через їх високу сипучість. Тому зв'язок між структурою напилених покриттів та здатністю працювати в поле підвищених температур можна описати за допомогою ефективних коефіцієнтів теплопровідності та термічного лінійного розширення, які використовуються для прогнозування характеристик пористих композиційних матеріалів залежно від властивостей та об'ємного вмісту вихідних компонентів. У роботі [9] розглянуто ефективність застосування теоретичних методів досліджень теплофізичних властивостей композиційних матеріалів у порівнянні з постановкою експерименту.

Дослідні електродугові покриття мають полідисперсну структуру (рис. 1), де в пористій металевій матриці рівномірно розташовані дисперсні включення – мікросфери. Ефективний коефіцієнт теплопровідності визначено за формулою Максвелла для бінарного композиту [10]:

$$\lambda_{\text{еф}} = \lambda_1 \left(\frac{\lambda_2 + 2\lambda_1 - 2\vartheta_2(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_2 + 2\lambda_1 + \vartheta_2(\lambda_1 - \lambda_2)} \right), \quad (1)$$

де $\lambda_{\text{еф}}$ – ефективний коефіцієнт теплопровідності композиційної системи; λ_1 – коефіцієнт теплопровідності матриці, тобто металевого компонента (без урахування пористості); λ_2 – коефіцієнт теплопровідності мікросфер; ϑ_1 , ϑ_2 – об'ємні частки матриці і мікросфер відповідно.

Ефективний термічний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) покриттів розраховано за методикою [11] за умовами заміни властивостей скляного компонента на керамічний (алюмосилікатний склад зольних мікросфер), можна визначити як:

$$\alpha^* = \frac{\Delta\alpha \cdot \nu_m \cdot (1 - \rho)}{K_{\text{ме}} / K_{\text{кер}} \cdot (1 - \nu_m) + \rho + \nu_m} + \alpha_{\text{ме}}, \quad (2)$$

де $\Delta\alpha$ – різниця у значеннях ТКЛР між сталеву матрицею та керамічним наповнювачем; ν_m – об'ємний вміст мікросфер у складі покриття; ρ – щільність покриття; $\alpha_{\text{ме}}$ – ТКЛР металеві матриці; $K_{\text{ме}} / K_{\text{кер}}$ – співвідношення значень об'ємного модуля пружності металеві матриці до об'ємного модуля пружності матеріалу керамічних мікросфер.

Результати розрахунків наведено в таблиці, у якій для порівняння вказані значення коефіцієнтів теплопровідності та термічного лінійного розширення для покриттів з Св-08 і 65Г без наповнювача і компактних аналогів цих сталей. Завдяки додаванню до складу зольних мікросфер покриття набувають теплозахисних властивостей.

Таблиця

Ефективні коефіцієнти теплопровідності і термічного лінійного розширення

Об'ємний вміст мікросфер (%)	Покриття зСв-08		Покриття з65Г	
	λ , Вт/(м×К)	α^* , К ⁻¹	λ , Вт/(м×К)	α^* , К ⁻¹
15	58,80	$12,30 \times 10^{-6}$	$37,0 \times 10^{-6}$	$10,90 \times 10^{-6}$
20	57,20	$12,25 \times 10^{-6}$	$35,6 \times 10^{-6}$	$10,85 \times 10^{-6}$
25	57,0	$12,15 \times 10^{-6}$	$35,2 \times 10^{-6}$	$10,75 \times 10^{-6}$
Покриття без наповнення	Св-08 (ГОСТ 2246-70)		65Г (ДСТУ 3671-97)	
	47,0	$11,5 \times 10^{-6}$	$37,0 \times 10^{-6}$	$11,1 \times 10^{-6}$
Компактний матеріал	08(ГОСТ 1050-88)		65Г (ГОСТ 14959-79)	
	60,0	$12,5 \times 10^{-6}$	$45,0 \times 10^{-6}$	$11,8 \times 10^{-6}$

Джерело: розроблено авторами.

Результати теоретичних досліджень показали можливість прогнозування коефіцієнтів теплопровідності та термічного лінійного розширення залежно від їх наповнення.

Можливість експлуатації композиційних покриттів в умовах підвищених температур експериментально підкріплена дослідженнями термостійкості та термостабільності. За критерій термостійкості обрана кількість термоциклів у режимі нагрівання/охолодження при температурах $570 \text{ }^\circ\text{C} / 10 \text{ }^\circ\text{C}$, які витримують покриття на сталевій підкладці до руйнування або відшаровування. Для проведення експериментальних робіт застосовано електропіч лабораторну марки СНОЛ-1.6.2.08/9-М1, у яку завантажували сталеві пластинки із Ст3 розміром $140 \times 100 \times 3,5$ мм з нанесеними з одного боку композиційними покриттями товщиною 1 мм. Зразки охолоджувалися під проточною водою з температурою $+10 \text{ }^\circ\text{C}$, а потім просушувалися у сушильній шафі при температурі $(20 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ протягом 10 хв. Для оцінки термостабільності розглядали зміни у структурі та фазовому складі, для чого було застосовано методи оптичної мікроскопії (мікроскоп БИОЛАМ-И) та рентгеноструктурного аналізу (установка ДРОН-3).

За результатами встановлено, що зразки з покриттями з Св-08 і 65Г витримують (13 ± 2) термоцикли, а покриття з 65Г – (15 ± 2) термоцикли. Дослідження структури показали окиснювання підкладки з Ст3 з утворенням окалини та викришування після 9-го термоциклу мікросфер на окремих ділянках, що можна пояснити слабкою поверхнею поділу у сформованих металокомпозитах. Змін у фазовому складі покриттів не відбувається. Таким чином, одержані результати свідчать про термостійкість і термостабільність, а також надають уявлення про максимальний ресурс та структурну стабільність дослідних покриттів.

У роботі вирішено науково-технічну задачу технологічних можливостей захисту сталеві поверхні від корозійного та термічного впливу шляхом нанесення електродугових покриттів з Св-08Г2С і 65Г, наповнених зольними мікросферами алюмосилікатного складу.

Наукова значущість роботи полягає в розширенні уявлень про корозійні процеси в дисперсно наповнених неорганічними мікросферами металоматричних покриттях та про їхній максимальний ресурс в умовах термоциклічних навантажень. Практичне значення одержаних результатів полягає в теоретично-експериментальному обґрунтуванні доцільності застосування електродугових покриттів із Св-08Г2С і 65Г, наповнених зольними мікросферами, для ефективного захисту конструкцій в умовах

підвищених температур, термоциклічних навантажень і хімічно активних речовин. Соціально-економічний ефект роботи включає в себе експериментальну проробку питання застосування виробничих відходів теплових електростанцій в технологіях створення нових композиційних покриттів.

Висновки. Експериментально досліджено корозійну стійкість електродугових покриттів з Св-08 і 65Г, наповнених зольними мікросферами алюмосилікатного складу, у середовищі нафталіну: в результаті занурювання протягом 120...150 днів спостерігається зміна кольору з утворенням окисної плівки та збільшенням розміру поверхневої пористості на 10...15 %.

Результати теоретично-експериментальних досліджень ефективних коефіцієнтів теплопровідності та термічного коефіцієнту лінійного розширення, термостійкості і термостабільності покриттів показали ефективність їх використання в умовах короточасних теплозмін при температурах 570 °С /10 °С без суттєвих змін у структурі й фазовому складі.

На підставі проведених досліджень можна зробити висновки щодо доцільності застосування електродугових покриттів з Св-08 і 65Г, наповнених зольними мікросферами алюмосилікатного складу, в технологіях захисту та відновлення деталей і конструкцій хімічного обладнання. Перспективи подальших досліджень пов'язано з розробкою практичних рекомендацій з їх експлуатації.

Список використаних джерел

1. Демченко В. О. Дослідження мінералогічного складу, структури і властивості поверхні зольних мікросфер України / В. О. Демченко, О. І. Сім'ячко, В. А. Свідерський // Технологічний аудит і резерви виробництва : науч. журн. – 2017. – № 6. – С. 28-34.
2. Редько О. І. Дослідження складу і технології формування захисних покриттів з підвищеними антикорозійними характеристиками і зносостійкістю / О. І. Редько, Р. Г. Редько // Наукові нотатки : міжвуз. зб. – Луцьк, 2018. – № 64. – С. 179-183.
3. Орловський В. М. Розроблення термостійких полегшених і легких тампонажних матеріалів / В. М. Орловський, А. М. Похилко, В. І. Дмитренко // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ : всеукраїнський щоквартальний науково-технічний журнал. – 2016. – № 3(60). – С. 79-84.
4. Прогнозна оцінка теплозахисних і механічних властивостей конструкційно-теплоізоляційних керамічних матеріалів / Л. П. Щукіна, Я. О. Галушка, Л. О. Ященко, С. Л. Лігезін // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. – 2021. – № 1(5). – С. 68-74.
5. Демідов Д. В. Вивчення впливу мінеральних наповнювачів на вогнезахисні характеристики водно-дисперсійних лакофарбових покриттів / Збірник наук. праць Українського державного університету залізничного транспорту. – 2018. – № 182. – С. 37-43.
6. Казимиренко Ю. О. Дослідження технологічних можливостей підвищення зносостійкості електродугових покриттів з 65Г / Ю. О. Казимиренко, Н. Ю. Лебедева // Матеріали X міжнар. наук.-техн. конф. «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». – Миколаїв : НУК, 2019. – С. 300-304.
7. Формирование электродуговых покрытий с повышенной прочностью, демпфирующей способностью и коэффициентом поглощения излучений / Ю. А. Казимиренко, Н. Ю. Лебедева, А. А. Карпеченко, А. А. Жданов // Наукові нотатки : міжвуз. зб. – Луцьк : ЛНТУ, 2013. – № 41, ч. 1. – С. 117-121.
8. Сіренко Г. О. Термотривкі полімери : [підручник] / Г. О. Сіренко, І. Б. Складнюк. – Івано-Франківськ: Супрун В. П., 2021. – 401 с.
9. Шутчинська К. С. Способи дослідження теплопровідності композиційних матеріалів / К. С. Шутчинська, І. Г. Ткаченко, Ю. В. Морозов // Physics and mathematics : Colloquium-Journl. – Czēść, Warszawa, Polska, 2021. – № 24 (100). – С. 40-41.

10. Поплавко Ю. М. Фізика твердого тіла : [підручник : в 2-х томах] / Ю. М. Поплавко. – К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. – Том 1: Структура, квазічастинки, метали, магнетики, 2017. – 415 с.

11. Kazymyrenko Y. The Effective Mechanical Properties of Metal-Glass Materials / Y. Kazymyrenko // The advanced science journal. – 2016. – Iss. 1. – Pp. 90–94.

References

1. Demchenko, V.O., Simiachko, O.I., & Sviderskyi, V.A. (2017). Doslidzhennia mineralohichnoho skladu, struktury i vlastyvoli poverkhni zolnykh mikrosfer Ukrainy [Research of mineralogical composition, structure and surface properties of ash microspheres of Ukraine]. *Tekhnolohichniy audyt i rezervy vyrobnytstva – Technological audit and production reserves*, (6), 28–34.

2. Redko, O.I., & Redko, R.H. (2018). Doslidzhennia skladu i tekhnolohii formuvannia zakhysnykh pokryttiv z pidvyshchenymy antykorozijnymy kharakterystykamy i znosostiikistiu [Research of composition and technology of formation of protective coatings with increased anti-corrosion characteristics and wear resistance]. *Naukovi notatky – Scientific notes*, (64), 179–183.

3. Orlovskiy, V.M., Pokhylko, A.M., & Dmytrenko, V.I. (2016). Rozroblennia termostiikykh polehshenykh i lehkykh tamponazhnykh materialiv [Development of heat-resistant lightweight and light grouting materials]. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i khazovykh rodovyshch – Exploration and development of oil and gas fields*, (60), 79–84.

4. Shchukina, L.P., Halushka, Ya.O., Yashchenko, L.O., & Lihezin, S.L. (2021). Prohnozna otsinka teplozakhysnykh i mekhanichnykh vlastyvolei konstruktsiino-teploizoliatsiynykh keramichnykh materialiv [Prognostic assessment of heat-protective and mechanical properties of structural and heat-insulating ceramic materials]. *Visnyk natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: Khimiia, khimichna tekhnolohiia ta ekolohiia – Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Chemistry, chemical technology and ecology*, (1(5)), 68–74.

5. Demidov, D.V. (2018). Vychennia vplyvu mineralnykh napovniuvachiv na vohnezakhysnik harakterystyky vodno-dyspersiynykh lakofarbovykh pokryttiv [Study of the influence of mineral fillers on the fire-retardant characteristics of water-dispersion paints]. *Zbirnyk nauk. prats Ukrainського derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Collection of Sciences. Proceedings of the Ukrainian State University of Railway Transport*, (182), 37–43.

6. Kazymyrenko, Yu.O., & Lebedieva, N.Yu. (2019). Doslidzhennia tekhnolohichnykh mozhlyvosti pidvyshchennia znosostiikosti elektroduhovykh pokryttiv z 65H [Research of technological possibilities of increasing the wear resistance of electric arc coatings with 65G]. *Materialy X mizhnar. nauk.-tekhn. konf. «Innovatsii v sudnobuduvanni ta okeanotekhnitsi» – Materials of X International. scientific and technical conf. "Innovations in shipbuilding and ocean engineering"* (pp. 300–304).

7. Kazymyrenko, Yu.A., Lebedeva, N.Yu., Karpechenko, A.A., & Zhdanov, A.A. (2013). Formyrovanye elektroduhovykh pokrytyi s povyshennoi prochnosti, dempfyruishchei sposobnostiu y kotffytsyentom pohloshchennia yzlucheniya [Formation of electric arc coatings with increased strength, damping ability and absorption coefficient of radiation]. *Naukovi notatky – Scientific notes*, 41(1), 117–121.

8. Sirenko, H.O., & Skladaniuk, M.B. (2021). *Termotryvki polimery [Heat-resistant polymers]*. Suprun V. P.

9. Shutchynska, K.S., Tkachenko, I.H., & Morozov, Yu.V. (2021). Sposoby doslidzhennia teploprovidnosti kompozytsiynykh materialiv [Methods of research of thermal conductivity of composite materials]. *Physics and mathematics – Physics and mathematics*, (24(100)), 40–41.

10. Poplavko, Yu.M. (2017). *Fizyka tverdoho tila [Physics of a solid body]* (Vol. 1. Structure, quasiparticles, metals, magnets). KPI im. Ihoria Sikorskoho, Vyd-vo «Politekhnik».

11. Kazymyrenko, Y. (2016). The Effective Mechanical Properties of Metal-Glass Materials. *The advanced science journal*, 1, 90–94.

Отримано 25.01.2022

UDC 666.3:621.793

Yuliia Kazymyrenko¹, Nataliia Lebedeva², Tetiana Makruha³

¹Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Materials Science and Technology of Metals
Admiral Makarov National University of Shipbuilding (Mykolaiv, Ukraine)

E-mail: u.a.kazymyrenko@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7120-8226>. **ResearcherID:** [U-2788-2017](https://orcid.org/0000-0002-7120-8226)

²Associate Professor Department of Materials Science and Technology of Metals Dept Admiral Makarov National University
of Shipbuilding (Mykolaiv, Ukraine)

E-mail: lebedeva@mksat.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4006-7889>. **ResearcherID:** [V-6670-2017](https://orcid.org/0000-0002-4006-7889)

³Associate Professor Department of Materials Science and Technology of Metals Dept
Admiral Makarov National University of Shipbuilding (Mykolaiv, Ukraine)

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

CORROSION RESISTANCE AND HEAT PROTECTIVE PROPERTIES OF COMPOSITE COATINGS FILLED WITH ASH MICROSPHERES

Modern branches of chemical production, which are associated with the development of light industry, cosmetology, pharmacy, will require the introduction of new materials and coatings with increased corrosion resistance and thermal protection properties. Possible ways to solve this important scientific and technical problem include finding resource-saving technologies, for which the authors consider the use of promising raw materials to create new composite coatings. These promising materials include ash microspheres of aluminosilicate composition, which are waste from thermal power plants operation. The coating is applied by electric arc method on a steel substrate with carbon steel grade A284Gr.D (Cm3) (GOST 380-2005). For their formation, continuously stretched welding wires of ferrite-perlite structure of brand 1066 (65Г) (GOST 14959-79) and low-carbon welding wire of brand ER346 (C8-08) (GOST 2246-70) were used. The aim of the work is the theoretical and experimental studies of corrosion resistance and heat-protective properties of coatings.

The corrosion resistance of coatings in naphthalene medium has been experimentally studied: as a result of immersion for 120... 150 days there is a change in color with the formation of an oxide film and an increase in the size of the surface pores by 10... 15%. The results of theoretical calculations of effective coefficients of thermal conductivity and thermal linear expansion for different filling with microspheres are given. The stability of thermophysical properties was experimentally confirmed by studies of heat resistance and thermal stability of coatings sprayed on a steel substrate with carbon steel grade A284Gr.D (Cm3) (GOST 380-2005), under cyclic loads at temperatures of 570 °C / 10 °C. The obtained results highlight the feasibility of using electric arc coatings with ferrite-perlite structure of brand 1066 (65Г) (GOST 14959-79) and low-carbon welding wire of brand ER346 (C8-08) (GOST 2246-70), filled with ash microspheres of aluminosilicate composition in technologies for protection and restoration of parts and structures of chemical equipment. The scientific significance of the work includes the expansion of ideas about corrosion processes in dispersed metal-matrix coatings dispersed with inorganic microspheres and about their maximum resource under conditions of thermocyclic loads.

Key words: naphthalene resistance; heat exchange; heat resistance; thermal stability; structure; electric arc spraying.

Fig.: 1. Table: 1. References: 11.

**Олег Марков¹, Антон Хващинський², Антон Мусорін³,
Марина Маркова⁴, Антон Лисенко⁵**

¹доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації виробничих процесів
Донбаська державна машинобудівна академія (Краматорськ, Україна)

E-mail: oleg.markov.umd@gmail.com, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9377-9866>
ResearcherID: [L-6561-2018](https://orcid.org/0000-0001-9377-9866), **Scopus Author ID:** [55648046800](https://orcid.org/0000-0001-9377-9866)

²аспірант кафедри обробки металів тиском

Донбаська державна машинобудівна академія (Краматорськ, Україна)

E-mail: antonio.hvasherman@ukr.net, **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-2690-8354>
Scopus Author ID: [57211480253](http://orcid.org/0000-0002-2690-8354)

³аспірант кафедри обробки металів тиском

Донбаська державна машинобудівна академія (Краматорськ, Україна)

E-mail: anton.m.95@mail.ru, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0571-8700>

⁴кандидат технічних наук, молодший науковий співробітник

Донбаська державна машинобудівна академія (Краматорськ, Україна)

E-mail: markova.mar.alex@gmail.com, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7995-3511>
Scopus Author ID: [57023421000](https://orcid.org/0000-0002-7995-3511)

⁵аспірант кафедри обробки металів тиском

Донбаська державна машинобудівна академія (Краматорськ, Україна)

E-mail: antl31@ukr.net, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5454-6357>

ДОСЛІДЖЕННЯ НОВОГО СПОСОБУ КУВАННЯ ВЕЛИКИХ ЗЛИТКІВ НА ОСНОВІ ОСАДЖЕННЯ ПРОФІЛЬОВАНИХ ЗАГОТОВОК

Аналіз напруженого стану дозволив встановити, що в тілі заготовки у процесі осадження виникає стан нерівномірного всебічного стискання. Підвищення рівня стискаючих напружень в осевій та бічній зонах можливе при осадженні низьких заготовок ($H/D < 3,0$). Збільшення ступеня осадження від 0,1 до 0,45 призводить до зміни параметра напруженого стану η від $-1,0$ до 0. Подальше осадження до 0,7 збільшує цей параметр до $+1,5$. Встановлено, що зменшення діаметра конусних торців призводить до зниження цього параметра η . Цей параметр має більш сприятливі умови для закриття осевих дефектів в інтервалі $-1,5...-0,6$ при осадженні з відносним діаметром конусних уступів 0,5.

Ключові слова: поковка; осадження; внутрішні дефекти; конусні торці; заварювання пустот; гідростатичні напруження.

Рис.: 5. Бібл.: 16.

Актуальність теми дослідження. Останніми роками кількість масивних поковок, виготовлених зі злитків, збільшується. Це спричинено збільшенням потужності важких машин. Однак якість поковок не завжди відповідає вимогам замовника. Низька якість масивних поковок пояснюється низькою якістю вихідних злитків [1]. При куванні масивних поковок брак ультразвукового контролю (УЗК) досягає 10 % [2]. Брак по УЗК пояснюється процесом осадження злитків з неоднорідною структурою. У результаті ця структура опрацьовується нерівномірно та недостатньо. Крім того, при осадженні циліндричних заготовок плоскими плитами відбувається збільшення розмірів осевої пухкості зливка. Аналіз процесів кування заготовок із застосуванням операції осадження дозволив встановити, що базова схема кування не гарантує подрібнення структури зливка та забезпечення заданих властивостей отриманих деталей [3].

Постановка проблеми. При виробництві масивних поковок відповідального призначення дуже важливо забезпечити високу якість одержуваних заготовок. Якість масивних поковок визначається відсутністю внутрішніх та зовнішніх дефектів, а також рівномірністю механічних властивостей. Ці вимоги викликані тим, що заготовкою є масивний ковальський зливок [4]. Масивні зливки характеризуються дефектами металургійного походження (осева пухкість, усадочна раковина та ін.). Ці дефекти визначають низьку якість ковальських злитків. У процесі деформування легованих сталей часто відбувається тріщиноутворення на зовнішній поверхні заготовки. Крім цього, ковальські зливки мають внутрішню неоднорідну структуру, викликану умовами кристалізації. Відсутність осевих та зовнішніх дефектів, а також усунення неоднорідної структури має бути забезпечено куванням у гарячому стані.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значне збільшення ліквідаційної зони в осьовій частині зливка є наслідком використання неефективних ковальських операцій. Тому перед удосконаленням технологічних процесів кування великих поковок слід провести аналіз відомих із літератури досліджень основних операцій, які використовуються при куванні.

Згідно з результатами, представленими в роботі [5], осадження застосовується для подрібнення литої структури, щоб підвищити ударну міцність металу і знизити анізотропію механічних властивостей. Проте результати досліджень [5] показують суттєве зниження рівномірності деформацій у процесі осадження. Авторами не запропоновані способи, що підвищують рівномірність деформацій.

У роботі [6] досліджувався механізм формування тріщини під час осадження масивних дископодібних поковок на основі використання метода скінчених елементів (МСЕ). Автори розробили діаграму розподілу напруженого стану в процесі осадження. Встановлено, що масивні ступені деформації заготовки за умови всебічного нерівномірного стискання призводять до розшарування металу та утворення внутрішніх тріщин. Таким чином, операція осадження циліндричних заготовок не призводить до покращення якості кованих деталей. До того ж автори не досліджували закриття осьових дефектів зливка у процесі осадження.

У роботі [7] досліджувався вплив геометричних параметрів бойків для профілювання зливка та закриття осьових дефектів у заготовках. На підставі цих досліджень було запропоновано бойки опуклої форми та режими профілювання заготовок. Проте дослідження операції осадження не було проведено.

Нові процеси кування масивних заготовок відповідального призначення було досліджено у роботі [8]. Було встановлено, що раціональним кутом вирізних бойків для підвищення рівня стискаючих напружень у тілі заготовки та забезпечення універсальності ковальського інструменту є кут, що дорівнює 135° . Однак проблема підвищення однорідності деформацій при куванні із застосуванням процесу профілювання заготовки не досліджена в цій роботі.

У роботі [9] досліджувався вплив геометричних параметрів бойків на закриття осьових дефектів у заготовках. На підставі проведених досліджень було запропоновано бойки опуклої форми. Дослідження [10] дозволили встановити, що закриття осьової пористості зливка відбувається після попереднього протягування. Авторами встановлено параметр для оцінки закриття порожнеч у процесі кування. Цей параметр враховує напружений стан та гідростатичні напруження в заготовці при осадженні. Було встановлено, що осадження вздовж осі зливка без попереднього його протягування не сприяє заварюванню осьової пористості. Авторами не досліджено вплив геометрії деформуючого інструменту на рівномірність структури поковок.

Осадження з подальшим протягуванням гарантує високу рівномірність розподілу деформацій вздовж осі заготовки, як це було встановлено авторами роботи [11], порівняно зі схемою протягування вирізними бойками. Це підтверджує ефективність операції осадження. Проте автори не досліджували НДС осадження попередньо профільованих заготовок.

Вплив операцій осадження та протягування при куванні валів з масивних злитків на подрібнення структури металу досліджувалося у роботі [12]. Було запропоновано новий спосіб осадження. У роботі запропонований спеціальний деформуючий інструмент. Проте автори роботи не досліджували вплив форми бойків на закриття пустот у процесі кування спеціальними бойками.

Пристрій для кування заготовок на радіально-обтискних машинах, представлений у роботі [13]. Встановлено вплив нової конструкції бойків на закриття порожнин у процесі радіального кування. Однак запропонована схема деформації призводить до інтенсивного подовження заготовки. Цей аспект не дозволяє накопичувати деформації з високим рівнем у тілі заготовки у процесі кування за запропонованим способом.

У роботі [14] показано, що при застосовуванні бойків опуклої форми досягається значне накопичення пластичних деформацій високого рівня осьової зони заготовки. Бойок опуклої форми також запропонований у роботі [15]. У запропонованих роботах не досліджено впливу профілювання заготовки на розподіл деформацій у процесі осадження.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Перспективним напрямом підвищення рівномірності деформацій та рівня стискаючих напружень є профіль торців заготовки перед операцією осадження [16]. Профілювання торців заготовок сприятиме подрібненню структури металу, що є в «мертвих» зонах заготовки. Крім того, осадження заготовки з профільованими торцями змінить НДС металу.

Метою статті є визначення ефективної геометрії заготовок з конусними торцями, що забезпечує рівномірний деформований стан та високий рівень стискаючих напружень.

Виклад основного матеріалу. Основними параметрами при моделюванні процесів кування масивних заготовок є нерівномірність розподілу напруженого та деформованого станів у металі заготовки. Простим критерієм для оцінки нерівномірності розподілу деформацій є різниця максимальних та мінімальних логарифмічних деформацій по всьому об'єму поковки. Однак цей показник не враховує величину площі кожної зони з певною деформацією. Це важлива оцінка розподілу деформацій. Більш точним описом є використання середньозваженої логарифмічної деформації:

$$e_{с.з} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i \cdot e_i}{\sum_{i=1}^n F_i},$$

де F_i – площі зон із різними деформаціями, мм²;

$\sum_{i=1}^n F_i$ – загальна площа поперечного перерізу осадженої заготовки, мм²;

e_i – логарифмічна деформація в певній зоні.

Основним параметром, що впливає на пластичні та енергосилові характеристики процесу деформування, є параметр напруженого стану металу. Цей параметр показує рівень та знак напружень, що виникають при деформуванні

$$\eta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i},$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруження, МПа;

σ_i – інтенсивність напружень, МПа.

Знак «мінус» параметра η свідчить, що в заготовки досліджуваної схеми деформування виникає напружений стан нерівномірного стискання. Величина параметра η показує рівень переважаючих напружень. Для визначення параметрів НДС заготовки у процесі осадження використано метод скінчених елементів (МСЕ) з урахуванням програмного продукту Deform 3D. Оцінка результатів моделювання проводилася за такими показниками: параметр напруженого стану η , середньозважена деформація (e).

Дослідження напруженого стану в процесі осадження. Збільшення рівня стискаючих напружень в осьовій зоні заготовки можливе за рахунок створення підпору збоку заготовки. Перспективним рішенням цього завдання є використання заготовок з конусними торцями перед осадженням (рис. 1). Формування увігнутої поверхні в процесі осадження підвищить рівномірність розподілу деформацій та забезпечить підпор в осьовій зоні. Цей аспект не досліджений сьогодні і немає конкретних рекомендацій щодо раціональної геометрії таких заготовок перед осадженням.

НДС досліджуваних заготовок під час процесу осадження визначався за середніми напруженнями в поздовжньому перерізі (рис. 2).

Максимальні стискаючі напруження в центральній зоні не спостерігаються. Площа зони із середніми напруженнями $-10 \dots -20$ МПа незначна і становить $10 \dots 20$ % загальної площі перерізу. Загальний рівень середніх напружень зі знаком мінус у тілі заготовки низький. Однак утворюється значна глибина увігнутої бічної поверхні в центральній частині за рахунок утворення подвійної бочки з боку торців заготовки. Цей результат збігається з відомими даними класичного осадження високих заготовок із співвідношенням $H/D > 2,5$.

Крім середніх напружень, додатково визначалася інтенсивність напружень (σ_i) у центрі заготовки. Для опису механізму закриття дефекту можна скористатися показником напруженого стану. Цей показник показує, наскільки середні напруження більші за інтенсивність напружень, а також знак цих напружень. Утворення опуклої бічної поверхні (бочки) при осадженні є причиною утворення тріщини на зовнішній поверхні заготовки в результаті виникнення в цій зоні напружень розтягу. Тому аналіз нових методів деформування без встановлення рівня напружень розтягу не буде повним. У результаті було проведено додаткове моделювання напруженого стану у процесі осадження високих заготовок. За результатами цих досліджень встановлені знак і величина напружень на бічній поверхні поковки. Розрахований параметр напруженого стану (η) на середній периферійній частині заготовки залежно від ступеня осадження для різних діаметрів конусних торців (d/D) для відносної висоти конусного уступу $h/D = 0,6$ (рис. 3).

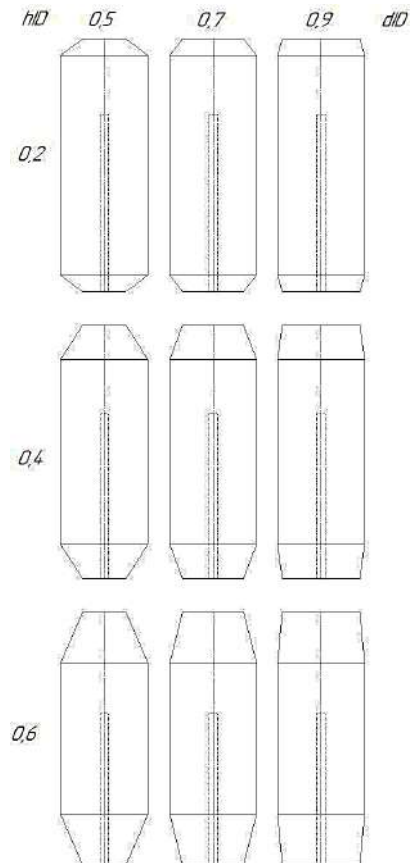


Рис. 1. Ескізи заготовок для осадження

Джерело: розроблено авторами.

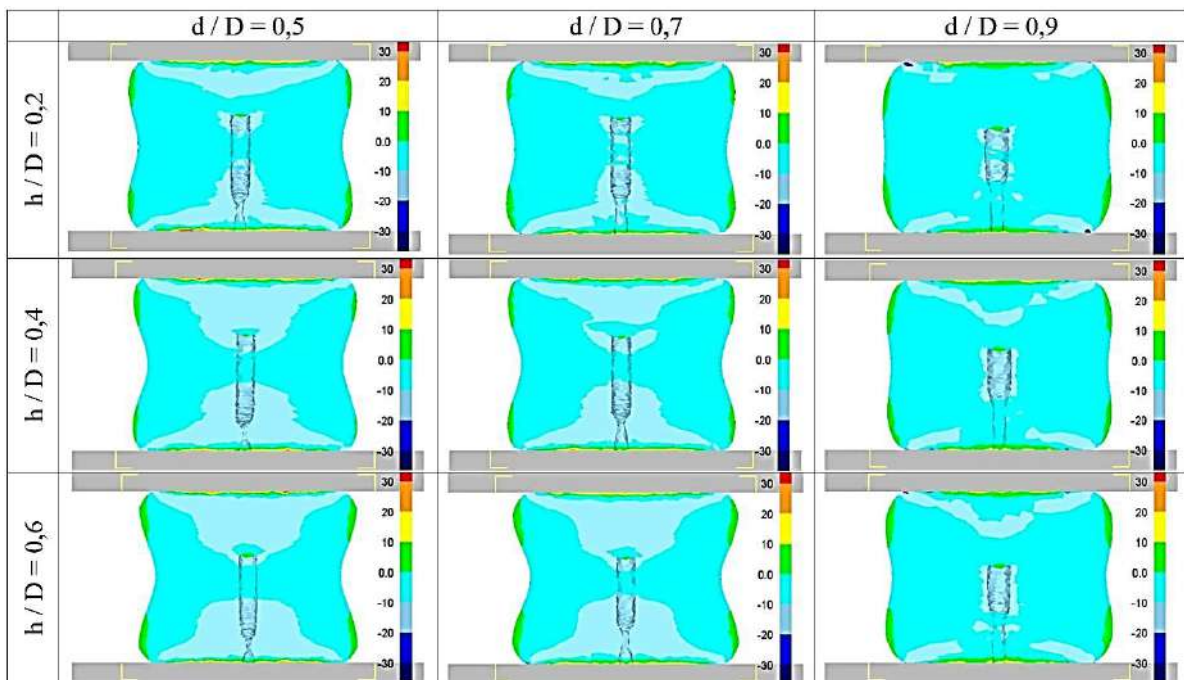


Рис. 2. Розподіл середніх напружень у поздовжньому перерізі заготовки з конусними торцями після осадження високих заготовок

Джерело: розроблено авторами.

З літератури відомо, що варіювання відносної висоти уступів не помітно впливає на параметр η , тому в роботі він не досліджується.

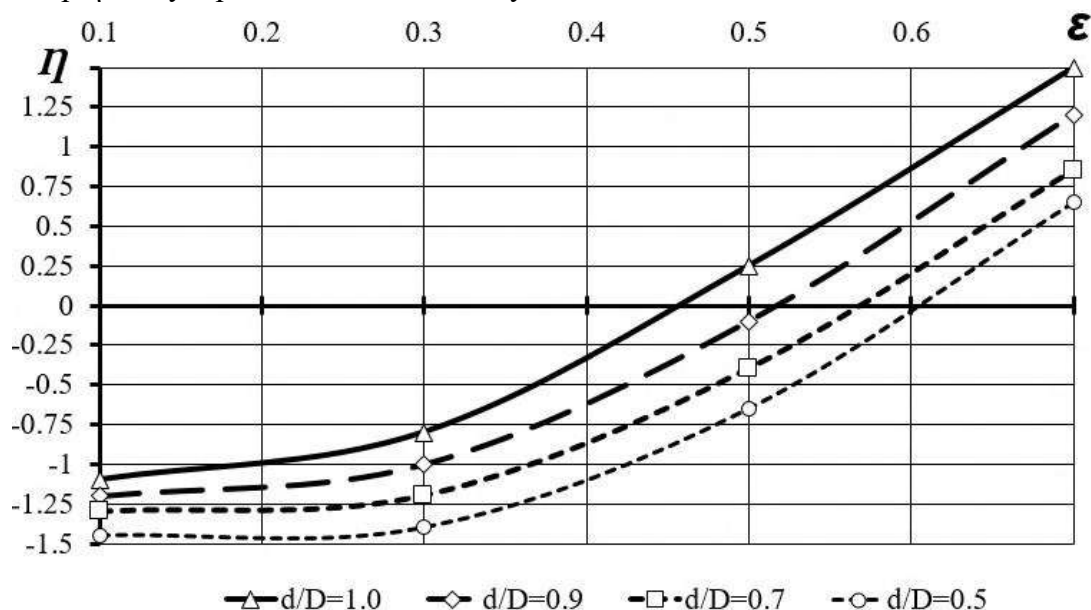


Рис. 3. Параметр напруженого стану залежно від рівня деформування (ϵ) для різних діаметрів уступів (d/D) для відносної висоти конусного уступу $h/D = 0,6$. Джерело: розроблено авторами.

Аналіз отриманих результатів дозволив встановити, що після осадження заготовок із конусними уступами понад 50 % параметр η має позитивне значення для досліджуваних схем деформування. Це підтверджує виникнення несприятливих умов при осадженні високих заготовок (рис. 3). У разі збільшення ступеня деформування від 0,1 до 0,45 параметр η змінюється від -1 до 0 . Подальше деформування до 0,7 збільшує цей параметр до $+1,5$. Встановлено, що зі зменшенням відносного діаметра конусних уступів параметр η при осадженні знижується. Осадження заготовок з відносним діаметром конусних уступів, рівним 0,9, призводить до змінення параметра η від $-1,2$ до $+1,25$ в інтервалі деформування 0,1...0,7. При осадженні заготовок з відносним діаметром уступу 0,5 цей параметр змінюється в інтервалі $-1,5$... $+0,6$ при ступені деформації від 0,1 до 0,7.

Дослідження деформованого стану після осадження. Розподіл логарифмічних деформацій після осадження заготовок представлений на рис. 4. Зони максимальних деформацій розташовуються одна від одної на значній відстані. Збільшення висоти конусних уступів збільшує цю відстань і сприяє появі в центральній частині заготовки значних деформацій. Зони мінімальних деформацій, розташовані біля уступів, мають схожі форми та розміри для однакових діаметрів уступів (d/D). Це пояснюється тим, що ці зони мають рівні площі контакту заготовки з інструментом.

Отримані результати пояснюються даними середньозважених деформацій (рис. 5). Рівень цих деформацій є низьким. Зменшення відносної висоти конусних уступів (h/D) приводить до зниження рівня деформацій.

Встановлено, що на першому етапі процесу осадження деформації локалізуються в конусних уступах заготовки. Такий розподіл деформацій призводить до виникнення подвійної бочки, яка при осадженні пояснює появу стискаючих напружень на бічній поверхні та в центральній частині заготовки. У процесі осадження заготовок з конусними уступами нерівномірність розподілу деформацій знижується при зменшенні діаметра ко-

нусного уступу. Висота конусних ділянок також впливає на нерівномірність розподілу деформацій. Максимальна рівномірність розподілу деформацій виникає в процесі осадження заготовки. Однак у цьому випадку відсутні локальні зони зі значними деформаціями.

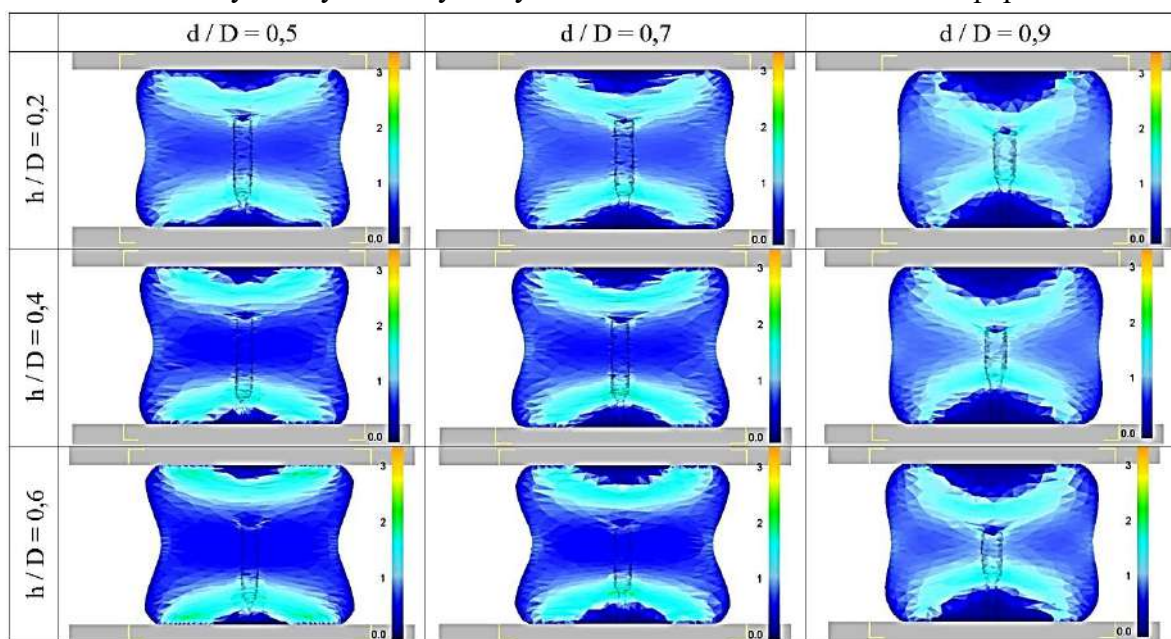


Рис. 4. Розподіл логарифмічних деформацій за перерізом заготовки з конусними уступами після осадження

Джерело: розроблено авторами.

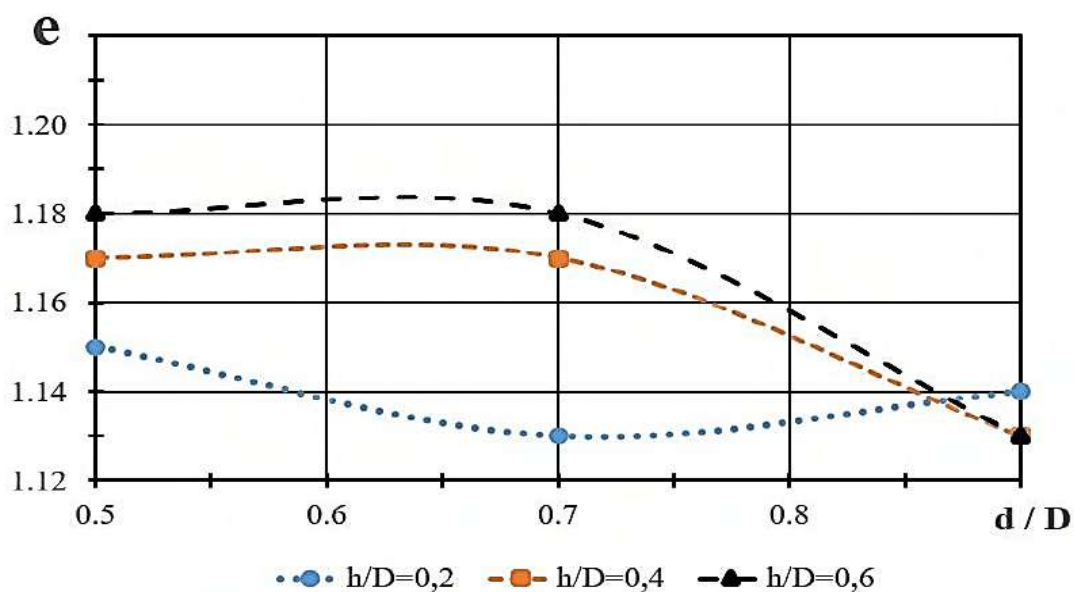


Рис. 5. Середньозважена деформація для різних відносних висот (h/D) та діаметрів конусних уступів (d/D)

Джерело: розроблено авторами.

Збільшення відносної висоти конусних уступів призводить до локалізації зон із максимальними деформаціями. Осадження заготовок з конусними уступами призводить до зниження нерівномірності деформацій при зменшенні діаметра уступу заготовки. Осадження заготовки з відносним діаметром уступу (d/D), рівним 0,5, забезпечує мінімальну нерівномірність деформацій. У цьому випадку зона мінімальних деформацій займає не-

значний обсяг заготовки. Висота конусних ділянок заготовки також впливає нерівномірність розподілу деформацій. Осадження заготовок з відносною висотою уступів, що дорівнює 0,2...0,4, забезпечує високу рівномірність розподілу деформацій. Збільшення висоти конусних уступів призводить до локалізації зон максимальних деформацій у центральній частині заготовки.

Висновки. Аналіз напруженого стану дозволив встановити, що в тілі заготовки у процесі осадження виникає стан нерівномірного всебічного стискання. Підвищення рівня стискаючих напружень в осевій та бічній зонах можливе при осадженні низьких заготовок ($H/D < 3,0$). Збільшення ступеня осадження від 0,1 до 0,45 призводить до зміни параметра напруженого стану η від $-1,0$ до 0 . Подальше осадження до 0,7 збільшує цей параметр до $+1,5$. Встановлено, що зменшення діаметра конусних торців призводить до зниження цього параметра η . Цей параметр має більш сприятливі умови для закриття осевих дефектів в інтервалі $-1,5...-0,6$ при осадженні з відносним діаметром конусних уступів 0,5. Осадження високих заготовок призводить до зниження рівня інтенсивності деформацій та зниження рівномірності їх розподілу. Розроблені співвідношення геометричних параметрів заготовок з конусними уступами можуть бути запроваджені під час виробництва масивних поковок.

Список використаних джерел

1. Глезер А. М. Основные направления использования нанотехнологий в металлургии / А. М. Глезер // Металлург. – 2010. – № 1. – С. 5-7.
2. Быков Ю. А. Способы получения конструкционных наноматериалов. Часть 1 / Ю. А. Быков, С. Д. Карпухин // Наноинженерия. – 2012. – № 6. – С. 11-19.
3. Процессы пластического структурообразования металлов / В. М. Сегал, В. И. Резников, В. И. Копылов, Д. А. Павлик, В. Ф. Малышев. – Минск : Наука и техника, 1994. – 232 с.
4. Валиев Р. З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией / Р. З. Валиев, И. В. Александров. – М. : Логос, 2003. – 87 с.
5. Колесников А. Г. Анализ способов измельчения структуры при получении металлических конструкционных материалов / А. Г. Колесников, А. С. Шинкарев // Наука и Образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2014. – № 11. – С. 34-44.
6. Полякова М. А. Влияние технологических параметров совмещенного процесса на механические свойства и структуру углеродистой проволоки / М. А. Полякова, А. Е. Гулин, О. А. Никитенко // Металлургические процессы и оборудование. МГТУ им. Г. И. Носова. – 2013. – № 3(33). – С. 20-25.
7. Тюрин В. А. Инновационные технологииковки с применением макросдвигов / В. А. Тюрин // Кузнечно-штамповочное производство. – 2007. – № 11. – С. 15-20.
8. Миленин А. А. Автоматизированная система проектирования технологии свободнойковки / А. А. Миленин, В. А. Афанасьев, А. С. Николаенко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії та машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – С. 49–54.
9. Тюрин В. А. Методики Московского института стали и сплавов для разработки и исследования инновационных технологийковки / В. А. Тюрин // Известия вузов. Черная металлургия. – 2005. – № 10. – С. 32–35.
10. Формирование прогнозируемых показателей качества поковок в условиях ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» / В. Л. Чухлеб, Д. Ю. Ключев, И. С. Прокопенко, А. В. Ашкалянец // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 1 (26). – С. 103-106.
11. Дурынин В. А. Исследование и совершенствование технологии производства с целью повышения ресурса стальных изделий из крупных поковок ответственного назначения / В. А. Дурынин, Ю. П. Солнцев. – СПб. : ХИМИЗДАТ, 2006. – 272 с. : ил.
12. Development of forging process design to close internal voids / Н. Kakimoto, Т. Arikava, Y. Takahashi, Т. Tanaka, Y. Imaida // J. Mater. Process Technol. – 2010. – № 210. – Pp. 415-422.
13. Тюрин В. А. Инновационные технологииковки / В. А. Тюрин // Кузнечно-штамповочное производство. – 2006. – № 5. – С. 27–29.

14. Онищенко А. К. Аналитическое исследованиековки крупных поковок с учетом температурной неоднородности материала / А. К. Онищенко, А. А. Мишулин // Кузнечно-штамповочное производство. – 2006. – № 10. – С. 14–19.

15. Polozine A. Influence of the inaccuracy of thermal contact conductance coefficient on the weighted-mean temperature calculated for a forged blank / Alexandre Polozine, Lirio Schaeffer // J. Mater. Process Technol. – 2008. – № 195. – Pp. 260–266.

16. The effect of forging temperature on microstructure and mechanical properties of in situ TiC/Ti composites / Ma Feng-cang, Lu Wei-jie, Qin Ji-ning, Zhang Di, Ji Bo // Mater. and Des. – 2007. – № 28. – Pp. 1339–1342.

References

1. Glezer, A.M. (2010). Osnovnye napravleniia ispolzovaniia nanotekhnologii v metallurgii [The main directions of the use of nanotechnologies in metallurgy]. *Metallurg – Metallurgist*, (1), 5-7.

2. Byikov, Yu.A., & Karpuhin, S.D. (2012). Sposobyi polucheniia konstruktsionnykh nanomaterialov. Chast 1 [Methods of obtaining structural nanomaterials. Part 1]. *Nanoinzheneriia – Nanoengineering*, (6), 11-19.

3. Segal, V.M., Reznikov, V.I., Kopyilov, V.I., Pavlik, D.A., & Malyishev, V.F. (1994). *Protsessy plasticheskogo strukturoobrazovaniia metallov [Processes of plastic structure of metals]*. Nauka i tehnika.

4. Valiev, R.Z., & Aleksandrov, I.V. (2003). *Nanostrukturnyie materialyi, poluchennyye intensivnoy plasticheskoy deformatsiiey [Nanostructural materials obtained by intensive plastic deformation]*. Logos.

5. Kolesnikov, A.G., & Shinkarev, A.S. (2014). Analiz sposobov izmelcheniia struktury pri poluchenii metallicheskikh konstruktsionnykh materialov [Analysis of structure grinding methods in the production of metallic structural materials]. *Nauka i Obrazovanie. MGTU im. N. E. Bauman – Science and Education. MSTU im. N. E. Bauman*, (11), 34-44.

6. Polyakova, M.A., Gulin, A.E., & Nikitenko, O.A. (2013). Vliianie tehnologicheskikh parametrov sovmeschennogo protsessa na mehanicheskie svoistva i strukturu uglerodistoi provoloki [Influence of technological parameters of the combined process on mechanical properties and structure of carbon wire]. *Metallurgicheskie protsessy i oborudovanie. MGTU im. G. I. Nosova – Metallurgical processes and equipment. MSTU im. G. I. Nosova*, (3(33)), 20-25.

7. Tyurin, V.A. (2007). Innovatsionnyie tehnologii kovki s primeneniem makrosdviгов [Innovative forging technologies using macroshears]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo – Forging and stamping production*, (11), 15–20.

8. Milenin, A.A., Afanasev, V.A., & Nikolaenko, A.S. (2008). Avtomatizirovannaya sistema proektirovaniya tehnologii svobodnoy kovki [Automated system for designing free forging technology]. *Udoskonalennia protsesiv i obladdnannia obrobky tyskom v metallurgii ta mashynobuduvanni – Improvement of processes and control of vise processing in metallurgy and machine-building* (pp. 49-54).

9. Tyurin, V.A. (2005). Metodiki Moskovskogo instituta stali i splavov dlia razrabotki i issledovaniya innovatsionnyih tehnologiy kovki [Methods of the Moscow Institute of Steel and Alloys for the development and research of innovative forging technologies]. *Izvestiya vuzov. Chernaia metallurgii – Izvestiya vuzov. Ferrous metallurgy*, (10), 32–35.

10. Chukhleb, V.L., Kliuev, D.Yu., Prokopenko, I.S., & Ashkelianets, A.V. (2011). Formirovanie prognoziruemyyih pokazateley kachestva pokovok v usloviyah OAO «ArselorMittal Krivoy Rog» [Formation of predicted quality indicators of forgings under the conditions of OAO ArcelorMittal Kryvyi Rih]. *Obrabotka materialov davleniem – Processing of materials by pressure*, (1(26)), 103–106.

11. Durynin, V. A., & Solntsev, Yu.P. (2006). *Issledovanie i sovershenstvovanie tehnologii proizvodstva s tseliu povyisheniia resursa stalnykh izdelii iz krupnykh pokovok otvetstvennogo naznacheniiia [Research and improvement of production technology to increase the resource of steel products from large forgings for critical purposes]*. KHMIZDAT.

12. Kakimoto, H., Arikava, T., Takahashi, Y., Tanaka, T., & Imaida, Y. (2010). Development of forging process design to close internal voids. *J. Mater. Process Technol.*, (210), 415-422.

13. Tyurin, V.A. (2006). Innovatsionnye tehnologii kovki [Innovative forging technologies]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo – Forging and stamping production*, (5), 27–29.

14. Onischenko, A.K., & Mishulin, A.A. (2006). Analiticheskoe issledovanie kovki krupnyih pokovok s uchetom temperaturnoy neodnorodnosti materiala [Analytical study of forging large forgings taking into account the temperature inhomogeneity of the material]. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo – Forging and stamping production*, (10), 14–19.

15. Polozine, A., & Schaeffer, L. (2008). Influence of the inaccuracy of thermal contact conductance coefficient on the weighted-mean temperature calculated for a forged blank. *J. Mater. Process Technol.*, (195), 260–266.

16. Ma, Feng-cang, Lu, Wei-jie, Qin, Ji-ning, Zhang, Di, & Ji, Bo. (2007). The effect of forging temperature on microstructure and mechanical properties of in situ TiC/Ti composites. *Mater. and Des.*, (28), 1339-1342.

Отримано 11.02.2022

UDC 621.923.42

**Oleg Markov¹, Anton Khvashchynskyi², Anton Musorin³,
Marina Markova⁴, Anton Lysenko⁵**

¹Doctor of Technical Science, Professor of the Automation of Industrial Processes Department
Donbass State Engineering Academy (Kramatorsk, Ukraine)

E-mail: oleg.markov.ond@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9377-9866>
ResearcherID: [L-6561-2018](https://orcid.org/0000-0001-9377-9866). **Scopus Author ID:** [55648046800](https://orcid.org/0000-0001-9377-9866)

²PhD Student of the Metal Forming Department

Donbass State Engineering Academy (Kramatorsk, Ukraine)

E-mail: antonio.hvasherman@ukr.net. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-2690-8354>
Scopus Author ID: [57211480253](https://orcid.org/0000-0002-2690-8354)

³PhD Student of the Metal Forming Department

Donbass State Engineering Academy (Kramatorsk, Ukraine)

E-mail: anton.m.95@mail.ru. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0571-8700>

⁴PhD of Technical Science, docent of the Metal Forming Department

Donbass State Engineering Academy (Kramatorsk, Ukraine)

E-mail: markova.mar.alex@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7995-3511>
Scopus Author ID: [57023421000](https://orcid.org/0000-0002-7995-3511)

⁵PhD Student of the Metal Forming Department

Donbass State Engineering Academy (Kramatorsk, Ukraine)

E-mail: antl31@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5454-6357>

STUDY NEW METHOD OF MASIVE INGOTS UPSETTING OF WORKPIECES WITH CONICAL FACES

Quantity of massive parts produced from an ingot is increasing today. It is caused by increasing in the capacity of a massive equipment. However, the quality of produced forging parts does not corresponds to customer's requirements. Poor quality of the produced forging parts is caused by low quality of forging ingots.

Defects of ultrasonic test after forging of the massive forging parts equal to 10%. The defects after ultrasonic test are caused by upsetting operation of the ingots with no equal internal structure. As a result, this structure is processed unevenly and insufficiently. Increasing of the ingot internal defects occurs during upsetting operation of billets by flat deformation tools.

The purpose of this work is establishing the rational geometry of billets with conical faces which guarantee the uniform distribution of the deformations, and significant hydrostatic stresses.

Analysis of the strain and stress states allows find that in the billet at the upsetting operation occurs the state with non-uniform compress stresses. Raising the degree of the compressive stresses in the internal and external parts can be obtained after upsetting of the shot billets ($H/D < 3.0$). Raising the deformation degree from till 0.45 provides to letdown factor of the stress state η from $-1,0$ to 0 . The upsetting till 0.7 raises this factor to $+1.5$. It was established that decreasing diameter of the conical faces leads to reduction the factor η . This factor has a more significant influence for welding of the internal cavities in the $-1.5...-0.6$ at upsetting operation with the comparative diameter of the conical faces of the 0.5 .

Upsetting of the toll billets leads to the reduction degree of logarithmic strains and reduction equability of the localization. Obtained geometrical parameters of the billets with conical faces are able to be introduced in producing of the massive forged parts.

Keywords: forged part; upsetting; internal defects; conical faces; cavity welding; hydrostatic stresses.

Fig.: 5. References: 16.

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-1(27)-54-59

УДК 621.9.06

Сергій Струтинський¹, Роман Семенчук²¹доктор технічних наук, доцент кафедри Прикладної гідроаеромеханіки і мехатроніки²аспірант кафедри прикладної гідроаеромеханіки і мехатроніки

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: strutynskiy@gmail.com, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9739-0399>**Scopus Author ID:** [57194195005](https://orcid.org/0000-0001-9739-0399)²аспірант кафедри прикладної гідроаеромеханіки і мехатроніки

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: roma.semenchuk@gmail.com, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9470-2756>**Scopus Author ID:** [57203868827](https://orcid.org/0000-0001-9470-2756)

РОЗРОБЛЕННЯ СПЕЦІАЛЬНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ РЕАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ЦИКЛОЇДАЛЬНИХ ПЕРЕДАЧ

Запропоновані спеціальні методи та математичні моделі, що дозволяють описати реальний профіль поверхні колеса циклоїдальної передачі. Розроблена методологія визначення параметрів точності за допомогою аналізу відмінностей між геометрією поверхні дослідного зразка та теоретичним профілем. При моделюванні застосовано сплайн-інтерполяцію. Розроблена методика дозволяє за допомогою рядів Фур'є визначити реальний профіль сателіту, що дає можливість більш вірогідно оцінити точність на етапі виготовленої передачі. При визначенні геометричних параметрів сателіту пропонується застосувати вірогідніших методів. Результати моделювання дозволяють визначити не лише інтегральні характеристики геометрії поверхні. Вони придатні для визначення точності виготовлення сателіту та характеристик циклоїдальної передачі в цілому.

Ключові слова: епіциклоїдальне профіль за допомогою ряду Фур'є; гіпоциклоїдальне зачеплення; високоточний шарнір; дослідження точності циклоїдального редуктора; циклоїдальна передача.

Рис.: 4. Бібл.: 6.

Актуальність теми дослідження. Нині спостерігається значний попит на нові розробки та промислові рішення в галузі робототехніки. Робототехнічні комплекси стають дедалі доступнішими, в тому числі за рахунок швидкої автоматизації роботи підприємств. Собівартість пристроїв знизилася на 30 %, а експерти в галузі промислового виробництва роблять прогнози щодо подальшого її падіння. Варто зазначити, що роботизовані маніпулятори застосовуються не лише на великих виробничих майданчиках, а також на малих та середніх підприємствах. При цьому затребуваними є високоточні, малогабаритні та надійні механізми.

Перспективними напрямками підвищення технічного рівня роботизованих комплексів та їхніх поворотних шарнірів є збільшення точності, плавності ходу, вантажопідйомності та довговічності механізму та його вузлів.

Для забезпечення високої питомої потужності поворотних вузлів широко використовуються циклоїдальні передачі. Вони також забезпечують високе передатне відношення та є компактними. За умови оптимального проєктування передач на основі розрахунків на міцність, неточності виготовлення циклоїдальних коліс визначають повторюваність, що забезпечується редуктором.

Дослідження реальної геометрії зубчастих коліс та визначення їхніх інтегральних параметрів поверхонь дозволяє підвищити розрахункову точність роботизованих комплексів та уникнути браку при їх виготовленні, що зумовлений незадовільними параметрами точності поворотних вузлів. Саме тому дослідження з цієї теми є актуальними та мають перспективи практичного застосування.

Постановка проблеми. Похибки виготовлення циклоїдальної передачі визначають величину неузгодженості кутів повороту сателіта для передач із епіциклоїдальним та гіпоциклоїдальним зачепленням. Вони визначають точність поворотного вузла роботизованого комплексу та його основні характеристики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. До елементної бази, що визначає характеристики роботизованих систем, можна віднести циклоїдальні передачі без проміжних тіл кочення. Дослідженню даних передач присвячено роботи [1-3]. У публікації [4] наведені результати моделювання статичних та динамічних характеристик, а також досліджено вплив характеристик складових частин механізму на інтегральні параметри точності. Точність виготовлення деталей механічних передач також впливає на надійність та довговічність механізму.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Сателіт циклоїдальної передачі відрізняється складним профілем (рис. 1), причому для оцінки похибок його поверхні зазвичай недостатньо інтегральних величин. Для визначення неточностей геометрії сателіту необхідна спеціальна методика. Вона потребує застосування математичної моделі реальної поверхні профілю сателіту та дозволяє визначити його основні геометричні параметри. Реальний профіль буде відрізнятися від теоретичного, і це буде призводити до виникнення похибок, у гіршому випадках – заклинювання, а при невеликих погрішностях не буде забезпечуватися необхідна плавність руху та точність повторного позиціонування поворотного вузла маніпулятора.

Мета роботи. Циклічна природа кривої, що визначає твірну поверхню деталі дозволяє використати оптимізовані математичні моделі, що враховують особливості практичного застосування елементів механічної передачі, зокрема ряди Фур'є. Математичний апарат дає можливість провести точну обробку масиву експериментальних даних та, порівнявши їх із теоретичним профілем, отримати характеристики поверхні деталі, на основі яких визначається точність досліджуваної конструкції циклоїдальної передачі.

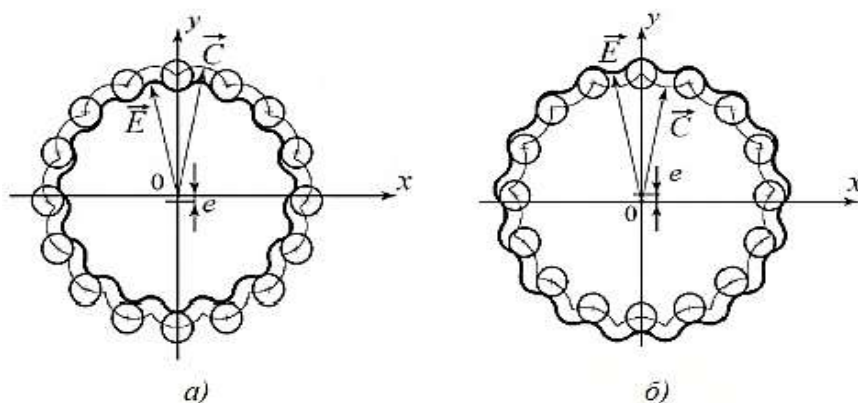


Рис. 1. Епіциклоїдальне (а) та гіпоциклоїдальне (б) зачеплення

Джерело: [7].

Виклад основного матеріалу. Апробація запропонованої методики потребує твердотільного моделюванням деталей передачі, виготовлення та подальшого дослідження серійних зразків. Розроблений метод дозволяє визначити параметри точності шляхом аналізу відмінностей між геометрією поверхні дослідного зразка та даними математичного моделювання, що відповідають теоретичному профілю (рис. 2, а).

Вхідні параметри визначення неточності виготовлення будуть значення можливих допусків, що буде представлятися у як набір випадкових величин з певним розсіюванням у відповідності до рівня невизначеності. Процес аналізу буде мати наступну структуру:

1. Визначення моделі/алгоритму, який найбільш точно відображають поведінку системи.
2. Тестування обраної моделі N разів, використовуючи випадкові величини, в діапазоні максимальних значень похибки $(-t; +t)$, щоб отримати вихідні дані моделі. Для отримання середнього значення, відхилення, інтервали використовуємо звичайні методи статистики.

При вимірювання реального робочого профілю сателіту циклоїдальної передачі відбувається зміщення по фазі (рис. 2, б). Зміщення, що виникає необхідно врахувати при розробці методики визначення точності профілю. При виготовленні у якості базуючої поверхні може використовуватися отвір (циліндричний виступ на деталі). При технологічних операціях обробки заготовки буде виникати похибка обумовлена наявністю ексцентриситета між реальною поверхнею отвору деталі та теоретичного. Це знижує точність зубчастого колеса та передачі загалом.

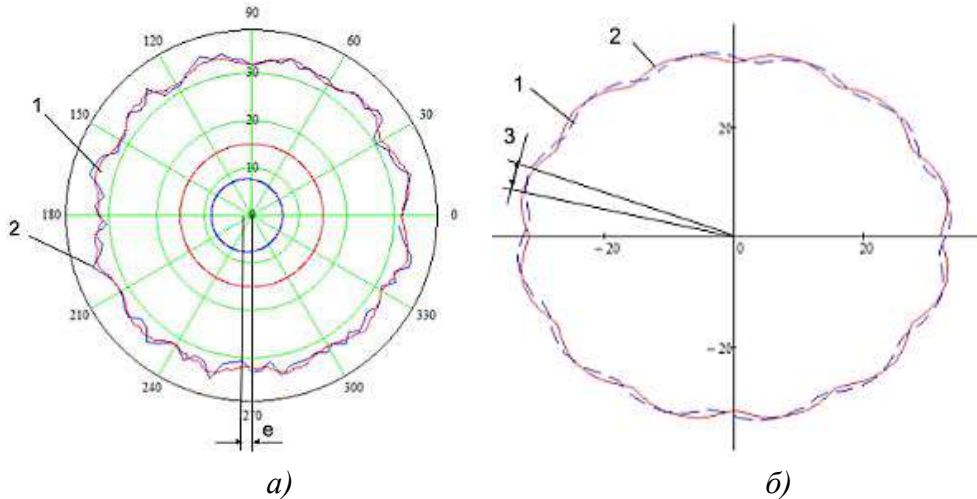


Рис. 2. Графік зміщення геометрії профілю
(похибка збільшена для візуального відображення):

a – внаслідок неточності виготовлення; *б* – по кутовій координаті;
1 – теоретичний ідеальний профіль; 2 – реальний профіль з похибкою;
3 – кутове зміщення; *e* – ексцентриситет

Джерело: розроблено авторами. Побудовані за викладеною методологією в цій статті.

Аналізуючи зв'язок між вхідними та вихідними даними можна пояснити відносну значущість факторів, що впливають на точність позиціонування кінцевого робочого/виконавчого елемента маніпулятора (деталі). Проаналізувавши систему, можна визначити додаткові заходи із взаємодії та вдосконалення системи.

Для побудови еквідистанти, що визначає теоретичну твірну поверхню зубчастого колеса, використано методику, що представлена в джерелі [5]. Відповідно рівняння профілю сателіта в параметричній формі матимуть вигляд:

$$x_{2k} = \frac{e \cdot z_2}{\lambda} \cdot \cos(t_k) - e \cdot \cos(z_2 \cdot t_k) - r \cdot \cos(t_k);$$

$$y_{2k} = \frac{e \cdot z_2}{\lambda} \cdot \sin(t_k) - e \cdot \sin(z_2 \cdot t_k) - r \cdot \sin(t_k),$$

де r – радіус кола, що обертається навколо фіксованої осі обертання.

Тоді рівняння укороченої епіциклоїди в параметричному вигляді:

$$x_k = \frac{e \cdot z_2}{\lambda} \cdot \cos(t_k) - e \cdot \cos(z_2 \cdot t_k);$$

$$y_k = \frac{e \cdot z_2}{\lambda} \cdot \sin(t_k) - e \cdot \sin(z_2 \cdot t_k),$$

де x_{2k} , y_{2k} – координати точок, що отримані шляхом підстановки параметра $t_k = 0 \dots 1$; e – ексцентриситет; λ – коефіцієнт укороченої епіциклоїди; z_2 – число зубців колеса.

На основі відомих моделей отримано ряд кривих, що визначають профіль поверхні зубчастого колеса циклоїдальної передачі (рис. 2). Теоретичний профіль має циклічну природу та може бути представлений у вигляді ряду Фур'є згідно із загальною методикою, що розглянута нижче.

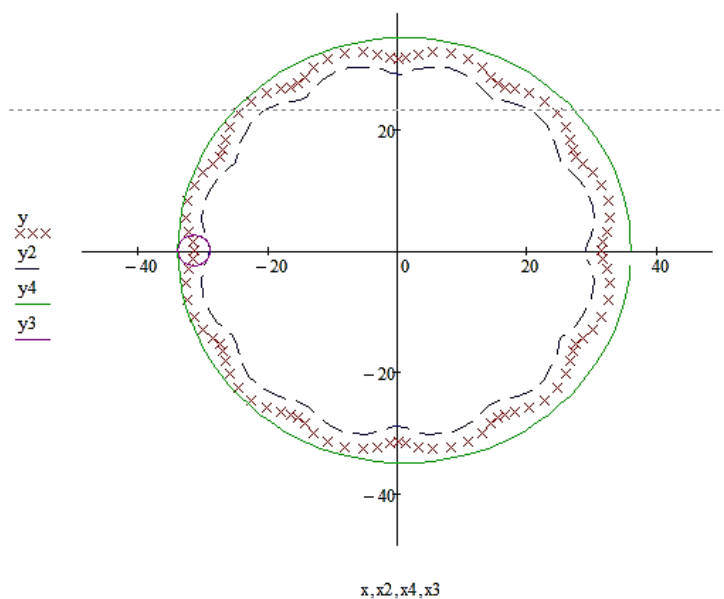


Рис. 3. Профіль сателіта в параметричному вигляді:

y – профіль укороченої епіциклоїди; *y2* – профіль сателіта; *y3* – проміжне положення кола, яке обертається, утворюючи профіль; *y4* – профіль, утворений обертанням центра кола, що обертається навколо т. *O*

Джерело: розроблено авторами. Побудовані за викладеною методологією у даній статті.

Визначення профілю реальної поверхні колеса циклоїдальної передачі здійснюється на координатно-вимірювальній машині. У результаті отримується набір точок, що визначають поверхню деталі.

Знаходження твірної поверхні за дискретними значеннями здійснюється шляхом сплайн-інтерполяції. Вона реалізується за допомогою вбудованої функції *cspline* пакета *MathCad* [6]:

$$ks := cspline(X, Y);$$

$$y5(w) := interp(ks, X, Y, w),$$

де *ks* – змінна функції сплайн-інтерполяції, що створює вектор коефіцієнтів кривої, яка наближує до кубічної параболи в граничних точках;

y5(x) – функція кубічної сплайн-інтерполяції.

Вбудовані інструменти програмного комплексу дозволяють здійснити перетворення Фур'є та отримати гармонічний ряд, що апроксимує дискретні значення поверхні зубчастого колеса.

Відповідно реальний профіль твірної поверхні та теоретичний епіциклоїдальний профіль можна описати за допомогою рядів Фур'є:

$$a_n := \frac{\int_0^{2\pi} f_{c1}(w+2\pi) \cdot \cos(n \cdot w) dw}{\pi};$$

$$b_n := \frac{\int_0^{2\pi} f_{c1}(w+2\pi) \cdot \sin(n \cdot w) dw}{\pi};$$

$$f3(w) := \frac{a_0}{2} + [\sum_{n=1}^m (a_n \cdot \cos(n \cdot w) + b_n \cdot \sin(n \cdot w))],$$

де a_0, a_n, b_n – коефіцієнти функції ряду Фур'є;

f3(w) – функція тригонометричного ряду Фур'є;

m – кількість гармонік; $n = 0..m$.

Результати та обговорення. Результати досліджень дозволяють отримати криву, що описує реальний профіль твірної колеса циклоїдальної передачі з допомогою ряду Фур'є (рис. 4), а також теоретичний профіль.

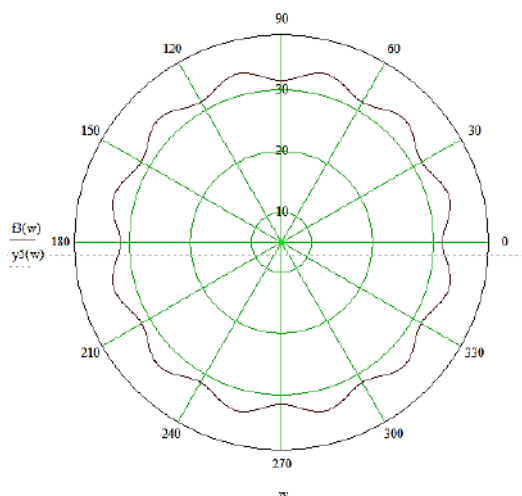


Рис .4. Побудований епіциклоїдальний профіль сателіта, описаний за допомогою ряду Фур'є – $f_3(w)$

Джерело: розроблено авторами.

Математична модель реального профілю у подальшому порівнюється з еталонним профілем із використанням методів Монте-Карло [6].

Це дає можливість врахувати наявність ексцентриситету та зсуву по фазі, що наявні для реальної поверхні.

Висновки. Розроблена математична модель забезпечує високий ступінь відповідності експериментальним даним, що дозволяє оперувати нею у процесі дослідження характеристик поверхні деталі. Використання гармонічних функцій при описі поверхні дозволяє скористатися інструментами спектрального аналізу, а також статистичними методами для визначення похибок виготовлення деталі. Ця методика реалізується шляхом порівняльного аналізу теоретичних даних та залежностей, що отримані експериментально. Врахування стохастичних параметрів при моделюванні дає можливість більш точно оцінити похибки реальної поверхні зубчастого колеса та більш точно визначати характеристики механічної передачі, що складається з двох або більше зубчастих коліс.

Список використаних джерел

1. Наземные военные роботы ВС США [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.modernarmy.ru/article/256/nazemnie-voennie-roboti-ssha>.
2. Кинематический анализ планетарно-цевочных механизмов / А. С. Иванов [и др.] // Вестник машиностроения. – 2012. – № 8. – С. 22-25.
3. Каратушин С. И. Моделирование контактных нагрузок в среде ANSYS для незвольвентных зацеплений / С. И. Каратушин, Д. А. Храмова, П. Н. Бокучава // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2018.
4. Strutynskyi S. Investigation of the accuracy of the manipulator of the robotic complex constructed on the basis of cycloidal transmission / S. Strutynskyi, R. Semenchuk // Technology audit and production reserves. – 2021. – Vol. 4 No. 1(61). – Pp. 6-14.
5. Носков К. А. Циклоидальные редукторы приводов технологического оборудования / К. А. Носков, А. В. Липов, Г. С. Бальшаков // Выпускная квалификационная работа. – Пенза, 2017. – С. 7-9.
6. Киричок П. О. Спеціальні методи наукових досліджень : підручник / П. О. Киричок, С. В. Струтинський, В. Г. Олійник. – К. : Вид. дім «Артек», 2016. – 592 с.

References

1. Nazemnye voennye roboty VS SShA [Ground military robots of the US Armed Forces]. <http://www.modernarmy.ru/article/256/nazemnie-voennie-roboti-ssha>.
2. Ivanov A.S. et al. (2012). Kynematicheskii analiz planetarno-tsevochnykh mekhanizmov [Kinematic analysis of planetary pinion mechanisms]. *Vestnik mashinostroeniia – Bulletin of mechanical engineering*, (8), 22-25.
3. Karatushin, S.I., Khramova, D.A., & Bokuchava, P.N. (2018). Modeling of contact loads in the ANSYS environment for non-involute gears [Modeling of contact loads in the ANSYS environment for non-involute gears]. *Izvestiia vysshykh uchebnykh zavedenii. Masinostroenie – News of higher educational institutions. Engineering*.
4. Strutynskiy, S., & Semenchuk, R. (2021). Investigation of the accuracy of the manipulator of the robotic complex constructed on the basis of cycloidal transmission. *Technology audit and production reserves*, 4(1(61)), 6-14.
5. Noskov K.A., Lipov A.V., & Balshakov G.S. (2017). Tsykloydalnye reduktory pryvodov tekhnolohycheskoho oborudovaniya [Cycloidal gearboxes for drives of technological equipment]. *Final qualification work*.
6. Kirichok, P.O., Strutynskiy, S.V., & Oliynik, V.G. (2016). *Spetsialni metody naukovykh doslidzhen [Special methods of scientific research]*. Artek.

Отримано 21.01.2022

UDC 621.9.06

Serhii Strutynskiy¹, Roman Semenchuk²

¹Doctor of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Fluid mechanics and mechatronics
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: strutynskiy@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9739-0399>

Scopus Author ID: [57194195005](https://orcid.org/0000-0001-9739-0399)

²PhD student at the Department of Fluid mechanics and mechatronics
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: rom.semenchuk@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9470-2756>.

Scopus Author ID: [57203868827](https://orcid.org/0000-0001-9470-2756)

DEVELOPMENT OF SPECIAL MATHEMATICAL MODELS FOR RESEARCH OF ACCURACY OF REAL SURFACES OF TEETH WHEELS OF CYCLOIDAL TRANSMISSIONS

Promising areas for improving robotic systems based on cycloidal gears aimed to increase their accuracy and other performance characteristics. The accuracy of the rotary unit and the mechanism as a whole is determined by errors in the manufacture of the transmission. Integral quantities are not enough to assess the accuracy of the transmission wheels. To determine the errors of the geometry of parts requires a technique that includes modeling of its real surface.

The cyclic nature of the curve that defines the generating surface of the wheel allows the use of optimized mathematical models based on Fourier series. The technique allows for accurate processing of experimental data and compare them with the theoretical profile. Approximation of the concept requires modeling of the theoretical profile and research of the manufactured parts.

The method allows to determine the parameters of the wheels by analyzing the differences between the simulated surface of the part and the theoretical profile. A hole in the part can be used as a base surface in the manufacture. Determination of the surface profile of the transmission wheel is carried out on a coordinate measuring machine, which allows to get a set of points.

Surface modeling by discrete values is performed by spline interpolation. In the future, the description of the surface is performed using harmonic functions. The proposed mathematical apparatus allows the use of spectral analysis tools and statistical methods. The harmonic series is obtained by means of the Fourier transform. Monte Carlo methods allow to compare the mathematical model of the real profile of the mechanical transmission wheel and the theoretical surface. This makes it possible to take into account the presence of eccentricity, phase shift and other features of the part when determining the accuracy parameters.

The mathematical model allows to effectively use experimental data in determining the characteristics of the surface of the part. The use of stochastic parameters in modeling makes it possible to take into account the accuracy of the wheel and increase the accuracy of determining the parameters of mechanical transmission.

Keywords: *epicycloidal profile with the help of Fourier series, hypocycloidal gearing, high-precision hinge; study of the accuracy of the cycloidal reducer; cycloidal transmission.*

Fig.: 4. References: 6.

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-1(27)-60-66

УДК 539.432

Максим Гладський¹, Катерина Барандич², Володимир Фролов³, Сергій Юренко⁴

¹кандидат 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/0000-0002-4547-7131)

²кандидат технічних наук, доцент кафедри виробництва приладів
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: barandichk@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0331-3216>. ResearcherID: [J-6389-2017](https://orcid.org/0000-0003-0331-3216)

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/0000-0002-3697-286X)

⁴здобувач вищої освіти
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: s.yurenko34@gmail.com

ВПЛИВ КОНЦЕНТРАЦІЇ НАПРУЖЕНЬ НА ДЕФОРМУВАННЯ СТАЛІ 20 ПРИ ЦИКЛІЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

В роботі досліджується вплив концентрації напружень на втомну поведінку маловуглецевої сталі 20 під час одночасного циклічного навантаження, а також знакозмінного кручення. Експериментальні дослідження проводились з контролем по деформаціям на циліндричних трубчастих зразках як з концентратором напружень так і без нього. Критерій максимальних головних напружень був обраний для програми досліджень. Результати випробувань зразків при крученні без концентратора напружень продемонстрували значно меншу довговічність, ніж розрахункові значення за критерієм максимальних головних напружень. Однак, для зразків із концентратором аналітичні дані добре корелюють з експериментальними. Для кореляції даних зразків усіх досліджуваних типів та типів навантаження запропоновано використовувати параметр Фатемі-Сосі.

Ключові слова: концентрація напружень; втомна довговічність; одночасне циклічне навантаження; знакозмінне кручення; вуглецева сталь.

Рис.: 3. Табл.: 1. Бібл.: 11.

Актуальність теми дослідження. Найпоширенішою причиною виникнення втомних тріщин у конструктивних компонентах є концентратори напружень. Пази, отвори, галтелі, різьбові та зварні з'єднання – усе це концентратори. Навіть під час номінальної пружної поведінки можуть виникати пластичні відхилення в межах концентратора напружень.

Експлуатаційне навантаження деяких інженерних компонентів із концентратором, таких як труби, вали, пружини, вигнуті оболонки, часто є багатовісними. До того ж багато конструкцій також перебувають в умовах змінної амплітуди або періодичних перевантажень. У порівнянні з осьовим навантаженням, дослідження багатовісної втоми та втоми від знакозмінного кручення є порівняно обмеженими.

Постановка проблеми. Визначення ефекту концентрації напружень на втомну довговічність конструктивних елементів є важливою складовою у визначенні ресурсу. Для застосування відповідного критерію необхідно з'ясувати механізм руйнування компонентів у зоні концентратора.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існують деякі дослідження, в яких проводиться оцінювання впливу концентраторів на поведінку при багатовісній втомі. Адзорі та ін. [1] провели експериментальне дослідження багатовісної втоми на зразках з V-подібним надрізом. Їхні експерименти включали два номінальних коефіцієнта навантаження, зберігаючи постійним і рівним одиниці коефіцієнт двовісності $\lambda = \sigma_a / \tau_a$. Вони виявили, що на багатоосьову втомну міцність значно впливає номінальне навантаження, тоді як вплив фазового кута навантаження здається незначним. При зміні коефіцієнта навантаження від $R = 1$ до 0 спостерігалось зниження довговічності у майже 10 разів.

I-Мінг та Вей-Вей [2] досліджували довговічність до зародження тріщини для суцільних циліндричних зразків з поперечними круглими отворами, виготовленими з нержавіючої сталі AISI 316 при пропорційному та непропорційному багатівісному навантаженні. Довговічність до утворення тріщин у зразків із отворами при нефазовому багатівісному навантаженні менша, ніж при синфазному багатоосьовому навантаженні через додатковий ефект циклічного зміцнення. Найменшою була виявлена довговічність при зсуві фаз на 90° .

Гао та ін. [3] досліджували втомну поведінку V-подібних валів, виготовлених зі сталі 16MnR з гострими та тупими радіусами вершин концентраторів. Вони показали, що існує вплив розміру виїмки на довговічність при різних шляхах навантаження, а ефект концентрації напружень є більш вираженим для циклів з підвищеним рівнем навантаження. Аналіз довговічності проводили з використанням двох критеріїв критичних площин багатівісної втоми, а саме критерію Цзяна та моделі Фатемі-Сосі.

Результати свідчать про те, що прогнозування втомної довговічності з використанням цих двох критеріїв та локальних напружень і деформацій, отриманих за допомогою скінченно-елементного методу, чудово узгоджуються з експериментальними спостереженнями.

Сан та ін. [4] провели випробування на втому з контролем за деформаціями для тонкостінних трубчастих зразків з V-подібними концентраторами, виготовлених зі сплаву GH4169, при пропорційному і двома різними непропорційними навантаженнями при підвищених температурах, а саме 650°C . З експериментальних результатів видно, що для зразків із концентраторами, довговічність при непропорційному навантаженні з кутом зсуву фаз 90° є менш тривалою в порівнянні з пропорційним навантаженням. Цей ефект також можна пояснити значним додатковим зміцненням цього матеріалу в зоні концентратора за рахунок високої пластичної деформації. У результаті був запропонований параметр втомних пошкоджень для прогнозування терміну виникнення втомних тріщин для зразка з концентраторами.

Альфредссон та ін. [5] вивчали вплив концентраторів на багатівісну втомну поведінку для бейнітної високоміцної роликової сталі. Тонкостінні зразки з двома однаковими невеликими протилежними отворами з сімома різними діаметрами в діапазоні від 1,0 до 2,6 мм піддавали різним непропорційним циклам навантаження. Зовнішній і внутрішній діаметри зразків становили 16 мм і 14,4 мм відповідно. Неможливо вичерпно оцінити ефект розміру концентратора, а також вплив непропорційності навантаження на втомну поведінку внаслідок обмеженої кількості тестів. Однак, і критерій Фіндлі, і діаграма Хей можуть передбачити положення тріщини в отворі. При цьому критерій Фіндлі дає більш чітку вказівку на місце зародження тріщини.

Крім того, багато інженерних конструкцій, що мають концентратори, також піддаються різному поєднанню циклічних і статичних навантажень [6-8]. Ці результати показують, що додавання статичного стиснення до циклічного кручення підвищує термін служби виробу, а статичний розтяг, навпаки, зменшує втому довговічність елементів з концентраторами напружень при знакозмінному крученні.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Для всебічного дослідження проблематики бракує експериментальних даних для двовісного навантаження. Наявність таких даних допоможе провести валідацію критеріїв руйнування для їх подальшого застосування у прикладних задачах.

Мета дослідження. У цій роботі спочатку розглядається експериментальна програма, що включає матеріал, метод виготовлення зразків, реалізовані траєкторії деформування та використану експериментальну процедуру. Далі представлені результати експерименту та деталі аналізу, після чого обговорюються експериментальні спостере-

ження. Також представлено кореляція прогнозованої та спостережуваної втомної довговічності під час осьових та крутильних навантажень. Насамкінець, наведено висновки з проведених експериментальних досліджень та аналізу.

Виклад основного матеріалу. У цьому дослідженні була використана низьковуглецева сталь 20. Хімічний склад матеріалу наступний (мас.%): С 0,24; Si 0,25; Mn 0,45; Cr 0,2. Використовувалась одна базова геометрія для двох різних типів зразків, базова конфігурація яких показано на рис. 1, з товщиною стінки 1,1 мм, внутрішнім діаметром 22 мм і довжиною робочої частини 40 мм. Один тип зразків являв собою трубчасті суцільні тонкостінні зразки, інший – такі самі зразки з додатковим круглим наскрізним отвором діаметром 3,4 мм посередині робочої частини.

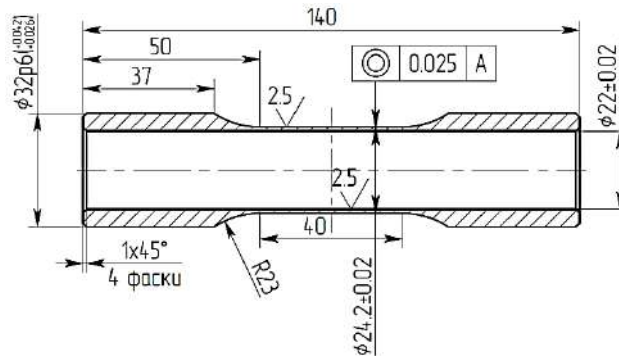


Рис. 1. Креслення суцільного зразка

Джерело: розроблено авторами.

Випробування на втому з контролем за деформаціями та напруженнями проводили при кімнатній температурі на сервогідравлічній машині з незалежним регулюванням тягово-навантажувальних і крутильних зусиль з частотою 0,5-3 Гц.

Для випробувань з постійною амплітудою використовувались повністю зворотні синусоїдальні осьові та крутильні траєкторії. Жорсткий режим (контроль за деформаціями) застосовувався для випробувань суцільних зразків лише при одновісному навантаженні. М'який режим навантаження відповідає випробуванням всіх зразків з концентраторами, а також суцільних зразків на кручення. Щоб переконатися у кореляції даних між випробуваннями в різних режимах, для одновісного випадку було обрано два різних рівня контролю зусиль, прикладених до суцільних зразків.

Зниження навантаження на 5% для випробувань з контролем одновісної деформації та 5% збільшення деформації та кута повороту для одновісних і крутильних випробувань при м'якому режимі відповідно, порівняно зі стабільним циклом навантаження для суцільних зразків, розглядалися як момент зародження малої тріщини. Для випробувань у м'якому режимі зразків з концентратором зроблено декілька припущень щодо моменту зародження тріщини, а саме на основі порогового значення напружень, а також наявності тріщини 0,5 мм та 1,0 мм. Далі для уточнення цього значення було використано діаграму К–Т, запропоновану Катагава і Такахаші, що описує зв'язок між порогом напружень і довжиною тріщини. Для короткої тріщини в зоні концентратора при осьовому циклічному навантаженні діапазон коефіцієнта інтенсивності напружень може бути виражений наступним чином [9]:

$$\Delta K_{th} = Ff \frac{K_I \Delta \sigma_e}{2 \cdot K_f} \left[\left(1 + 2 \frac{a}{r} \right)^{-1/2} + \left(1 + 2 \frac{a}{r} \right)^{-3/2} \right] \sqrt{\pi a}, \quad (1)$$

де a – це довжина тріщини від краю отвору, $r = 1,7$ мм – радіус отвору та f – коригуючий коефіцієнт, що дорівнює 1 якщо $a/f < 0,2$ і що визначає максимальне значення контактного напруження на кінці тріщини. Коефіцієнт концентрації напружень K_I було визначено за допомогою онлайн ресурсу eFatigue відповідно до графіків Петерсона. Втомний коефіцієнт концентратора K_f може бути визначений за допомогою рівняння Нейбера [10]:

$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \sqrt{\rho/r}}, \quad (2)$$

де характеристика довжини, ρ , дорівнює 0.185 мм.

Параметр форми F дорівнює 1,05 [11]. Границя втомної витривалості $\Delta\sigma_e = 384$ МПа та порогове значення розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень $\Delta K_{th} = 9$ МПа \sqrt{m} , що було встановлено за результатами експериментальних випробувань. Підставивши знайдені параметри до рівняння (1) отримаємо значення довжини зародженої тріщини з урахуванням порогового напруження для зразка з концентратором рівним 0,2 мм.

Амплітуда осьової деформації, $\Delta\varepsilon/2$ та амплітуда нормальних напружень, $\Delta\sigma/2$ були використані в якості параметрів контролю процесу навантаження для суцільних зразків при жорсткому і м'якому режимах відповідно. Амплітуда осьової деформації вимірювалась безпосередньо екстензометрами, закріпленими на поверхні робочої частини зразка. Амплітуда нормальних напружень бралася із розрахунку площі поперечного перетину робочої частини зразка.

Під час експериментальних досліджень зразків з концентратором як параметри контролю були амплітуди нормальних та дотичних напружень, $\Delta\sigma/2$ та $\Delta\tau/2$ відповідно. Номінальне значення осьових напружень було визначено з відношення осьового навантаження та площі перетину зразка в робочій зоні. Амплітуда дотичних напружень, τ_a , що перевищувала границю текучості визначалась за формулою:

$$\tau_a = \frac{\Delta\tau}{2} = \frac{\Delta T}{2r_m A}, \quad (3)$$

де $\Delta T/2$ – амплітуда крутного навантаження, A площа перетину зразка в робочій зоні без урахування концентратора та r_m серединний радіус перетину зразка.

У випадку повністю пружного деформування, дотичні напруження визначались з урахуванням полярного моменту опору. Отримані експериментальні дані, а саме величини осьової деформації, значення амплітуди нормальних і дотичних напружень, а також кількість циклів до руйнування при циклічному навантаженні із постійною амплітудою для сталі 20 наведено в таблиці.

За допомогою графіків Петерсона визначено значення коефіцієнт концентрації напружень. Для одновісного навантаження коефіцієнт дорівнює 3,29, а для випадку кручення – 3,98. Втомна поведінка об'єктів з концентраторами залежить не тільки від пружного параметра концентрації, і тому під час оцінки втомної міцності необхідно враховувати коефіцієнт втомної концентрації напружень, K_f . Використовуючи методику, представлену у роботі [11], було знайдено величину коефіцієнта втомної концентрації напружень при одновісному 2,73 та для випадку знакозмінного кручення – 3,21.

Втомну міцність компонентів з концентраторами напружень можна визначити як міцність зразків без концентратора віднесено до аналітичного фактору. З метою застосування S-N методики в цій роботі було використано коефіцієнти втомної концентрації напружень при одновісному навантаженні і знакозмінному крученні K_{fA} і K_{fT} відповідно. Для випадків, коли довговічність перевищувала 10^6 циклів втомна міцність зразків з концентратором визначалась як S_A/K_{fA} і S_T/K_{fT} , де S_A і S_T – осьова і крутильна втомна міцність зразків без концентратора.

Критерій Мізеса було обрано для кореляції втомної довговічності при одновісному циклічному навантаженні і знакозмінному крученні із використанням S-N методики в такій формі:

$$\bar{\sigma}_a = \sqrt{3}(K_{fT} \cdot S_{aT}), \quad (4)$$

де S_{aA} і S_{aT} – амплітуда номінальних значень нормальних і дотичних напружень.

Експериментальні дані

Режим навантаження	$\frac{\Delta\varepsilon}{2}$	$\frac{\Delta\sigma}{2}$ МПа	$\frac{\Delta\tau}{2}$ МПа	σ_{a1} МПа	$\bar{\sigma}_a$ МПа	$\sigma_{n,\max}$ МПа	N_f циклів
Зразки без концентратора							
Осьове	0,0100	411	-	411	411	206	50
Осьове	0,0070	350	-	350	350	175	135
Осьове	0,0030	277	-	277	277	139	3,400
Осьове	0,0020	261	-	261	261	131	13,120
Осьове	0,0015	232	-	232	232	116	51,500
Осьове	0,0010	192	-	192	192	96	>972,000
Осьове	0,0031	300	-	300	300	150	2,050
Осьове	0,0016	230	-	230	230	115	151,000
Кручення		-	190	190	329	0	8,573
Кручення		-	175	175	303	0	45,810
Кручення		-	149	149	258	0	242,000
Зразки з концентратором							
Осьове		269	-	269	269	135	315
Осьове		250	-	250	250	125	495
Осьове		200	-	200	200	100	2,115
Осьове		144	-	144	144	72	20,900
Осьове		106	-	106	106	53	140,500
Кручення		-	149	149	258	0	5,407
Кручення		-	149	149	258	0	5,910
Кручення		-	121	121	209	0	34,700
Кручення		-	87	87	151	0	120,000
Кручення		-	87	87	151	0	276,000
Кручення		-	65	65	113	0	>1,150,000

Джерело: розроблено авторами

На рис. 2 представлено результати кореляції експериментальних та аналітичних даних. Як видно з цього рисунку, спостерігається майже 10 кратне перевищення у прогнозуванні втомної довговічності, що пояснюється консервативністю застосованої методології.

Також у роботі для кореляції даних було використано інший підхід, зокрема, параметр критичної площини Фатемі-Сосі у формі зсуву

$$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} \left(1 + k \frac{\sigma_{n,\max}}{\sigma_y} \right) = \left[(1 + \nu_e) \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + (1 + \nu_p) \varepsilon'_f (2N_f)^c \right] \cdot \left[1 + k \left(\frac{\sigma'_f}{2\sigma_y} (2N_f)^b \right) \right], \quad (5)$$

де $\nu_e = 0,3$ та $\nu_p = 0,5$, пружний і пластичний коефіцієнт Пуассона, відповідно. Для досліджуваної сталі коефіцієнт $k = 1,0$.

Крива втоми для зсуву була згенерована із використанням критерію Мізесу. Параметр Фатемі-Сосі було пов'язано з локальним напружено-деформованим станом завдяки скінченно-елементному аналізу. Апроксимація експериментальних даних з використанням параметру Фатемі-Сосі представлено на рис. 3. Як видно з рисунку, спостерігається досить висока кореляція для обох видів зразків. Це можна пояснити тим, що в основі параметру Фатемі-Сосі критичними визнаються площадки зсуву, розташовані навколо концентратора під кутами $0^\circ, \pm 180^\circ$ при одновісному навантаженні і під кутами $\pm 45^\circ, \pm 135^\circ$ при знакозмінному крученні. Саме таке розташування зародження тріщин було зафіксовано під час проведення експериментальних досліджень. До того ж поверхня руйнування для обох видів навантаження узгоджується з розташуванням площини максимального зсуву.

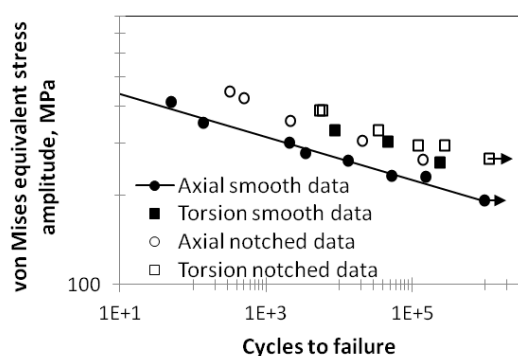


Рис. 2. Кореляція експериментальних даних з використанням критерію Мізеса

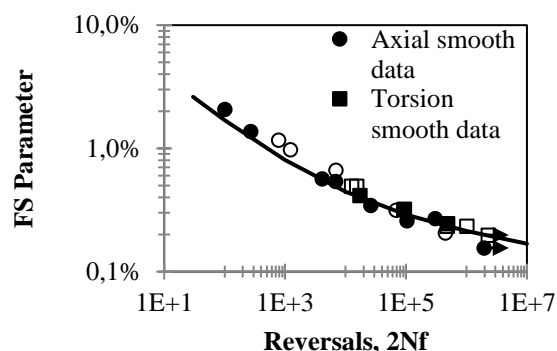


Рис. 3. Кореляція експериментальних даних з використанням параметру Фатемі-Сосі

Висновки. Отримано задовільні результати кореляції експериментальних даних для зразків з концентратором напружень з використанням критерію максимальних головних напружень. Проте, спостерігається суттєве відхилення аналітичних розрахунків для зразків без концентратора в умовах одновісного навантаження та знакозмінного кручення. У процесі проведення досліджень було виявлено зсувний механізм руйнування зразків зі сталі 20, що також підтверджується аналітичними розрахунками з використанням скінченно-елементного методу. Було встановлено, що найкращий збіг результатів аналізу дає метод із використанням параметру Фатемі-Сосі як для суцільних зразків, так і для зразків з концентратором.

Список використаних джерел

1. Multi-axial fatigue behavior of a severely notched carbon steel / Atzori B., Berto F., Lazzarin P., Quaresimin M. // *Int J Fatigue*. – 2006. – Vol. 28. – Pp. 485-93.
2. Jen Y.M. Crack initiation life prediction for solid cylinders with transverse circular hole under in-phase and out-of-phase multiaxial loading / Jen Y.M., Wang W.W. // *Int J Fatigue*. – 2005. – Vol. 27. – Pp. 527-39.
3. An investigation of fatigue of a notched member / Gao Z., Qui B., Wang X., Jiang Y. // *Int J Fatigue*. – 2010. – Vol. 32. – Pp. 1960-9.
4. Sun G.Q. Prediction of fatigue lifetime under multiaxial cyclic loading using finite element analysis / Sun G.Q., Shang D.G. // *Materials and Design*. – 2010. – Vol. 31. – Pp. 126–33.
5. Alfredsson B. Fatigue crack initiation and growth at holes in a high strength bainitic roller bearing steel when loaded with non-proportional shear and compressive cycles / Alfredsson B., Watz V., Olsson E. // *Int J Fatigue*. – 2011. – Vol. 33. – Pp. 1244-56.
6. Tipton S.M. Advances in multiaxial fatigue life prediction for components with stress concentrations / Tipton S.M., Nelson D.V. // *Int J Fatigue*. – 1997. – Vol. 19. – Pp. 503-15.
7. Thomson K.D. Fatigue crack growth in notched and plain shafts subjected to torsion and axial loading / Thomson K.D., Sheppard S.D. // *Engng Fract Mechanics*. – 1992. – Vol. 43(1). – Pp. 55-71.
8. Ohkawa C. Notch effect on torsional fatigue of austenitic stainless steel: Comparison with low carbon steel / Ohkawa C., Ohkawa I. // *Engng Fract Mechanics*. – 2011. – Vol. 78. – Pp. 1577-89.
9. Kujawski D. Estimations of stress intensity factors for small cracks at notches / Kujawski D. // *Fat. Fract. Engng. Mater. Struct.* – 1991. – Vol. 14. – Pp. 953-65.
10. Neuber H. Theory of Notch Stresses, Office of Technical Services, U.S. Department of Commerce. – Washington, DC, 1961.
11. Fuhring H. Approximation functions for K-factors of cracks in notches / Fuhring H. // *Int J Fracture*. – 1973. – Vol. 9. – Pp. 328-31.

References

1. Atzori, B., Berto, F., Lazzarin, P., & Quaresimin M. (2006). Multi-axial fatigue behavior of a severely notched carbon steel. *Int J Fatigue*, 28, 485-93.
2. Jen, Y.M., Wang, W.W. (2005). Crack initiation life prediction for solid cylinders with transverse circular hole under in-phase and out-of-phase multiaxial loading. *Int J Fatigue*, 27, 527-39.

3. Gao, Z., Qui, B., Wang, X., & Jiang Y. (2010). An investigation of fatigue of a notched member. *Int J Fatigue*, 32, 1960-9.
4. Sun, G.Q., & Shang, D.G. (2010). Prediction of fatigue lifetime under multiaxial cyclic loading using finite element analysis. *Materials and Design*, 31, 126–33.
5. Alfredsson, B., Watz, V., & Olsson, E. (2011). Fatigue crack initiation and growth at holes in a high strength bianitic roller bearing steel when loaded with non-proportional shear and compressive cycles. *Int J Fatigue*, 33, 1244-56.
6. Tipton, S.M., Nelson, D.V. (1997). Advances in multiaxial fatigue life prediction for components with stress concentrations. *Int J Fatigue*, 19, 503-15.
7. Thomson, K.D., & Sheppard, S.D. (1992). Fatigue crack growth in notched and plain shafts subjected to torsion and axial loading. *Engng Fract Mechanics*, 43(1), 55-71.
8. Ohkawa, C., & Ohkawa, I. (2011) Notch effect on torsional fatigue of austenitic stainless steel: Comparison with low carbon steel. *Engng Fract Mechanics*, 78, 1577-89.
9. Kujawski, D. (1991). Estimations of stress intensity factors for small cracks at notches. *Fat. Fract. Engng. Mater. Struct.*, 14, 953-65.
10. Neuber, H. (1961). *Theory of Notch Stresses, Office of Technical Services*. U.S. Department of Commerce, Washington, DC.
11. Fuhring, H. (1973). Approximation functions for K-factors of cracks in notches. *Int J Fracture*, 9, 328-31.

Отримано 28.01.2022

UDC 539.432

Maksym Gladskiy¹, Kateryna Barandych², Volodymyr Frolov³, Serhii Yurenko⁴

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the 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/0000-0002-4547-7131)

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Instrument Production and Engineering
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)
E-mail: barandich@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0331-3216>. ResearcherID: [J-6389-2017](https://orcid.org/0000-0003-0331-3216)

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the 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/0000-0002-3697-286X)

⁴Applicant for Higher Education
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)
E-mail: s.yurenko34@gmail.com

INFLUENCE OF STRESS CONCENTRATION ON STEEL DEFORMATION 20 UNDER CYCLIC LOADS

The effect of stress concentration on fatigue behavior of steel 20 is studied. Experimental study is carried out on tubular smooth and notched specimens under uniaxial cyclic loading and alternating torsion. Load and strain controlled fatigue tests were carried out at room temperature using servohydraulic machine with independent control of push-pull and torsion loads with frequency of 0.5-3 Hz. One basic geometry for two different types of specimens shown in Figure 1 with 1.1 mm wall thickness, 22 mm inside diameter, and 40 mm gauge length was used in this work. One type was a tubular smooth thin-walled specimens, the other type was the same thin-walled specimen with 3.4 mm circular through-thickness hole at the middle of gauge length. The 5% load drop for uniaxial strain control tests and 5% strain and rotation angle increment for uniaxial and torsion load control tests respectively, as compared to midlife stable cycle for smooth specimens were considered as a small crack initiation life. The criterion of maximum principal stress was used as a control parameter of the test program. Torque loading was accompanied by a significant decrease in durability compared to uniaxial loading due to conservative methodology. Although maximum principal stress criterion could correlate axial and torsion constant amplitude data of notched specimens with a factor of 4, it could not correlate axial with torsion data of smooth specimens. It is found that the prediction of fatigue life can be successfully performed according to the shear form of Fatemi-Soci criterion by taking into account the mechanism of destruction of samples. The shear strain-life curve was generated based on von Mises criterion. The FS parameter was associated with local stress-strain condition based on FE analysis results.

Keywords: stress concentration; fatigue life; uniaxial cyclic loading; alternating torsion; carbon steel.

Fig.: 3. Table: 1. References: 11.

Юліана Гупало¹, Іван Бельмас², Олена Білоус³, Ганна Танцура⁴

¹аспірантка кафедри технології машинобудування та зварювання
Дніпровський державний технічний університет (Кам'янське, Україна)

E-mail: uliana.gupalo@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7906-5402>

²доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології машинобудування та зварювання
Дніпровський державний технічний університет (Кам'янське, Україна)

E-mail: belmas09@meta.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2112-0303>

³кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри галузеве машинобудування
Дніпровський державний технічний університет (Кам'янське, Україна)

E-mail: bilouselena66@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6398-8843>

⁴кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Галузеве машинобудування
Дніпровський державний технічний університет (Кам'янське, Україна)

E-mail: hannaivan71@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8672-1153>

АНАЛІЗ ДОПУСТИМИХ ВІДХИЛЕНЬ ВУЗЛІВ ПРИЄДНАННЯ ВАНТОВОГО КАНАТУ ДО СПОРУДИ

На основі метода механіки шаруватих композитних матеріалів була створена модель, яка здатна оцінити вплив дефектів приєднання канату до залізобетонного покриття будівлі на його напружено деформований стан. Отримані розрахунки дають можливість визначити допустиму похибку приєднання кінців канату до споруди, що суттєво сприяє підвищенню безпеки експлуатації загалом. Вони надають можливість визначити допустиму похибку приєднання кінців канату до споруди та сприяють підвищенню безпеки експлуатації останньої. Результати отримані методами механіки композитних матеріалів з використанням моделювання в системі Mathcad, що дозволяє вважати їх достатньо достовірними.

Ключові слова: допустимі відхилення; напружено-деформований стан; вантовий канат; кут повороту; внутрішні сили навантаження.

Бібл.: 15.

Актуальність теми досліджень. Одним із напрямів сучасного капітального будівництва є зменшення витрат на виготовлення будівельної продукції та підвищення надійності її основних елементів. Для скорочення термінів виробництва виготовлення конструкцій здійснювати з плоских залізобетонних елементів з'єднаних у просторову конструкцію вантами.

Постановка проблеми. Зменшення кількості часу на виробництво основних елементів будівництва дозволяє створити матеріали незначної маси для перекриття із зазначеними розмірами у плані споруд. Проте неодмінно постає завдання прорахунку проектних вузлів приєднання вантових канатів до будівельних блоків, щоб вирішити питання надійності та довготривалості експлуатації споруд.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Залізобетонні конструкції з покриттям вантових канатів є збірною схемою [1], тому основна увага повинна приділятися розрахункам з'єднувальних вузлів та елементів між собою. Більшість сучасних досліджень проводиться стосовно напружено-деформованого стану конструкції [2; 3] та навантаження окремих елементів [4]. Вивчається також застосування в залізобетонних конструкціях плоских покриттів [5-7].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх досліджень та публікацій показав, що питання розрахунку вузлів приєднання вантових канатів до залізобетонних елементів є недостатньо визначеним та таким, що потребує ретельного вивчення.

Метою статті є розробка методики визначення допустимих відхилень від проектних вузлів приєднання, вплив дефектів на напружено-деформований стан вантових канатів на основі теоретичних досліджень для підвищення міцності будівельних матеріалів і будівельних конструкцій загалом.

Виклад основного матеріалу. Згідно з тим, що з'єднувальними елементами слугують вантові канати необхідно збільшити експлуатаційний термін їх використання. Для цього, на нашу думку, необхідно захистити його структуру від корозії, тобто факторів агресивного впливу навколишнього середовища. Реалізація цього можлива шляхом розміщення його в еластичну оболонку, матеріалом якої буде поліуретан, гума або інші еластичні матеріали. Тяговим елементом такого канату має бути трос. Троси виготовляють з дротів, тому зменшення діаметра дроту супроводжується зростанням межі міцності тросу, за рахунок збільшення кількості дротів у тросі. Плоскі гумотросові канати гнучкі та постачаються намотаними в декілька шарів. Вантовий канат можна виготовити на місці його монтажу шляхом склеювання в декілька шарів шматків гумотросових канатів. Конструкція двошарового гумотросового канату обґрунтована в роботі [8].

Практично було доведено, що термін роботи гумотросових канатів зрівноважування перевищує такий термін для звичайних канатів у 6 разів [8]. Вплив умов використання гумотросових канатів та стрічок на їх напружено-деформований стан (НДС) достатньо повно досліджені в роботах [9-15].

Відповідно до технології виготовлення троси канату скручуються. З метою врівноважування моменту скручування канату кількість тросів у ньому парна. Троси різного напрямку скручування розташовані почергово. Канат складений із системи паралельних, регулярно розташованих в декількох площинах – тросів. Оболонка канату практично не деформується в напрямку, нормальному тросам. Вона деформується практично лише на зсув у напрямку тросів. Напруження в елементах канату в межах допустимих навантажень прямо пропорційні деформаціям. Розміри вузла приєднання канату до споруди малі відносно розмірів канату.

Відхилення місця розташування вузлів приєднання канату до конструкції призводить до повороту осі канату відносно положення передбаченого проектом. Відхилення пов'язане з поворотом вузла приєднання теж призводить до того самого наслідку. Поворот осі канату відносно проектного розташування можна вважати критерієм оцінки точності монтажу вантового канату. Відхилення місця розташування вузлів приєднання канату до конструкції приводить до повороту осі канату відносно положення передбаченого проектом. Відхилення пов'язане з поворотом вузла приєднання теж призводить до того самого наслідку. Поворот осі канату відносно проектного розташування можна вважати критерієм оцінки точності монтажу вантового канату.

Поворот канату відносно вузла приєднання в загальному випадку можна розглядати як поворот у площині канату та за межами його площини. Лінійність задачі дозволяє розглядати окремо кожен із цих згинів. Структурна схожість побудови перерізу канату у двох напрямках дозволяє знайти рішення для одного з двох можливих згинів канату.

Приймемо такі спрощення. Троси в канаті не вагомні, регулярно паралельно розташовані в обмеженому просторі, абсолютно жорсткі на згин, взаємодіють через пружне середовище, у якому виникають лише напруження зсуву. Деформування елементів канату відбувається в межах закону Гука. Канат не вагомий, навантажений силою спрямованою вздовж осі канату. Усі шари мають однакову кількість тросів. Усі троси, що розташовані в площинах нормальних до площини згину, деформуються однаково, згідно цього приймаємо, що вантовий канат одношаровий. Переміщення, внутрішні сили, навантаження тросів канату з розташуванням тросів в одному шарі визначимо за залежностями [7]:

$$u_i = \sum_{m=1}^{M-1} (A_m e^{\beta_m x} + B_m e^{-\beta_m x}) \cos(\mu_m(i-0,5)) + \frac{D_0}{EF} + \chi; \quad (1)$$

$$p_i = EF \sum_{m=1}^{M-1} (A_m e^{\beta_m x} - B_m e^{-\beta_m x}) \beta_m \cos(\mu_m(i-0,5)) + D, \quad (2)$$

де A_m , B_m , χ – сталі величини; E , F – зведений модуль пружності троса на розтяг та площа його перерізу; D – зусилля що припадає на трос канату; i – номер тросу ($1 \leq i < M^j$); μ_m , β_m – характеристичні показники;

$$\beta_m = \sqrt{2 \frac{G k_G b}{h E F} (1 - \cos(\mu_m))}; \mu_m = \frac{\pi m}{M},$$

де $b=1$ – крок розташування шарів тросів в канаті; h – відстань поміж тросами; G – модуль зсуву матеріалу оболонки канату; k_G – коефіцієнт що враховує вплив форми гуми поміж тросами на жорсткість при взаємному зсуві суміжних тросів.

Відомі переміщення тросів, їх взаємні відстані в канаті дозволяють визначати значення максимальних тангенсів кутів зсуву гуми поміж тросами.

$$\gamma_i^J = \frac{u_i^J - u_{i+1}^J}{h}, \quad (1 \leq i \leq M^J - 1).$$

Нехай кути нахилу обох кінців канату за абсолютними значеннями рівні – відповідають максимально допустимому куту. Тангенс допустимого кута γ . Гранична умова:

$$x = \pm \frac{L}{2}; u_i = \pm \gamma \left(i - \frac{M}{2} \right) (h + d). \tag{3}$$

Задамо (3) як функцію на осі номерів тросів.

$$u_i = \pm \gamma (h + d) \frac{2}{M - 1} \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{j=1}^M j \cos(\mu_m (j - 0,5)) \cos(\mu_m (i - 0,5)). \tag{4}$$

Підставимо (4) в (1). Отримаємо

$$A_m = \pm \gamma (h + d) \frac{2}{(M - 1) e^{\beta_m \frac{L}{2}}} \sum_{j=1}^M j \cos(\mu_m (j - 0,5)) - B_m e^{-\beta_m L}, \tag{5}$$

$$\chi = - \frac{P L}{2 E F}. \tag{6}$$

Врахуємо (5) та (6). Тоді отримаємо:

$$p_i = E F \sum_{m=1}^{M-1} \left(\begin{aligned} & \left(\pm \gamma (h + d) \frac{2 e^{-\beta_m \frac{L}{2}}}{(M - 1)} \sum_{j=1}^M j \cos(\mu_m (j - 0,5)) e^{\beta_m x} \right) \times \\ & \left(- B_m (e^{-\beta_m x} + e^{-\beta_m L} e^{\beta_m x}) \right) \end{aligned} \right) + P, \tag{7}$$

$$u_i = \sum_{m=1}^{M-1} \left(\begin{aligned} & \left(\pm \gamma (h + d) \frac{2 e^{\beta_m x}}{(M - 1) e^{\beta_m \frac{L}{2}}} \sum_{j=1}^M j \cos(\mu_m (j - 0,5)) + \right) \times \\ & \left(+ B_m (e^{-\beta_m x} - e^{-\beta_m L} e^{\beta_m x}) \right) \end{aligned} \right) + \frac{P \left(x - \frac{L}{2} \right)}{E F}. \tag{8}$$

Деформування перерізу $x=0$ залежні від сполучення знаків напрямку кута нахилу осі канату до проєктного. У разі протилежних напрямів поворотів плоский нормальний переріз канату до навантаження залишається плоским і після навантаження. Цьому випадку відповідає така умова, коли

$$x = 0 \quad u_i = const. \tag{9}$$

У випадку однакових напрямів поворотів обох кінців канату маємо умову, коли

$$x = 0 \quad p_i = const. \tag{10}$$

З умови (9) та виразу переміщень (8) маємо значення вектору невідомих сталих для випадку протилежних напрямів поворотів перерізів приєднання канату до споруди.

$$B_m = \mp \frac{2 \gamma (h+d) \sum_{j=1}^M j \cos(\mu_m (j-0,5))}{(M-1)(1-e^{-\beta_m L}) e^{\beta_m \frac{L}{2}}}. \quad (11)$$

Відповідно, вирази розподілу сил (7) та (8) переміщень набувають наступних форм.

$$p_i = \pm 2\gamma E F \frac{(h+d)}{(M-1)} \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{j=1}^M \left(\begin{array}{l} \sum_{j=1}^M j \cos(\mu_m (j-0,5)) e^{-\beta_m \frac{L}{2}} \times \\ \times \left(e^{\beta_m x} + \frac{(e^{-\beta_m x} + e^{-\beta_m L} e^{\beta_m x})}{(1-e^{-\beta_m L})} \right) \times \\ \times \beta_m \cos(\mu_m (i-0,5)) \end{array} \right) + P, \quad (12)$$

$$u_i = \pm 2\gamma \frac{(h+d)}{(M-1)} \sum_{m=1}^{M-1} \left(\begin{array}{l} \sum_{j=1}^M j \frac{\cos(\mu_m (j-0,5))}{e^{\beta_m \frac{L}{2}}} \times \\ \times \left(e^{\beta_m x} + \frac{(e^{-\beta_m x} - e^{-\beta_m L} e^{\beta_m x})}{(1-e^{-\beta_m L})} \right) \times \\ \times \cos(\mu_m (i-0,5)) \end{array} \right) + \frac{P \left(x - \frac{L}{2} \right)}{E F}. \quad (13)$$

Для випадку однакових напрямів поворотів обох кінців канату (10), значення вектора сталих:

$$B_m = \mp \gamma (h+d) \frac{2 \sum_{j=1}^M j \cos(\mu_m (j-0,5))}{(M-1)(1+e^{-\beta_m L}) e^{-\beta_m \frac{L}{2}}}, \quad (14)$$

Порівняння (11) та (14) показує, що за різних граничних умов значення вектора B_m визначене за виразом (14) менше, ніж визначене вище за (11). Відповідно, за абсолютними значеннями, переміщення тросів та сили їх навантаження більші в разі протилежних напрямів поворотів кінців приєднання канату до споруди.

Дефекти приєднання вантового канату спричиняють локальне збурення напружено-деформованого стану. Екстремальних значень напруження набувають в перерізі дії чинника що спричинив збурення. Таким чинником є подовження тросів. Найбільше подовження мають крайні троси шарів. Для крайнього (першого) троса й визначимо допустимий тангенс повороту $[\gamma]$ кінця вантового канату з умови міцності його тросів та еластичного прошарку. Знак напрямку повороту опустимо.

$$[\gamma] \leq \frac{[P] - P}{2EF \frac{(h+d)}{(M-1)} \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{j=1}^M \left(\sum_{j=1}^M j \cos(\mu_m(j-0,5)) + \frac{2}{(1-e^{-\beta_m L})} e^{-\beta_m \frac{L}{2}} \times \right.} \quad (15)$$

$$\left. \times e^{\beta_m \frac{L}{2}} \beta_m \cos\left(\frac{\mu_m}{2}\right) \right)}$$

$$[\gamma] \leq \frac{[\Delta](M-1)}{2 \sum_{m=1}^{M-1} \left(\sum_{j=1}^M j \cos(\mu_m(j-0,5)) \left(\cos\left(\frac{\mu_m}{2}\right) - \cos\left(\frac{3\mu_m}{2}\right) \right) \right)} \quad (16)$$

де $[P]$ – допустиме навантаження на один трос канату, $[\Delta]$ – допустимий зсув еластичного матеріалу розташованого поміж тросами.

Висновки. Методом механіки шаруватих композитних матеріалів побудована модель у замкненій формі, побудовані рішення. Встановлено вплив дефектів його приєднання до залізобетонного покриття будівлі на напружено деформований стан вантового канату. Сформульовані вирази для визначення допустимого повороту перерізу приєднання канату до будівельної конструкції. Уточнено механізм впливу характеру приєднання канату до споруди на його напружено-деформований стан.

Кут повороту приєднання канату до споруди впливає на його напружено-деформований стан. Внаслідок розрахунку складання похибок відхилення вузлів приєднання залізобетонного покриття, протилежні напрями поворотів перерізів канату свідчать, що дані конструкції є більш небезпечні. Отримано вирази для визначення допустимих відхилень вузлів приєднання вантового канату до будівельної конструкції. Вони надають можливість визначати допустиму похибку приєднання кінців канату до споруди та сприяють підвищенню безпеки експлуатації останньої. Результати отримані методами механіки композитних матеріалів з використанням моделювання в системі Mathcad, що дозволяє вважати їх достатньо достовірними.

Список використаних джерел

1. Стороженко Л. І. Дослідження напруженого стану елементів вузлових з'єднань структурно-вантових сталезалізобетонних покриттів на основі результатів моделювання умов їх роботи / Л. І. Стороженко // Містобудування та територіальне планування. – 2016. – № 61. – С. 343-345.
2. Гасій Г. М. Напружено-деформований стан структурно-вантових сталезалізобетонних конструкцій покриття / Г. М. Гасій // Проблеми сучасного будівництва : матеріали Всеукраїнської інтернет-конференції молодих учених і студентів. – Полтава, 2012. – С. 121-122.
3. De Sousa Jr. J. B. Numerical analysis of composite steel-concrete columns of arbitrary cross section / De Sousa Jr. J. B., Caldas R. B. // Journal of structural engineering. – 2005. – Vol. 131, № 11. – Pp. 1721–1730.
4. Storozhenko L.I Experimental research of strain-stress state of ferrocement slabs of composite reinforced concrete structure elements / L. I. Storozhenko, G. M. Gasii // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – Vol. 6. – Pp. 40–42.
5. Дослідження і проектування сталезалізобетонних структурних конструкцій / Л. І. Стороженко, В. М. Тимошенко, О. В. Нижник, Г. М. Гасій, С. О. Мурза. – Полтава : АСМІ, 2008. – 262 с.
6. Стороженко Л. І. Просторові сталезалізобетонні структурно-вантові покриття : монографія / Л. І. Стороженко, Г. М. Гасій, С. А. Гапченко. – Полтава : ТОВ «АСМІ», 2015. – 218 с.
7. Стороженко Л. І. Результати експериментальних досліджень сталезалізобетонного структурного покриття / Л. І. Стороженко, В. М. Тимошенко, Г. М. Гасій // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Рівне. – 2008. – № 16. – С. 376-381.
8. Колосов Д. Л. Обґрунтування параметрів та конструкцій двошарових гумотросових конвеєрних стрічок для гірничих підприємств : дис... канд. техн. наук: 05.05.06. / Д. Л. Колосов. – Дніпропетровськ, 2002. – 164 с.

9. Бельмас І. В. Розподіл зусиль в причепному пристрої плоского тягового органу / І. В. Бельмас, Л. Д. Колосов // Математичне моделювання. – 2008. – № 1(18). – С. 33-35.
10. Ропай В. А. Шахтные уравновешивающие канаты : монография / В. А. Ропай. – Днепропетровск : Национальный горный университет, 2016. – 263 с.
11. Напряженное состояние плоской резинотросовой ленты на барабане подъемно-транспортной машины / І. В. Бельмас, Д. Л. Колосов, Н. А. Даніяров, А. І. Танцура, А. Ж. Карсакова // Труды университета. Карагандинский технический университет. – Казахстан, 2013. – № 3. – С. 75-77.
12. Бельмас І. В. Исследование напряженно-деформированного состояния резинотросового каната на участке перехода к трубчатой форме / І. В. Бельмас, Д. Л. Колосов, О. Л. Колосов // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2014. – № 12. – С. 48-55.
13. The stress-strain state of the flat rope of hoisting engine with considering their technical state / I. Belmas, D. Kolosov, O. Dolgov, G. Tantsura // Innovations in science and education: challenges of our time. Collection of scientific papers. – London : LASHE, 2017. – Pp. 191-196.
14. Бельмас І. В. Взаємодія гумотросового канату з приводним барабаном. Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки) / І. В. Бельмас, Д. Л. Колосов, О. І. Білоус. – Каменське : ДДТУ, Тематичний випуск. Машини і пластична деформація металу, 2018. – С. 168-173.
15. Zabolotny K. Definition of rating loading in spires of multilayer winding of rubber-rope cable / K. Zabolotny, Y. Panchenko // New Techniques and technologies in Mining. – 2010. – Pp. 223-229.

References

1. Storozhenko, L.I., & Hasii, H.M. (2016). Doslidzhennia napruzhenoho stanu elementiv vuzlovykh ziednan strukturno – vantovykh stale zalizobetonnykh pokryttiv na osnovi rezultativ modeliuвання umov yikh roboty [Investigation of the stress state of the elements of nodal joints of structural-cable steel reinforced concrete coatings based on the results of modeling the conditions of their work]. *V Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia – Urban Planning and Spatial Planning*, (61), 343-345.
2. Hasii, H.M. (2012). Napruzhenno-deformovanyi stan strukturno-vantovykh stalezalizobetonnykh konstruksii pokryttia [Stress-deformed state of structural-cable reinforced concrete structures of the coating]. *Problemy suchasnoho budivnytstva: Materialy Vseukrainskoi internet-konferentsii molodykh uchenykh i studentiv – Problems of modern construction: materials of the All-Ukrainian Internet conference of young scientists and students* (pp. 121-122).
3. De Sousa, Jr. J.B., & Caldas, R.B. (2005). Numerical analysis of composite steel-concrete columns of arbitrary cross section. *Journal of structural engineering*, 131(11), 1721–1730.
4. Storozhenko, L.I., & Gasii, G.M. (2014). Experimental research of strain-stress state of ferrocement slabs of composite reinforced concrete structure elements. *Metallurgical and Mining Industry*, (6), 40-42.
5. Storozhenko, L.I., Tymoshenko, V.M., Nyzhnyk, O.V., Hasii, H.M., & Murza, S.O. (2008). *Doslidzhennia i proektuvannia stalezalizobetonnykh strukturnykh konstruksii [Research and design of reinforced concrete structural structures]*. ASMI.
6. Storozhenko, L.I., Hasii, H.M., & Hapchenko, S.A. (2015). *Prostorovi stalezalizobetonni strukturno-vantovi pokryttia [Spatial reinforced concrete structural-cable coverings]*. ASMI.
7. Storozhenko, L.I., Tymoshenko, V.M., & Hasii, H.M. (2008). Rezultaty eksperymentalnykh doslidzhen stalezalizobetonnoho strukturnoho pokryttia [Results of experimental studies of reinforced concrete structural coating]. *Resursoekonomni materialy, konstruksii, budivli ta sporudy – Resource-saving materials, structures, buildings and structures*, (16), 376-381.
8. Kolosov, D.L. (2002). *Obgruntuvannia parametriv ta konstruksii dvosharovykh humotrosovykh konveiernykh strichok dlia hirnychkykh pidpriemstv [Substantiation of parameters and constructions of two-layer rubber-rope conveyor belts for mining enterprises]* [PhD, Dnipropetrovskiyi natsionalnyi hirnychiy universytet].
9. Belmas, I.V., & Kolosov, L.D. (2008). Rozpodil zusyly v prycheptomu prystroi ploskoho tiahovoho orhanu [Rozpodil zusyly in the trailer attachment of a flat traction body]. *Matematychni modeliuвання – Mathematical modeling*, 1(18), 33-35.
10. Ropai, V.A. (2016). *Shakhtnye uravnovesivayushchiye kanaty [Mine balancing ropes]*. Natsionalnyi gornyi universitet.

11. Belmas, I.V., Kolosov, D.L., Daniyarov, N.A., Tantcura, A.I. & Karsakova, A.Zh. (2013). Napriazhennoe sostoianie ploskoi rezinotrosovoi lenty na barabane podemno-transportnoi mashiny [Stress state of a flat rubber-cable belt on the drum of a hoisting and transport machine]. *Trudy universiteta – Proceedings of the University. Karaganda technical university*, (3), 75-77.

12. Belmas, I.V., Kolosov, D.L., & Kolosov, O.L. (2014). Issledovanie napriazhenno-deformirovannogo sostoiannia rezinotrosovogo kanata na uchastke perekhoda k trubchatoi forme [Investigation of the stress-strain state of a rubber-rope in the section of transition to a tubular form]. *Vestnik PNIPU. Geologiya. Neftgazovoe i gornoe delo – Vestnik PNIPU, no. Geology. Oil and gas and mining*, (12), 48-55.

13. Belmas, I., Kolosov, D., Dolgov, O., & Tantsura, G. (2017). The stress-strain state of the flat rope of hoisting engine with considering their technical state. *Innovations in science and education: challenges of our time. Collection of scientific papers* (pp. 191-196).

14. Belmas, I.V., Kolosov, D.L., & Bilous, O.I. (2018). Vzaiemodiia humotrosovoho kanatu z pryvodnym barabanom [Interaction of the rubber rope with the drive drum]. *Collection of scientific works of the Dnieper State Technical University (technical sciences)* (pp. 168-173).

15. Zabolotny, K., & Panchenko, Y. (2010). Definition of rating loading in spires of multilayer winding of rubber-rope cable. *New Techniques and technologies in Mining* (pp. 223-229).

Отримано 03.02.2022

UDC 624.016: 624.07.001.5

Yuliana Hupalo¹, Ivan Belmas², Olena Belous³, Anna Tantsuna⁴

¹Graduate Student of the Department of Mechanical Engineering and Welding Technology
Dnipro State Technical University (Kamyanske, Ukraine)

E-mail: uliana.gupalo@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7906-5402>

²Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering and Welding Technology
Dnipro State Technical University (Kamyanske, Ukraine)

E-mail: belmas09@meta.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2112-0303>

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering
Dnipro State Technical University (Kamyanske, Ukraine)

E-mail: bilouselena66@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6398-8843>

⁴PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering
Dnipro State Technical University (Kamyanske, Ukraine)

E-mail: hannaivan71@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8672-1153>

ALGORITHM FOR DETERMINING PERMISSIBLE DEVIATIONS OF CABLE ROPE CONNECTION NODES TO STRUCTURE

One of the directions of modern capital buildings is reduce the cost of manufacturing construction products and increase the reliability of its basic elements. In order to reduce the production time, manufacturing construction products should be made of flat reinforced concrete elements connected to the spatial structure by cables.

Due to the reduction of the amount of time for the production of the main elements of construction, it becomes possible to produce materials of low weight for the overlapping with the specified dimensions in the plan of structure. The main factor of safe operation is the calculation of the nodes connecting the cable ropes to structure.

Analysis of recent achievements and publications has shown that the problem of determining the stress-strain state of the cable rope is not solved, in the scientific literature insufficiently studied the effects of nodes on the state of the entire prefabricated structure.

The aim of the article is study the influence of defects on the stress-strain state of cable ropes and develop a method for determining allowable fluctuations of load and displacement forces between ropes for design nodes of connection.

Based on the method of mechanics of layered composite materials, a model is built, the influence of defects of its connection to the stable reinforced concrete floor of building on stress-strain state of cable rope is established. Expressions for determining the permissible rotation of the cross-section of the connected rope to the structure are formed. The mechanism of influence of the nature of rope connection to the structure on its stress-strain state is specified.

The expressions for determination of admissible deviations of knots of connection of a cable rope to a building design are received. This makes it possible to determine the permissible error of connecting the ends of the rope to the structure, which improves operational safety. The results can be considered reliable because they are obtained by methods of mechanics of composite materials using analytical results in a closed form.

Keywords: permissible deviations; stress-strain condition; cable-stayed rope; rotation angle; internal load forces.

References: 15.

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-1(27)-74-81

УДК 621.791.019

Володимир Гаєвський¹, Олег Гаєвський², Іван Пічугін³

¹кандидат технічних наук, асистент кафедри зварювального виробництва, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: v.gaevskiy@kpi.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3888-3107>

ResearcherID: [AAK-3955-2020](https://orcid.org/0000-0002-3888-3107). SCOPUS Author ID: [57221567034](https://orcid.org/0000-0002-3888-3107)

²кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри зварювального виробництва, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: ggoa@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0769-5661>

ResearcherID: [AAK-3936-2020](https://orcid.org/0000-0003-0769-5661). SCOPUS Author ID: [57221567160](https://orcid.org/0000-0003-0769-5661)

³здобувач вищої освіти, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: vano9@yahoo.com

ЗАСТОСУВАННЯ ІНДЕКСУ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ПРОЦЕСУ ПРИ ВИБОРІ ЗВАРЮВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

На основі аналізу результатів досліджень механічних характеристик зварювальних дротів, проведених із застосуванням індексу працездатності процесу зварювання, уперше показано, що зварювальні матеріали, які вважаються прийнятними для заданого виробу в процесі оцінювання за традиційним критерієм перебування всіх експериментально отриманих значень характеристик якості в межах специфікації можуть давати невідповідні значення показників на окремих ділянках зварного шва. Запропоновано використання індексу працездатності процесу зварювання при виборі зварювальних матеріалів як більш результативного для визначення прийнятності матеріалів.

Ключові слова: вибір зварювальних матеріалів; індекс працездатності процесу; валідація процесів зварювання; забезпечення якості зварювання; статистичні методи у зварюванні.

Табл.: 5. Бібл.: 8.

Актуальність теми дослідження. Зварювальні матеріали безпосередньо беруть участь у формуванні металу зварного шва, забезпечують захист електродних крапель, металу зварювальної ванни та зони кристалізації зварного шва. Вони значною мірою визначають хімічний склад та механічні властивості металу зварного шва та наявність дефектів, таких як пори, тріщини, шлакові включення та інші. Серед механічних властивостей металу зварного шва першочергове значення мають межа плинності (σ_T), тимчасовий опір руйнуванню (σ_B), відносне видовження (δ_5), відносне звуження (ψ) [1]. Створення нових конструкційних матеріалів, необхідність підвищення функційних характеристик зварних виробів призводить до розробки нових зварювальних матеріалів. Для кожного нового виробу слід аргументовано обирати зварювальні матеріали. Такий вибір часто супроводжується випробуваннями пілотних зразків, заварених досліджуваними зварювальними матеріалами.

Процеси зварювання характеризуються значною змінюваністю контрольованих характеристик якості зварних з'єднань [2], у тому числі, під впливом зварювальних матеріалів. Щорічне зростання номенклатури конструкційних матеріалів і, відповідно, можливих варіантів використання зварювальних матеріалів визначає актуальність застосування сучасних статистичних інструментів до прийняття рішень про прийнятність використання зварювальних матеріалів до заданого виробу.

Постановка проблеми. Змінюваність показників якості зварних з'єднань, навіть в умовах незмінності контрольованих показників процесу зварювання, призводить до можливості невиконання встановлених вимог до властивостей металу на окремих ділянках зварного шва. Тобто на окремих ділянках можливий вихід показників якості металу зварного шва за нижнє допустиме значення (LSL) або верхнє допустиме значення (USL). Визначення механічних властивостей металу зварного шва потребує руйнівних випробувань. Тому неможливо встановити значення механічних властивостей металу зварного шва безпосередньо у зварному шві виробу. Це робить процеси зварювання спеціальними процесами, які потребують застосування відповідних, зокрема, статистичних методів для їх валідації з врахуванням

змінюваності механічних властивостей. Підтвердження прийнятності зварювальних матеріалів до використання для заданого зварного виробу є складовою такої валідації процесу зварювання [2]. Застосування результативних статистичних методів валідації сприятиме зниженню ризиків застосування неприйнятних зварювальних матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Традиційним підходом до підтвердження прийнятності зварювальних матеріалів для заданого зварного виробу є проведення випробувань декількох зразків, заварених досліджуваним зварювальним матеріалом. При цьому критерієм прийнятності є перебування в межах допустимого всіх отриманих значень контрольованих характеристик. Недоліком такого підходу є те, що не враховується середньоквадратичне відхилення (σ), математичне сподівання (μ) контрольованих показників і, як наслідок, не виключається можливість виходу діапазону природного розсіювання ($\mu-3\sigma$; $\mu+3\sigma$) контрольованої характеристики за межі діапазону допустимих значень (LSL; USL). Цей недолік може бути усунений застосуванням до визначення прийнятності зварювальних матеріалів планів статистичного вибіркового контролю за альтернативною та безперервною ознакою.

Застосування планів (n-c) статистичного контролю за альтернативною ознакою [3] передбачає виготовлення статистично обґрунтованої кількості зразків зварних з'єднань (n), заварених досліджуваним зварювальним матеріалом. За умови, якщо кількість невідповідних значень (x) не перевищує приймального числа (c), то зварювальний матеріал є прийнятним. Плани контролю (n-c) визначаються міжнародними стандартами і залежать від об'єму партій (виробництва) і прийнятного рівня якості (AQL) зварювальних матеріалів. Недоліком такого підходу є доволі значні об'єми вибірок (n), які можуть суттєво зменшені використанням статистичного вибіркового контролю за кількісною ознакою.

Статистичний вибірковий контроль за кількісною ознакою [4] проводиться за планом (n-k_s). Такий підхід статистично обґрунтований, потребує відносно невеликих об'ємів вибірки, але він орієнтований на контроль окремих партій продукції і не містить ознак сучасної процесної орієнтації [5]. Між тим, на сучасних зварювальних підприємствах постачання зварювальних матеріалів розглядається саме як процес, передбачає партнерські довгострокові відносини з постачальниками [6], що дає підстави відноситися до поставок як до систематичного отримання зварювальних матеріалів, які є продукцією аутсорсингового процесу на підприємстві-постачальнику.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Загалом здатність процесу виконувати встановлені вимоги визначається за індексом працездатності процесу (C_{pk}) [7]. Проте результативність застосування C_{pk} до визначення можливості застосування зварювальних матеріалів до заданого виробу потребує вивчення.

Метою статті є визначення результативності оцінювання прийнятності зварювальних матеріалів для зварювання заданого виробу шляхом застосування індексу працездатності процесу зварювання досліджуваним матеріалом за контрольованим показником якості зварного шва.

Виклад основного матеріалу. Дослідження застосування індексу працездатності до визначення прийнятності зварювальних матеріалів проведено на прикладі вибору зварювального дроту для виготовлення балки мостового переходу. Основним матеріалом балки є сталь 10ХСНД (С390) по ГОСТ 6713-91 (аналог за стандартом EN 10025-5 сталь S355J0WP). Це низьколегована конструкційна сталь, що застосовується для виготовлення зварних конструкцій підвищеної міцності та корозійної стійкості. Для зварювання основних швів балки призначений спосіб зварювання під флюсом, для коротких швів – у захисних газах.

Вимоги до зварних швів балки мостового переходу встановлюють державні будівельні норми [8]. За окремими показниками механічних властивостей металу зварного шва (σ_T , σ_B , δ_5) державні будівельні норми встановлюють вимоги до мінімально допустимого значення (LSL).

Для зварювання під флюсом сталі 10ХСНД може бути застосований дріт суцільного перетину Хорда S2 (класифікація за ДСТУ EN ISO 14171-A – S 42 3 MS S2) та дріт суцільного перетину Хорда S2Ni1Mo (класифікація за ДСТУ EN ISO 14171-A – S-Z 46 6 AB S2Ni1Mo). Дріт Хорда S2 має перевагу в тому, що він дешевший. Визначення прийнятності до застосування розпочали саме з цього дроту.

Дослідження службових характеристик зварювальних дротів, проведені акредитованою лабораторією ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. Визначались механічні властивості металу зварного шва межа плинності (σ_T), тимчасовий опір руйнуванню (σ_B), відносне видовження (δ_5), відносне звуження (ψ). Для кожного варіанта застосування зварювальних матеріалів заварювалися по три стандартних зразки, тобто об'єм вибірки становив $n = 3$.

Для кожного досліджуваного сполучення зварювальних матеріалів визначені механічні властивості металу зварного шва за трьома зразками ($n=3$), Визначені статичні характеристики вибірки μ , σ , C_{pl} .

Значення математичного сподівання (μ) за вибіркою оцінювалось через середньоарифметичне значення (\bar{x}):

$$\mu = \bar{x} = \frac{\sum_n x_i}{n},$$

де x_i – i - те значення у вибірці об'ємом n .

Значення середньоквадратичного відхилення (σ) за вибіркою розраховувалось як стандартне відхилення (s):

$$\sigma = s = \frac{\sum_n \sqrt{(\bar{x} - x_i)^2}}{(n - 1)}.$$

Індекс працездатності процесу визначається як мінімальне значення між індексом працездатності по верхній границі і нижній границі допустимих значень. ДБН В.2.3.-26:2010 встановлює вимоги до механічних властивостей зварних швів по нижній границі допустимих значень (LSL). Значення індексу працездатності процесу зварювання по нижній границі (C_{pl}) за вибіркою розраховувалось:

$$C_{pl} = \frac{\mu - LSL}{3\sigma}.$$

Вважається, що процес здатен виконувати вимоги, якщо значенням індексу працездатності процесу перевищує 1,67 ($C_{pl}^0 \geq 1,67$).

У таблицях 1-2 наведені результати визначення можливості виконання вимог ДБН В.2.3.-26:2010 до конструкцій прогонових споруд металевих мостів сталі 10ХСНД при зварюванні дротом Хорда S2 під флюсом Flux Ok 10.71.

Таблиця 1

Стикове зварне з'єднання прокату 10ХСНД-12 (С390) 25 мм
за ГОСТ 19281-89 X-подібне оброблення крайків

Показник	Межа плинності σ_T , МПа	Тимчасовий опір руйнуванню σ_B , МПа	Відносне видовження δ_5 , %	Відносне звуження ψ , %
Зразок 1	371,2	527,2	34	69,8
Зразок 2	370,6	525,4	31,3	67,8
Зразок 3	374,6	527,2	32,3	67,9
LSL	390	530	16	
μ	372,1333	526,6	32,53333	68,5
σ	2,157159	1,03923	1,36504	1,126943
C_{pl}	-2,76083	-1,09055	4,037327	

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 2

*Стикове зварне з'єднання прокату 10ХСНД-2 (С390) 14 мм
за ГОСТ 6713-91 V-подібне оброблення крайків*

Показник	Межа плинності σ_T , МПа	Тимчасовий опір руйнуванню σ_B , МПа	Відносне видовження δ_5 , %	Відносне звуження ψ , %
Зразок 1	363,3	527	33,3	70,6
Зразок 2	364,9	503,7	34	74,5
Зразок 3	361,2	496,6	35,8	61,9
LSL	390	530	16	
μ	363,1333	509,1	34,36667	69
σ	1,855622	15,90314	1,289703	6,450581
C_{pl}	-4,82617	-0,43807	4,747002	

Джерело: розроблено авторами.

З табличних даних видно, що дріт Хорда S2 на всіх трьох зразках показав невиконання вимог до σ_T , σ_B при зварюванні з'єднань із сталі 10ХСНД-2 (С390). Значення індексу працездатності по цих показниках значно менші за 1,67 (вони від'ємні). Таким чином, як за традиційними критеріями, так і за індексом працездатності досліджуване сполучення зварювальних матеріалів не здатне виконувати вимоги щодо механічних властивостей зварних швів і не може бути рекомендованим до зварювання балок мостових переходів.

Для порівняння були визначені механічні характеристики зварних з'єднань при зварюванні дротом Хорда S2 під флюсом Flux Ok 10.71 сталі 09Г2С, які систематизовані в таблиці 3.

Таблиця 3

*Стикове зварне з'єднання прокату 09Г2С-12 (С345) 12 мм
за ГОСТ 19281-89 X-подібне оброблення крайків*

Показник	Межа плинності σ_T , МПа	Тимчасовий опір руйнуванню σ_B , МПа	Відносне видовження δ_5 , %	Відносне звуження ψ , %
Зразок 1	400,6	534,2	32,3	73,3
Зразок 2	396,7	534,1	31	71,5
Зразок 3	398,4	535,9	30,7	71,5
LSL	345	490	16	
μ	398,5667	534,7333	31,33333	72,1
σ	1,955335	1,011599	0,85049	1,03923
C_{pl}	9,131714	14,74013	6,009607	

Джерело: розроблено авторами.

Для сталі 09Г2С всі отримані значення межі плинності, тимчасового опору руйнування, відносного видовження перевищують мінімально допустимі значення контрольованих характеристик (LSL), а індекси працездатності C_{pl} значно перевищують мінімально допустиме значення 1,67. Отже, зварювання дротом Хорда S2 під флюсом Flux Ok 10.71 може бути рекомендовано для конструкцій прогонових споруд металевих мостів, виготовлених зі сталі 09Г2С. Однак ця сталь не використовується для заданих балок мостових переходів.

Можна зробити загальний висновок, що дріт Хорда S2 при зварюванні під флюсом Flux Ok 10.71 може бути використаний для сталі 09Г2С і не рекомендується для використання для сталі 10ХСНД. Цей висновок однаковий як при використанні традиційного критерію прийнятності зварювальних матеріалів, так і при використанні як критерію індексу працездатності процесу зварювання. Розглянемо можливість використання зварювального дроту Хорда S2Ni1Mo.

У таблиці 4 наведені результати визначення можливості виконання вимог ДБН В.2.3.-26:2010 до конструкцій прогонових споруд металевих мостів при зварюванні дротом Хорда S2Ni1Mo під флюсом Flux Ok 10.71.

Таблиця 4

*Стикове зварне з'єднання прокату 10ХСНД-2 (С390) 20 мм
за ГОСТ 6713-91 Х-подібне оброблення крайків*

Показник	Межа плинності σ_T , МПа	Тимчасовий опір руйнуванню σ_B , МПа	Відносне видов- ження δ_5 , %	Відносне зву- ження ψ , %
Зразок 1	522,7	649	25,4	61,9
Зразок 2	516,8	643,8	23,3	63,9
Зразок 3	523,6	648,6	26,9	64,2
LSL	390	530	16	
μ	521,0333	647,1333	25,2	63,33333
σ	3,693688	2,893671	1,808314	1,250333
C_{pl}	11,82498	13,49305	1,695871	

Джерело: розроблено авторами.

Усі отримані значення механічних властивостей (σ_T , σ_B , δ_5) значно перевищують значення LSL. При цьому C_{pl} – індекси працездатності процесів зварювання за механічними властивостями металу шва суттєво перевищують мінімально допустимий рівень 1,67. Таким чином, зварювання сталі 10ХСНД товщиною 20 мм з Х-подібним розробленням крайків, дротом Хорда S2Ni1Mo під флюсом Flux Ok 10.71 може бути рекомендоване для конструкцій прогонових споруд металевих мостів.

Для зварювання в захисних газах сталі 10ХСНД може бути застосований дріт суцільного перетину Х-3Si1 у суміші газів М21. У таблиці 5 наведені результати визначення можливості виконання вимог ДБН В.2.3.-26:2010 до конструкцій прогонових споруд металевих мостів при зварюванні дротом Х-3Si1 у суміші газів М21.

Таблиця 5

*Стикове зварне з'єднання прокату 10ХСНД-2 (С390) 14 мм
за ГОСТ 6713-91 V-подібне оброблення крайків*

Показник	Межа плинності σ_T , МПа	Тимчасовий опір руйнуванню σ_B , МПа	Відносне видов- ження δ_5 , %	Відносне зву- ження ψ , %
Зразок 1	495,3	600,1	23,3	59,9
Зразок 2	493,7	658,8	29,5	70,7
Зразок 3	524	644,4	29,1	71,1
LSL	390	530	16	
μ	504,3333	634,4333	27,3	67,23333
σ	17,05061	30,59286	3,46987	6,354001
C_{pl}	2,235176	1,137883	1,085535	

Джерело: розроблено авторами.

Розглянемо результати випробувань за показниками механічних властивостей окремо. За межею плинності (σ_T) всі отримані значення перевищують мінімально допустиме (390 МПа), індекс працездатності по межі плинності ($C_{pl} = 2,235$) також перевищує 1,67. Таким чином, за межею плинності зварювання дротом Х-3Si1 у суміші газів М21 може бути використане при виготовленні балок мостового переходу. За тимчасовим опором руйнування (σ_B) та відносним подовженням (δ_5) всі отримані значення перевищують мінімально допустимі відповідно 530 МПа та 16 % і за традиційним підходом ц ситуація є прийнятною. Однак індекс працездатності процесу і для тимчасового опору руйнуванню і для відносного видовження менші за 1,67 (1,137 і 1,085 відповідно). Це означає, що не зважаючи на відсутність експериментальних даних про недосягнення мінімально допустимих значень σ_B та δ_5 при виконанні зварювання дротом Х-3Si1 у суміші газів М21 можуть бути ділянки зварного шва зі значеннями σ_B та δ_5 меншими за мінімально допустимими.

Отже, за традиційними критеріями зварювання дротом X-3Si1 у суміші газів M21 може бути рекомендований для балок мостових переходів і не рекомендується за індексом працездатності процесу зварювання по тимчасовому опору руйнування і відносному подовженню.

Висновки. Проведені дослідження показали, що результати оцінювання прийнятності зварювальних матеріалів за традиційним критерієм (перебування всіх отриманих експериментально даних в межах діапазону допустимих значень) на 87 % співпадають з результатами оцінювання за індексом працездатності процесу ($C_{pk} \geq 1,67$). При дослідженні прийнятності до використання для зварювання заданого виробу дроту X-3Si1 класичний підхід показав прийнятність зварювального дроту. При цьому індекс працездатності процесу зварювання за тимчасовим опором руйнування (σ_b) та відносним подовженням (δ_5) мав значення, менші за 1,67, що свідчить про можливість невиконання вимог за цими показниками на окремих ділянках зварного шва. Застосування класичного підходу не враховує діапазонів природного розсіювання контрольованих характеристик і, в окремих випадках, може призводити до помилкових висновків про прийнятність зварювальних матеріалів. Застосування при виборі зварювальних матеріалів індексу працездатності процесу зварювання як критерію прийнятності для застосування матеріалів до заданого виробу підвищує результативність оцінювання у порівнянні з класичним підходом. Індекс працездатності процесу зварювання може бути рекомендований для статистично аргументованого вибору зварювальних матеріалів для заданого виробу, що сприятиме зменшенню ризиків застосування неприйнятних для заданого виробу зварювальних матеріалів. Ризики застосування неприйнятних зварювальних матеріалів потребують подальшого вивчення.

Список використаних джерел

1. Kinetics of strains during single-pass fusion welding of a symmetrical butt joint [Electronic resource] / V. M. Prokhorenko, D. V. Prokhorenko, C. O. Zvorykin, S. F. Hainutdinov // *Technological Systems*. – 2019. – № 3(88). – Pp. 73-84. – Accessed mode: <https://dx.doi.org/10.29010/88.11>.
2. Analysis of the influence of system welding coordination on the quality level of joints [Electronic resource] / O. Haievskiyi, V. Kvasnytskyi, V. Haievskiyi, C. Zvorykin // *Eastern-European journal of enterprise technologies*. – 2020. – Vol. 5, No. 1(107). – Pp. 98-109. – Accessed mode: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.204364>.
3. ISO 2859-1:1999/AMD1:2011 Sampling procedures for inspection by attributes – Part 1: Sampling schemes indexed by acceptance quality limit (AQL) for lot-by-lot inspection - Amendment 1 [Electronic resource]. – Geneva : International Organization for Standardization, 2011. – 104 p. – Accessed mode: <https://www.iso.org/ru/standard/53053.html>.
4. ISO 39511:2018 Sequential sampling plans for inspection by variables for percent nonconforming (known standard deviation) [Electronic resource]. – Geneva : International Organization for Standardization, 2018. – 98 p. – Accessed mode: <https://www.iso.org/standard/67139.html>.
5. Harasawa H. Quality assurance and quality management [Electronic resource] / H. Harasawa // *Journal of the Japan Welding Society*. – 2012. – № 81(5). – Pp. 434-436. – Accessed mode: <https://doi.org/10.2207/jjws.81.434>.
6. Otsuka H. Quality assurance of welded steel of Tokyo sky tree [Electronic resource] / H. Otsuka, Y. Minoda, K. Nagayama // *Journal of the Japan Welding Society*. – 2013. – № 82(4). – Pp. 252-257. – Accessed mode: <https://doi.org/10.2207/jjws.82.252>.
7. Costa A.R. Six Sigma: Main Metrics and R Based Software for Training Purposes Purposes and Practical Industrial Quality Control [Electronic resource] / Ana Rita Costa, Carla Barbosa, Gilberto Santos, M. Rui Alves // *Quality Innovation Prosperity*. – 2019. – № 23(2). – Pp. 83-100. – Accessed mode: <https://doi.org/10.12776/qip.v23i2.1278>.
8. ДБН В.2.3-26:2010 Споруди транспорту. Мости та труби. Сталеві конструкції. Правила проектування. – К. : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2010. – 201 с.

References

1. Prokhorenko, V.M., Prokhorenko, D.V., Zvorykin, C.O., Hainutdinov, S.F. (2019). Kinetics of strains during single-pass fusion welding of a symmetrical butt joint. *Technological Systems*, 3(88), 73-84. DOI: <https://dx.doi.org/10.29010/88.11>.
2. Haievskiy, O., Kvasnytskyi, V., Haievskiy, V., Zvorykin, C. (2020). Analysis of the influence of system welding coordination on the quality level of joints. *Eastern-European journal of enterprise technologies*, 5(1(107)), 98-109. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.204364>.
3. International Organization for Standardization. (1999). Sampling procedures for inspection by attributes – Part 1: Sampling schemes indexed by acceptance quality limit (AQL) for lot-by-lot inspection – Amendment 1 (ISO 2859-1:1999/AMD1:2011). <https://www.iso.org/ru/standard/53053.html>.
4. International Organization for Standardization. (2018). Sequential sampling plans for inspection by variables for percent nonconforming (known standard deviation) (ISO 39511:2018). <https://www.iso.org/standard/67139.html>.
5. Harasawa, H. (2012). Quality assurance and quality management. *Journal of the Japan Welding Society*, 81(5), 434-436. <https://doi.org/10.2207/jjws.81.434>.
6. Otsuka, H., Minoda, Y., Nagayama, K. (2013). Quality assurance of welded steel of Tokyo sky tree. *Journal of the Japan Welding Society*, 82(4), 252-257. <https://doi.org/10.2207/jjws.82.252>.
7. Ana Rita Costa, Carla Barbosa, Gilberto Santos, M. Rui Alves (2019). Six Sigma: Main Metrics and R Based Software for Training Purposes Purposes and Practical Industrial Quality Control. *Quality Innovation Prosperity*, 23(2), 83-100. <https://doi.org/10.12776/qip.v23i2.1278>.
8. National Transport University. (2010). Sporudy transportu. Mosty ta truby. Stalevi konstruktsii. Pravyla proektuvannia [Transport facilities. Bridges and pipes. Steel structures. Design rules] (DBN B.2.3-26:2010). Ministry of Regional Development, Construction and Housing of Ukraine.

Отримано 24.01.2022

UDC 621.791.019

Volodymyr Haievskiy¹, Oleh Haievskiy², Ivan Pichuhin³

¹PhD in Technical Sciences, Assistant of the Department of Welding
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)
E-mail: v.gaevskiy@kpi.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3888-3107>
ResearcherID: [AAK-3955-2020](https://orcid.org/0000-0002-3888-3107). SCOPUS Author ID: [57221567034](https://orcid.org/0000-0002-3888-3107)

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Welding
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)
E-mail: ggoa@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0769-5661>
ResearcherID: [AAK-3936-2020](https://orcid.org/0000-0003-0769-5661). SCOPUS Author ID: [57221567160](https://orcid.org/0000-0003-0769-5661)

³Applicant for Higher Education
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)
E-mail: vano9@yahoo.com

APPLICATION OF THE CAPABILITY INDEX OF ONE PROCESS AT CHOOSING WELDING MATERIALS

The lists of construction materials, welding materials, welded products and areas of application of welding are constantly increasing. For each welded product should be chosen welding, taking into account the variability of the characteristics of welds. This determines the urgency of research on the effectiveness of modern statistical methods on the choice of welding materials.

Welding processes are special processes that require validation in the face of changing values of the quality characteristics of welded joints. Existing approaches to determining the acceptability of welding materials do not exclude the possibility of non-compliance with the requirements for welds in some areas.

Analysis of the literature shows that the traditional approach to confirming the acceptability of welding materials for a given welded product, based on the criterion of finding all experimentally obtained values within the range of acceptable values. This approach does not take into account the mathematical expectation and the standard deviation of the quality of welds. The application of statistical sampling requires large sample sizes and focuses on the acceptance or rejection of individual batches of welding consumables. However, in modern conditions, the supply of welding consumables should be treated as a process.

In the general case, the ability of the process to meet the established requirements is determined by the index of efficiency of the process. However, the effectiveness of this approach to determine the possibility of applying welding materials to a given product needs to be studied.

The research objective is to determine the effectiveness of assessing the acceptability of welding materials for welding a given product by applying the index of efficiency of the welding process of the test material on controlled quality indicators of the weld.

A study of the application of the efficiency index to determine the acceptability of welding materials in the selection of welding wire for the manufacture of bridge beams from steel S355J0WP. State building norms ДБН В.2.3-26: 2010 establish requirements for the minimum allowable value (LSL) of welds of the bridge beam on certain indicators of mechanical properties of the weld metal.

The use of the traditional approach and performance index was investigated to confirm the acceptability for the bridge beam welding with Chord wire S2 flux flux Ok 10.71, Chord S2Ni1Mo flux wire Flux Ok 10.71, X-3Si1 wire in a mixture of M21 gases. The mechanical properties of the weld metal were determined by the yield strength (σ_m), temporary fracture toughness (σ_6), relative elongation (δ_5), relative narrowing (ψ).

According to both the traditional approach and the performance index, the Chord wire S2 is not acceptable, and the Chord wire S2Ni1Mo is acceptable for submerged arc welding Flux Ok 10.71 bridge beams. Thus, when welding under Flux Ok 10.71, both approaches gave the same result. However, for X-3Si1 wire welding in a mixture of M21 gases, the studied approaches gave different conclusions. According to the traditional approach, welding with X-3Si1 wire in a mixture of M21 gases is acceptable, and according to the process performance index, it is not acceptable for the bridge crossing beam.

Studies have shown that the results of assessing the acceptability of welding materials by the traditional criterion (stay of all experimentally obtained data within the range of allowable values) by 87% coincide with the results of the capability of the process index ($C_{pk} \geq 1.67$). In the study of the acceptability of the use of X-3Si1 wire for welding a given product, the classical approach showed the acceptability of the welding wire. The efficiency of the welding process on the temporary resistance to failure (σ_6) and elongation (δ_5) had values less than 1.67, which indicates the possibility of non-compliance with these indicators in some areas of the weld. The index of efficiency of the welding process can be recommended for statistically substantiated choice of welding materials for a given product, which will reduce the risks of using unacceptable welding materials for a given product.

Keywords: choice of welding materials; process capability index; validation of welding processes; ensuring the quality of welding; statistical methods in welding.

Table: 5. References: 8.

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-1(27)-82-91

УДК 621.375.826:621

Віктор Романенко¹, Леонід Головка², Михайло Блощизин³, Віктор Дубнюк⁴

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: romvzv@gmail.com, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1918-7090>

²доктор технічних наук, професор кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: leongolovko@gmail.com, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7803-0312>, **SCOPUS Author ID:** [6603561129](https://orcid.org/0000-0001-7803-0312)

³кандидат 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>

⁴старший викладач кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: v.dubniuk@kpi.ua, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6146-9265>

ВИГОТОВЛЕННЯ БІМЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СПЕЦІАЛЬНИХ УТРИМУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Наведено аналіз існуючих способів та представлено нові комбіновані процеси виготовлення біметалів, де на поверхні його функціональної складової шляхом лазерного або дугового зварювання створюється спеціальна регулярна конструкція з утримувачів, підготовлена складова розміщується в піщаній формі. На поверхню функціональної складової через отвір в формі із дозатору подається розплав конструктивної складової біметалу. Повне заповнення технологічного простору між утримувачами розплавленим металом гарантує надійне скріплення пластин біметалу. Висока міцність зчеплення складових біметалу і рівномірності її розподілу по площині з'єднання забезпечується заданим розміщенням конструкцій утримувачів.

Ключові слова: біметал; комбінований процес; розплав; функціональна конструктивна складова; міцність зчеплення.
Рис.: 12. Бібл.: 15.

Актуальність теми дослідження. У сучасному виробництві велика кількість металевих конструкцій різного призначення при експлуатації відчувають одночасний вплив механічних навантажень і зовнішнього агресивного середовища. Для конструкцій, де потрібне забезпечення високого рівня міцності разом із забезпеченням опору різним видам абразивного зношування і корозійного руйнування стає неможливим підібрати сталь або сплав, які б поєднували в собі всі необхідні якості, не вдаючись до невиправданих як із матеріального, так і з економічного погляду затрат. Технологічне оснащення відіграє важливу роль у зазначених випадках стає доцільним використання біметалевих матеріалів, до складу яких входять основна та робоча пластини. При цьому основний шар відповідає за несучу здатність конструкції, але від нього не вимагається високої корозійної стійкості або зносостійкості. Розрахунок міцності конструкцій з біметалевої сталі ведеться, виходячи тільки з товщини шару основи. Робочий шар несе чисто захисні функції, у зв'язку з чим, він повинен бути виконаним із корозійностійкого або зносостійкого матеріалу.

Постановка проблеми. При проєктуванні технології виготовлення біметалів нами була поставлена та вирішена задача вдосконалення способу ливарного виготовлення біметалевих матеріалів, при якому забезпечувався би достатньо високий рівень міцності зчеплення пластин біметалу, щоб унеможливити роз'єднання пластин біметалу при його використанні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням функціонального аналізу технічних систем присвячено достатню кількість наукових праць [1-11].

Одним із альтернативних методів для отримання біметалів є технологія, в основі якої лежить нанесення розплавленого металу на поверхню основи виробу методом електрошлакового наплавлення. При цьому оплавлення основного і розплавлення присадного

(робочого) металів відбувається за рахунок тепла, що виділяється в шлаковій ванні при протіканні через неї електричного струму [1]. Цей спосіб забезпечує рівномірність товщини і хімічного складу наплавленого робочого шару, підвищення якості його поверхні при збереженні високої міцності з'єднання шарів біметалу. Проте при цьому способі спостерігається утворення кристалізаційних тріщин і інших дефектів у самому робочому шарі й на його поверхні.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що є недоліки наявних способів переважно пов'язані з не достатнім рівнем міцності зчеплення пластин біметалу, тобто є можливість роз'єднання пластин біметалу при його використанні.

Метою статті є визначення можливостей підвищення міцності зчеплення біметалевих деталей із можливістю спрощення технологічної реалізації процесу.

Виклад основного матеріалу. Найбільш широко для виготовлення біметалевих матеріалів застосовується метод ливарного виготовлення біметалів, що включає систему отримання біметалічного виливка зі зносостійким поверхневим шаром при заливанні розплавленого робочого металічного матеріалу одного складу (наприклад, неіржавіючої сталі) у форму, в якій встановлена пластина основи із металічного матеріалу іншого складу (наприклад, сталі 3, сталі 10 або 20) [2; 3]. Цей спосіб на відміну від попереднього дозволяє отримувати на біметалі корозійностійкий шар потрібної товщини, без утворення кристалізаційних тріщин і інших дефектів у самому робочому шарі й на його поверхні. Проте при отриманні біметалічного виливка має місце мала глибина перехідного шару для зчеплення основного та робочого металу.

При реалізації запропонованого методу ми враховували, що оскільки глибина проникнення розплаву основи в робочу пластину при отриманні біметалу за звичайних умов незначна, а в деяких випадках, коли температура плавлення робочої пластини вища за температуру плавлення металу основи, і зовсім відсутня, то потрібен додатковий елемент для надійного з'єднання пластин біметалу.

Таким елементом може служити спеціальний утримувач, який виготовлений, наприклад, із дроту діаметром d (рис. 1). Діаметр дроту вибирається з тих міркувань, що дрот не повинен повністю розплавлятися під час заливання та подальшій кристалізації рідкого металу основи. При цьому допускається часткове підплавлення цього елемента. Експериментальні дослідження показують, що дрот діаметром d більше за 3,0 мм відповідає таким вимогам.

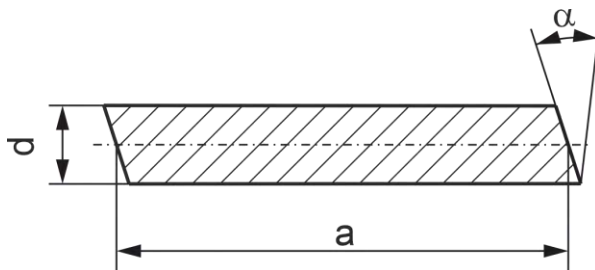


Рис. 1. Приклад утримувача, виготовленого з дроту [2; 3]

Дрот для кращого подальшого утримування шару основи повинен бути нахиленим під невеликим кутом α до поверхні робочої пластини. При куті в $10...30^\circ$ рідкий метал буде повністю охоплювати всю поверхню дроту та забезпечить повний і надійний обхват нахиленого утримувача шаром металу основи після кристалізації та охолодження. Довжина ж дроту a підбирається такою, щоб забезпечити надійне прикріплення робочої пластини цим утримувачем після його схоплення шаром основи. При цьому нахилені утримувачі повинні бути віддалені від зовнішнього краю біметалу на невелику відстань, наприклад, на

1...3 мм залежно від товщини пластини основи. Кількість потрібних утримуючих елементів визначається розмірами біметалу, що виготовляється. При цьому було встановлено, що утримувачі потрібно закріплювати на поверхні основи на відстані 50...100 мм один від одного.

Прикріплення утримувача 1 до поверхні робочої пластини 2 може бути виконане за допомогою, наприклад, електродугового зварювання плавким електродом 3 або лазерним випромінюванням 4 (рис. 2) [2; 3; 4; 5]. Для цього утримуючий елемент встановлюють та попередньо фіксують (наприклад, плоскогубцями) в потрібному місці, з нахилом під потрібним кутом (10...30°), та його край надійно приварюють до поверхні робочої пластини. Режими зварювання підбирають такими, щоб внутрішня поверхня робочої пластини розплавлялась не більше, ніж на половину її товщини. Це необхідно, щоб протилежна (експлуатаційна) поверхня робочої пластини не псувалась. Можлива лише поява на ній кольорів мінливості. При цьому потрібно поперемінно змінювати нахил утримувачів в різні сторони по всій площині робочої пластини, що забезпечить більш надійне зчеплення шарів біметалу [6 - 13]. Крім того, на краях робочої пластини нахил утримувачів краще виконувати в сторону краєк цієї пластини, та розташовувати утримуючі елементи як можна ближче до країв. Це забезпечить мінімальні зазори між пластинами біметалу на його кромках.

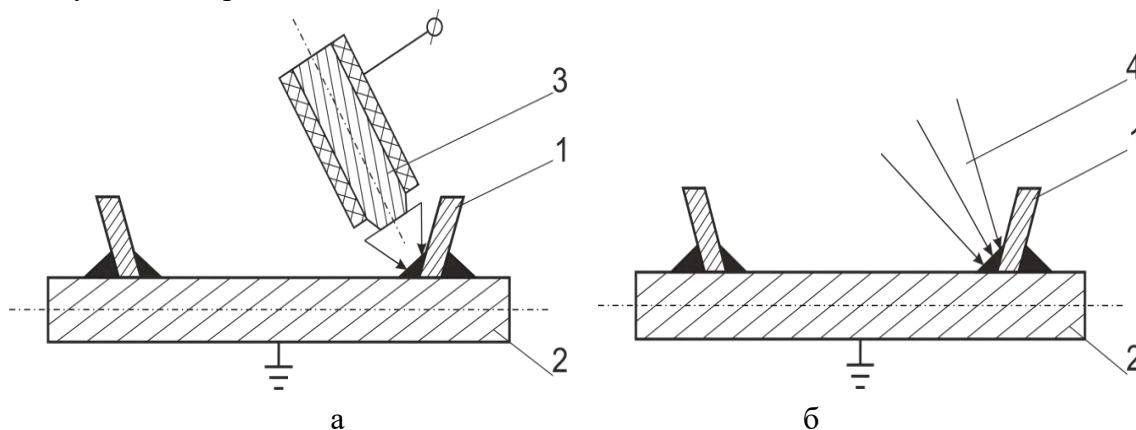


Рис. 2. Приєднання утримувача до робочої пластини за допомогою електродугового зварювання плавким електродом (а) або лазерного випромінювання (б) [2; 3; 4; 5]

У подальшому для отримання біметалу робочу пластину 2 встановлюють (при орієнтуванні утримувачів 1 ввєрх) у форму, у яку ущільнюють формувальну суміш 4, та закривають верхньою напівформою 5 (рис. 3). Розплав металу основи 6 через ливникову систему 7 подають у порожнину форми для створення (після охолодження) основи біметалу. В порожнині форми рідкий метал основи рухається по робочій пластині 2 (стрілка 8) зі швидкістю, рівною швидкості вільного розтікання рідкого металу, поступово омиваючи та обволікаючи всі утримувачі 1. У результаті після кристалізації та затвердіння рідкого металу отримують основу біметалу, яка має надійне з'єднання з робочою пластиною. Приварені до робочої пластини та закристалізовані в пластині основи утримуючі елементи забезпечують це. Наприкінці технологічні напливи металу від ливникової системи необхідно зачистити, наприклад, зішліфувати.

Для спрощення та здешевлення процесу виготовлення біметалічних матеріалів також був запропонований спосіб з використанням вже готової пластини основи потрібної товщини, а процес заливки щоб зводився лише до заповнення невеликих технологічних отворів в цій пластині. Це набагато скорочує енергозатрати, ніж при отриманні суцільного шару основи ливарним методом [13; 14; 15].

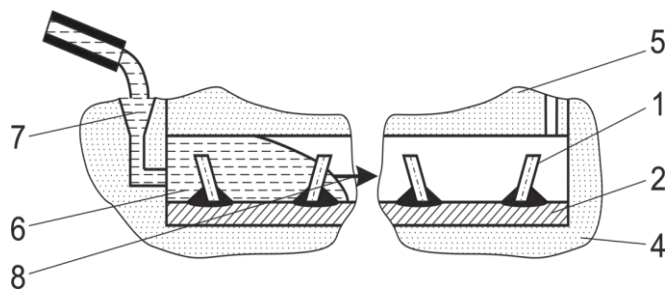


Рис. 3. Заливання форми металом основи [2; 3]

Запропонований спосіб реалізується таким чином. У пластині основи 1 завдяки попередній розмітці або використанню шаблонів виконують ступінчасті технологічні отвори 2 (рис. 4). Діаметр вузької частини технологічного отвору повинен бути достатнім для вільного затікання рідкого металу по всій глибині цього отвору. Діаметр же ширшої частини технологічного отвору повинен бути більшим вузької частини, наприклад, в 1,5 раза, а глибина широкої частини може складати 30...50 % глибини всього технологічного отвору в залежності від товщини пластини основи.

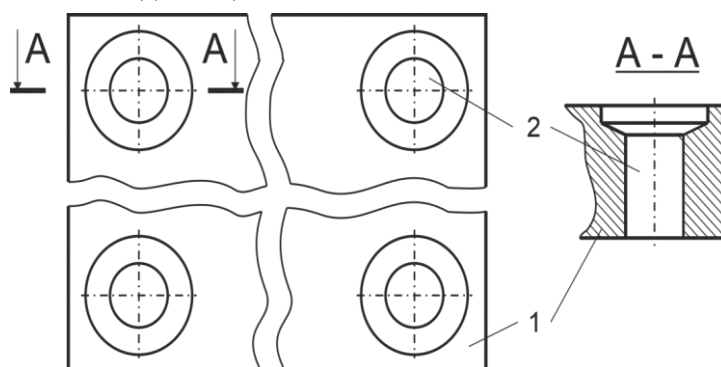


Рис. 4. Виконання ступінчатих технологічних отворів у пластині основи та поперечний перетин цих отворів [2; 4; 5]

Пластину основи кладуть на робочу пластину та маркують центри технологічних отворів на останній. Знімають пластину основи та до робочої пластини 3 в місцях маркування вертикально встановлюють та кріплять утримувачі 4, наприклад, електродуговим зварюванням плавким електродом 5 (рис. 5). По довжині утримуючі елементи можуть бути декілька довшими товщини пластини основи (для зручності їх подальшого згинання).

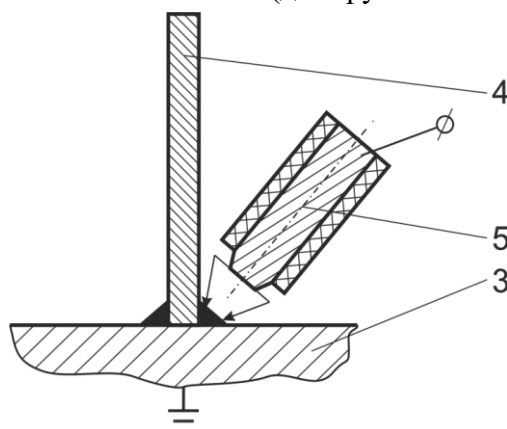


Рис. 5. Приєднання утримуючого елемента до робочої пластини за допомогою електродугового зварювання [2; 3; 4; 5]

Після цього пластину основи 1 встановлюють на робочу пластину 3 ширшою частиною технологічного отвору 2 назвни так, щоб утримуючі елементи зайшли в технологічні отвори (рис. 6) та тимчасово скріплюють пластини 1 та 3 між собою, наприклад, за допомогою струбцин. Для забезпечення надійного зчеплення пластин біметалу за рахунок неможливості виходу утримувачів із технологічних отворів після заливки та затвердіння металу, що заливається, до утримуючих елементів потрібно прикласти зусилля 6 для їх згинання в межах технологічних отворів 2. Це можна здійснити, наприклад, за допомогою молотка. При цьому форма зігнутого утримувача не повинна заважати переміщенню рідкого металу при заливці по всьому об'єму технологічного отвору.

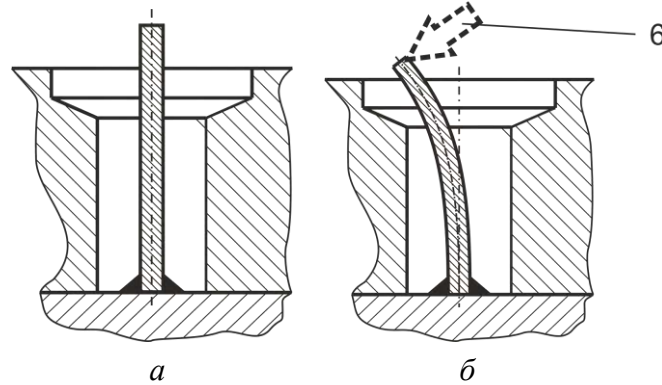


Рис. 6. Встановлення пластини основи на робочу пластину (а) та згинання кожного утримуючого елемента в межах технологічного отвору (б) [2; 4; 5]

За допомогою засобу для заливки розплавленого металу 7 (наприклад, невеликого тигля) рідкий метал основи 8 заливають в кожний технологічний отвір 2 так, щоб цей метал заповнював отвір 2 врівень із поверхнею пластини основи 1 (рис. 7). Після затвердіння рідкого металу в кожному технологічному отворі отримують надійне з'єднання 9 пластин біметалу. Дійсно, приварені до робочої пластини та закристалізовані в пластині основи зігнуті утримуючі елементи разом зі ступінчатою формою технологічних отворів забезпечують це. Наприкінці напливи металу в місцях технологічних отворів потрібно зачистити.

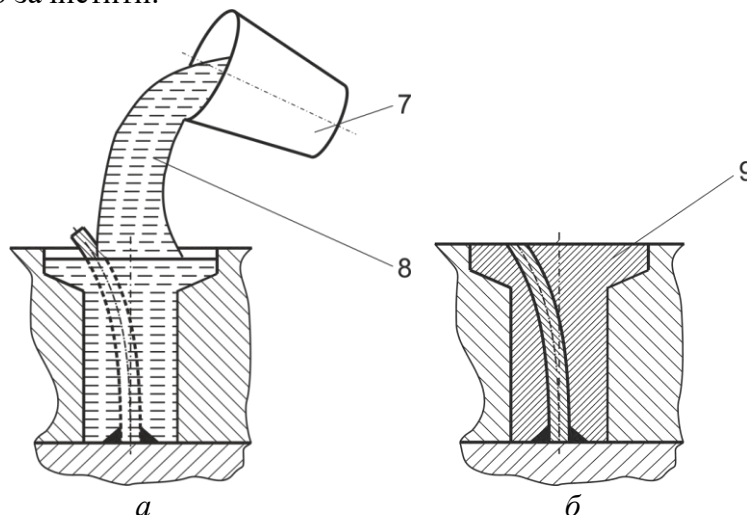


Рис. 7. Заливка металу основи в кожний технологічний отвір (а) з подальшим створенням монолітної пластини основи (б) [2; 4; 5]

Кількість потрібних утримуючих елементів визначається розмірами біметалу, що виготовляється. При цьому було встановлено, що утримувачі потрібно закріпляти на поверхні робочої пластини на відстані 50...100 мм один від одного.

Нами розроблений також найбільш дешевий та простий метод отримання біметалевих пластин без потреби в ливарних операціях та обладнанні. Для цього в пластині основи 1 також виконують технологічні отвори 2. Діаметр отвору 2 підбирають декілька більшим діаметра утримуючого елемента так, щоб останній вільно заходив у отвір 2 з урахуванням розширення, що виникає в нижній частині утримувача при його приварці до робочої пластини. Як правило, діаметр технологічного отвору виконують на 120...150 % більшим за діаметр утримуючого елемента. Кількість та спосіб розміщення отворів 2 на пластині основи 1 можуть бути обрані, відповідно до потреб міцності з'єднання пластин біметалу.

Як і в попередньому способі, пластину основи кладуть на робочу пластину та маркують центри технологічних отворів на останній. Знімають пластину основи та до робочої пластини 3 у місцях маркування вертикально встановлюють та приварюють утримувачі 4 за допомогою, наприклад, електродугової зварки плавким електродом 5 (рис. 5). По довжині утримувачі можуть бути декілька довшими товщини пластини основи (для зручності їх подальшого приварювання до цієї пластини). Пластину основи встановлюють на робочу пластину так, щоб утримуючі елементи зайшли в технологічні отвори та тимчасово скріплюють пластини між собою.

За допомогою плавкого електроду приварюють верхню частину утримуючого елемента до зовнішньої кромки технологічного отвору (рис. 8). Після охолодження та кристалізації зварної ванни отримуємо зварний шов 6 між пластиною основи та утримувачем. Загальна ж кількість таких з'єднань і забезпечить високий рівень міцності зчеплення пластин біметалу. Виступаючі над поверхнею пластини основи напливи металу зварного шва 6 усуваються, наприклад, зішліфуються урівень із поверхнею цієї пластини.

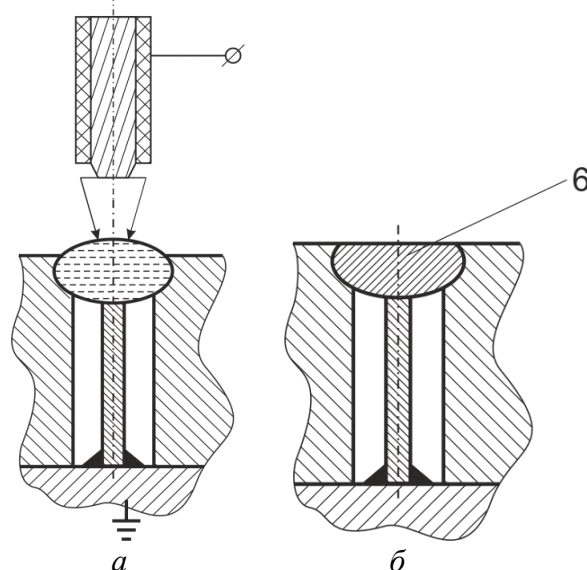


Рис. 8. Приварювання утримуючого елемента до кромки технологічного отвору (а) з наступним зачищенням пластини основи (б) [5; 11]

Нами були проведені пошукові експерименти по отриманню пластин біметалу при заливці шару основи з використанням утримуючих елементів. Усі зразки показали надійне з'єднання між пластинами біметалу. Можемо з певністю констатувати, що така технологія повністю готова для промислового використання. На рис. 9 наведено розріз готового біметалу при зчепленні його пластин утримуючими елементами, де робоча пластина розташована зверху, а пластина основи – знизу. Слід зауважити повне прилягання пластин біметалу одна до одної. При цьому має місце надійне зчеплення між шарами біметалу.



Рис. 9. Розріз біметалу, виконаного при заливці робочого шару та використанні утримуючих елементів [5; 11]

На рис. 10 представлено розріз біметалу в місцях встановлення утримувачів, сфотографований під різним кутом для кращого спостереження місць зчеплення. На фото видно повний обхват утримуючих елементів створеним шаром пластини основи (ця пластина – зверху) при надійному приварюванні утримувачів до робочої пластини (нижня пластина).



Рис. 10. Розріз біметалу в місцях встановлення утримувачів, сфотографований під різним кутом спостереження [3; 5; 11]

Спосіб виготовлення біметалів при використанні технологічних отворів у пластині основи та при застосуванні утримуючих елементів теж забезпечує досить надійне зчеплення між пластинами біметалу. Крім того при цій технології набагато знижуються енергозатрати на таке виробництво. Розріз одного з таких технологічних отворів представлений на рис. 11, а. Добре видно повне заповнення технологічного отвору залитим металом, що гарантує надійне скріплення пластин біметалу.

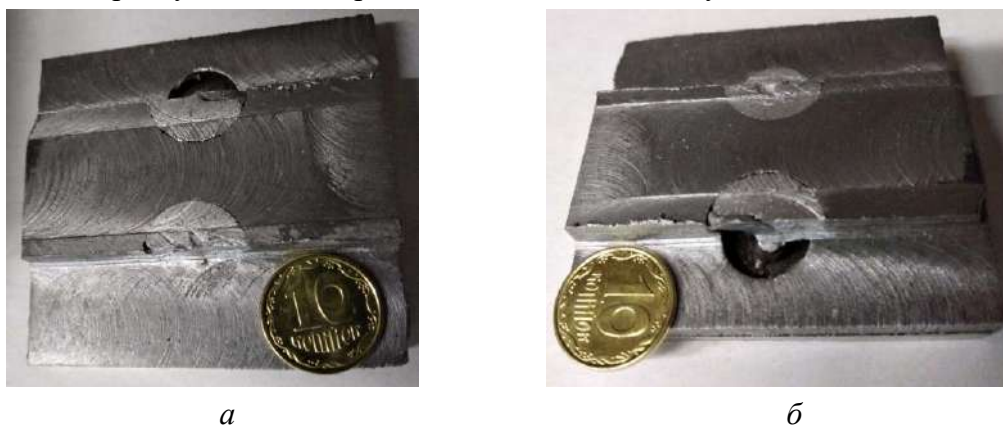


Рис. 11. Розріз біметалу з утримуючими елементами всередині технологічних отворів при їх заливці (а) та частковому заварюванні (б) [3; 5; 11]

Розріз з'єднання пластин біметалу за допомогою приварювання плавким електродом верхньої частини утримуючого елемента до зовнішньої кромки технологічного отвору представлений на рис. 11, б. На фото видно, що лише верхня частина утримуючого елемента приплавлена до пластини основи. Але такого зчеплення достатньо для надійного скріплення пластин біметалу, тоді як вартість такої технології менша від попередніх.

На верхній поверхні пластини основи (рис. 12) добре видно сліди заплвлених технологічних отворів після електродугового зварювання в результаті зачищення цієї поверхні шліфмашинкою, чого повністю достатньо для подальшого використання біметалу.



Рис. 12. Верхня поверхня пластини основи біметалу після заплвлених технологічних отворів електродуговою зваркою та подальшої зачистки [3; 5; 11]

Висновки. Таким чином, запропоновані нами способи виготовлення біметалів із застосуванням спеціальних утримуючих елементів суттєво розширюють можливості свого застосування в результаті забезпечення високого рівня міцності зчеплення пластин біметалу, що гарантує низьку вірогідність відокремлення робочої пластини в процесі подальшого використання біметалевих матеріалів. Впровадження цих технологій у виробництво біметалів не потребує великих матеріальних затрат та забезпечує максимальну рентабельність процесу виготовлення таких матеріалів. Наявність же декількох способів виготовлення дозволяє підбирати найбільш оптимальну технологію в залежності від об'ємів виробництва та розмірів отримуваних листів біметалів або окремих виробів з них.

Список використаних джерел

1. Патент РФ № 2193071, кл. С22В9/20; заявл. 05.06.2000; опубл. 20.11.2002.
2. Патент № 133111 UA, В22D 19/16 (2006.01). Пристрій для ливарного виготовлення біметалічних матеріалів з застосуванням утримуючих елементів / Романенко В. В.; Головка Л. Ф.; Блощин М. С., Салій С. С. – № у 201810064; заявл. 09.10.2018; опубл. 25.03.2019; Бюл. № 6, 2019.
3. Патент № 134859 UA, В23D 19/08 (2006.01). Спосіб ливарного виготовлення біметалів із застосуванням нахилених утримувачів / Романенко В. В.; Головка Л. Ф.; Блощин М. С., Ямшинський М. М., Салій С. С., Ковальчук О. Г. – № у 201812618 ; заявл. 19.12.2018 ; опубл. 10.06.2019; Бюл. № 6, 2019.
4. Патент № 133173 UA, В23D 19/08 (2006.01). Спосіб ливарного виготовлення біметалів з використанням технологічних отворів та утримуючих елементів / Романенко В. В.; Головка Л. Ф.; Блощин М. С., Салій С. С. – № у 201810447 ; заявл. 23.10.2018 ; 25.03.2019; Бюл. № 6, 2019.
5. Спосіб виготовлення біметалів електродуговим зварюванням з використанням технологічних отворів та утримуючих елементів / Патент на корисну модель № 133218 дата 25.03.2019
6. Производство металлических слоистых композиционных материалов / А. Г. Кобелев, В. И. Лысак, В. Н. Чернышев, А. А. Быков, В. П. Востриков. – М. : Изд. «Интермет Инжиниринг», 2002. – 496 с.
7. Лазерні технології та комп'ютерне моделювання / під редакцією Л. Ф. Головка, С. О. Лук'яненка. – К. : Вид-во «Вістка», 2009. – 295 с.

8. Golovko L. Development of the laser-foundry process for manufacture of bimetal [Electronic resource] / L. Golovko, S. Sali, M. Bloschchysyn // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2018. – Vol. 4/1, no. 94. – Pp. 47–54. – Accessed mode: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139483>.

9. Пристрій для лазерно-ливарного виготовлення біметалів: пат. № 96621 України: МПК: B23K 26/352 / № u201409701; заявл. 04.09.2014; опубл. 10.02.2015, Бюл. № 3. 5 с.

10. Development of an 8090/3003 bimetal slab using a modified direct-chill casting process / Wang T., Liang C., Chen Z. and others // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2014. – Vol. 214, no. 9. – Pp. 1806–1811. – Accessed mode: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.03.029>.

11. Комбінований лазерно-ливарний процес виготовлення біметалів [Електронний ресурс] / С. С. Салій, Л. Ф. Головка, А. Л. Головка, В. В. Романенко // *Mechanics and Advanced Technologies*. – 2020. – № 1 (88). – Pp. 93–107. – Режим доступу: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2020.88.200234>.

12. Квасницький В. В. Спеціальні способи зварювання : навчальний посібник / В. В. Квасницький. – Миколаїв : УДМУ, 2003. – 437 с.

13. Панфилов А. И. Перспективы использования биметаллических износостойких листов SWIP в угольной промышленности / А. И. Панфилов, А. В. Копощко, Ю. М. Кусков // *Физико-технические проблемы горного производства*. – 2011. – № 14. – С. 181–187.

14. Коррозионно-стойкие биметаллы с прочным сцеплением слоев для нефтехимической промышленности и других отраслей / [И. Г. Родионова, А. А. Павлов, А. И. Зайцев и др.]. – М. : ЗАО Metallurgizdat, 2011. – 292 с.

15. Шмидт М. Получение биметаллических заготовок с помощью лазерной сварки проплавленным швом / М. Шмидт, С. В. Курынцев // *Автомат. сварка*. – 2010. – № 6. – С. 30–33.

References

1. Patent RF № 2193071, kl. C22B9/20 [Patent of the Russian Federation № 2193071, class. C22B9 / 20]. (2002).

2. Romanenko, V.V., Holovko, L.F., Bloschchysyn, M.S., & Sali S.S. (2019). Patent № 133111 UA, B22D 19/16 (2006.01) Prystrii dlia lyvarnoho vyhotovlennia bimetalichnykh materialiv z zastosuvanniam utrymuiuchykh elementiv [Patent № 133111 UA, B22D 19/16 (2006.01). Device for foundry production of bimetallic materials with the use of retaining elements].

3. Romanenko, V.V., Holovko, L.F., Bloschchysyn, M.S., Yamshynskyi, M.M., Sali, S.S., & Kovalchuk O.H. (2019). Patent № 134859 UA, B23D 19/08 (2006.01). Sposib lyvarnoho vyhotovlennia bimetaliv iz zastosuvanniam nakhylenykh utrymuvachiv [Patent № 134859 UA, B23D 19/08 (2006.01). Method of foundry production of bimetal with the use of inclined holders].

4. Romanenko, V.V., Holovko, L.F., Bloschchysyn, M.S., & Sali, S.S. (2019). Patent № 133173 UA, B23D 19/08 (2006.01). Sposib lyvarnoho vyhotovlennia bimetaliv z vykorystanniam tekhnolohichnykh otvoriv ta utrymuiuchykh elementiv [Method of foundry production of bimetal using technological holes and retaining elements].

5. Patent na korysnu model № 133218. (2019). Sposib vyhotovlennia bimetaliv elektroduhovym zvariuvanniam z vykorystanniam tekhnolohichnykh otvoriv ta utrymuiuchykh elementiv [Method of manufacturing bimetal by electric arc welding using technological holes and retaining elements].

6. Kobelev, A.G., Lysak, V.I., Chernyshev, V.N., Bykov, A.A., & Vostrikov, V.P. (2002). *Proizvodstvo metallicheskikh sloistykh kompozitsionnykh materialov [Production of metal layered composite materials]*. Izd. «Intermet Inzhiniring».

7. Gholovka, L.F., Lukianenka, S.O. (2009). *Lazerni tekhnologii ta kompiuterne modeliuвання [Laser technologies and computer modeling]*. Vyd-vo «Vistka».

8. Golovko, L., Sali, S., & Bloschchysyn, M. (2018). Development of the laser-foundry process for manufacture of bimetal. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/1(94), 47–54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139483>.

9. Romanenko, V.V., Lykshosha, V.P., Shatrava, O.P., Gholovko, L.F., & Kryvcun, I.V. (2015). Prystrii dlia lazerno-lyvarnoho vyhotovlennia bimetaliv, Ukraine, Pat. № 96621 [Device for laser casting of bimetal: US Pat. № 96621 of Ukraine: IPC: B23K 26/352].

10. Wang, T., Liang, C., & Chen, Z. (2014), Development of an 8090/3003 bimetal slab using a modified direct-chill casting process. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(9), 1806–1811. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.03.029>.
11. Salii, S.S., Gholovko, L.F., Gholovko, A.L., & Romanenko V.V. (2020). Kombinovanyi lazerno-lyvarnyi proces vygotovlennia bimetaliv [Combined laser-casting process of bimetallic manufacturing]. *Mechanics and Advanced Technologies*, (1(88)), 93-107. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2020.88.200234>.
12. Kvasnytskyi, V.V. (2003). *Specialni sposoby zvariuvannia [Special methods of brewing]*. UDMTU.
13. Panfilov, A.I., Koposhko, A.V. & Kuskov, Ju.M. (2011). Perspektivy ispolzovaniia bimetallicheskikh iznosostoikikh listov SWIP v ugolnoi promyshlennosti [Prospects for the use of SWIP bimetallic wear-resistant sheets in the coal industry]. *Fiziko-tehnicheskie problemy gornogo proizvodstva – Physical and technical problems of mining*, (14), 181–187.
14. Rodionova, I.G., Pavlov, A.A., & Zaitsev, A.I. (2011). *Korroziionno-stoikie bimetally s prochnym scepleniem sloev dlia neftehimicheskoi promyshlennosti i drugih otraslei [Corrosion-resistant bimetallics with strong adhesion of layers for the petrochemical industry and other industries]*. ZAO Metallurgizdat.
15. Shmidt, M., & Kuryncev, S.V. (2010). Poluchenie bimetallicheskih zagotovok s pomoshh'ju lazernoj svarki proplavnym shvom [Obtaining bimetallic blanks using laser penetration welding]. *Avtomat. Svarka – Automatic welding*, (6), 30–33.

Отримано 11.02.2022

UDC 621.375.826:621

Victor Romanenko¹, Leonid Golovko², Mykhailo Bloschchysyn³, Viktor Dubniuk⁴

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: romvv@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1918-7090>

²Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Laser Systems and Physical Technologies National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: leongolovko@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7803-0312> SCOPUS Author ID: 6603561129

³PhD 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.bloschchysyn@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3688-7948>

⁴Senior Lecturer of the Department of Laser Systems and Physical Technologies National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: v.dubniuk@kpi.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6146-9265>

PRODUCTION OF BIMETALLIC MATERIALS WITH THE USE OF SPECIAL HOLDING ELEMENTS

The analysis of existing methods and a new combined process of bimetal production are presented, according to which a special regular design of holders is created on the surface of its functional component by means of laser or arc welding. The melt of the structural component of the bimetal is fed to the surface of the functional component through the hole in the form of a special device with a given flow rate. Holders are made of wire. The holders are located on the surface of the working plate at an angle or perpendicular to the base, followed by bending after assembly. The number of holders, their geometry and relative position on the surface are determined by the size of the bimetal. You can change the required parameters of the strength of adhesion in different areas. Full filling of technological space between holders filled with metal guarantees reliable fastening of bimetallic plates. Various options have been developed and implemented to reduce the cost of bimetal production technology. There are options where not the whole surface is filled, but only the specified areas of the prepared holes. This allows to implement multi-layer metal structures. A cheap and simple method of obtaining bimetallic plates without the need for foundry operations and equipment is the use of welding technology. It has been proven that in order to ensure high bond strength of bimetallic components and uniform distribution on the joint plane, it is necessary that the frequency of the holders and the step between them have the optimal value. The high efficiency of a new, innovative combined technology of bimetal production has been demonstrated.

The introduction of these technologies in the production of bimetals does not require large material costs and ensures maximum profitability of the manufacturing process of such materials. The presence of several manufacturing methods allows you to select the most optimal technology depending on the volume of production and the size of the resulting sheets of bimetals or individual products from them.

Keywords: bimetal; combined process; melt; functional structural component; adhesion strength.

Fig.: 12. References: 15.

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-1(27)-92-101

УДК 533.924:620.18

Володимир Лебедєв¹, Сергій Лой², Володимир Спіхтаренко³

¹доктор технічних наук, головний конструктор
Державне підприємство «Дослідне конструкторсько-технологічне бюро інституту електрозварювання
ім. С. О. Патока НАН України» (Київ, Україна)

E-mail: lebedevvladimir@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0391-6113>

²доцент кафедри зварювання
Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування
імені адмірала Макарова (Херсон, Україна)

E-mail: welding.kherson@nuos.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1936-6390>

³доцент кафедри зварювання
Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування
імені адмірала Макарова (Херсон, Україна)

E-mail: vladimir.kherson11@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6328-9791>

МОЖЛИВОСТІ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ПЛАЗМОВОГО НАПИЛЕННЯ ПРИ ЗМІЦНЕННІ ТА ВІДНОВЛЕННІ ВУЗЛІВ І ДЕТАЛЕЙ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТА ІНШОЇ ТЕХНІКИ

З метою виявлення способу підвищення міцності зчеплення напиленого шару з металом поверхні проведено пошук матеріалів, які можна застосувати як порошок для ефективного відновлення та зміцнення деталей. Визначено основний компонент – самофлюсуючий сплав, та введення в його склад компоненти в вигляді борного шлаку. Запропоновано методику знаходження оптимального розрахунку кількості введення шлаку та застосованих параметрів плазмового процесу напилення для отримання максимального ефекту – максимальних значень характеристик зчеплення.

Ключові слова: плазмове напилення, компоненти порошку, параметри процесу, оптимальний розрахунок,
Рис.: 5. Табл.: 4. Бібл.: 9.

Актуальність теми дослідження. Відновлення і зміцнення великої кількості вузлів і деталей різних машин та механізмів є актуальною проблемою, оскільки дозволяє вирішити ряд завдань експлуатаційного характеру. Основними з цих завдань є продовження терміну служби вузлів та деталей. А також скорочення реальних витрат на їх придбання та резервування (постачальні операції). Кожна галузь, що спирається на застосування певних машин та механізмів, має досить обмежену номенклатуру вузлів та деталей для відновлення та зміцнення. Парк машин та механізмів для сільськогосподарського виробництва, на нашу думку, найбільш широко представлений у різноманітті машин та механізмів. Це і загальнопромислові автомобілі та трактори, а також великий типаж специфічних машин. Так, наприклад, обладнання для оранки, культивації та інших механізмів обробки землі під посів. Є широка номенклатура машин та механізмів для збирання врожаю. Вимагають відновлення лемеша плугів, лапи культиваторів, ножі комбайнів та різноманітних косарок.

Постановка проблеми Можна відновлювати і зміцнювати вузли двигунів внутрішнього згоряння та інших. Очевидно, що є широкий фронт для організації робіт з відновлення та зміцнення найширшого ряду вузлів і деталей машин та механізмів сільськогосподарського виробництва. Є багато способів і технологій, які можуть бути застосовані для широкого використання в роботах з відновлення та зміцнення вузлів та деталей. Насамперед це практично всі способи електродугового наплавлення, які представлені в технічній літературі, наприклад [1]. Цей спосіб має значне поширення внаслідок своєї відносно простоти й універсальності як за типом сталей, що наплавляються, так і застосовуваних електродних матеріалів і умов застосування. До обмежень при реалізації цього типу технології слід зазначити досить вузький вибір діапазон режимів, що позначається на товщинах, що наплавляються, а отже, у багатьох випадках і на коробленні наплавлених деталей. Через нерівномірність нанесення наплавленого шару потрібна додаткова механічна обробка.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Набуває дедалі більшого поширення нанесення покриттів, що відновлюють і зміцнюють, з використанням низькотемпературної плазми (дифузна металізація) [2; 3]. Цей спосіб отримання покриттів частково замінює, а частково доповнює спосіб електродугового наплавлення.

Поширення технології плазмового напилення сприяють нижченаведені її особливості:

- можливість наносити покриття на деталі складної форми та на вироби великих розмірів;

- отримати рівномірне покриття на значній поверхні та на її обмежених ділянках;

- дозволяє наносити шари в кілька міліметрів і при цьому практично уникнути деформації тонколистового виробу;

- висока продуктивність процесу;

- можливість автоматизації процесу напилення.

До недоліків плазмового напилення можна віднести:

- у деяких випадках недостатній ступінь адгезії напиленого шару до основної деталі;

- одержання пухкої структури з включеннями.

Виключити зазначені недоліки можна декількома шляхами, серед яких підбір найбільш ефективних режимів, вибір матеріалів порошку та його додаткових компонентів, ретельна підготовка напилюваної поверхні, вибір транспортуючого газу, цілеспрямоване вдосконалення конструкції плазмотрона та установки загалом та ін.

Метою роботи є дослідження деяких матеріалів, у тому числі самофлюсуючих сплавів, шлаків, що використовуються як напилюваний порошок, здатних ефективно впливати на міцнісні характеристики напиленого шару, а також вивчення їхніх можливостей для використання в практичних роботах з відновлення та зміцнення вузлів та деталей машин та механізмів сільськогосподарського та інших виробництв.

Виклад основного матеріалу. Основою для напилюваного шару був обраний порошок, що складається з бор і кремній хромо-нікелевих сплавів типу ПГ-10Н-01 [4]. Підставою для вибору було те, що цей порошок є самофлюсуючим, так як утворювані при плавленні боросилікати пов'язують оксиди заліза, нікелю, хрому і виводять їх на поверхні у вигляді склоподібних шлаків. Такий процес забезпечує оплавлення напиленого покриття на повітрі. Плазмове напилення, яке вивчається, можна охарактеризувати як процес з одночасним оплавленням.

Сплави, що самофлюсуються, і сплав ПГ-10Н-01 зокрема, відрізняються пластичністю при плавленні і гарною змочуваністю. Ці характеристики забезпечують відсутність стікання покриття при оплавленні та дають можливість отримувати напилення покриття товщиною 2-3 мм.

Покриття з самофлюсуючих сплавів набувають дедалі більшого поширення, зокрема при відновленні та зміцненні деталей двигунів автотракторної техніки. Такі покриття часто при відновленні мають більший ресурс, ніж нові деталі. Однак слід зазначити і деякі обмеження в застосуванні сплавів, що самофлюсуються, як порошку для плазмового напилення. Так, покриття на основі ПГ-10Н-01 і подібних до нього мають недостатню міцність зчеплення в місцях де деталі відчувають великі деформації зсуву внаслідок того, що міцність покриття не має рівної міцності з основним металом. У таких випадках достатню для експлуатації міцність зазвичай отримують унаслідок додаткової технологічної операції, при якій на поверхні напилюваної деталі створюють шорсткість. Тому міцність зчеплення покриття досягається головним чином за рахунок наявної на поверхні шорсткості. Необхідну шорсткість можна отримати декількома способами: нарізанням рваного різьблення, дробоструминною обробкою та іншими методами. Така підготовка поверхні подовжує технологічний цикл відновлення зношеної поверхні на 30-40 %. Збільшується трудомісткість відновлення чи зміцнення деталі та вартість робіт.

Для досягнення цілей роботи насамперед слід зупинитися на вирішенні таких основних завдань:

- підвищити міцність зчеплення покриття із підкладкою (поверхнею деталі);
- знизити трудомісткість і вартість робіт, в основному за рахунок виключення з технологічного циклу операції підготовки поверхні, що напилюється.

Одним з напрямків, що дозволяють вирішити вищевказані завдання, є додаткове введення до складу самофлюсуючих сплавів типу ПГ-10Н-01 та інших на основі Ni-Cr-B-Si флюсових добавок.

Вивчення впливу флюсових добавок проводилося на основі визначення міцності паяних сполук, де часто застосовуються флюси, до складу яких входять бориди, у які для підвищення активності вводять у вигляді лігатури алюміній, мідь та магній. Можна зазначити, що такі флюси істотно підвищують адгезійну міцність паяних конструкцій. На підставі цього проводилося вивчення "борного шлаку", який включає зневоднену буру і подвійний метаборат натрію і магнію ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_6 \cdot \text{MgO}$) у певному співвідношенні.

Для визначення ефективності застосування пропонованої композиції порошку для напилення необхідно було провести ряд випробувань зазначеного складу, з визначення параметрів міцності та дослідивши кількісне співвідношення покриття на основі ПГ-10Н-01 із введенням до його складу борного шлаку. Найбільш показовими міцності характеристики напиленого покриття можуть бути визначені при дослідженнях на зріз.

Для цих досліджень виготовлялася партія заготовок - зразків для натурних експериментів. Зовнішній вигляд таких заготовок представлений на ескізі рис. 1.

Як матеріал зразків для напилення була обрана сталь 40Х. Напилення виконували на установці УПУ-3Д плазмотроном ПН-25. Слід зазначити, що установка була модернізована за конструкцією плазмотрона, системою подачі порошку, що напилюється, та ін. відповідно до роботи [5]. Покриття наносилося з одночасним оплавленням. Режими напилення такі:

- струм плазми, 300-400 А;
- напруга, 40-60 В;
- витрата плазмоутворюючого газу, 100-300 л/хв;
- дистанція напилення, 100-150 мм.

Для початкового визначення кількісного складу порошку використовувалися спеціально приготувані суміші з різною кількістю компонентів флюсу, які представлені в табл. 1.

Один зразок напилюється складом № 1 з циклом підготовки поверхні, що включає:

- знежирення поверхні;
- піскоструминна обробка поверхні.

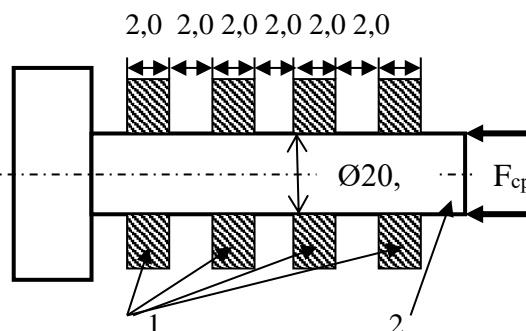


Рис. 1. Ескіз зразка для досліджень міцності покриття на зріз:

1 – напилені ділянки; 2 – підкладка

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 1

Склад зразка

№	Склад зразка	Матеріали напилювальної суміші, мас %		Міцність σ_s , МПа
		ПГ-10Н-01	Борний шлак	
1	З підготовкою поверхні	100,00	-	361,4
2	Без підготовки поверхні	99,50	0,50	311,2
3	Без підготовки поверхні	99,00	1,00	328,2
4	Без підготовки поверхні	98,50	1,50	360,4
5	Без підготовки	98,50	3,00	401,0
6	Без підготовки поверхні	98,50	5,00	350,7

Напилення покриттів інших зразків здійснювалося без попередньої підготовки поверхні.

Напилений шар проточується по зовнішній поверхні до Ø24 мм. Потім на нанесеному шарі робилися проточки до основного металу для поділу напиленого шару на окремі кільця (рис. 1) шириною 2 мм, які випробовувалися на зріз. Площа зрізу – $F = 125,6 \text{ мм}^2$. Експериментальна робота з

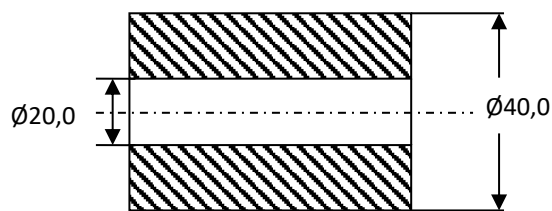


Рис. 2. Ескіз втулки для випробувань на зріз зразка

Джерело: розроблено авторами.

визначенням міцності на зріз σ_s виконувалася із застосуванням спеціальної втулки (рис. 2), яка продавлювалася до зрізування по напиленим кільцям. При цьому динамометром вимірювалося зусилля зрізу.

Визначення величини міцності на зріз проводилося з використанням виразу

$$\sigma_s = \frac{F}{S}, \tag{1}$$

З аналізу отриманих результатів (табл. 1) слід зазначити, що немає однозначної залежності між кількістю борного шлаку в порошок, що напилюється, і міцністю отриманого результату. Крім цього, як відомо [6], істотний вплив на характеристики міцності напиленого шару надають і інші параметри напилення, основні з яких струм і напруга процесу. Для наступних етапів дослідження нами обрані саме струм та напруга разом із кількісним вмістом борного шлаку.

Було проведено великий цикл дослідно-експериментальних робіт із виявлення залежностей $\sigma_s = f(p, I,)$ і $\sigma_s = f(p, U)$ докладно представлених у табл. 2 і табл. 3. Експерименти з вихідними даними та отриманими результатами, за табл. 2 виконувались при напрузі 50 В.

Таблиця 2

Результати досліджень впливів струму та вмісту шлакової компоненти на міцність напиленого шару

I, A	p, %										
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
300	257,0	265,9	274,8	283,7	292,6	301,5	310,4	319,3	328,2	337,1	346,0
310	260,2	268,8	277,4	285,9	294,5	303,1	311,7	320,3	328,8	337,4	346,0
320	263,4	271,7	279,9	288,2	296,4	304,7	313,0	321,2	329,5	337,7	346,0
330	266,6	274,5	282,5	290,4	298,4	306,3	314,2	322,2	330,1	338,1	346,0
340	269,8	277,4	285,0	292,7	300,3	307,9	315,5	323,1	330,8	338,4	346,0
350	273,0	280,3	287,6	294,9	302,2	309,5	316,8	324,1	331,4	338,7	346,0
360	276,2	283,2	290,2	297,1	304,1	311,1	318,1	325,1	332,0	339,0	346,0
370	279,4	286,1	292,7	299,4	306,0	312,7	319,4	326,0	332,0	339,3	346,0
380	282,6	288,9	295,3	301,6	308,0	314,3	320,6	327,0	333,3	339,7	346,0
390	285,5	291,8	297,8	303,9	309,9	315,9	321,9	327,9	334,0	340,0	346,0
400	289,0	294,7	300,4	306,1	311,8	317,5	323,2	328,9	334,6	340,3	346,0

З аналізу результатів, поданих у табл. 2 слід зробити кілька важливих висновків.

Передусім це зростання міцності зчеплення зі збільшенням практично в усіх досліджених діапазонах флюсової компоненти і струму плазмового процесу, проте зі збільшенням струму темп зростання міцності поступово знижується. Аналогічна картина спостерігається і зі зростанням міцності зі збільшенням флюсової компоненти. На нашу думку, однією з причин цієї закономірності може бути збільшення енергетичного впливу на вміст флюсу в порошок, що напилюється, який просто вигоряє.

Вихідні дані та результати вимірювань, дані в табл. 3, виконані при постійному значенні струму процесу – 350 А.

Таблиця 3

Результати досліджень впливів напруги процесу та вмісту шлакової компоненти на міцність напиленого шару

U, В	p, %										
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
40	204,0	220,1	236,2	252,3	268,4	284,5	300,6	316,7	332,8	348,9	365,0
42	212,5	227,6	242,6	257,7	272,7	287,8	302,9	317,9	333,0	348,0	363,1
44	221,0	235,0	249,0	263,1	277,1	291,1	305,1	319,1	333,2	347,2	361,2
46	229,5	242,5	255,5	268,4	281,4	294,4	307,4	320,4	333,3	345,3	359,3
48	238,0	249,9	261,9	273,8	285,8	297,7	309,6	321,6	333,5	345,5	357,4
50	246,5	257,4	268,3	279,2	290,1	301,0	311,9	322,8	333,7	344,6	355,5
52	255,0	264,9	274,7	284,6	294,4	304,3	314,2	324,0	333,9	343,7	353,6
54	263,5	272,3	281,1	290,0	298,8	307,6	316,4	325,2	334,1	342,0	351,7
56	272,0	279,8	287,6	295,3	303,1	310,9	318,7	326,5	334,2	342,0	349,8
58	280,5	287,2	294,0	300,7	307,5	314,2	320,9	327,7	334,4	341,2	347,9
60	289,0	294,7	300,4	306,1	311,8	317,5	323,2	328,9	334,6	340,3	346,0

З аналізу табл. 3 можна зробити висновок, що тенденція зниження зростання міцності зчеплення зі збільшенням напруги процесу та змісту шихти, як і в попередньому випадку, дотримується, проте тут з'являється інша особливість – зі зростанням параметрів спостерігається падіння значень міцності зчеплення. Це також можна пояснити, зокрема, і впливом енергетичних характеристик плазми та режиму оплавлення на діючий вміст борного шлаку, який має досить низьку температуру плавлення та розкладання.

За результатами цього експериментального етапу досліджень і результатів представлених у табл. 1, 2 і 3 виконаний комплекс робіт, що дозволив відповідно до [7] здійснити математичне планування експериментів з подальшим визначення залежності $\sigma_g = f(p, I, U)$, де p – частка шлакової компоненти у складі порошку, що напилюється.

На підставі цього експериментального етапу досліджень отримано регресійне рівняння, що описує залежність $\sigma_g = f(p, I, U)$ у вигляді повного лінійного рівняння

$$\sigma_g = 293,00 + 8,00p + 16,5I + 54,5U + 18,00IU + 8,00pUI . \quad (2)$$

При цьому була виконана перевірка значущості коефіцієнтів рівняння з наступним винятком малозначущих величин. За табличними значеннями критерію Кохрена [8] визначено значущість експерименту.

Адекватність рівняння регресії було перевірено з допомогою критерію Фішера [8]. З розгляду табл. 1, 2, 3 випливає, що міцність зчеплення зовсім по-різному залежить від силових характеристик плазмового процесу і від вмісту компоненти борного шлаку в порошку, що напилюється. Для того щоб визначити максимальний ефект від цих показників, які можна прийняти як основні, необхідно визначити оптимальне (максимальне) значення залежності. Цей пошук можна здійснити, використовуючи певні методів, наприклад, виділивши найбільш дієві значення за їх ваговим впливом на шуканий якісний показник. Це досить складне оцінне завдання. У межах цієї роботи нами вбачається, що найбільш простим і дієвим буде використання методики математичного планування експериментів Бокса-Вілсона (метод крутого сходження) [9], при використанні якого в цьому випадку як параметр оптимізації прийнята міцність зчеплення покриттів з основою, що є одним із головних критеріїв, що характеризують якість напилених покриттів.

Таблиця 4

Матриця планування експериментів при пошуку оптимальності – міцності покриття

№	Крок варіювання	I, А	U, В	p, %	σ_s , МПа, М
		5,87	2,42	0,4	
1	Основний рівень	350,00	50,00	1,00	293,00
2	Експеримент 1	355,87	52,42	1,40	337,87
3	Експеримент 2	361,74	54,84	1,80	374,66
4	Експеримент 3	367,61	57,27	2,20	402,30
5	Експеримент 4	373,49	59,69	2,60	419,69
6	Експеримент 5	379,36	62,11	3,00	425,73
7	Експеримент 6	385,23	64,53	3,40	419,34
8	Експеримент 7	391,10	66,95	3,80	399,42
9	Експеримент 8	396,97	69,38	4,20	364,87
10	Експеримент 9	402,84	71,80	4,60	314,62
11	Експеримент 10	408,72	74,22	5,00	247,56

За результатами попередніх експериментів було визначено, що найбільший вплив на міцність зчеплення покриттів з основою мають такі параметри: струм дуги (I), напруга дуги (U) та кількість компонента, що флюсує (p). Вони й були обрані як основні фактори при визначенні рівняння регресії. Оскільки характер впливу кожного фактору не був відомий, використовувався загальний випадок рівняння регресії, заснований на повному лінійному рівнянні. Це дозволило скласти матрицю планування експериментів

за методикою Бокса-Вілсона, яка представлена в табл. 4.

Використовуючи результати, подані в табл. 4, виконано графічну побудову залежності $\sigma_s = f(p, I, U)$, де видно її оптимум, який можна використовувати в практичній роботі при виборі силових режимів напильника, а також кількість борного шлаку, що вводиться до складу порошку.

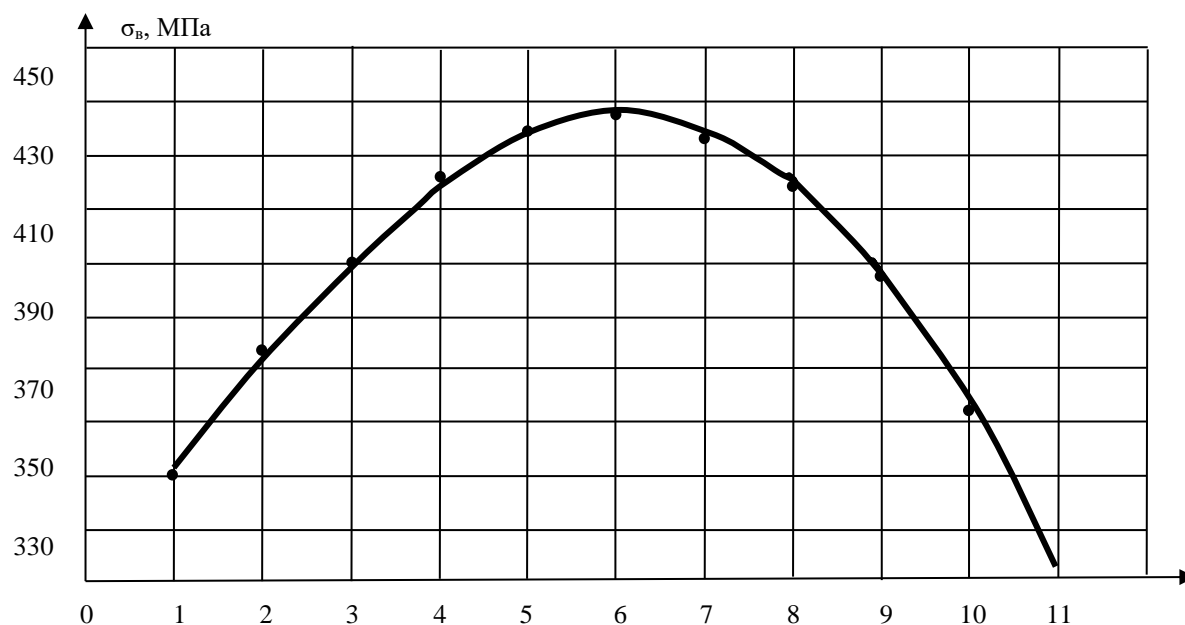


Рис. 4. Залежність міцності зчеплення від основних параметрів плазмового процесу
Джерело: розроблено авторами.

Для повного розуміння процесів при формуванні напиленого шару, зокрема на кордоні з підкладкою, було виконано дослідження цієї зони на ряді зразків з отриманням та аналізом мікроструктур. Приклади мікроструктур для порівняльних висновків представлені на фотографіях рис. 5.



а

б

Рис. 5. Структура напиленого покриття:

а – без додавання борного шлаку $\times 200$;

б – із введенням до складу порошку борного шлаку $\times 200$

Джерело: розроблено авторами.

Дослідження мікроструктури на рис. 5 та інших аналогічних структур показали, що при виконанні покриттів на непідготовлену поверхню підкладки зі сталі 40Х напиленням порошку ПГ-10Н-01, без введення борного шлаку з оплавленням, на непідготовлену підкладку в зоні з'єднання покриття з напилюваною поверхнею утворюється відносно рівний світлий прошарок (рис. 5, а) товщиною близько 12 мкм. На нашу думку, це результат взаємної дифузії компонентів покриття та підкладки. Покриття досить щільне, хоча є окремі мікропори.

Лінія сплавлення покриття, що містить борний шлак у кількості 3%, та основи (рис. 5, б) має складну хвилюподібну форму. Очевидно, введення в порошок, що напилюється, борного шлаку сприяє інтенсивному розчиненню підкладки в покритті. Це явище спостерігається і при інших концентраціях борного шлаку, який є поверхнево активним речовиною.

Для перевірки отриманих розрахунковим шляхом значень міцності виконувалося напилення зразків виготовлених зі сталі 40Х із запровадженням борного шлаку не більше як 2,5-3,5 %. Середній результат, отриманий при випробуванні на зріз покриття, становить 410 МПа, що в межах 5 % від розрахункового значення, що підкреслює адекватність застосування математичних методів щодо визначення оптимуму характеристик міцності.

Можна відзначити, що форма лінії взаєморозташування напилення і підкладки значною мірою визначає міцнісні характеристики напиленого шару.

За результатами досліджень можна рекомендувати процес напилення із введенням борного шлаку для відновлення цілого ряду деталей у тому числі колінчастих валів. При цьому наголошується на збільшенні міцності зчеплення з одночасним винятком спеціальної обробки поверхні деталі. Характеристики міцності зчеплення напиленого шару порошком ПГ-10Н-01 без спеціальної підготовки основи становить 280 МПа, а з введенням борного шлаку – до 425 МПа і це підвищення міцності на 35 %

Висновки. 1. Застосування покриттів із сплавів, що самофлюсуються, дозволяє отримати покриття з високою міцністю зчеплення напиленого шару з основою і високою зносо- та ерозійною стійкістю. Високі показники механічних властивостей покриттів, що самофлюсуються, забезпечує структури з дрібнодисперсними однорідно розподіленими складовими покриття.

2. Значну роль у забезпеченні міцності зчеплення плазмового покриття з підкладкою (деталлю) відіграє шлакова компонента (борний шлак), введена до складу порошку, що напилюється, який дозволяє при оптимально вибраних характеристиках процесу на 30...35 % збільшити величину міцності на зріз у порівнянні зі звичайними покриттями.

3. Застосування методів математичного планування експериментів з виявленням оптимальних параметрів з напылення з різними характеристиками: вміст шлаку у складі порошку, енергетичні характеристики процесу (струм, напруга) дозволяють визначити найбільш ефективно поєднання варіантів впливу для отримання максимально значущого результату.

Список використаних джерел

1. Рябцев И. А. Теория и практика наплавочных работ / И. А. Рябцев, И. К. Сенченков. – К. : Екотехнологія, 2013. – 400 с.
2. Pfender L. F. Trends in Thermal Plasma Technology. Thermal Plasma Torches and Technologies / Pfender L. F. // Cambridge International Science Publishing. – 2003. – Vol. 1. Plasma Torches. Basic Studies and Design. – Pp. 20-41.
3. Лащенко Г. И. Плазменное упрочнение и напыление / Г. И. Лащенко. – К. : Екотехнологія, 2003. – 64 с.
4. Плазменное напыление износостойких покрытий из порошков самофлюсующихся сплавов / В. И. Кузьмин, С. П. Вашенко, И. П. Гуляев и др. // Вестник Юргинского государственного университета. – 2015. – Вып. 2(37). – С. 45-52.
5. Лебедев В. А., Лой С. А. Модернизация плазматрона для напыления на воздухе и в контролируемой атмосфере (в вакууме) / В. А. Лебедев, С. А. Лой // Вісник Національного технічного університету “ХІІІ”. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2019. – № 10. – С. 21-29.
6. Pavlowski L. Science and Engineering of Thermal Spray Coatings / Pavlowski L., John Wiley. – 2nd ed. – Sons Ltd., 2008. – 656 p.
7. Губин С. В. Теория планирования экспериментов в энергетике : Курс лекций для высших технических учебных заведений / С. В. Губин, А. И. Яковлев. – К. : Миллениум, 2009. – 158 с.
8. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами / Химмельблау Д. – М. : Издательство “Мир” 1973. – 957 с.
9. Должанский Ю. М. Планирование эксперимента при исследовании и оптимизации свойств сплавов / Ю. М. Должанский, Ф. С. Новик, Т. А. Чемлева. – М. : ОНТИ, 1974. – 132 с.

References

1. Ryabcev, I.A., Senchenkov, I.K. (2013). *Teoriia i praktika naplavocnih rabot [Theory and practice of surfacing]*. Ekotehnologiya.
2. Pfender, L.F. (2003). Trends in Thermal Plasma Technology. Thermal Plasma Torches and Technologies. *Cambridge International Science Publishing*, 1 (Plasma Torches. Basic Studies and Design), 20-41.
3. Lashenko, G.I. (2003). *Plazmennoe uprochnenie i napylenie [Plasma hardening and spraying]*. Ekotehnologiya.
4. Kuzmin, V.I., Vashenko, S.P., Gulyaev, I.P., Karataev, E.V., Sergachyov, D.V., Kornienko, E.E., Dolmatov, A.V. (2015). Plazmennoe napylenie iznosostojkih pokritij iz poroshkov samoflyusu-yushihhsya spлавov [Plasma spraying of wear-resistant coatings from powders of self-fluxing alloys]. *Vestnik Yurginskogo gosudarstvennogo uniersiteta – Bulletin of the Yurga State University*, 2(37), 45-52.
5. Lebedev, V.A., Loj, S.A. (2019). Modernizaciya plazmotrona dlya napyleniya na vozduhe i v kontroliruemoj atmosfere (v vakuume) [Modernization of the plasma torch for sputtering in air and in a controlled atmosphere (in vacuum)]. *Visnik Nacionalnogo tehnicnogo universitetu “HIII”. Seriya: Novi rishennya v suchasnih tehnologiyah – Bulletin of the National Technical University “XIII”. Series: New solutions in modern technologies*, (10), 21-29.
6. Pavlowski, L., John Wiley. (2008). *Science and Engineering of Thermal Spray Coatings* (2nd ed.). Sons Ltd.
7. Gubin, S.V., Yakovlev, A.I. (2009). *Teoriia planirovaniia eksperimentov v energetike: Kurs lektzii dlia vysshih tehniceskikh uchebnyh zavedenii [A course of lectures for higher technical educational institutions, Theory of planning experiments in the energy sector]*. Millenium.
8. Himmelblau, D. (1973). *Analiz processov statisticheskimi metodami [Analysis of processes by statistical methods]*. Izdatelstvo “Mir”.

9. Dolzhanskii, Yu.M., Novik, F.S., Chemleva, T.A. (1974). *Planirovanie eksperimenta pri issledovanii i optimizatsii svoistv splavov [Planning an experiment in the study and optimization of the properties of alloys]*. ONTI.

Отримано 01.02.2022

UDC 533.924:620.18

Vladimir Lebedev¹, Serhii Loi², Vladimir Spihtarenko³

¹Doctor of Technical Sciences, Chief designer
SF “Experimental Design-Technological Office of the E.O. Paton Electric Welding Institute
of the National Academy of Sciences of Ukraine” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: lebedevvladimir@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0391-6113>

²Associate Professor of the Department of Welding
Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National Shipbuilding University (Kherson, Ukraine)

E-mail: welding.kherson@nuos.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1936-6390>

³Associate Professor of the Department of Welding
Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National Shipbuilding University (Kherson, Ukraine)

E-mail: vladimir.kherson11@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6328-9791>

POSSIBILITIES OF IMPROVING THE QUALITY OF PLASMA SPRAYING WHEN STRENGTHENING AND RENOVATING UNITS AND DETAILS AGRICULTURAL AND OTHER MACHINERY

The work is devoted to finding ways for improving the mechanical properties of the plasma-sprayed layer on the surface of parts and assemblies of agricultural and other equipment in order to give them certain qualities in the restoration or strengthening.

It is determined that there are a number of methods and ways to restore and strengthen components and parts, where electric arc surfacing, including flux electrode wire, is the most common. This technology has a number of advantages but there are a number of disadvantages that do not allow electric arc surfacing to be used in some cases, in particular in the surfacing of sheet material and more.

An alternative to arc surfacing, or its supplement, is plasma spraying, which can eliminate the existing shortcomings of surfacing. But spraying has its drawbacks, one of the main of which is the weak adhesive properties, accompanied by a low value of the adhesion of the powder that is sprayed to the surface of the part.

The search for a way to increase the adhesion of the sprayed layer to the surface of the assembly and the part led to the choice as a component of the self-fluxing alloy, which gives the sprayed layer strength and reduce unwanted inclusions.

But an even greater effect can be achieved by introducing into the powder being sprayed, a special slag, which surfacing from melting further increases the adhesion of the sprayed layer to the surface.

A mathematical model of the influence of the amount of flux and force parameters of the plasma on the adhesion parameter is developed, and the optimal parameters of the process and materials on the adhesion characteristics are found by mathematical methods.

This is confirmed by experimental studies and can be used in practical work in the implementation of real technology - plasma spraying.

A large number of specimens of a special shape made of 40X steel were used for spraying experiments. Experimental work was carried out on the installation, which was upgraded to improve the process. Control of energy parameters of spraying was applied.

To make it clearer to choose the optimal dependence of the strength of the plasma coating on the main parameters of the process and determine the maximum value of strength for the example built a graph of dependence, which is based on certain regression models.

Keywords: plasma spraying; powder components; process parameters; optimal calculation.

Fig.: 5. Table: 4. References: 9.

Євген Корбут¹, Валерія Парненко², Тетяна Ніколаєнко³, Олександр Плівак⁴

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: korbuto113@gmail.com, **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-1221-4052>, **Scopus Author ID:** [56736964700](https://orcid.org/0000-0002-1221-4052)

²кандидат технічних наук, старший викладач кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: v.parmenko@kpi.ua, **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-1450-2744>, **Scopus Author ID:** [57217101654](https://orcid.org/0000-0002-1450-2744)

³кандидат технічних наук, доцент кафедри нарисної геометрії та інженерної графіки
Київський національний університет будівництва і архітектури (Київ, Україна)

E-mail: tatyana.rodina@gmail.com, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0960-1251>,

ResearcherID: https://www.researchgate.net/profile/Tatyana_Nikolayenko

⁴завідувач лабораторії вимірювальної техніки НН ММІ
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: aplivak@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ОТВОРІВ У ВОЛОКНИСТИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛАХ ПРИ ОБРОБЦІ СВЕРДЛАМИ З ДИСКРЕТНИМИ ПОКРИТТЯМИ ГЛОБУЛЯРНОГО ТИПУ НА РОБОЧІЙ ПОВЕРХНІ

У статті розглянуто основні марки інструментальних матеріалів та нанесених зносостійких покриттів, які використовуються для інструментів при різанні волокнистих полімерних композиційних матеріалів (ВПКМ). Показано, що алмазні покриття є переважними для обробки ВПКМ, але є проблема створення необхідної адгезії та високої собівартості інструменту з даним покриттям. Конкуруючим способом нанесення зносостійких покриттів є метод електроіскрового легування (ЕІЛ), яке в порівнянні з іншими методами має на порядок нижчі енергозатрати та на декілька порядків нижчу вартість обладнання. Проведено дослідження з визначення величини точності отворів в деталі з ВПКМ при обробці свердлами зі швидкорізальної сталі з нанесеним на його робочі поверхні дискретним покриттям глобулярного типу в порівнянні зі свердлами з алмазним покриттям. Запропоновано та доведена доцільність використання інструментальних швидкорізальних сталей для обробки різанням деталей з ВПКМ за рахунок використання дискретних глобулярних покриттів певної архітектури та складу без втрати точності отриманих виробів, що дозволить зменшити вартість інструменту і, як наслідок, собівартість готового виробу.

Ключові слова: різальний інструмент; зносостійкі покриття; волокнистий полімерний композиційний матеріал; електроіскрове легування; покриття дискретного типу

Рис.: 4. Табл.: 1. Бібл.: 15.

Актуальність теми дослідження. Проблема підвищення якості обробки різанням полімерних волокнистих композиційних матеріалів (ВПКМ) значною мірою пов'язана з пошуком шляхів забезпечення працездатності та надійності інструменту для їх обробки. Пошук і розробка альтернативних рішень існуючим матеріалам та покриттям дозволять вирішити проблеми з якістю та собівартістю обробки виробів з ВПКМ. Тому питання використання інструменту зі швидкорізальних сталей для обробки волокнистих полімерних композиційних матеріалів за рахунок формування на його робочій поверхні модифікованого дискретного покриття є актуальною проблемою та має високе практичне значення.

Постановка проблеми. ВПКМ мають комплекс властивостей та особливостей, які позитивно відрізняють їх від металів та їхніх сплавів, що відкриває широкі можливості для розробки нових конструкцій та технологій різного призначення й удосконалення існуючих. Водночас їхні фізико-механічні властивості викликають труднощі обробкою різанням, що накладає певні вимоги до використання різального інструменту. Насамперед вони повинні забезпечувати необхідну точність обробленої поверхні деталей з ВПКМ, мати високий опір зношуванню. Спрощення їх конструкції, підвищення рівня технологічності виготовлення дозволить знизити собівартість інструменту і, як наслідок, собівартість виробу з ВПКМ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням властивостей, застосування та обробки ВПКМ різанням присвячено достатню кількість наукових праць [1-3]. У роботах [4-6] проведено детальний аналіз використання полімерних композиційних матеріалів в авіаційній техніці, визначені їхні властивості. Авторами [7-10] розглянуті способи обробки ВПКМ, інструментальні матеріали та схеми різання. На теперішній час для обробки ВПКМ використовують різні види інструментальних матеріалів та зносостійких покриттів на них для виготовлення різального інструменту. У роботах [11; 12] розглянуто методи підвищення працездатності інструменту для обробки ВПКМ за рахунок прогресивних схем різання та геометрії різального інструмента. Так, було запропоновано для підвищення якості обробки застосовувати реверсивний рух [11], а в роботі [12] використовувати свердла з підрізаючими різальними кромками. Однак повною мірою задача забезпечення продуктивності обробки та якості обробленої деталі не вирішена та потребує подальшого дослідження.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що найбільшою мірою вимогам до інструментальних матеріалів для інструменту для обробки ВПКМ відповідає полікристалічний алмаз та тврдосплавний інструмент з ультратвердим алмазоподібним покриттям (DLC). Проте їх використання призводить до ускладнення конструкції інструменту та високої його вартості, а тврдосплавний інструмент використовується тільки з суцільним зносостійким покриттям. Дослідження по використанню різального інструменту зі швидкорізальної сталі (ШР), з формованим на його робочій поверхні дискретним покриттям для обробки ВПКМ не проводились.

Метою статті є дослідження точності отворів у деталях з ВПКМ при використанні різального інструменту зі ШР сталі зі сформованим на його робочій поверхні дискретним покриттям глобулярного типу.

Виклад основного матеріалу. Підвищення експлуатаційних параметрів інструментів для обробки ВПКМ призводить до зростання вимог до інструментальних матеріалів, створення нових видів інструментальних матеріалів, задовольняючих ці вимоги. Але в багатьох випадках це економічно недоцільно. Тому стратегічним напрямком удосконалення різального інструменту для обробки ВПКМ є розробка нових методів та матеріалів для модифікації поверхневого шару інструменту, тобто заміна об'ємної зміни властивостей інструментальних матеріалів на модифікацію поверхневого шару робочої поверхні.

Встановлено, що інструментальні матеріали для обробки ВПКМ повинні забезпечувати високий опір абразивному зношуванню контактуючих поверхонь леза інструменту, мати низький коефіцієнт тертя в парі з оброблюваним матеріалом, мати високу теплостійкість та теплопровідність.

За даними аналізу [3; 8] в авіаційній промисловості при свердлінні отворів у ВПКМ застосовуються швидкорізальні сталі (ШР), тверді сплави (ТС), полікристалічний алмаз, кубічний нітрид бора (КНБ), кераміка.

Інструмент із швидкорізальної сталі для обробки отворів, особливо в ремонтних роботах на підприємствах авіаційної промисловості знаходить доволі широке застосування. Низький опір абразивному зносу, а відповідно і низька стійкість швидкорізальної сталі для певних умов виробництва компенсується великою кількістю розробок прогресивних конструкцій інструменту і способів свердління. Для підвищення різальної здатності ШР інструментів часто наносять зносостійкі покриття методом PVD, товщиною плівки 1-7 мкм твердих з'єднань (TiN, TiCN та ін.). Проте швидкорізальні інструменти з покриттям практично не забезпечує певної якості обробки через швидке видалення покриття в процесі свердління з робочих поверхонь інструмента з причин низької адгезії покриття та поверхні інструмента та з затупленням різальної кромки.

Для обробки ВПКМ найчастіше використовують однокарбідні тверді сплави, так як вони об'єднують в собі найкраще відношення зносостійкості і міцності. Це пояснюється тим, що двох і трьох карбідні сплави мають підвищений вміст γ -фази (карбідів TiC, TaC, NbC) в порівнянні з однокарбідними. Вони були розроблені для забезпечення найбільш сприятливого балансу зносостійкості та міцності в умовах високих температур різання. Але при відносно низьких температурах різання ВПКМ ці сплави не проявляють своїх переваг і показують меншу стійкість ніж однокарбідні. Так, при прямокутному різанні склопластика середня величина сили різання інструментами з трьох карбідного сплаву типу TT5K10 на 100 Н більше. Ніж при різанні інструментом із однокарбідного твердого сплаву ВК6. Використання твердосплавного інструменту з різними за конструкцією та складом покриттям також стримується високою вартістю твердого сплаву.

Полікристалічний алмаз (ПКА) має найбільший опір абразивному зношуванню, механізм котрого аналогічний зношуванню твердого сплаву. Багаточисленні дослідження [3; 8] показують, що за стійкістю та продуктивністю при останніх рівних умовах він багаторазово перевищує інструменти з однокарбідним твердим сплавом. Саме його твердість, висока теплопровідність та хімічна стабільність, мала взаємодія з полімерами забезпечують суттєві переваги при різанні ВПКМ в порівнянні з іншими інструментальними матеріалами. Проте ПКА надзвичайно крихкий матеріал, тому з метою зменшення вірогідності крихкого руйнування різальної кромки використовують підложку із ШР або ТС. Таким чином, таке рішення для спіральних свердел не технологічне і не повною мірою задовольняє роботу спірального свердла.

Кубічний нітрид бору (КНБ) при різанні ВПКМ поступається полікристалічному алмазу в зносостійкості і в силу його відносно високої вартості досить рідко використовується для обробки ВПКМ [3].

Кераміка характеризується високим опором абразивному зношуванню. Водночас для обробки ВПКМ із-за низького опору ударному навантаженню цей матеріал майже не використовується.

Для підвищення зносостійкості інструмента зі швидкорізальних сталей та твердосплавного в основному використовуються суцільні покриття на основі TiC, TiN, TiCN, TiAlON, AlCrN та інші. При обробці металів та сплавів такі покриття суттєво підвищують працездатність інструментів [3; 8; 13]. Однак, як зазначалось раніше, використання таких покриттів не дає суттєвого збільшення стійкості через неможливість забезпечення в процесі різання малого радіуса округлення різальної кромки.

Дослідження дискретних покриттів на точність отворів при однакових товщинах покриттів, діаметрах свердел, їх конструкції та геометрії, швидкості різання та подачі при свердлінні однакових марок ВПКМ та розмірах заготовок не досліджувались.

Тому виникла необхідність дослідження точності отворів інструментом із швидкорізальної сталі з дискретним покриттям глобулярної структури в порівнянні з отворами просвердленими твердосплавними свердлами з алмазним покриттям.

В експерименті було використано свердла діаметром 8мм зі сталі Р6М5 з нанесеним на його робочі поверхні, з урахуванням умов когезійно-адгезійної міцності, дискретним покриттям глобулярного типу TiCrBr+AlN. Даний склад покриття найбільш відповідає алмазному за теплопровідністю, твердістю та іншими параметрами.

Якість отворів при свердлінні характеризується його точністю, узагальненим показником якої є відхилення від круглості [14; 15].

Відхилення від круглості при свердлінні інструментом із швидкорізальної сталі з глобулярним покриттям TiCrBr+AlN було розглянуто в порівнянні з інструментом із твердого сплаву ВК6 з суцільним алмазним покриттям товщиною $h = 5$ мкм при свердлінні заготовки зі склопластику СТЕФ-У (рис. 1).

У дослідженнях брали участь по 3 свердла кожного з варіантів із товщиною покриття $h = 5$ мкм. Кожним із свердел здійснювалась обробка 3 отворів.



Рис. 1. Свердління отвору в заготовці зі склопластику СТЕФ-У

Вимірювання круглості проводилось у трьох перерізах по довжині отвору: на вході свердла, посередині і на виході. Ескіз експериментальних зразків із ВПКМ наведено на рис. 2.

Вимірювання відхилення від круглості здійснювалось на вимірювальному комплексі, який складається із кругломіра встановленого на столі та електронного блока і блока запису круглограм, встановлених на тумбі рис. 3.

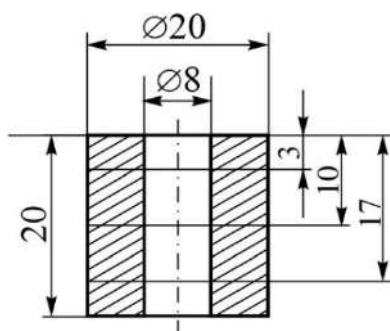


Рис. 2. Ескіз експериментального зразка з ВПКМ з позначенням контрольних перерізів



Рис. 3. Вимірювальний комплекс

Після підготовки до роботи проводилось центрування та вимірювання круглості. Для кожного отвору результати вимірювання графічно зі значенням відхилень від круглості записувались в блок запису.

Умови та середні значення результатів вимірювань точності отворів просвердлених твердосплавними свердлами з суцільним алмазним покриттям та із швидкорізальної сталі з дискретним глобулярним покриттям наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Умови та результати вимірювань точності отворів

№	Матеріал		Умови випробувань			Відхилення від круглості, мкм		
	Підложки	Покриття	h, мкм	V, м/хвс	S, мм/об	Вхідний	Середина	Вихід
1	ВК6	алмазне	5	0,3	0,4	24,73	32,08	26,92
2	Р6М5	TiCrBr+AlN	5	0,3	0,4	34,88	40,84	37,37

Дослідження впливу на відхилення від круглості залежно від виду покриття при свердлінні ВПКМ показує, що ступінь відхилення згідно ГОСТ 24643-81 при обробці свердлами з алмазним покриттям відповідає 11 ступені (≤ 40 мкм).

При глобулярному покритті одержаному методом ЕІІ на вході та на виході свердла відхилення від круглості відповідає 11 ступені точності, а посередині – 12 ($\leq 60\mu\text{м}$). (табл. 1, рис. 4).

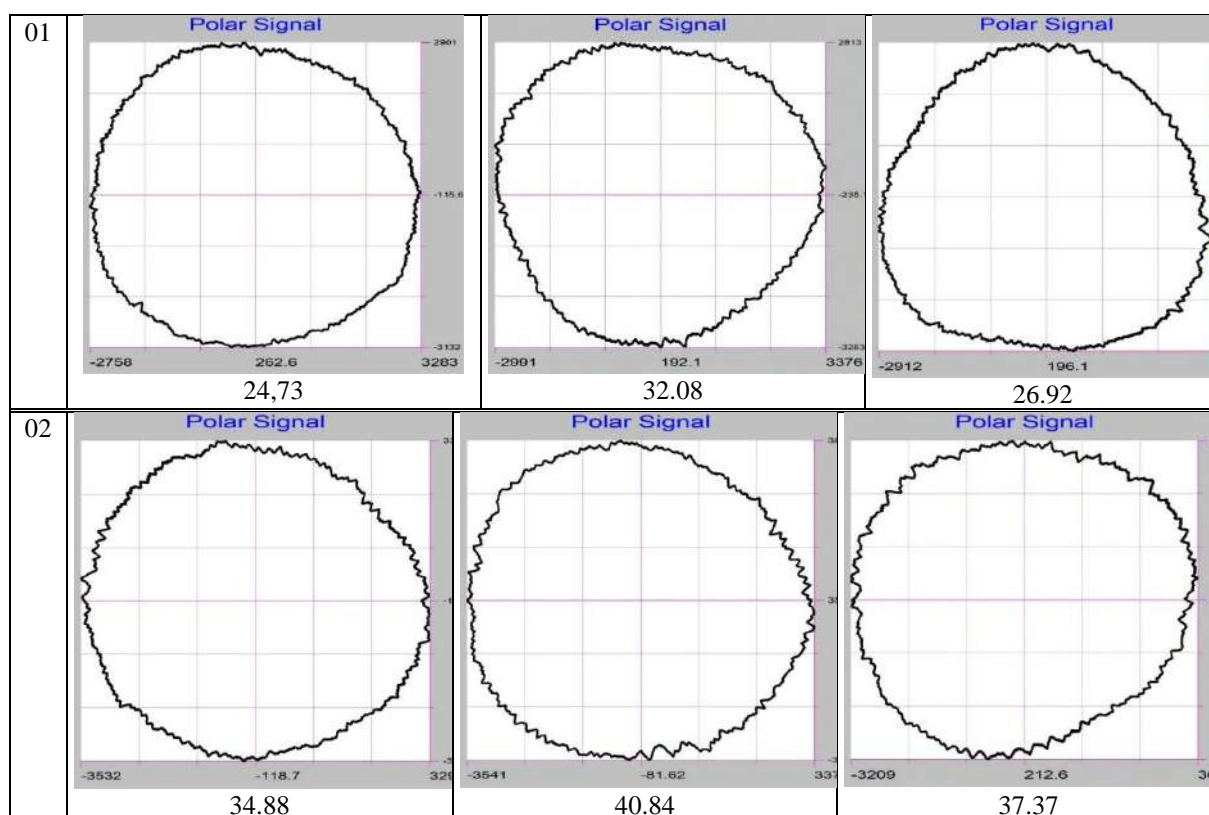


Рис. 4. Відхилення від круглості:

01 – суцільне алмазне покриття, 02 – глобулярне покриття

Джерело: розроблено авторами.

Таким чином, можна вважати (за найбільшим відхиленням від круглості), що обидва випадки відповідають ДСТУ11284:2008 Отвори наскрізні під кріпильні деталі та ДСТУ 14802:2008.

Проте глобулярні покриття мають значну перевагу в порівнянні з алмазними по загальній вартості на їх виготовлення, тому в повній мірі можуть бути використані при обробці ВПКМ.

Висновки. У роботі досліджено точність обробки отворів у ВПКМ інструментом зі швидкорізальної сталі з нанесеним на його робочі поверхні дискретним покриттям глобулярного типу. Значення відхилення від круглості оброблених отворів свідчать про можливість рівноцінної заміни свердел з полікристалічним алмазним покриттям на свердла з швидкорізальної сталі з нанесеним на його робочі поверхні дискретним покриттям TiCrVg+AlN глобулярного типу. Таким чином можна зменшити вартість інструменту без втрати точності обробки деталей з ВПКМ.

Список використаних джерел

1. Deborah D. L. Chang *Composite materials: science and applications. Functional materials for modern technologies / D. L. Deborah.* – Printed in Great Britain, 2004. – 293 p.
2. Thomas H. Hahn. *Composite Materials: Fatigue and Fracture / H. Thomas Hahn, Paul A. Lagace, T. Kevin O'Brien.* – Printed in Ann Arbor, MI, 1991. – 830 p.
3. Механическая обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов (аналитический обзор) : монография / Д. В. Криворучко, В. А. Залога, В. А. Пасечник, В. А. Колесник, С. С. Емельяненко. – Сумы 2013. – 272 с.

4. Sheikh-Ahmad JY7 Machining of Polymer Composite/ Sheikh-Ahmad J.Y. – Technology and Engineering, 2008. – 230 p.

5. Кива Д. С. Этапы становления и начало развернутого применения полимерных композиционных материалов в конструкциях пассажирских и транспортных самолетов / Д. С. Кива // Авиационно-космическая техника и технология. – 2014. – № 6(113). – С. 5-16.

6. Лабунец В. Ф. Авиационные конструкционные материалы с высокой удельной прочностью : учебное пособие / В. Ф. Лабунец. – К. : КМУГА, 1993. – 116 с.

7. Gay, D. Composite Materials. Design and Application D. Gay, S. V. Hoa. – CRC Press, 2007. – 328 p.

8. Лобанов Д. В. Технология инструментального обеспечения производства изделий из композиционных неметаллических материалов: монография / Д. В. Лобанов, А. С. Янюшкин. – Старый Оскол : ТНТ, 2012. – 296 с.

9. Тарасюк А. П. Расширение функциональных возможностей волокнистых полимерных композитов за счет разработки эффективных процессов механической обработки : дис. ... д-ра техн. наук / А. П. Тарасюк. – Харьков, 2011. – 567 с.

10. Баранчиков В. И. Обработка специальных материалов в машиностроении: Справочник. Библиотека технолога / В. И. Баранчиков, А. С. Тарапанов, Г. А. Харламов. – М. : Машиностроение, 2002. – 264 с.

11. Милокост І. О. Підвищення якості отворів при свердлінні тонкостінних виробів з ортотропних вуглепластиків : дис. ... канд. техн. наук / І. О. Милокост. – К., 2016. – 158 с.

12. Лупкин Б. В. Касс Сверление ПКМ сверлами с подрезающими режущими кромками / Б. В. Лупкин, О. М. Кошкина, А. Л. Касс // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2011. – № 49. – С. 68-80.

13. Hochgen H. On Drilling Characteristics of Some Fiber-Renforced Thermoset and Thermoplastics in Drilling / H. Hochgen, H.Y. Puw, // Int. J. of Machine tools and Manufacture. – 1992. Vol. 32, no. 4. – Pp. 583-592.

14. ДСТУ 14802:2008 Заклепки (повышенной точности).

15. ДСТУ 11284:2008 Отвори наскрізні під крипильні деталі.

References

1. Deborah, D.L. (2004). Chang Composite materials: science and applications. Functional materials for modern technologies. *Printed in Great Britain*.

2. Thomas, H. Hahn, Paul A. Lagace, T. Kevin O'Brien (1991). Composite Materials: Fatigue and Fracture. Printed in Ann Arbor, MI. – 830.

3. Kryvoruchko, D.V., Zaloha, V.A., Pasechnyk, V.A., Kolesnyk, V.A., & Emelianenko, S.S. (2013). *Mekhanicheskaiia obrabotka kompozytsionnykh materialov pri sborke letatelnykh apparatov (analiticheskii obzor) [Machining of composite materials in the assembly of aircraft (analytical review)]*.

4. Sheikh-Ahmad JY7 Machining of Polymer Composite/ Sheikh-Ahmad J.Y. (2008). Technology and Engineering.

5. Kyva, D.S. (2014). *Etapy stanovleniia i nachalo razvernutoho primeneniia polimernykh kompozitsionnykh materyalov v konstrukttsiakh passazhirskikh i transportnykh samoletov [Stages of formation and the beginning of the expanded application of polymer composite materials in the construction of passenger and transport aircraft]. Avyatsyonno-kosmycheskaia tekhnika y tekhnolohyia – Aviation and space engineering and technology, (6(113)), 5-16.*

6. Labunets, V.F. (1993). *Aviatsyonnye konstruksionnye materialy s vysokoi udelnoi prochnosti [Aviation construction materials with high specific strength]*. KNAU.

7. Gay, D., & Hoa S. V. (2007). *Composite Materials. Design and Application*. CRC Press.

8. Lobanov, D.V., & Yaniushkyn, A.S. (2012). *Tekhnologiia instrumentalnogo obespecheniia proizvodstva izdelii iz kompozitsionnykh nemetallicheskih materialov [Technology of instrumental support for the production of products from composite non-metallic materials]*. Stary Oskol: TNT.

9. Tarasiuk, A.P. (2011). *Rasshirenie funktsionalnykh vozmozhnostei voloknistykh polimernykh kompozitov za schet razrabotki effektivnykh protsessov mekhanicheskoi obrabotki [Expansion of functional possibilities of fibrous polymer composites due to development of effective processes of mechanical processing]* [Doctor dissertation].

10. Baranchikov, V.I., Tarapanov, A.S., & Kharlamov, H.A. (2002). *Obrabotka spetsyalnykh materyalov v mashynostroenyu: Spravochnyk. Byblyoteka tekhnoloha [Processing of special materials in mechanical engineering]*. Mechanical engineering.

11. Mylokost, I.O. (2016). *Pidvyshchennia yakosti otvoriv pry sverdlinni tonkostinnykh vyrobiv z ortotropnykh vuhleplastykiv [Improving the quality of holes when drilling thin-walled products from orthotropic carbon plastics]* [PhD dissertation].
12. Lupkyn, B.V., Koshkyna, O.M., & Kass, A.L. (2011). Kass Sverlenye PKM sverlamy s podre-zaiushchymy rezhushchymy kromkami [Drilling of PKM drills with cutting edges]. *Otkrytye informatsionnye i kompiuternye integrirovannye tekhnologii – Open information and computer integrated technologies*, 49, 68-80.
13. Hochgen, H., & Puw, H.Y. (1992). *On Drilling Characteristics of Some Fiber-Reinforced Thermoset and Thermoplastics in Drilling*. Int. J. of Machine tools and Manufacture, 32(4), 583-592.
14. DSTU 14802:2008 Zaklepki (povyshennoi tochnosti) [DSTU GOST 14802:2008 Rivets (high precision)].
15. DSTU 11284:2008 Otvory naskrizni pid kryplyni detali [DSTU GOST 11284:2008 Through openings under fasteners].

Отримано 06.02.2022

UDC 621.9.02.004.6

Ievgen Korbut¹, Valeriya Parnenko², Tatyana Nikolayenko³, Oleksandr Plivak⁴¹PhD in Technical Sciences, Assistant Professor, Department of Machine Design

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: korbut113@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-1221-4052>. **Scopus Author ID:** [56736964700](https://orcid.org/0000-0002-1221-4052)²PhD in Technical Sciences, Assistant, Department of Machine Design

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: v.parnenko@kpi.ua. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-1450-2744>. **Scopus Author ID:** [57217101654](https://orcid.org/0000-0002-1450-2744)³PhD in Technical Sciences, Assistant Professor, Department of Descriptive Geometry and Engineering Graphics
Kyiv National University of Construction and Architecture (Kyiv, Ukraine)**E-mail:** tatyana.rodina@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0960-1251>.**ResearcherID:** https://www.researchgate.net/profile/Tatyana_Nikolayenko⁴Head of the Laboratory of Measuring Technology NN MMI

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: aplivak@gmail.com

INVESTIGATION OF ACCURACY OF HOLES IN FIBER POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS DURING TREATMENT WITH DRILLS, WITH THE SURFACE SURFACED ON THEIR

The article considers the main brands of tool materials used for cutting tools used for processing fibrous polymer composite materials (FIC) and sets requirements for them.

The analysis of advantages and disadvantages of their application is carried out. It is noted that to increase the wear resistance of cutting tools made of high-speed steels and carbide alloys for processing fibrous polymeric composite materials are currently used continuous coatings based on TiC, TiN, TiCN, TiALON, AlCrN and others, however, the use of such coatings does not significantly increase resistance due to the impossibility of providing in the process of cutting a small radius of rounding of the cutting edge. It is shown that diamond coatings are predominant for the processing of fibrous polymeric composite materials, but there is a problem of creating the necessary adhesion and high cost of the tool with this coating. Competitive and promising method of applying wear-resistant coatings is the method of electrospark alloying (ESA), which in comparison with other methods has both a significantly lower magnitude of energy consumption and a cost of equipment. The article presents the results of research to determine the accuracy of holes in parts made of fibrous polymeric composite materials, namely fiberglass STEF-U when processing drills from high-speed steel with the discrete covering of globular type put on its working surfaces in comparison with drills with a diamond covering. The obtained research results showed that the obtained values of deviation from the roundness of machined holes meet the requirements for holes for fasteners, and this indicates the possibility of equivalent replacement of drills with polycrystalline diamond coating on drills made of high-speed steel type, which will reduce the cost of the tool and therefore the cost of the finished product without losing the accuracy of processing.

Keywords: cutting tool; tool material; precision machining; wear-resistant coatings; fibrous polymer composite material; electrospark alloying; discrete type coatings; abrasive wear; ceramics; cubic boron nitride; cohesive-adhesive strength of the coating.

Fig.: 4. Table: 1. References: 15.

РОЗДІЛ II. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-1(27)-108-124

УДК 004.94

**Світлана Корнієнко¹, Ігор Корнієнко², Володимир Дмитрієв³,
Анатолій Павленко⁴, Дмитро Камак⁵**

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: cornel@ukr.net. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9105-0780>

ResearcherID: [F-7236-2017](https://orcid.org/0000-0001-9105-0780). SCOPUS Author ID: [57219054966](https://orcid.org/0000-0001-9105-0780)

³доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, заступник начальника інституту з наукової роботи
Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки
(Чернігів, Україна)

E-mail: vadmitriev@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0792-6397>

SCOPUS Author ID: [57219049932](https://orcid.org/0000-0002-0792-6397)

⁴кандидат технічних наук, начальник науково-організаційного відділу
Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації
озброєння та військової техніки (Чернігів, Україна)

E-mail: agpav@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6341-8381>

SCOPUS Author ID: [57219056002](https://orcid.org/0000-0001-6341-8381)

⁵начальник науково-дослідного відділу

Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації
озброєння та військової техніки (Чернігів, Україна)

E-mail: dkam@meta.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0348-5456>

SCOPUS Author ID: [57219057496](https://orcid.org/0000-0003-0348-5456)

ОЦІНКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ПОВ'ЯЗАНОСТІ ПРОЦЕСІВ ПРИ ФУНКЦІОНАЛЬНОМУ МОДЕЛЮВАННІ СИСТЕМИ ВИПРОБУВАНЬ

У статті розглянуто питання оцінки функціональних моделей на передпроектному етапі. Запропоновано спосіб оцінювання пов'язаності процесів при функціональному моделюванні складних систем за допомогою графічної нотації IDEFO з використанням засобів автоматизованого проектування. Оцінка має чіткі логічні межі й чутлива до зміни параметрів оцінюваної моделі. Зважаючи на різну важливість зв'язків, що передбачено інтерфейсом графічної нотації IDEFO, запропоновано використання шкали вагомості типу зв'язку, що забезпечує відображення в оцінці пов'язаності функцій сильних або слабких типів зв'язків і, відповідно, успішності й раціональності конфігурації функціональної моделі.

Ключові слова: випробування; автоматизація; оцінка; інформаційна пов'язаність; функціональна модель.

Табл.: 5. Рис.: 3. Бібл.: 30.

Актуальність теми дослідження. Проведення випробувань зразків озброєння та військової техніки (ОВТ) являє собою складний багатоетапний процес перевірки відповідності виробу заявленим тактико-технічним характеристикам. Здебільшого процес випробувань складається з декількох етапів: підготовки до випробувань, безпосередньо випробувань, обробки одержаних результатів і складання актів випробувань та іншої звітної документації. Успішність виконання етапів випробувань, які визначаються критеріями своєчасності й достовірності одержаних результатів, переважно визначається належною інформаційною підтримкою на всіх етапах та налагодженням внутрішньосистемних процесів документообігу та обміну інформацією.

Постановка проблеми. Для вирішення завдань всебічної інформаційної підтримки випробувань зразків ОВТ у Державному науково-дослідному інституті випробувань і сертифікації ОВТ (ДНДІ ВС ОВТ) розпочата розробка автоматизованої інформаційної системи супроводження випробувань ОВТ. Початкові етапи створення інформаційних

систем передбачають проведення системного аналізу інформаційних процесів, які відбуваються в системі. Однією з перевірених технік системного аналізу є SADT функціональне моделювання систем за допомогою нотації IDEF0 (і відповідними доповненнями IDEF1x, DFD, STD тощо) з використанням засобів автоматизації.

Проведене функціональне моделювання системи випробувань зразків ОВТ вирішило низку завдань системного аналізу інформаційних процесів, а саме дозволило визначити структуру інформаційних потоків і ресурсів, встановити носії інформації та їх маршрутизацію, сформулювати потреби в інформації для різних компонентів аналізованої системи та/або різних процесів (функцій), визначити системні ознаки проявів і впливів інформаційних потоків на ефективність функціонування системи. Проте невирішеним залишилося питання комплексної оцінки конфігурації функціональної моделі. Потреба в таких оцінках може виникнути під час вибору альтернативного варіанта функціональної моделі на етапах оптимізації і модернізації системи з метою підвищення ефективності її функціонування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Сучасний стан нормативної бази випробувань ОВТ включає в себе низку документів, правил та методичних вказівок [1-9], які регламентують загальний порядок випробування зразків ОВТ на всіх етапах їх життєвого циклу в частині міжвідомчої взаємодії при організації і проведенні випробувань, прав і обов'язків сторін такої взаємодії, чіткої регламентації форми і змісту документації, стандартизації способів дослідження зразка ОВТ тощо. Однак залишається певна ступінь свободи в частині організації випробувальної діяльності й методичних підходів до неї безпосередньо в ДНДІ ВС ОВТ [10-11]. Успішність і системність процесів управління випробувальною діяльністю на цій ланці певною мірою впливає на рівень обороноздатності держави [12], що забезпечує актуальність інтересу до проблеми оптимізації системи випробувань. Існує чимала кількість досліджень з цих питань, наприклад, у [13-16] розглянуто низку проблем, які пов'язані з організацією, підготовкою та проведенням випробувань. У [17] авторами досліджено модель системи випробувань ОВТ, а у [18] представлено концептуальну модель автоматизованої інформаційної системи супроводження випробувань ОВТ. Створення такої інформаційної системи передбачає функціональне моделювання, дослідження і аналіз усіх інформаційних процесів у системі випробувань.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Техніка функціонального моделювання систем SADT, що представлена нотацією IDEF0, добре зарекомендувала себе під час проведення декомпозиції і системного аналізу інформаційних потоків та інформаційних ресурсів. Чисельні приклади реалізації SADT у програмних комплексах, зокрема у програмному продукті ERwin, який використовували автори, дозволяють автоматизувати більшість процесів функціонального моделювання, надають максимально зручний інтерфейс (що дозволяє досліднику зосередитись на основних задачах системного аналізу), мають гнучкі налаштування функцій та виводять у зручному вигляді результати моделювання та повну статистичну інформацію. Проте зазначена нотація, як і програмні комплекси, що її реалізують, не дають яких-небудь висновків щодо ефективності створеної функціональної моделі (сили або слабкості, вдалості, гнучкості або керованості тощо). Такою оцінкою може бути ступінь інформаційної пов'язаності процесів на різних етапах випробування та в системі випробувань загалом, а також ступінь керованості процесів випробувань.

Мета дослідження. На основі результатів функціонального моделювання, статистичних звітів, які надаються програмним продуктом ERwin, розробити спосіб оцінювання функціональної пов'язаності моделі складної системи та ступеня її керованості.

Виклад основного матеріалу. Системний аналіз інформаційних процесів і потоків у складних системах є обов'язковою процедурою при синтезі автоматизованих інформаційних систем. Незважаючи на різні цілі такого аналізу (що можна побачити на прикладі [19; 20; 24-30]), різні методи та методик, що використовуються у процесі аналізу, або різноманітність, різноплановість чи комплексність аналізованих складних систем, кінцевою метою є підвищення ефективності їх функціонування.

Проведене функціональне моделювання системи випробування ОВТ у межах випробувальної організації (з урахуванням діючих національних законодавчих і нормативних регламентних документів, стандартів, норм і методик [1-9]) дозволило визначити загальносистемні характеристики інформаційних потоків, а саме: тип інформаційного зв'язку між процесами випробування (функціями моделюваної системи); потребу в інформаційному супроводженні на різних етапах проведення випробувань ОВТ; ступінь важливості інформаційного ресурсу для процесу випробування. Для аналізу створеної функціональної моделі системи випробувань всі інформаційні потоки (зв'язки) були класифіковані на зовнішньосистемні (граничні) і внутрішньосистемні. З огляду на нотацію IDEF0, усі зв'язки між функціями можуть мати чотири призначення, бути входом (Input) або виходом (Output) функції, керувати функцією (Control) або забезпечувати її виконання (Mechanism).

Зауважимо, що в аналізованій системі випробувань як граничні, так і внутрішньосистемні зв'язки мають суто інформаційний або змішаний характер (з певною інформаційною складовою). Наприклад (рис. 1), граничний зв'язок «Випробувальний зразок» несе інформаційний вміст як у вигляді досліджуваного зразка ОВТ, так і у технічній документації на зразок та іншій супровідній документації; зв'язок «Персонал» несе як механізм, завдяки якому виконуються функції, так і певний інформаційний контент у вигляді «знань», «накопиченого досвіду», «навиків випробувальної діяльності» тощо, від якого великою мірою залежить успішність та ефективність виконання функцій системи випробувань.

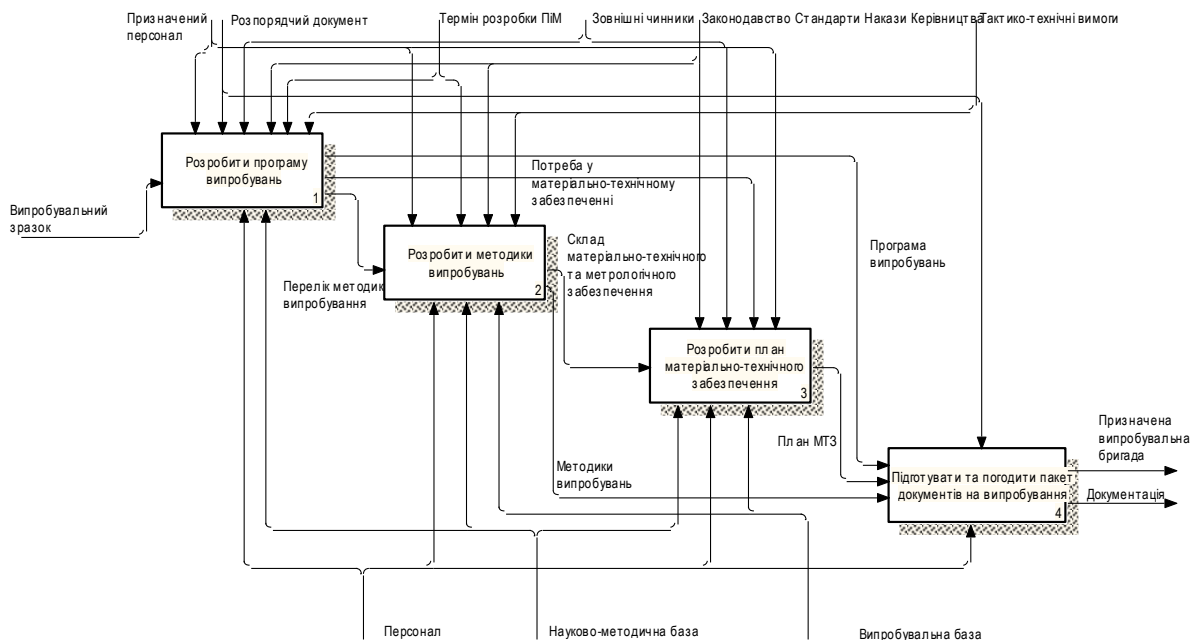


Рис. 1. Діаграма процесу підготовки документації підготовчого етапу випробувань
Джерело: розроблено авторами.

На основі сформованих у ERwin звітів щодо граничних зв'язків була виконана кількісна оцінка затребуваних інформаційних ресурсів на різних етапах випробування (табл. 1).

Таблиця 1

Перелік та характеристика граничних зв'язків функціональної моделі випробувань ОВТ

Назва зв'язку	Тип зв'язку	Кількість процесів (функцій) одержувачів / джерел	Потреби на основних етапах випробування			
			Підготовчий етап	Практичні випробування	Обробка даних	Складання акта
Випробувальна база	Mechanism	11	9	2		
Випробувальний зразок	Input	14	10	4		
Законодавство, стандарти, накази керівництва	Control	16	13	2		1
Зовнішні чинники	Control	11	7	4		
Матеріальні ресурси	Mechanism	2		2		
Науково-методична база	Mechanism	20	16		4	
Персонал	Mechanism	65	45	15	4	1
Розпорядчий документ	Control	4	3	1		
Тактико-технічні вимоги	Control	9	7		2	
Акт про випробування	Output	1				1
Кількісна оцінка затребуваності інформаційного супроводження випробування	Абсолютна	153	110	30	10	3
	Відносна	1,00	0,71	0,20	0,07	0,02

Джерело: розроблено авторами.

Така оцінка характеризує інформаційну потребу різних етапів випробування, але не визначає важливості інформаційного супроводження та вагомості інформаційних зв'язків. Оцінка може бути корисною для визначення ступеня автоматизації інформаційного супроводження в різних частинах функціональної моделі (у нашому випадку на різних етапах проведення випробування).

Для внутрішньосистемних функціональних зв'язків, які визначають ступінь і характер пов'язаності процесів (функцій), порядок та процедурність виконання завдань у системі, розробники нотації IDEF0 запропонували власну шкалу оцінювання їх важливості (табл. 2). Найвагомими зв'язками зазначені функціональні, послідовні та комунікативні зв'язки. Менш важливими зв'язками при функціональному моделюванні є процедурні, часові, логічні й випадкові. Наведені в табл. 2 оцінки важливості зв'язків (від 0 до 6) є скоріше декларативними, ніж придатними для оцінювання конфігурації функціональної моделі, проте їх можна використовувати для порівняльної оцінки внутрішньосистемної пов'язаності функцій для декількох альтернативних варіантів конфігурації зв'язків.

Таблиця 2

Характеристика зв'язків функціональної моделі і моделі даних

Вагомість	Тип зв'язності	Характеристика	Для функцій нотації IDEF0 (функціональне моделювання системи)	Для даних нотації IDEF1X (модель даних, що є еквівалентною реляційній моделі бази даних)
1	2	3	4	5
0	Випадкова	Безпосередній зв'язок між функціями малий або відсутній (дуги до/від функцій мають різні імена)	Випадкова	Випадкова
1	Логічна	Дані та функції належать до одного класу або набору елементів без функціонального зв'язку між ними	Функції тієї ж самої множини або класу	Дані тієї ж самої множини або класу
2	Часова	Дані та функції пов'язані в часі і/або використовуються (або виконуються) одночасно	Функції того ж самого періоду	Дані, що використовуються в одному часовому інтервалі

Закінчення табл. 2

1	2	3	4	5
3	Процедурна	Функції або дані є згрупованими внаслідок їх виконання (використання) в одному циклі (процесі)	Функції, що виконуються в одному циклі	Дані, що використовуються в одному циклі
4	Комунікаційна	Функції використовують (продукують) ті ж самі дані, або дані виробляються (споживаються) тією ж самою функцією (виду OUTPUT – (INPUT_1, INPUT_2, ..., INPUT_n))	Функції, використовують ті ж самі дані	Дані, на які впливає та сама функція
5	Послідовна	Послідовний зв'язок між функціями (даними) (виду OUTPUT – INPUT)	Функції, що виконують послідовні перетворення тих самих даних	Дані, які послідовно перетворюються функціями
6	Функціональна	Керування функції іншою функцією без інших типів зв'язку (виду OUTPUT – CONTROL)	Функції, які об'єднані для виконання одного процесу	Дані, які пов'язані з однією функцією

Джерело: розроблено авторами.

Питанням зв'язності розподілених структур присвячено чимало робіт, наприклад [19-25], де пропонується використання наближених методів визначення оцінок. Застосування наближених методів виправдано суттєвим спрощенням розрахунків і достатньо малою похибкою. Проте сучасні методи автоматизованого проектування дозволяють суттєво спростити задачу одержання оцінок. Проектування функціональної моделі в програмному продукті ERwin дозволяє сформувати статистичні звіти за багатьма параметрами моделі, зокрема й за міжфункціональними зв'язками. І хоча призначення цих звітів є документування результатів моделювання, їх можна використовувати для оцінки внутрішньосистемної пов'язаності функцій.

Крім того, зв'язки, що розглядалися у роботах [19-25], мають імовірнісний характер, що є неприйнятним для нашого випадку, де зв'язки мають переважно детермінований характер, а стохастичний фактор визначається через вплив зовнішнього середовища (зовнішніх чинників) на успішність виконання функцій. Детерміновані оцінки зв'язності графів, такі як вузлова зв'язність або реберний переріз, не можна застосувати через те, що вони призначені для встановлення мінімальної кількості вершин або ребер для перетворення зв'язного графа в незв'язний, і не відповідають нашій меті оцінювання розвиненості зв'язків у функціональній моделі.

Розглянемо проблему оцінки пов'язаності функцій з погляду визначення кількісного показника, що характеризуватиме розвиненість зв'язків між функціями системи. Якщо вважати, що всі зв'язки мають рівну вагу, то простішою оцінкою пов'язаності є їх щільність C_l , тобто середня кількість зв'язків, що припадає на окрему функцію:

$$C_l = \frac{N_l}{n}, \quad (1)$$

де N_l – загальна кількість зв'язків функціональної моделі; n – загальна кількість функцій функціональної моделі. У такому вигляді оцінка пов'язаності дає певну характеристику функціональної моделі, але є корисною лише при порівнянні варіантів розробки функціональної конфігурації однієї системи.

Визначимо потенційні межі існування оцінки (1). Якщо припустити, що одна функція повинна мати мінімум 2 зв'язки (дуги), що приєднані до неї (наприклад, вхід і вихід), але перша й остання функція матимуть по одному внутрішньосистемному інтерфейсному зв'язку (інші належать до граничних зв'язків), то справедливим є співвідношення кількості внутрішньосистемних зв'язків N_l : $N_l + 1 \geq n$. Таке припущення є справедливим з міркувань,

що функція не існує сама по собі і має перетворювати вхідну інформацію (продукт, енергію тощо) у вихідну. Тоді мінімальне значення, яке може прийняти оцінка (1) при зростанні кількості функцій становитиме $C_l \geq \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{N_l}{n} \right) = 1$. Зауважимо, що оцінка (1) стосується лише внутрішньосистемних зв'язків, якщо функціональна модель матиме мінімум 2 граничних зв'язка $N_{l_{ext}}$, які з'єднують систему з навколишнім середовищем, то: $N_l + N_{l_{ext}} > n$.

Визначимо потенційну верхню межу оцінки (1). Якщо вважати, що між двома функціями може існувати лише 1 зв'язок (еквівалент неорієнтованого графа), то максимальна кількість внутрішньосистемних зв'язків становитиме $N_l = \frac{n(n-1)}{2}$. Проте, невиключним є варіант, коли функції пов'язані як прямим, так і зворотнім зв'язком, і якщо це весь набір зв'язків, що може існувати між двома функціями, то максимальна кількість внутрішньосистемних зв'язків становитиме $N_l = n(n-1)$. При розгляді функціональної моделі за нотацією IDEF0 кожна функція має 3 входи і 1 вихід. Відповідно можна вважати, що потенційно можлива кількість прямих зв'язків між функціями становитиме три прямих і три зворотних зв'язка, і тоді кількість внутрішньосистемних зв'язків буде обмежена зверху величиною:

$$N_l \leq 3n(n-1). \quad (2)$$

Обмеженням для виконання нерівності (2) є те, що не може існувати дублюючих зв'язків, тобто може існувати лише один зв'язок між конкретним інтерфейсним виходом функції і конкретним інтерфейсним входом функції, і всі можливі дані (продукти, енергії тощо) групуються у один потік.

Тоді, оцінка (1) матиме межі: $1 < C_l \leq 3(n-1)$. Якщо оцінку (1) розглянути в границі, за умови що $n \rightarrow \infty$, то $C_l \in (1; \infty)$. Такий інтервал існування оцінки не є зручним при порівнянні ступеня пов'язаності функцій у функціональних моделях різної розмірності. Інакше можна запропонувати обернену оцінку (1), тоді її границі будуть знаходитись у межах: $\frac{1}{C_l} \in (0; 1]$. Знаходження оберненої оцінки біля одиниці буде визначати мінімально

можливу кількість зв'язків у функціональній схемі; при її прямуванні до нуля кількість зв'язків зростатиме. Таке представлення зв'язності дещо суперечливо, оскільки природним для розуміння є сенс збільшення оцінки при збільшенні функціональних зв'язків. З урахуванням границь зворотної оцінки (1), можна представити оцінку зв'язності як

$$Q_l = 1 - \frac{1}{C_l} = \frac{N_l - n}{N_l}, \quad (3)$$

при цьому $Q_l \in [0; 1)$. Тоді за мінімально можливої кількості зв'язків оцінка дорівнюватиме нулю, а при зростанні кількості зв'язків оцінка прагнучиме до 1. Окремо зауважимо, що оцінка (3) матиме сенс тільки за двох умов:

- 1) $N_l \geq n$;
- 2) оцінка буде точнішою при $n \rightarrow \infty$.

Оскільки кількість внутрішньосистемних зв'язків визначається нерівністю $N_l + 1 \geq n$, то потенційно може існувати випадок, коли кількість внутрішньосистемних зв'язків виявиться меншим за кількість функцій, і оцінка матиме від'ємне значення. Для усунення цього представимо оцінку (3) у такому вигляді:

$$Q_l = \frac{(N_l + 1) - n}{N_l}. \quad (4)$$

Додана одиниця не матиме суттєвого впливу при достатньо великих значеннях N_l , і не вноситиме значну похибку у величину Q_l .

Для підтвердження цього припущення, дослідимо поведінку оцінки (4) при різних значеннях кількості функцій n і кількості зв'язків N_l . Потенційно можливі значення мінімальної і максимальної кількості зв'язків для різної кількості функцій наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Вихідні дані для аналізу оцінки пов'язаності функцій у функціональній моделі IDEF0

n	$N_{l\min}$	$N_{l\max}$
2	1	6
5	4	60
10	9	270
100	99	29700

Джерело: розроблено авторами.

Результати обчисленої оцінки пов'язаності функцій для функціональних моделей з різною кількістю функцій представлені на рис. 2. Для зручності аналізу вісь кількості зв'язків N_l взята у логарифмічному масштабі.

З рис. 2 можна побачити, що потенційне наближення оцінки до одиниці можливе при достатньо великій кількості функцій. З іншого боку, технологія IDEF0 призначена для моделювання складних систем, які мають достатньо складну структуру. Наприклад, моделювання системи випробувань з декомпозицією функцій до 2-4 рівня ієрархії (яке можна вважати початковим етапом аналізу) налічує 88 функцій. Тому, на нашу думку, справедливо, що певна обмеженість у досягненні верхньої межі оцінки при малих кількостях функцій не впливатиме при аналізі складних функціональних моделей.

Також із графіків рис. 2 видно, що поведінка оцінки, яка задається кривизною графіків, однакова для різних значень n і N_l , що свідчить про можливість її застосування при порівнянні пов'язаності функцій для моделей різного масштабу і складності (на графіку логарифмічний характер осі кількості зв'язків N_l зводить розкид між максимальною і мінімальною кількістю функціональних зв'язків до одного масштабу).

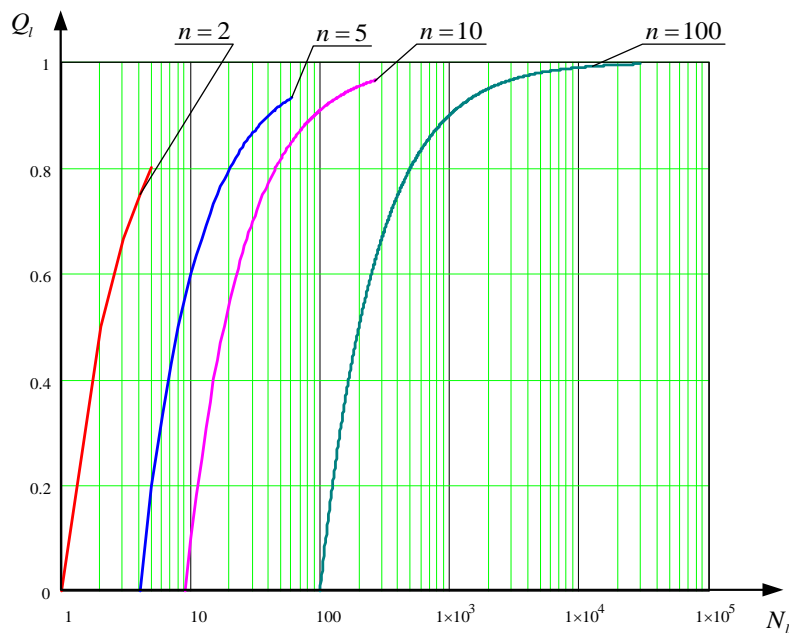


Рис. 2. Значення Q_l для різної кількості функцій n і кількості зв'язків N_l

Джерело: розроблено авторами.

Отже, одержана оцінка (4) може бути використана для оцінки пов'язаності функцій, проте, при її формуванні було здійснене припущення щодо рівнозначності міжфункціональних зв'язків. Але, як визначалося у постановочній частині статті, для оцінки найбільш керованої структури (структури з найсильнішими зв'язками) існує потреба розрізнити тип функціонального зв'язку та визначити найсильнішу пов'язаність функцій (навіть за умови однакової кількості зв'язків). Розробники технології IDEF0 рекомендували при моделюванні звертати увагу на вагомість того чи іншого типу зв'язку, які або посилюють функціональну структуру, або навпаки послаблюють її (див. табл. 2). Таке посилення або послаблення можна враховувати через привласнення зв'язкам певної ваги. У табл. 2 розробники умовно навели вагомість типу зв'язків у шкалі 0...6. Насправді на етапі функціонального моделювання системи, достатньо складно об'єктивно оцінити вплив того чи іншого типу зв'язку на ефективність функціонування системи і сформувати шкалу коефіцієнтів, яка однозначно визначатиме «корисність», «шкідливість» або «нейтральність» зв'язку, а тим більше величину їх впливу на ефективність розподіленої системи [19; 25]. Але, якщо вважати, що є певний «серединний» стан функціональної моделі системи, який можна покращувати або погіршувати за рахунок введення «сильних» або «слабких» зв'язків, то можна спробувати скористатися шкалою, що пропонується розробниками IDEF0. Прийmemo, що «процедурний» тип зв'язності є тим типом зв'язку, що приводить систему в «серединний» стан (табл. 4).

Таблиця 4

Відповідність вагомості типу зв'язності IDEF0 та ваги зв'язку при визначенні оцінки пов'язаності функцій

Вагомість IDEF0	Тип зв'язку	Вага зв'язку при визначенні оцінки пов'язаності функцій, ω		
		Масштаб співвідношення шкал $m = 1$	Масштаб співвідношення шкал $m = 0,5$	Масштаб співвідношення шкал $m = 2$
0	Випадкова	1/4	1/2	1/8
1	Логічна	1/3	2/3	1/6
2	Часова	1/2	5/6	1/4
3	Процедурна	1	1	1
4	Комунікаційна	2	4/3	4
5	Послідовна	3	5/3	6
6	Функціональна	4	2	8

Джерело: розроблено авторами.

Тобто процедурний тип зв'язку, за такого представлення, є типом зв'язку, що не посилює і не послаблює функціональну систему, відповідно його вага $\omega = 1$. Тоді інші типи зв'язків, додають, або віднімають користь. Далі можна скористатися шкалою розробників нотації IDEF0, при цьому, найсильніший тип зв'язку – «функціональний» матиме вагу $\omega = 4$, а найслабкіший – «випадковий»: $\omega = 1/4$. Складність оцінювання також полягає у визначенні величини впливу того чи іншого типу зв'язку на ефективність функціонування системи, і, не виключно, що величина впливу залежатиме від природи моделюваної системи; тобто зв'язки двох однакових по структурі функціональних моделей, але різних за призначенням (сферами застосування) можуть мати докорінно різну впливовість на ефективність функціонування системи. Для відображення «послаблення» або «посилення» впливу зв'язків можна ввести масштаб співвідношення шкал IDEF0 і ваги зв'язку при визначенні оцінки пов'язаності функцій (вага зв'язку при різних значеннях масштабу наведена в табл. 4). Тоді оцінка (4), яка враховує тип зв'язності матиме вигляд:

$$Q_i = \frac{m \sum_{i=1}^{N_i} \omega_i + 1 - n}{m \sum_{i=1}^{N_i} \omega_i}, \quad (5)$$

де m – масштаб співвідношення шкал IDEF0 і ваги зв'язку при визначенні оцінки пов'язаності функцій, ω_i – вага зв'язку i -го типу.

Зауважимо, що оцінка (5) матиме границі $Q_i \in [0; 1)$ за умови, що загальна кількість «сильних» зв'язків буде більше, ніж кількість «слабких» зв'язків, що завжди відбувається на практиці при функціональному моделюванні систем. Запропоновані коефіцієнти типу зв'язності не є остаточними і достеменно справедливими, але певним чином враховують вплив чисельності, конфігурації і типу функціональних зв'язків.

Дослідимо поведінку оцінки функціональної пов'язаності моделі при зміні типу зв'язків. Для цього побудуємо залежність оцінки від типу зв'язку та загальної кількості зв'язків (рис. 3).

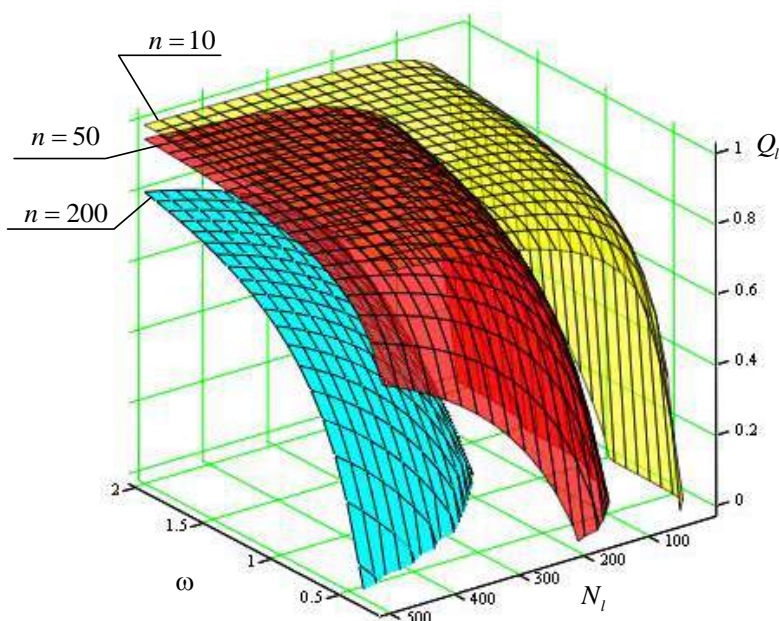


Рис. 3. Поведінка оцінки Q_i при варіюванні типами зв'язків ω_i і кількістю зв'язків N_i

Джерело: розроблено авторами.

На графіках рис. 3 варіювання параметром ω здійснюється у межах 0,25...2, при цьому нижня межа визначає, що всі міжфункціональні зв'язки в моделі є «випадковими», верхня межа характеризує модель, в якій всі зв'язки мають найсильніший функціональний тип. Вочевидь, що всі інші конфігурації системи з різними типами зв'язків знаходяться в цих межах. З графіків видно достатню чутливість оцінки пов'язаності до типу зв'язку при співрозмірному відношенні кількості функцій і кількості зв'язків. При суттєвому перевищенні кількості зв'язків над кількістю функцій (понад 7-10 разів) оцінка пов'язаності перестає бути чутливою як до типів зв'язків, так і до їх кількості.

Отже, оцінимо внутрішньосистемну пов'язаність функціональної моделі випробувань ОВТ. У табл. 5 наведені кількісні показники внутрішньосистемних зв'язків за типами і за етапами випробувань (табл. 5 сформована на основі звіту, який згенерований програмним продуктом ERwin). Зв'язки, що враховувались, належать до категорії внутрішньосистемних, і в тому числі, міжетапні. Зауважимо, що в оцінюваній функціональній моделі відсутні «слабкі» зв'язки, що пов'язане з невеликою глибиною функціональної декомпозиції процесу випробувань ОВТ.

Таблиця 5

Оцінки пов'язаності функцій на різних етапах випробування

Тип зв'язності	Кількісні показники внутрішньосистемної пов'язаності функцій за етапами							
	підготовчий етап	% типу зв'язку	практичні випробування	% типу зв'язку	обробка даних	% типу зв'язку	складання акта	% типу зв'язку
Функціональна	64	63	39	74	8	50	2	67
Послідовна	27	26	10	19	4	25	1	33
Комунікативна	11	11	4	8	4	25	-	0
Загальна кількість зв'язків за етапом випробувань	102		53		16		3	
Кількість функцій	45		17		4		1	
Щільність зв'язків	2,26		3,11		4		3	
Оцінка пов'язаності функцій Q_i	0,877		0,917		0,942		-	

Джерело: розроблено авторами.

З табл. 5 видно, що найбільш керованими процесами характеризується етап практичних випробувань, що є природним, оскільки майже всі процеси практичних випробувань керуються нормативно-методичними документами: програма, методика, календарний план випробувань. Однак оцінка Q_i визначає найбільш сильною функціональну структуру етапу обробки даних, який має найбільшу щільність зв'язків серед інших етапів функціональної моделі.

Крім того, етап обробки даних характеризується мінімальною кількістю граничних зв'язків (у порівнянні з іншими етапами) і жорстким алгоритмуванням процесів обробки результатів випробувань та одержання оцінок достовірності результатів, що дає підстави припустити про справедливість одержаної оцінки.

Висновки. У статті запропоновано спосіб оцінювання функціональної пов'язаності процесів при функціональному моделюванні складних систем за допомогою графічної нотації IDEF0 і з використанням засобів автоматизованого проектування. Оцінка має чіткі логічні межі й чутлива до зміни параметрів оцінюваної моделі. Зважаючи на різну важливість зв'язків, які передбачені інтерфейсом графічної нотації IDEF0, запропоновано використання шкали вагомості типу зв'язку, що забезпечує відображення в оцінці пов'язаності функцій сильних або слабких боків конфігурації функціональної моделі.

Використання запропонованого способу оцінювання дозволить порівнювати структури функціональних моделей складних систем ще на етапі передпроектних досліджень.

Список використаних джерел

1. Про затвердження Порядку проведення випробувань зразків озброєння та військової техніки [Електронний ресурс] : Постанова Кабінету Міністрів України від 17.02.2021 р. № 159. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/159-2021-%D0%BF#Text>.

2. Про затвердження Порядку проведення випробувань та прийняття на озброєння (постачання) зразків озброєння, військової та спеціальної техніки, засобів і обладнання іноземного виробництва [Електронний ресурс] : Постанова Кабінету Міністрів України від 17 лютого 2021 р. № 160. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/go/160-2021-%D0%BF#Text>.

3. Про затвердження Порядку супроводження дослідно-конструкторських робіт та організації проведення випробувань озброєння та військової техніки у Збройних Силах України : Наказ Головнокомандувача ЗС України від 31.05.2021 р. № 143.

4. Про внесення змін до Порядку постачання озброєння, військової і спеціальної техніки та боєприпасів під час особливого періоду, введення надзвичайного стану, проведення заходів із забезпечення національної безпеки і оборони, відсічі і стримування збройної агресії та у період проведення антитерористичної операції [Електронний ресурс] : Постанова Кабінету Міністрів України від 17.02.2021 р. № 162. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/162-2021-%D0%BF#Text>.

5. ДСТУ 3021-95. Випробування і контроль якості продукції. Терміни та визначення. – [Чинний від 1996-01-01]. – Вид. офіц. – К., 1995. – 71 с.

6. 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 від 03.03.2021 р. № 234. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/234-2021-%D0%BF#Text>.

7. ГОСТ В 15.210-78. СРПП ВТ. Система разработки и постановки на производство военной техники. Испытания опытных образцов изделий. – [Чинний від 1979-01-01]. – М., 1978. – 35 с.

8. ГОСТ В 15.211-78. СРПП ВТ. Порядок разработки программ и методик испытаний опытных образцов изделий. Основные положения. – [Введен 1979-07-01]. – М., 1978. – 23 с.

9. ГОСТ В 15.307-77. СРПП ВТ. Испытания и приемка серийных изделий. Основные положения. – [Введен 1979-07-01]. – М., 1977. – 36 с.

10. Про затвердження Положення про Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки : Наказ Начальника Генерального Штабу від 30.12.2017 р. № 170.

11. 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. – К. : ВНУ ГШ ЗС України, 2020. – 63 с.

12. Тимошенко Р. І. Оновлення парку озброєння та військової техніки – шлях до боєздатності Збройних Сил України [Електронний ресурс] / Р. І. Тимошенко // Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського. – 2016. – № 3(58). – С. 6-11. – Режим доступу: <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2016-3-58/6-11>.

13. Дмитрієв В. А. Методичний підхід до обґрунтування можливості зменшення експериментів в процесі проведення випробувань / В. А. Дмитрієв, А. І. Сергієнко. Ю. М. Тішков // Труды академії. – 2008. – № 7(87). – С. 63-67.

14. Основы военно-технических исследований. Теория и приложения : монография : в 10 т. Т. 9. Прикладные аспекты испытаний и теоретико-экспериментальных исследований вооружения и военной техники / под ред. С. В. Лапицкого. – К. : Изд. дом Дмитрия Бураго, 2015. – 504 с.

15. Демидов, Б. А. Теория и методы военно-научных исследований вооружения и военной техники / Б. А. Демидов. – Х. : ВИРТА ПВО, 1990. – 558 с.

16. Ланецький Б. М. Проблемні питання організації та планування випробувань складних технічних систем / Б. М. Ланецький, В. В. Лук'ячук // Системи обробки інформації. – 2009. – № 4(78). – С. 93-96.

17. Investigation of the Model of Testing for Weapons and Military Equipment / I. Korniienko, S. Korniienko, V. Dmytriiev, A. Pavlenko, D. Kamak // Mathematical Modeling and Simulation of Systems (MODS'2020) : Selected Papers of 15th International Scientific-practical Conference (June 29 – July 01 2020, Chernihiv, Ukraine). – Chernihiv, 2020. – Pp. 309-316. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-58124-4_30.

18. Щодо можливих функціональних компонент інформаційної системи супроводження випробувань ОВТ ЗСУ / І. В. Корнієнко, С. П. Корнієнко, Д. О. Камак, С. М. Казначей, О. В. Жирна // Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. – 2020. – № 4(6). – С. 52-61.
19. Барабаш О. В. Построение функционально устойчивых распределенных информационных систем : монография / О. В. Барабаш. – К. : НАОУ, 2004. – 226 с.
20. Полесский В. П. Оценки вероятности связности случайного графа / В. П. Полесский // Проблемы передачи информации. – 1990. – Т. 26. – Вып. 1. – С. 90-98.
21. Костров В. О. Применение оценок Полесского для расчета надежности сети связи / В. О. Костров // Электросвязь. – 2001. – № 11. – С. 42-46.
22. Кривулец В. Г. Квазиупаковочные оценки характеристик надежности сетей / В. Г. Кривулец, В. П. Полесский // Информационные процессы. – 2001. – Т. 1, № 2. – С. 126-146.
23. Кривулец В. Г. Об одном методе аппроксимации надежности монотонных систем / В. Г. Кривулец, В. П. Полесский // Информационные процессы. – 2002. – Т. 2, № 1. – С. 111-119.
24. Самуйлов К. Е. Методы анализа и расчета сетей ОКС 7 : монография / К. Е. Самуйлов. – М. : РУДН, 2002. – 292 с.
25. Корнієнко І. В. Оцінка ефективності просторово-розподілених телекомунікаційних мереж [Електронний ресурс] / І. В. Корнієнко, С. П. Корнієнко // Чернігівський науковий часопис. Серія 2: Техніка і природа. – 2011. – № 1(1). – С. 96-101. – Режим доступу: <http://ir.stu.cn.ua/123456789/12594>.
26. Бойко Н. І. Методи опису, аналізу та дослідження інформаційних потоків в торговельних підприємствах [Електронний ресурс] / Н. І. Бойко // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2014. – № 13. – С. 91-98. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/etks_2014_13_13.
27. Гужва В. М. Інформаційні системи і технології на підприємствах / В. М. Гужва. – К. : КНЕУ, 2001. – 400 с.
28. Садовников В. И. Потоки информации в системах управления / В. И. Садовников, П. Л. Эпштейн. – М. : Энергия, 1973. – 240 с.
29. Меняев М. Ф. Информационные потоки в системе управления [Электронный ресурс] / М. Ф. Меняев // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2011. – № 5. – Режим доступу: <https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnye-potoki-v-sisteme-upravleniya>.
30. Модин А. А. Исследование и анализ потоков информации на предприятии / А. А. Модин. – М. : Энергия, 2007. – 304 с.

References

1. Pro zatverdzhennya Poryadku provedennia vyprobuvan zrazkiv ozbroiennia ta viyskovoї tekhniki [About the statement of the Procedure for carrying out tests of samples of the weapon and military equipment], The Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine (№ 159 dated 17.02.2021). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/159-2021-%D0%BF#Text>.
2. Pro zatverdzhennia Poriadku provedennia vyprobuvan ta pryiniattia na ozbroiennia (postachannia) zrazkiv ozbroiennia, viyskovoї ta spetsialnoi tekhniki, zasobiv i obladnannia inozemnoho vyrobnytstv [About the statement of the Rules of carrying out of tests and acceptance on armament (supply) of samples of the armament, military and special technics, means and the equipment of foreign manufacture], The Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine (№ 160 dated 17.02.2021). <https://zakon.rada.gov.ua/go/160-2021-%D0%BF#Text>.
3. Pro zatverdzhennia Poriadku suprovodzhennia doslidno-konstruktorskykh robit ta orhanizatsii provedennia vyprobuvan ozbroiennia ta viyskovoї tekhniki u Zbroinykh Sylakh Ukrainy [About the statement of the Order of support of research and development works and the organization of carrying out tests of the armament and military equipment in Armed forces of Ukraine], Order of the Commander-in-Chief of the Armed Forces of Ukraine (№ 143 dated 31.05.2021).
4. Pro vnesennia zmin do Poriadku postachannia ozbroiennia, viyskovoї i spetsialnoi tekhniki ta boieprypasiv pid chas osoblyvoho periodu, vvedennia nadzvychainoho stanu, provedennia zakhodiv iz zabezpechennia natsionalnoi bezpeky i oborony, vidsichi i strymuvannia zbroinoї ahresii ta u period provedennia antyterrorystychnoi operatsii [On Amendments to the Procedure for Supply of Arms, Mili-

tary and Special Equipment and Ammunition during the Special Period, Imposition of a State of Emergency, Carrying Out Measures to Ensure National Security and Defense, Repulse and Contain Armed Aggression and During the Anti-Terrorist Operation], The Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine (№ 162 dated 17.02.2021). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/162-2021-%D0%BF#Text>.

5. *Vyprobuvannia i kontrol yakosti produktsii. Terminy ta vyznachennia [Product testing and quality control. Terms and definitions]* (DSTU 3021-95).

6. *Pro zatverdzhennia Poriadku rozroblennia, osvoiennia ta vypusku novykh vydiv produktsii oboronnoho pryznachennia, a takozh prypynennia 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]*, The Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine (№ 234 dated 03.03.2021). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/234-2021-%D0%BF#Text>.

7. *Sistema razrabotki i postanovki na proizvodstvo voennoy tehniky. Ispytaniya opyitnykh obraztsov izdeliy [The system for the development and production of military equipment. Testing of prototypes of products]* (HOST V 15.210-78. SRPP VT).

8. *Poryadok razrabotki programm i metodik ispytaniy opyitnykh obraztsov izdeliy. Osnovnyie polozeniya [The order of development of programs and methods of tests of prototypes of products. Basic provisions]* (HOST V 15.211-78. SRPP VT).

9. *Ispytaniya i priemka seriynykh izdeliy. Osnovnyie polozeniya [Testing and acceptance of serial products. Basic provisions]* (HOST V 15.307-77. SRPP VT).

10. *Pro zatverdzhennia Polozhennia pro Derzhavnyi naukovo-doslidnyi instytut vyprobuvan i sertifikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki [On approval of the Regulations on the State Research Institute for Testing and Certification of Weapons and Military Equipment]*, Order of the Commander-in-Chief of the Armed Forces of Ukraine (№ 170 dated 29.06.2021).

11. *Metodychni rekomendatsii shchodo orhanizatsii naukovo i naukovo-tekhnichnoi diialnosti u Zbroinykh Sylakh Ukrainy. Ch. 4. Osnovy orhanizatsii vyprobuvan zrazkiv (kompleksiv, system) ozbroiennia i viiskovoi tekhniki dlia potreb Zbroinykh Syl Ukrainy [Methodical recommendations on the organization of scientific and scientific-technical activities in the Armed Forces of Ukraine. Part 4 Basics of organization of tests of samples (complexes, systems) of armaments and military equipment for the needs of the Armed Forces of Ukraine].* (2020). VNU GSh ZS Ukrainy.

12. Tymoshenko, R.I. (2016). *Onovlennia parku ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki - shliakh do boiezdatnosti Zbroinykh Syl Ukrainy [Renewal of the arms and military equipment park - the way to the combat capability of the Armed Forces of Ukraine]. Zbirnyk naukovykh prats Tsentru voienno-stratehichnykh doslidzhen Natsionalnoho universytetu oborony Ukrainy imeni Ivana Cherniakhovskoho – Collection of scientific works of the Center for Military Strategic Studies of the Ivan Chernyakhovsky National University of Defense of Ukraine, (3(58)), 6-11.*

13. Dmytriiev, V.A., Serhiienko, A.I., & Tishkov, Yu.M. (2008). *Metodychnyi pidkhid do obruntuvannia mozhlivosti zmeshennia eksperymentiv v protsesi provedennia vyprobuvan [Methodical approach to substantiate the possibility of reducing experiments in the process of testing]. Trudy akademii – Works of the academy, (7(87)), 63-67.*

14. Lapytskyi, S.V. (Ed.). (2015). *Osnovy voenno-tehnicheskikh issledovaniy. Teoriia i prilozheniia [Fundamentals of military-technical research. Theory and applications] (T. 9. Prikladnyie aspekty ispytaniy i teoretikoeksperimentalnykh issledovaniy vooruzheniya i voennoy tekhniki – Vol. 9. Applied Aspects of Testing and Theoretical Experimental Research of Weapons and Military Equipment) Izdatelskiy dom Dmitriya Burago.*

15. Demidov, B.A. (1990). *Teoriia i metody voenno-nauchnykh issledovaniy vooruzheniia i voennoi tekhniki [Theory and methods of military scientific research of weapons and military equipment]. VIRTА PVO.*

16. Lanetskyi, B.M., & Lukianchuk, V.V. (2009). *Problemni pytannia orhanizatsii ta planuvannia vyprobuvan skladnykh tekhnichnykh system [Problem-solving questions of the organization and the planning the test the complex technical systems]. Systemy obrobky informatsii – Information processing systems, (4(78)), 93-96.*

17. 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* (pp. 309-316). https://doi.org/10.1007/978-3-030-58124-4_30.
18. Korniienko, I.V., Korniienko, S.P., Kamak, D.O., Kaznachei, S.M., & Zhyrna, O.V. (2020). Shchodo mozhlivvykh funktsionalnykh komponent informatsiynoyi systemy suprovodzhennia vyprovuvan OVT ZSU [On possible functional components of the information system of arms and military equipment testing of the armed forces of Ukraine]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho naukovo-doslidnoho instytutu vyprovuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki – Scientific works of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification*, (6), 52-61. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.6.2020.06>.
19. Barabash, O.V. (2004). *Postroenie funktsionalno ustoichivyykh raspredelennykh informatsionnykh sistem [Construction of functionally stable distributed information systems]*. NAOU.
20. Polesskij, V.P. (1990). Otsenki veroiatnosti svyaznosti sluchainoho grafa [Estimates of the probability of connectivity of a random graph]. *Problemy peredachi informatsii – Information transfer problems*, 26(1), 90-98.
21. Kostrov, V.O. (2001). Primenenie ocenok Polesskogo dlia rascheta nadezhnosti seti svyazi [Application of Polesskiy estimates for calculating the reliability of a communication network]. *Elektrosvyaz – Telecommunication*, (11), 42-46.
22. Krivulets, V.G., Polesskij, V.P. (2001). Kvaziupakovochnye otsenki kharakteristik nadezhnosti setei [Quasi-packing estimates of network reliability characteristics]. *Informatsionnye protsessy – Information processes*, 1(2), 126-146.
23. Krivulets, V.G., Polesskii, V.P. (2002). Ob odnom metode approksimatsii nadezhnosti monotonnykh sistem [About one method for approximating the reliability of monotonic systems]. *Informatsionnye protsessy – Information processes*, 2(1), 111-119.
24. Samuilov, K.E. (2002). *Metody analiza i rascheta setej OKS 7 [Methods of analysis and calculation of ACS networks 7]*. RUDN.
25. Korniienko, I.V., Korniienko, S.P. (2011). Otsinka efektyvnosti prostorovo-rozpodilennykh telekomunikatsiynykh merezh [Estimation of efficiency of spatially-distributed telecommunication networks]. *Chernihivskiyi naukovyi chasopys. Seriya 2: Tekhnika i pryroda. – Chernihiv Scientific Journal. Series 2, Technology and Nature*, (1(1)), 96-101. <http://ir.stu.cn.ua/123456789/12594>.
26. Boiko, N.I. (2014). Metody opysu, analizu ta doslidzhennia informatsiynykh potokiv v torhovelynykh pidpriemstvakh [Methods of description, analysis and research information flows in trade enterprises]. *Elektrotekhnicheskie i kompiuternye systemy – Electrical and Computer Systems*, (13), 91-98. http://nbuv.gov.ua/UJRN/etks_2014_13_13.
27. Huzhva, V.M. (2001). *Informatsiini systemy i tekhnologii na pidpriemstvakh [Information systems and technologies in enterprises]*. KNEU.
28. Sadovnikov, V.I., Epshtejn, P.L. (1973). *Potoki informatsii v sistemakh upravleniia [Information flows in control systems]*. Energy.
29. Menyayev, M.F. (2011). Informatsionnye potoki v sisteme upravleniia [Information flows in the control system]. *Mashynostroenie i kompiuternye tekhnologii – Mechanical engineering and computer technology*, (5). <https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnye-potoki-v-sisteme-upravleniya>.
30. Modin, A.A. (2007). *Issledovanie i analiz potokov informatsii na predpriiatii [Research and analysis of information flows in the enterprise]*. Energy.

Отримано 05.02.2022

UDC 004.94

**Svitlana Korniienko¹, Ihor Korniienko², Volodymyr Dmytriiev³,
Anatolii Pavlenko⁴, Dmytro Kamak⁵**

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of 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 Management
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: cornel@ukr.net. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-9105-0780>

ResearcherID: [F-7236-2017](https://orcid.org/0000-0001-9105-0780). **SCOPUS Author ID:** [57219054966](https://orcid.org/0000-0001-9105-0780)

³Doctor in Technical Sciences, Senior Researcher

The Laureate of State Prize of Ukraine in Sphere of Science and Technique, Deputy Chief of Institute of Research Work
State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: vadmitriev@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0792-6397>

SCOPUS Author ID: [57219049932](https://orcid.org/0000-0002-0792-6397)

⁴PhD in Technical Sciences, Chief of the Scientific Organizational Section
State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: agpav@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6341-8381>

SCOPUS Author ID: [57219056002](https://orcid.org/0000-0001-6341-8381)

⁵Chief of the Scientific-Research Department

State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: dkam@meta.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0348-5456>

SCOPUS Author ID: [57219057496](https://orcid.org/0000-0003-0348-5456)

EVALUATION OF INFORMATION CONNECTIVITY OF PROCESSES IN FUNCTIONAL MODELING OF TEST SYSTEM

The national security and defense capability of the state is largely determined by the level of equipping the armed forces with modern weapons and military equipment.

An important point in the rearmament of the army is the high-quality and timely testing of the latest military models, which, to a large extent, is ensured by successful and systematic planning and management of test activities.

The automated test support information system is aimed at solving such problems. During the IDEF0 notation, functional modeling of the armaments and military equipment testing system was designed, which allowed to determine the system-wide characteristics of information flows, but did not allow obtaining models performance evaluation.

Existing methods for estimating distributed structures, as a rule, are reduced to estimating the connectivity of graph models and do not take into account the features of the interface of the IDEF0 notation functions.

The article considers the issue of evaluation of functional models at the pre-design stage.

A method for estimating the functional connectivity of processes in the functional modeling of complex systems using graphical notation IDEF0 and using automated design tools is proposed. The estimation has clear logical limits and is sensitive to changes in the parameters of the evaluated model. Due to the different importance of connections provided by the graphical notation interface IDEF0, it is proposed to use a scale of importance of the type of connection, which reflects the assessment of the connectedness of functions of strong or weak types of connections, and, accordingly, the success and rationality of functional configuration models. Estimates of the functional model of the weapons and military equipment test system are obtained.

The use of the proposed evaluation method will allow to compare the structures of functional models of complex systems at the stage of pre-design studies.

Keywords: tests; automation; estimation; information connectivity; functional model.

Table: 5. **Fig.:** 3. **References:** 30.

Наталія Фролова¹, Інна Михальчук², Олександр Тищенко³

¹асистент кафедри комп'ютеризованих систем захисту інформації
Національний авіаційний університет (Київ, Україна)

E-mail: talaf@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7935-6496>

²кандидат технічних наук, асистент кафедри кібербезпеки та захисту інформації
Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)

E-mail: mykhalchuk.inna.kbzi@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1802-7653>

ResearcherID: [ABF-8615-2020](https://orcid.org/0000-0002-1802-7653). SCOPUS Author ID: [57188710011](https://orcid.org/0000-0002-1802-7653)

³студент освітнього ступеня магістр
Національний авіаційний університет (Київ, Україна)

E-mail: stischenko0@icloud.com

ЗАХИСТ ПУБЛІЧНИХ ТОЧОК ДОСТУПУ WI-FI

Розглянуто технології та засоби розгортання публічних мереж на базі сімейства стандартів IEEE 802.11, проаналізовано типи хакерських атак у загальнодоступній Wi-Fi мережі, на основі проведеного аналізу найпоширеніших вразливостей та загроз публічних точок доступу Wi-Fi запропоновано рекомендації щодо впровадження WEP, WPA, WPA2, WPA3 та OWE технологій залежно від роду діяльності й обсягів конфіденційної інформації, підтримки технології захисту кінцевими пристроями користувачів та актуальності протоколів безпеки, які надає та чи інша технологія безпеки.

Ключові слова: публічні точки доступу Wi-Fi; стандарт; вразливості; методи захисту; зловмисник; безпека мережі; інформаційна безпека.

Табл.: 2. Рис.: 1. Бібл.: 11.

Актуальність теми дослідження. Стрімкий розвиток методів побудови бездротових локальних мереж зумовив підвищення їх доступності та попиту на ринку інформаційних технологій. Сучасні підприємства та організації зацікавлені в розгортанні публічних точок доступу Wi-Fi, щоб приваблювати більшу кількість клієнтів, ніж конкуренти. Забезпечення зручного бездротового доступу безлічі користувачів до мережі Інтернет шляхом підключення їх до публічних точок доступу Wi-Fi зумовлює передачу великих об'ємів конфіденційних даних у мережі.

Для того щоб задовольнити потреби окремих користувачів мобільних пристроїв, публічні точки доступу Wi-Fi стали повсюдними в кав'ярнях, аеропортах та інших комерційних закладах. Користувачі використовують такі точки доступу для підключення до Інтернету своїх ноутбуків, смартфонів та планшетів.

Трафік у загальнодоступних мережах значною мірою незашифрований, але більшість користувачів загальнодоступного Wi-Fi не знають про пов'язані з цим ризики та продовжують входити в облікові записи електронної пошти, банківських установ або будь-які інші домени, що містять конфіденційну особисту інформацію.

Актуальність проблеми захисту публічних мереж посилюється ще й тим, що більшість провайдерів загальнодоступних точок доступу Wi-Fi приділяють увагу лише зручності та простоті доступу користувачів до мережі, ігноруючи при цьому питання забезпечення захисту даних користувачів.

Постановка проблеми. Більшість мережевих провайдерів, розгортаючи публічні точки доступу Wi-Fi, надають перевагу зручності їх використання користувачами, приділяючи при цьому незначну увагу заходам безпеки, що ставить під загрозу цілісність та конфіденційність даних користувачів та сприяє реалізації хакерських атак на мережу. Кіберзлочинці ефективно використовують наявні вразливості безпеки публічних точок доступу Wi-Fi з метою перехоплення трафіку мережі та викрадення конфіденційних даних. Саме тому важливим завданням є впровадження методів виявлення та протидії подібним кіберзлочинним атакам, які засновані на аналізі хакерської діяльності, що дає змогу оцінити доцільність та ефективність використання тих чи інших технологій забезпечення конфіденційності даних та значною мірою може покращити захист даних користувачів, а отже, і загальну репутацію компанії-надавача мережевих послуг.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У більшості сучасних досліджень цієї проблеми описується розвиток та причини поширення технологій розгортання бездротової локальної мережі, відповідно до сімейства стандартів IEEE 802.11, де передусім акцентується увага на тому, що бездротові локальні мережі мають певний радіус дії, зумовлений загасанням сигналу у просторі, у межах якого користувачі можуть мати доступ до мережі. Зважаючи на цей фактор, не тільки правомірні, але й неправомірні користувачі мають доступ до бездротової мережі. Як варіанти вирішення цієї проблеми, здебільшого пропонується фізичне обмеження доступу, відповідно до меж розповсюдження сигналу мережі, примусове обмеження поширення бездротового сигналу за допомогою його екранування та застосування надійних криптостійких паролів [1].

Більш ефективними сучасними підходами до захисту бездротових мереж є використання відкритої автентифікації, автентифікації зі спільним ключем WEP (Wired Equivalent Privacy), WPA (Wi-Fi Protected Access) та автентифікації за допомогою RADIUS-сервера WPA2 [2]. Проте більшість досліджень, спрямованих на вирішення проблеми захисту публічних точок доступу Wi-Fi, розглядають питання захисту інформації в загальнодоступних бездротових мережах Wi-Fi, не аналізуючи при цьому наявні вразливості та пов'язані з ними загрози, які наявні для цих мереж [3; 4].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. У дослідженнях та публікаціях, які розглядалися, не наведено обґрунтування доцільності та ефективності використання того чи іншого методу захисту точок доступу Wi-Fi мереж залежно від виду загроз, для запобігання яких розгортається ця технологія захисту. Також відсутність начального порівняння запропонованих методів захисту мережі ускладнює розуміння відмінностей, переваг та недоліків кожного з методів.

Метою статті є оцінка ефективності сучасних методів захисту загальнодоступних Wi-Fi мереж на основі аналізу актуальних загроз і вразливостей таких мереж та розробка рекомендацій щодо їх застосування для забезпечення безпеки даних під час розгортання та підтримки різних типів загальнодоступних Wi-Fi мереж, у тому числі й на пристроях користувачів.

Виклад основного матеріалу. Організація бездротових Wi-Fi мереж базується на сімействі стандартів IEEE 802.11 Інституту інженерів електротехніки та електроніки (IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers), які забезпечують високу швидкість передачі й гарантують стабільність та надійність мережі. Бездротова локальна мережа WLAN (Wireless Local Area Network) розглядається як технологія, яка забезпечує найбільш зручний зв'язок між наявними дротовими мережами та портативним обчислювальним та комунікаційним обладнанням, таким як портативні комп'ютери та цифрові помічники персоналу, на рівні офісу, готелю, компанії чи університету.



Рис. 1. Набір послуг передачі даних
Джерело: [9].

Архітектура IEEE 802.11 визначає дев'ять служб, які можна поділити на дві групи: служби станцій і служби розповсюдження. Служби станцій забезпечують аутентифікацію, деаутентифікацію, конфіденційність та доставку даних, тоді як служби розповсюдження – асоціацію, повторну асоціацію, роз'єднання, розповсюдження та інтеграцію (рис. 1).

Станції – це пристрої, які містять специфікацію IEEE 802.11 з інтерфейсом MAC (Media access control) та PHY (Physical layer) для бездротової мережі. Функції 802.11 реалізовані на станціях програмним або апаратним забезпеченням мережевого адаптера або картки мережевого інтерфейсу (NIC- Network interface controller).

Точка доступу – це пристрій, який забезпечує з'єднання бездротової станції з дротовою або бездротовою мережею. Найважливішою функцією точок доступу є функція мостування [5]. Бездротове середовище використовується для транспортування кадру з однієї станції на іншу.

У табл. 1 наведено різновиди сімейства стандарту 802.11 та їхні основні характеристики.

Типова Wi-Fi мережа включає три складові частини: дротове з'єднання з широкосмуговим провайдером, точку доступу і, зазвичай, комп'ютер, з'єднаний за допомогою дротового та/або бездротового з'єднань. Wi-Fi пропонує різну швидкість широкосмугового доступу та працює в промисловому, науковому та медичному діапазоні частот (діапазон ISM) [6]. Зв'язок між вузлами або комп'ютерами здійснюється через точки доступу. Точка доступу також виконує функцію бездротового адаптера Ethernet. Мережі Wi-Fi легко розгортаються на ринках, в офісах, аеропортах та інших місцях, забезпечуючи такі переваги, як гнучкість, мобільність, простота використання та низька вартість [7].

Таблиця 1

Основні специфікації стандарту 802.11

Стандарт	Дата прийняття	Робоча частота, ГГц	Швидкість передачі	Робоча відстань, м	Вид модуляції	Застосування
802.11a	1999	5	54 Мбіт/с	120	DSSS, FHSS	WLAN
802.11b	1999	2.4	11 Мбіт/с	140	OFDM	WLAN
802.11g	2003	2.4	54 Мбіт/с	140	DSSS	WLAN
802.11n	2009	2,4/5	600 Мбіт/с	250	DSSS, OFDM	WLAN
802.11ac	2014	5	1 Гбіт/с	305	QAM	WLAN

Доступ до мереж Wi-Fi можна здійснити різними способами. Якщо мережа WLAN має бути спільною для декількох користувачів, ключ мережі зазвичай потрібно вводити вручну. Тому Android і Apple iOS розробили метод спільного використання мережі WLAN у смартфонах Android та iPhone. Пристрій Android генерує QR-код, який можна відсканувати іншими смартфонами Android для автоматичного приєднання до мережі. Функція Apple для спільного використання мережі WLAN базується на Bluetooth. Це працює лише в тому випадку, якщо Bluetooth увімкнено на обох пристроях і хоча б один інший iPhone поблизу підключений до відповідної мережі.

NFC (Near-Field Communication – технологія бездротового високочастотного зв'язку малого радіуса дії «в один дотик») може значно спростити цей процес, поділившись даними доступу через тег NFC. Щоб зберігати бездротову мережу під тегом NFC, необхідно мати ідентифікатор бездротової мережі SSID (Service Set Identifier) та пароль бездротової мережі. За замовчуванням ці дані зберігаються безпосередньо на маршрутизаторі. Сканування доступу до мережі WLAN за допомогою тегу NFC на пристроях з ОС Android здійснюється за вбудованими функціями читання міток NFC. Для iPhone потрібен сторонній додаток.

Аналіз методів атак на публічні WLAN.

Точка доступу керує технологією Wi-Fi через маршрутизатор, який забезпечує доступ до Інтернету кінцевих пристроїв користувачів. Безкоштовні точки доступу, як правило, працюють у загальнодоступній мережі, у якій функції автентифікації вимкнені, саме тому виникають такі стратегії захисту як, наприклад, «модель справедливості користувачів» - це модель платежів, яка може бути реалізована за допомогою розширеної функції розподіленої координації EDCF (Enhanced Distributed Coordination Function), що робить ревізію рівня MAC поточного стандарту IEEE 802.11, щоб розширити підтримку додатків локальної мережі, які мають вимоги QoS (Quality of Service) [4].

Кіберзагрози для мобільних пристроїв у громадському середовищі Wi-Fi включають: фінансові втрати, витік даних, крадіжку пароля чи особистої інформації тощо. При цьому в багатьох випадках виявити наявність нападу дуже важко, а то й неможливо. Це пояснюється відкритим характером підключення до точки доступу загальнодоступного Wi-Fi.

Незашифрований характер загальнодоступних Wi-Fi мереж та відсутність фізичного бар'єру для прийому всіх пакетів у мережі дають змогу зловмисникам анонімно приєднатися до мережі, перехоплювати пакети, перенаправляти трафік на свій тощо, а отже, забезпечувати відносно легкий доступ до даних інших користувачів.

Сніфінг (sniffing – нюхання) пакетів на сьогодні є найпростішим і прихованим методом перехоплення даних користувачів. У відкритій, незахищеній мережі пакети даних, призначені для конкретного користувача, фактично надсилаються незашифрованими всім іншим користувачам, підключеним до мережі. Існує кілька популярних інструментів, які дозволяють здійснювати пошук пакетів, наприклад: Wireshark, tcpdump. За допомогою вивчення HTTP-трафіку, пакети можна аналізувати та визначати пари логін/пароль, файли, миттєві повідомлення або будь-які інші незашифровані дані, надіслані через мережу. У відкритій мережі захист від сніфінгу пакетів майже відсутній, оскільки це абсолютно пасивна атака. Звичайному одержувачу ніяк не потрібно активно змінювати мережевий потік, а досить просто «слухати» трафік. Це також унеможлиблює ідентифікацію «сніфера» технологічними засобами.

Спуфінгу (spoofing – підробка). Однією з ключових властивостей відкритих мереж стандартів 802.11 є те, що вони побудовані навколо середовища передачі даних, де будь-яка бездротова станція може передавати кадри й може прослуховувати всі інші кадри, що передаються в мережі. Ця властивість робить WLAN мережі сприйнятливими до спуфінгу та ін'єкційних атак. Основна ідея полягає в тому, що зловмисник може контролювати зв'язок між хостами в бездротовій мережі. Якщо комунікація не зашифрована належним чином, зловмисник може виявити стан сеансу шляхом прослуховування, а якщо зв'язок не автентифікований, він може потім ввести кадри в одну кінцеву точку сеансу, видаючи себе за іншу кінцеву точку сеансу.

Більшість протоколів, таких як DNS (Domain Name System), DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) і TCP (Transmission Control Protocol), сприйнятливі до цієї атаки. У разі DNS зловмисник може стежити за вихідними запитами DNS та вводити відповіді, що вказують на підконтрольний йому хост. Для TCP зловмиснику потрібно знати лише поточний стан з'єднання з точки зору порядкових номерів. Під час налаштування з'єднання він може навіть повністю взяти на себе з'єднання, ввівши відповідний SYN-ACK, у результаті чого законна кінцева точка буде не синхронізована. Ін'єкція також можлива в будь-який момент з'єднання, поки зловмисник може вчасно ввести спроби ін'єкції, щоб належним чином доставити сегменти TCP до мережевого стека жертви. Протокол DHCP може бути підробленим, щоб жертва використовувала IP-адресу та шлюз за замовчуванням, що дає зловмиснику повний контроль над усім його трафіком.

Підробка DNS дуже приваблива для такого виду атак, як фішинг, оскільки, наприклад, зловмисник може створити імітаційний банківський вебсайт, який би передавав маніпульовані запити на реальний сайт у режимі «людина посередині». У цьому випадку навіть двофакторна автентифікація не може допомогти. Подібним чином ін'єкція TCP може бути використана для вставлення інструкцій щодо переспрямування, реклами чи спаму на легальні в іншому випадку вебсторінки.

Сканування. Атака на зразок «сканування» використовується для визначення інших хостів у мережі. Таку атаку, зазвичай, важко виявити, і більшість загальнодоступних точок доступу не мають ресурсів для моніторингу такої діяльності. Існує кілька різних типів методів сканування, хоча кожен дотримується основного принципу надсилання певних типів пакетів на всі можливі IP-адреси в мережі та перевірки відповідей. За цими відповідями зловмисник може виявити конкретну інформацію про кінцеві пристрої користувачів, такі як операційна система або відкриті порти. Озброївшись цими знаннями, зловмисник може мати можливість розповсюджувати шкідливе програмне забезпечення, використовувати інший хост у атаці відмови в обслуговуванні (DoS) або виконувати іншу форму незаконної поведінки.

Атака MITM (*man-in-the-middle* – людина посередині) є складнішою за попередні та може спричинити більш серйозні наслідки. Ця атака ґрунтується на здатності хакера маніпулювати протоколом розрішення адрес (ARP – Address Resolution Protocol), який пов’язує IP-адреси з адресами Ethernet. Усі хости в мережі спілкуються через ARP і зберігають таблицю з адресами всіх інших хостів. Вразливість виникає через те, що будь-який хост може оголосити, що він пов’язаний із будь-якою IP-адресою, що дає змогу хосту видавати себе за іншого. Ця стратегія відома як підробка ARP, і є інструменти, які її реалізують.

Більш серйозна атака MITM може навіть обійти заходи, спрямовані на збереження конфіденційності даних, наприклад, надсилання даних за протоколом Secure Socket Layer (SSL). Діючи як тунель від початкової до кінцевої точки, SSL забезпечує рівень шифрування HTTP-трафіку. Однак зловмисник може зірвати цю систему, переконавши іншого хоста, що він є орієнтованим одержувачем вихідних даних. У наведеному вище прикладі зловмисник також запустив підробку системи доменних імен (DNS – Domain Name Service). Коли користувач робить перший запит, він запитує у DNS-сервера IP-адресу потрібного домена. Оскільки хакер бачить цей трафік першим, він відповідає користувачу своєю власною IP. Користувач ініціює безпечне з’єднання з хакером, який може розшифрувати його дані. Потім він повторно шифрує дані та надсилає на справжній вебсайт, імітуючи безпечне з’єднання.

За атаки на зразок «шахрайські точки доступу» (*RAP – Rogue access points*) зловмисник видає себе за допустиму точку доступу. Користувач може підключитися до цієї точки доступу, що надає зловмиснику повний доступ до всіх мережевих підключень цього користувача [8]. RAP виникають із нещодавно винайденої атаки «заперечення зручності»: користувачі очікують підключення до Інтернету, де б вони не були, і безкоштовно. Через цю вимогу забезпечення автентичності точки доступу є складним, оскільки це може перешкоджати можливості користувача швидко та прозоро підключитися до точки доступу в будь-яких умовах. У цьому випадку користувач підключиться до шахрайської точки доступу, але запити на передачу даних не пройдуть. Оскільки більшість смартфонів відключають широкопasmові з’єднання на користь Wi-Fi, це робить телефон нездатним приймати дані [10].

Відмова в обслуговуванні (DoS, Denial of Service). Як і атака «заперечення зручності» така має на меті перервати обслуговування кінцевих пристроїв. Атака DoS може або використовувати підробку, тактику MITM, або перевантаження мережі.

Використовуючи підробку, зловмисник змушує інших користувачів у мережі надсилати запити зловмиснику. Щоб виконати відмову в наданні послуги, зловмиснику не потрібно передавати пакети запиту цільовому одержувачу. У загальнодоступній точці доступу Wi-Fi користувач більше не матиме доступу до маршрутизатора, і як наслідок, весь мережевий трафік припиниться.

Недоліком загальнодоступного Wi-Fi є обмежена пропускна спроможність, яку він накладає на користувачів, особливо під час завантаженості [10]. У цьому випадку зловмисник може заповнити мережу фальшивими пакетами, по суті, зменшуючи корисну пропускну здатність. Користувачі помічають або дуже повільний, або взагалі відсутній мережевий трафік, що надходить і виходить із їхніх пристроїв. Може здатися, що зловмисника в цьому випадку було б легко ідентифікувати, однак зловмисник може підробити адресу відправника зловмисних пакетів. Зловмисник також може реалізувати атаку, коли термінал іншого користувача виступає як винний у здійсненні атаки.

Дослідження методів та технологій захисту публічних точок доступу Wi-Fi.

Переважно технології безпеки мобільних пристроїв у мережі Wi-Fi орієнтовані на забезпечення конфіденційності, цілісності та автентифікації. При цьому загрози для мобільних пристроїв при використанні мережі Wi-Fi, пов’язані переважно з ненадійними третіми

сторонами, що стоять за атакою, копіюванням, крадіжкою або зміною інформації. Кіберзлочинці завжди намагаються знайти шляхи доступу до мобільного пристрою. Бездротовий зв'язок є більш вразливим порівняно з дротовим. Тому дані, що передаються у відкритій мережі Wi-Fi, легко прослуховуються або викрадаються невідомою третьою стороною.

Метою технологій забезпечення конфіденційності є недопущення читання та збереження переданих даних мережею неправомірними особами. Контроль цілісності дає змогу виявляти будь-які навмисні або ненавмисні зміни даних, які відбуваються під час передавання, а автентифікація надає доступ до мережі лише правомірним особам.

Конфіденційність дротового еквівалента WEP (Wired Equivalent Privacy). У 1999 році Альянсом Wi-Fi для захисту конфіденційності даних у бездротовій мережі була сертифікована технологія WEP як частина оригінального стандарту 802.11. WEP використовує RC4 для шифрування та CRC-32 для перевірки цілісності даних. RC4 вимагає паролі фрази, яка складається з двох частин. Перша частина – статична, це загальнодоступний ключ PSK (Pre-Shared Key), який потрібно ввести в налаштування конфігурації (зазвичай завдовжки 5 або 10 символів) кожного вузла перед підключенням до бездротової мережі. Друга частина – динамічна, це вектор ініціалізації IV (Initialization vector), який використовується для генерації ключа шифрування кожного пакета і змінюється в процесі функціонування мережі. Це значення надсилається заздалегідь до пакета даних у вигляді відкритого тексту, який одержувач використовує в процесі дешифрування. Однак IV не були унікальними і повторювались через деякі проміжки часу, після того, як вони були створені з використанням паролі фрази як однієї зі змінних. Зловмисники можуть витягувати ці повтори шляхом пасивного сніфінгу зашифрованих пакетів [3]. І, оскільки, керування ключами не передбачено і вектор ініціалізації повторюється, то декілька користувачів використовують однакові вектори і зловмисник перехопивши їх, отримує доступ до даних усіх користувачів.

WEP – найслабший метод шифрування порівняно з іншими технологіями конфіденційності. Однак він широко використовується протягом тривалого часу, оскільки доступний для всіх бездротових продуктів стандарту IEEE 802.11.

Захищений доступ Wi-Fi (WPA - Wi-Fi Protected Access) успадкував основний принцип WEP та усунув його недоліки. WPA використовує протокол цілісності тимчасового ключа (TKIP - Temporal Key Integrity Protocol) для створення ключа шифрування, який є динамічним та не підтримується WEP і використовує вектор ініціалізації довжиною 48 біт для постійної генерації нового ключа довжиною 128 біт для шифрування кожного окремого пакету. Тому навіть якщо зловмисник збирає багато пакетів, обчислити загальний ключ практично неможливо. WPA також створює контрольні суми за методом MIC (Message Integrity Code), коли в кожному кадр записується код цілісності повідомлення довжиною 8 байт для запобігання фальсифікації даних та автентифікації.

Захищений доступ Wi-Fi WPA2 (Wi-Fi Protected Access 2). У 2004 році був розроблений повний стандарт IEEE 802.11 і під назвою WPA2, що усуває певні недоліки методу WPA.

WPA2 включає обов'язкову підтримку CCMP (Counter Mode with Cipher Block Chaining Message Authentication Code Protocol) на основі криптосистеми AES (Advanced Encryption Standard). Сертифікація WPA2 є обов'язковою для всіх нових пристроїв, що мають торговельну марку Wi-Fi. WPA2 забезпечує автентифікацію, шифрування та перевірку цілісності даних, що є повноцінною програмою безпеки. Залежно від версії WPA, кінцевого користувача та використовуваного протоколу шифрування можна виділити різні режими WPA:

- режим WPA-Personal (WPA-PSK загальнодоступний ключ). Призначений для домашніх та невеликих офісних мереж і не потребує сервера автентифікації. Кожен пристрій бездротової мережі автентифікується точкою доступу з використанням 256-розрядного ключа, створеного за допомогою пароля або паролі фрази;

- режим шифрування WPA-Enterprise, призначений для корпоративних мереж Wi-Fi. Для забезпечення додаткової безпеки WPA-Enterprise потрібен сервер автентифікації RADIUS (Remote Authentication Dial In User Service - віддалений ідентифікаційний набір у службі користувача), що являє собою транспортний протокол, який використовується для захищеного віддаленого доступу користувачів до мережі із забезпеченням моделі AAA (авторизація, автентифікація та аудит (облік)). Фактично сервер RADIUS виконує функції із первинної автентифікації користувачів, надання їм відповідних привілеїв та може бути налаштований для ведення журналу обліку (запису дій користувачів).

Захищений доступ Wi-Fi WPA3 (Wi-Fi Protected Access 3). WPA3 - це остання, оновлена реалізація WPA2. Сертифікація продуктів WPA3 триває з 2018 року. WPA3 надає функції для особистого та корпоративного використання такі, як 256-розрядний протокол Галуа/Режим лічильника GCM-256 (Galois/Counter Mode Protocol), 384-розрядний режим автентифікації хешованих повідомлень HMAC (Hash-based Message Authentication Code) та 256-розрядний протокол цілісності багатоадресної розсилки BIP-GMAC-256 (Broadcast/Multicast Integrity Protocol Galois Message Authentication Code).

Хоча WPA3 є більш безпечним і всеосяжним, ніж WPA2, проте протокол WPA2 все ще буде підтримуватися та оновлюватися Альянсом Wi-Fi у найближчому майбутньому.

WPA3, у порівнянні зі стандартом WPA2, додатково забезпечує такі важливі функції:

- одночасну автентифікацію протоколу Equals. Ця функція дає змогу утворити безпечне з'єднання. Так, коли мережевий пристрій підключатиметься до точки доступу, то обидва пристрої спілкуватимуться для перевірки автентифікації та з'єднання. Навіть якщо пароль користувача слабкий, WPA3 забезпечує більш безпечне з'єднання за допомогою протоколу надання пристроїв Wi-Fi DPP (Device Provisioning Protocol);

- індивідуальне шифрування даних. Під час входу до загальнодоступної мережі WPA3 реєструє новий пристрій за допомогою системи DPP, яка дає змогу користувачам використовувати NFC-теги або QR-коди для доступу пристроїв у мережу. Захист WPA3 використовує шифрування GCM-256 замість раніше використовуваного шифрування 128-біт;

- більш потужний захист від атак повним перебором. WPA3 захищає від автономного вгадування пароля, дозволяє користувачеві лише одну здогадку та змушує його безпосередньо взаємодіяти з пристроєм Wi-Fi;

- підтримку великих розмірів ключів сеансів, зокрема до 192-розрядних ключів у випадках використання WPA3 ENT;

- наявність розширеного відкритого режиму Wi-Fi, що підвищує конфіденційність у відкритих мережах, запобігає пасивному сніфінгу, шифруючи трафік, навіть якщо пароль не використовується. Однак це не посилює безпеку, оскільки будь-хто може підключитися до мережі.

Особливості WPA3:

- наділений функцією шифрування фреймів управління одноадресної передачі. Це є запобіжником, наприклад неправомірної деавторизації клієнтів за наявності атаки «людина посередині» або для виведення клієнтів у системах IDS/IPS. Системи WIDS/WIPS характеризуються менш жорсткими способами запровадження політики для клієнтів і більше залежать від сповіщення системного адміністратора про точки доступу або несанкціоновані програми.

- наявність механізму автентифікації SAE, який забезпечує більш безпечну автентифікацію на основі пароля та механізму узгодження ключів, навіть якщо паролі не відповідають вимогам складності, захищає від атак грубої сили та значно ускладнює небажане розшифрування сеансів під час або після сеансу (одного знання паролі фрази недостатньо для розшифрування сеансу);

- забезпечує перехід від особистого, підприємницького або розширеного режимів WPA3 до WPA2 для підключення клієнтів, які не підтримують WPA3.

Щоб мінімізувати незручності з боку користувачів та забезпечити поступовий шлях міграції до WPA3-Personal зі збереженням сумісності із пристроями, що підтримують лише WPA2-PSK, Wi-Fi Альянсом був визначений перехідний режим WPA3-Personal (WPA3-Personal Transition Mode). Оскільки SAE – це новий протокол аутентифікації Wi-Fi і не сумісний із PSK, встановлення WPA3-Personal вимагає, щоб кожен клієнтський пристрій підтримував WPA3-Personal, що порушує роботу пристроїв, які підтримують лише WPA2-Personal. Як тільки доступність WPA3-Personal досягне достатнього рівня серед клієнтських пристроїв, власники мереж повинні вимкнути режим переходу WPA3-Personal для досягнення всіх переваг WPA3-Personal.

Режим переходу WPA3-Personal підтримує аутентифікацію як WPA3-Personal, так і WPA2-Personal з тим самим ідентифікатором бездротової мережі SSID та паролем. Компроміс полягає в тому, що загальний пароль мережі WPA3-Personal можна визначити шляхом атаки на пристрій WPA2-Personal за допомогою простої атаки офлайн-словника. Атака WPA2-Personal може бути виконана пасивно на застарілому клієнтському пристрої, який підтримує лише WPA2-Personal, або більш складну активну атаку на пониження можна здійснити на клієнті, який підтримує WPA3-Personal.

Пасивна атака на застарілі клієнтські пристрої WPA2-Personal є такою ж, як і у застарілих мережах WPA2-Personal. Активна атака на клієнтський пристрій WPA3-Personal є складною і приносить зловмиснику порівняно небагато, якщо враховувати можливість простішої пасивної атаки на застарілих клієнтів. Зловмисник, який визначає пароль, може отримати доступ до мережі просто за допомогою вразливостей WPA2-Personal, незалежно від WPA3-Personal. Крім того, навіть після того, як ця атака буде успішною і зловмисник визначить пароль, клієнти, які підключаються до WPA3-Personal, однаково матимуть переваги від секретності пересилання, яку надає SAE, оскільки в цьому разі ключі шифрування трафіку залишатимуться невідомими, навіть якщо пароль відомий.

Узагальнені дані порівняння за певними ознаками технологій WEP, WPA, WPA2 та WPA3 наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Порівняння протоколів безпеки WEP, WPA, WPA2 та WPA3

	WEP	WPA	WPA2	WPA3
Рік випуску	1999	2003	2004	2018
Криптосистема	RC4	TKIP із RC4	AES-CCMP	AES-CCMP(Personal) AES-GCMP(Enterprise)
Розмір сесійного ключа	40 біт	128 біт	128 біт	128 біт(Personal) 256 біт(Enterprise)
Тип шифру	потоківий	потоківий	блочний	блочний
Цілісність	CRC-32	MIC	СВС-МАС	CCMP-НМАС (Personal) GCMP-НМАС(Enterprise)
Автентифікація	WEP-Open WEP-Shared	WPA-PSK WPA-Enterprise	WPA2-Personal WPA2-Enterprise	SAE EAP
Управління ключами	-	чотиристороннє рукостискання	чотиристороннє рукостискання	ECDH, ECDSA, SAE

Бездротове шифрування OWE (Opportunistic Wireless Encryption). OWE – це технологія, яка дає змогу бездротовим пристроям встановлювати зашифровані з'єднання із загальнодоступними точками доступу Wi-Fi навіть без інформації про доступ до Wi-Fi. За допомогою OWE бездротовий пристрій та точка доступу автоматично шифрують з'єднання із загальнодоступними точками доступу Wi-Fi. У цьому випадку пристрої узгоджують унікальний ключ сеансу (PMK – Pairwise Master Key), який можна використовувати лише один раз. Цей ключ сеансу використовується замість мережевого ключа для

шифрування з'єднання Wi-Fi за допомогою протоколу блочного шифрування з кодом автентичності повідомлення WPA2 CCMP (Counter Mode with Cipher Block Chaining Message Authentication Code Protocol).

Незашифровані з'єднання Wi-Fi та з'єднання Wi-Fi, зашифровані за допомогою OWE, можна одночасно встановити на загальнодоступну точку доступу Wi-Fi. Це означає, що бездротові пристрої, які не підтримують OWE, можуть встановлювати незашифровані з'єднання з точкою доступу Wi-Fi без використання інформації про доступ до Wi-Fi.

Розширена відкрита аутентифікація Wi-Fi (EOA – Enhanced Open Authentication). Wi-Fi EOA – це протокол для шифрування сеансів Wi-Fi, які відбуваються в загальнодоступних мережах. Забезпечує захист у сценаріях, коли аутентифікація користувача не потрібна, захист від пасивного прослуховування, не вимагаючи пароля або додаткових кроків для приєднання до мережі.

На основі OWE відкрита аутентифікація наділяє кожного користувача унікальним індивідуальним шифруванням, яке захищає обмін даними між пристроєм користувача та мережею Wi-Fi. EOA вимагає обміну ключами шифрування за схемою Діффі-Хеллмана. Після успішного обміну ключами, мережі виконують чотиристороннє рукошлякування перед завершенням та увімкненням зашифрованого з'єднання.

Оскільки EOA базується на OWE, для неї характерні ті ж самі недоліки. Хоча OWE шифрує сеанси між користувачем та мережею Wi-Fi, вона не запускає процес аутентифікації для жодної зі сторін. Це робить мережеве з'єднання сприйнятливим до атаки «злого близнюка», під час якої неправочинна сторона перейменовує свій пристрій, маскуючись під мережу Wi-Fi. Хоча EOA шифрує відкрите мережеве з'єднання Wi-Fi і краще, ніж повністю незашифрована мережа, Wi-Fi Alliance визнає, що ні користувач, ні мережа не перевірені. Навіть із EOA відкритої загальнодоступної мережі Wi-Fi несе ризик.

Підтримка WPA3, OWE та Enhanced Open.

Що стосується термінів, то широке впровадження WPA3 відбудеться не за один день, оскільки наразі підтримка WPA3 все ще є необов'язковою функцією для сертифікації Wi-Fi Alliance. Навіть якщо користувач купує пристрій з підтримкою WPA3, варто зважати на те, що мережа повинна підтримувати WPA3, щоб отримати будь-яке покращення безпеки, хоча пристрій WPA3 все одно зможе підключатися до мереж WPA2. Вдома користувач має контроль над мережею і може вибрати оновлення маршрутизатора та пристроїв до WPA3. Однак витрати на великі мережі можуть означати дуже довгий період впровадження WPA3 підприємствами. Це також може мати місце навіть для невеликих загальнодоступних точок доступу Wi-Fi, оскільки бездротовий Інтернет, зазвичай, не є доволі витратним, то провайдери не будуть витрачати додаткові кошти на поліпшення заходів безпеки.

Перше покоління підтримки WPA3 на клієнтських пристроях тільки розгортається. Android 10 має підтримку, але вона все ще знаходиться в бета-версії. Те саме стосується Apple, яка випустила підтримку WPA3 в iOS 13. В останніх версіях Windows 10 є підтримка WPA3-SAE, але його також повинен підтримувати драйвер пристрою мережного обладнання.

З урахуванням зазначених застережень можна стверджувати, що неповна підтримка WPA3 набагато цінніша, ніж універсальна та зріла підтримка WPA2.

Що стосується бездротового пристрою, наприклад, смартфона або ноутбука, то операційна система та драйвер пристрою Wi-Fi повинні підтримувати WPA3. Нижче наведені найбільш популярні користувацькі ОС та їх версії, з яких вводиться підтримка WPA3 та OWE:

- Windows 10: версія 1903 або пізніша підтримує WPA3, підтримка драйверів пристрою різна;
- macOS підтримує WPA3, починаючи з версії 10.15 (Catalina);
- iOS та iPadOS: підтримка WPA3 з версії 13 або пізнішої;
- Android: WPA3 був представлений з Android 10. Фактична підтримка може відрізнятися залежно від смартфона або планшета.

WPA3-Personal забезпечує режим переходу, що дозволяє поступово переходити до мережі WPA3-Personal, одночасно дозволяючи підключення пристроїв WPA2-Personal. Однак усі переваги WPA3-Personal реалізуються лише тоді, коли мережа знаходиться в лише в режимі WPA3.

Щодо Enhanced Open, то пристрої повинні мати розширену версію операційної системи для підтримки цієї технології. Наприклад, Android потребує мови дизайну інтерфейсу HAL 1.2 для запуску цієї функції, а також потрібна версія Android 10 та новіші версії.

Wi-Fi Enhanced Open можна розгортати в режимі переходу, що дозволяє поступово переходити з відкритої мережі до Wi-Fi Enhanced Open без перешкод для користувачів Wi-Fi або операторів мережі. При цьому немає потреби в додатковій конфігурації з боку користувача.

Аналіз способів автентифікація IEEE 802.1X.

У сучасних бездротових локальних мережах існують такі основні способи автентифікації: автентифікація з відкритою системою та спільним ключем WPA; WPA2 із автентифікацією за допомогою загальнодоступних ключів; WPA та WPA2 із автентифікацією підприємства.

Ідентифікація відкритої системи - це найпростіший метод, який дозволяє будь-якому користувачеві аутентифікувати їх у точці доступу, доки пристрій знає ідентифікатор набору послуг (SSID) цієї мережі. Хоча SSID зазвичай надсилається як трансляція, його можна легко зрозуміти за допомогою пасивних методів перехоплення даних. Автентифікація за спільним ключем, який надано обом сторонам з'єднання, зазвичай використовується в бездротових мережах невеликого офісу. Як тільки ключі збігаються з ключами бездротової мережі, пристрій буде допущений до мережі. Автентифікація за допомогою спільного ключа може використовуватися лише з шифруванням WEP, і тому не вважається безпечним методом надання доступу до мережі.

Для автентифікації відповідно до методів WPA (PSK) та WPA2 (Personal) Wi-Fi із захищеним доступом використовується попередньо розподілений ключ захисту. Автентифікація WPA та WPA2 PSK є більш безпечною, ніж автентифікація за спільним ключем WEP. Ці методи дозволяють користувачам, які знають цей ключ, мати доступ до мережі.

У корпоративних методах автентифікації WPA та WPA2 використовується стандарт IEEE 802.1X, який є більш безпечним, ніж WPA та WPA2 з автентифікацією за допомогою загальнодоступних ключів. Вони реалізують фреймворк EAP (Extensible Authentication Protocol – розширений протокол автентифікації), щоб дозволити автентифікацію користувача на зовнішньому сервері автентифікації RADIUS. У цьому разі автентифікація користувачів здійснюється за допомогою власних облікових даних замість спільного ключа. Простіше кажучи, автентифікація 802.1X включає три сторони: користувача (мобільний пристрій), автентифікатор (мережа Wi-Fi підприємства) та сервер автентифікації (хост із програмним забезпеченням, що підтримує протоколи RADIUS та EAP). Перед тим як користувач звернеться до корпоративної мережі, автентифікатор буде працювати для перевірки облікового запису користувача або цифрового сертифіката користувача. Якщо облікові дані дійсні, користувач має доступ до мережі.

Погляд на безпеку кінцевих пристроїв з погляду користувачів.

Користувачі можуть вжити декількох кроків для забезпечення належного захисту своїх даних під час доступу до публічних точок доступу Wi-Fi. Звичайно, найкращий захід безпеки – це не надсилати конфіденційні дані через незахищену публічну мережу. Однак це не означає, що користувач повинен поступатися певною зручністю, наприклад, оплатою рахунку в кав'ярні, заради безпеки. Якщо конфіденційні дані необхідно надсилати за протоколом HTTP із загальнодоступної мережі, користувач повинен переконатися, що весь трафік зашифрований за допомогою захищеного рівня сокету SSL (Secure Sockets Layer) або забезпечується безпека транспортного рівня TLS (Transport Layer Security) протягом усього віддаленого з'єднання.

Наступний варіант для користувачів – надсилати дані через віртуальну приватну мережу VPN (Virtual Private Network). VPN дозволяє користувачеві спілкуватися через зашифрований канал із будь-якою іншою точкою Інтернету. Одним із недоліків використання VPN є додаткова вартість, оскільки більшість постачальників VPN стягують постійну плату за свої послуги. Крім того, користувачі повинні заздалегідь знати про особливості використання технологій VPN, а потім вжити заходів щодо встановлення програмного забезпечення та налаштування відповідної служби VPN. Щоб вирішити цю проблему, пропонується розгортання виділених маршрутизаторів до домашніх точок доступу, які б прозоро обробляли VPN-з'єднання.

Висновки. Проведені дослідження дають змогу зробити такі висновки:

1. Такі методи захисту загальнодоступних Wi-Fi мереж, як WEP та WPA є застарілими. Саме тому для забезпечення достатнього захисту бездротової мережі пропонується використання WPA2 у режимі Personal або Enterprise залежно від типу та структури мережі.

2. Обмежене використання новітнього рішення безпеки WPA3 пояснюється необхідністю оновлення як програмного, так і апаратного забезпечення з боку провайдерів та користувачів. Тому повноцінне використання даної технології поки не підтримується на більшості пристроїв, а отже, не є ефективним.

3. Можливість роботи в режимі переходу від WPA2 до WPA3 дозволяє забезпечити поступовий перехід та розповсюдження технології WPA3. Перевагою цього режиму є те, що його підтримують усі пристрої, які підтримують WPA2, а також новітні пристрої, які підтримують WPA3. Ось чому, найкращим рішенням для забезпечення належного рівня безпеки є саме режим переходу від WPA2 до WPA3.

4. Технології OWE і Wi-Fi Enhanced Open не є надійними засобами захисту бездротової мережі, адже забезпечують лише шифрування сеансу з'єднання користувача із бездротовою точкою доступу і не забезпечують при цьому автентифікації. Тому вони мають використовуватись у поєднанні з іншими технологіями, наприклад, разом з WPA2.

Список використаних джерел

1. Паляниця В. А. Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп'ютерних технологій / В. А. Паляниця // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції : збірник тез доповідей. – Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2019. – 377 с.

2. Шувалова Л. А. Методи захисту даних у WI-FI мережах Методи захисту даних у WI-FI мережах [Електронний ресурс] / Л. А. Шувалова // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2011. – № 2. - С. 133-135. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nitps_2011_2_35.

3. An overview of the Wi-Fi WPA2 vulnerability. (2017, October 19) [Electronic recourse]. – Accessed mode: <https://www.enisa.europa.eu/publications/info-notes/an-overview-of-the-wi-fi-wpa2-vulnerability>.

4. Hong Zimeng. Security of Mobile Devices and Wi-Fi Networks [Electronic recourse]. 2015. – Accessed mode: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/94480/Security%20of%20Mobile%20Devices%20and%20Wi-Fi%20Networks.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
5. Gessner C., Roessler A. LTE technology and LTE test. 2009. [Electronic recourse]. – Accessed mode: <http://www.scribd.com/doc/49762490/3/LTE-background-story-the-early-days>.
6. Raman B., Chebrolu K. Experiences with WiFi for Rural Internet in India (2007) [Electronic recourse]. – Accessed mode: <http://cse.iitk.ac.in/users/braman/papers/2007-exp-dgp.pdf>.
7. Юдін О. К. Захист інформації в мережах передачі даних : підручник / О. К. Юдін, Г. Ф. Конахович, О. Г. Корченко. – К. :ТОВ НВП “ІНТЕРСЕРВІС, 2009. – 724 с.
8. Brody R. G. Wi-Fi hotspots: secure or ripe for fraud? / R. G. Brody, K. Gonzales, D. Oldham // Journal of Forensic Investigative Accounting. – 2013. – Vol. 5(2). – Pp. 27-47.
9. Dondyk E. Denial of Convenience Attack to Smartphones Using a Fake Wi-Fi Access Point / E. Dondyk, Zou Cliff C. // The 10th Annual IEEE CCNC – Mobile Device Platform Applications. 2013.
10. Noor M. M. Current threats of wireless networks / M. M. Noor, W. H. Hassan // The Third International Conference on Digital Information Processing and Communications. – 2013. – Pp. 704-713.
11. Підпалій Р. І. Аналіз вразливості бездротової мережі Wi-Fi з новим протоколом захищеності WPA3 [Електронний ресурс] / Р. І. Підпалій, О. І. Романов // Перспективи телекомунікацій: збірник матеріалів міжнародної науково-технічної конференції. – 2020. – Режим доступу: <http://conferenc.its.kpi.ua/proc/article/view/200855>.

References

1. Palianytsia, V. A. (2019). Teoretychni ta prykladni aspekty radiotekhniki, pryladobuduvannia i kompiuternykh tekhnolohii [Theoretical and applied aspects of radio engineering, instrumentation and computer technology]. *Materialy IV Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii – Proceedings of the IV International scientific and technical conference: collection of abstracts*. Palianytsia V. A.
2. Shuvalova, L.A. (2016). Metody zakhystu danykh u WI-FI merezhakh [Methods of data protection in WI-FI networks Methods of data protection in WI-FI networks]. *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy – Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*, 2, 133-135. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nitps_2011_2_35.
3. An overview of the Wi-Fi WPA2 vulnerability. (2017, October 19). <https://www.enisa.europa.eu/publications/info-notes/an-overview-of-the-wi-fi-wpa2-vulnerability>.
4. Hong Zimeng. (2015). *Security of Mobile Devices and Wi-Fi Networks*. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/94480/Security%20of%20Mobile%20Devices%20and%20Wi-Fi%20Networks.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
5. Gessner, C., Roessler, A. (2009). *LTE technology and LTE test*. <http://www.scribd.com/doc/49762490/3/LTE-background-story-the-early-days>.
6. Raman, B., Chebrolu, K. (2007, January). *Experiences with WiFi for Rural Internet in India*. <http://cse.iitk.ac.in/users/braman/papers/2007-exp-dgp.pdf>.
7. Iudin, O. K., Konakhovych, H.F., Korchenko, O.H. (2009). Zakhyst informatsii v merezhakh peredachi danykh [Protection of information in data transmission networks]. TOV NVP “ІНТЕРСЕРВІС.
8. Brody, R.G, Gonzales, K., & Oldham, D. (2013). Wi-Fi hotspots: secure or ripe for fraud? *Journal of Forensic Investigative Accounting*, 5(2), 27-47.
9. Dondyk, E., & Zou, C.C. (2013). Denial of Convenience Attack to Smartphones Using a Fake Wi-Fi Access Point. *The 10th Annual IEEE CCNC- Mobile Device Platform Applications*.
10. Noor, M.M., & Hassan, W.H. (2013). Current threats of wireless networks. *The Third International Conference on Digital Information Processing and Communications* (pp. 704-713).
11. Pidpal'yi, R.I., Romanov, O.I. (2020). Analiz vrazlyvosti bezdrotovoi merezhi Wi-Fi z novym protokolom zakhyshchenosti WPA3 [Analysis of the vulnerability of the wireless Wi-Fi network with a new security protocol WPA3]. *Perspektyvy telekomunikatsii: zbirnyk materialiv mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii – Perspectives of telecommunications: a collection of materials of the international scientific and technical conference*. <http://conferenc.its.kpi.ua/proc/article/view/200855>.

Отримано 27.01.2022

UDC 004.77.056(045)

Nataliia Frolova¹, Inna Mykhalchuk², Oleksandr Tyshchenko³¹Assistant of Computerized Information Security Systems Department,
National Aviation University (Kyiv, Ukraine)**E-mail:** talaf@ukr.net. **ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0001-7935-6496>²PhD in Technical science, Assistant of Cybersecurity and Information Protection Department
Taras Shevchenko National University of Kyiv (Kyiv, Ukraine)**E-mail:** mykhalchuk.inna.kbzi@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1802-7653>**ResearcherID:** [ABF-8615-2020](https://orcid.org/0000-0002-1802-7653). **SCOPUS Author ID:** [57188710011](https://orcid.org/0000-0002-1802-7653)³Student of the Master`s degree
National Aviation University (Kyiv, Ukraine)**E-mail:** stischenko0@icloud.com

PROTECTION OF PUBLIC WI-FI SPOTS

Traffic on public wireless networks is mostly unencrypted. Most users are usually unaware of the risks involved, and providers of public Wi-Fi hotspots do not pay attention to this, focusing only on convenience and ease of user to access the network, while ignoring the protection of user data.

Cybercriminals effectively use existing security vulnerabilities in public Wi-Fi spots to intercept network traffic and steal sensitive data. To ensure effective counteraction to hacking, an important task is to analyze methods and technologies for detecting and combating such cybercrime attacks.

The literature and research reviews of public Wi-Fi spots shows that the justification for the feasibility and effectiveness of using a method or technology of protecting Wi-Fi spots depending on the type of threat, network structure and type is not given enough attention.

The aim of this work is to evaluate the effectiveness of modern methods and technologies of protecting public Wi-Fi networks based on the analysis of current threats and vulnerabilities and develop recommendations for their use in deploying and supporting various types and features of public Wi-Fi networks including user devices.

Based on the analysis of the most common vulnerabilities and threats of public Wi-Fi spots, features, advantages and disadvantages of currently used technologies and methods to ensure adequate protection of wireless networks, it was recommended to implement WEP, WPA, WPA2, WPA3 and OWE technologies depending on the type of user activity and amount of confidential information, the availability of support for a particular end-user protection technology and the relevance of security protocols provided by a particular security technology.

Keywords: public Wi-Fi access points; standard; vulnerabilities; security methods; attacker; network security; information security.

Table: 2. Fig.: 1. References: 11.

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-1(27)-136-141

УДК 004.42:004.75

Сергій Точилін

кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж

Національний університет «Запорізька політехніка» (Запоріжжя, Україна)

E-mail: tochnozp@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2010-6358>. Scopus Author ID: 6602607112

ПРОДУКТИВНІСТЬ PHP CRUD WEB-СЕРВІСІВ ПРИ РОБОТІ З ДАНИМИ POSTGRESQL

Розроблені PHP CRUD Web-сервіси для роботи з даними СКБД PostgreSQL, а також програма-тестер для визначення їхньої продуктивності. За допомогою створених програм отримані дані про продуктивність XML-RPC, SOAP та RESTful PHP Web-служб при виконанні CRUD операцій створення, читання, оновлення та видалення даних PostgreSQL. Отримані результати свідчать як про істотний вплив технології розробки сервісу на його продуктивність, так і про доцільність використання RESTful Web-служб у SOA-додатках, які для роботи з даними PostgreSQL застосовують CRUD операції.

Ключові слова: CRUD; PHP; PostgreSQL; Web-сервіс; XML-RPC; SOAP; RESTful.

Рис.: 2. Бібл.: 11.

Актуальність теми дослідження. При розробці сучасних розподілених комп'ютерних систем, які працюють в Intranet та Internet, широко використовується сервіс-орієнтована архітектура SOA (Service Oriented Architecture).

Для практичної реалізації подібних систем застосовуються стандартні технології Web-сервісів. На їх основі створюються як окремі додатки, так і програмні комплекси, які використовуються багатьма компаніями. Вони надають широкий спектр Web-послуг, зокрема, це банківські та біржові операції, метеорологічне прогнозування, хмарні обчислення [1; 2].

Однією з основних вимог до подібного роду Web-послуг є оперативність їх надання, яка залежить від того, як сервіс програмно реалізується [3-5].

При цьому актуальна задача вибору оптимального програмного забезпечення, що реалізує Web-сервіс, пов'язана із завданням вибору або розробки програми-тестера служби, що дозволяє визначити її продуктивність.

Постановка проблеми. Програмні засоби PHP є ефективною платформою для SOA. На її основі розробляються Web-сервіси, які підтримують різні протоколи та технології [6]. Зокрема, XML-RPC та SOAP протоколи використовують сервіси, що обмінюються XML-повідомленнями.

Сучасні розподілені системи з SOA також використовують PHP RESTful Web-сервіси, які мають доступ до віддалених ресурсів за допомогою HTTP-протоколу [6; 7].

До віддалених ресурсів можна віднести й окремі записи, які зберігаються в СКБД.

При роботі з даними СКБД та реалізації можливості виконання над ними операцій створення (create), читання (read), оновлення (update), видалення (delete), з використанням відповідних HTTP-методів, RESTful Web-сервісів являється CRUD Web-додатком. Водночас CRUD Web-сервіси можна реалізовувати і за допомогою XML-RPC та SOAP технології.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як відомо, до найпоширеніших та продуктивних СКБД належить PostgreSQL [8; 9]. Продуктивність XML-RPC, SOAP та RESTful PHP Web-сервісів при пошуку в даних PostgreSQL була досліджена нами раніше в роботах [4; 5]. Аналіз результатів робіт [4; 5] дозволив вибрати оптимальне програмне забезпечення для Web-служб, що реалізують пошук (CRUD операцію читання) при роботі з даними СКБД.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Досліджень для XML-RPC, SOAP та RESTful PHP Web-служб в [4; 5] при виконанні CRUD операцій додавання (create), оновлення (update) та видалення (delete) даних PostgreSQL не було проведено.

Постановка завдання. У цій роботі була поставлена задача аналізу продуктивності XML-RPC, SOAP та RESTful PHP Web-сервісів, які при роботі з даними PostgreSQL використовують CRUD операції, для визначення оптимального програмного забезпечення для цієї СКБД при побудові SOA-додатків. З цією метою передбачалося також розробити програму-тестер з простим інтерфейсом користувача.

Виклад основного матеріалу. Для вирішення поставленого завдання було розроблено три варіанти розподілених додатків, які у своєму складі мали однакову клієнтську частину (програма-тестер), але різні CRUD Web-сервіси (XML-RPC, SOAP та RESTful), розроблені за допомогою PHP-технології.

Також був підготовлений об'єкт дослідження – таблиця Data бази даних (БД) PostgreSQL, яка мала два поля – ключове Id і даних Dt , та зберігала інформацію в обсязі $V = 1$ МБайт. При цьому у стовпчиках таблиці ці поля мали однакові значення, які утворювали послідовності чисел від 1 до 250 000 з кроком 1.

У процесі аналізу продуктивності Web-сервісів використовують час відгуку τ , час який витрачає сервіс на виконання запиту користувача.

Згідно з [10], для визначення τ можна використовувати вираз:

$$\tau = T - t, \quad (1)$$

де T – час виконання запиту в розподіленому додатку;

t – час обмірковування користувача (час, що проходить між одержанням користувачем відповіді на свій запит та відправленням нового запиту).

Визначення часу відгуку τ Web-сервісів здійснювалося нами за допомогою програми-тестера CRUD_Tester, розробленої для вирішення поставленої в роботі задачі. З цією метою вона спочатку одержувала значення T та t , при послідовному виконанні розподіленим додатком двох алгоритмів, подібним наведеним в [4; 5].

Перший з них складався з такої послідовності дій:

1. У клієнтському додатку зафіксувати час початку тестування.
2. Виконати п. 3-п. 8 певну кількість разів, значення кількості визначає користувач.
3. Сформулювати параметри запиту до PHP Web-сервісу.
4. Відправити з клієнтського додатка запит до Web-служби.
5. У програмній реалізації PHP Web-сервісу одержати параметри запиту клієнта.
6. За допомогою відповідної SQL команди здійснити запит до PostgreSQL з використанням параметрів з п. 3.
7. Відправити клієнту результат виконання запиту та назву використаної ним SQL команди.
8. Одержати в клієнтському додатку результат виконання запиту та назву SQL команди.
9. Зафіксувати час.
10. Визначити час роботи розподіленого додатка та зберегти його значення.

Другий алгоритм являв собою скорочену версію першого (без виконання п. 4-п. 8).

Запит до кожного сервісу включав ім'я таблиці БД PostgreSQL, параметри $p1$, $p2$ для CRUD операцій створення та оновлення даних або тільки один $p1$, для операцій читання та видалення. Крім того, для виконання CRUD операцій, при зверненні до XML-RPC и SOAP сервісів на основі HTTP-методу POST, додатково вказувалися Java-методи, які їх реалізують, а у запитах до RESTful служби з цією метою використовувалися відповідні HTTP-методи [6]. Водночас при зверненні до RESTful сервісу, для виконання операції видалення даних, метод DELETE реалізовувався за допомогою переважанні дієслова POST з відповідною ініціалізацією заголовка запиту X-HTTP-METHOD-OVERRIDE. У разі потреби таке переваження дієслова POST використовується при функціонуванні RESTful сервісів [11].

Для створення нових даних параметри $p1$ та $p2$ мали однакові значення, на 1 більше за максимальне число, яке зберігалось в полі Id таблиці БД. При оновленні даних параметри $p1$ та $p2$ дорівнювали випадковим значенням, які змінювалися від 1 до максимально можливого, що зберігалось в полі Id таблиці БД. Таким самим способом змінювався параметр $p1$ при використанні сервісом операції читання. Для операції видалення параметр $p1$ дорівнював максимальному значенню ключового поля таблиці.

Програма-тестер була написана на мові програмування Java і мала графічний інтерфейс користувача. Він складався з дев'яти полів вводу, двох кнопок, списку, що розкривається, та чотирьох прапорців. Вікно додатка `CRUD_Tester` перед проведенням тестування зображено на рис. 1.

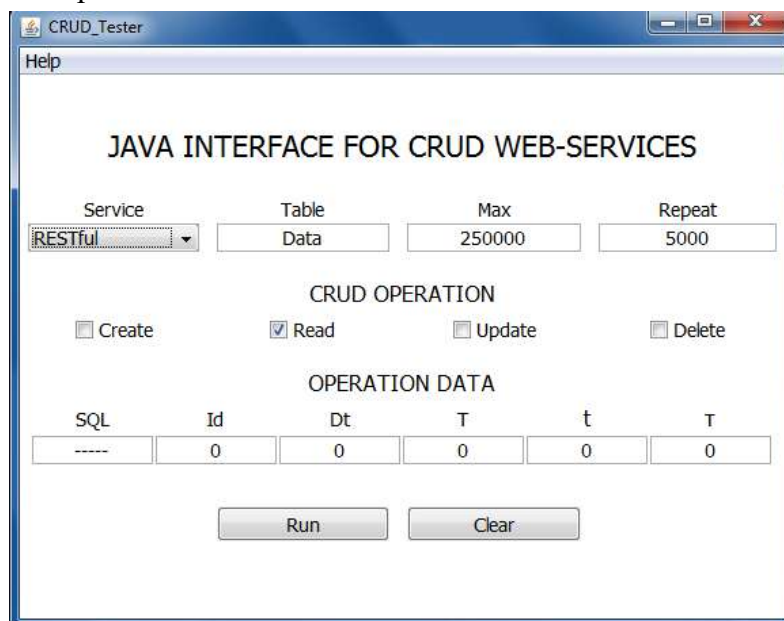


Рис. 1. Вікно програми `CRUD_Tester`

Джерело: розроблено автором.

Програмне забезпечення, використане в роботі, являло собою сучасні версії відповідних програмних продуктів. Воно містило: пакет PHP 7.4.27, сервер Apache 2.4.52 та СКБД PostgreSQL-14.2.1.

Додатки працювали на персональному комп'ютері, частота процесора якого дорівнювала 1,6 ГГц, а обсяг оперативної пам'яті мав значення 8 ГБайт.

При підготовці до проведення досліджень продуктивності розроблених додатків на сервер Apache встановлювалися XML-RPC, SOAP та RESTful PHP Web-сервіси, які мали доступ до даних таблиці `Data`.

У ході вимірів в програмі `CRUD_Tester` спочатку у списку «Service» вибирався Web-сервіс (XML-RPC, RESTful або SOAP) для тестування, а перемикачами «Create», «Read», «Update» та «Delete», встановлювався тип операції з даними PostgreSQL.

З цією метою також використовувалися поля вводу «Table», «Max» та «Repeat», в які вводилися назва таблиці БД, максимальне значення поля Id та число звернень N до сервісу при тестуванні, відповідно. У наших дослідженнях $N = 5000$.

Запуск тестування здійснювався натисканням на кнопку «Run» програми-тестера, для видалення його результатів використовувалася кнопка «Clear».

У процесі функціонування розподілений додаток працював з даними таблиці `Data`. При цьому, програма-тестер визначала середні значення повного часу виконання запиту T , часу обмірковування користувача t при формуванні запиту та часу відгуку τ для відповідного Web-сервісу. Після чого в полях вводу « τ », « t », « T », «SQL» додатка

CRUD_Tester з'являлася інформація про значення τ , t , T та назву застосованої команди SQL, відповідно. Водночас у полях вводу «Id», «Dt» розташовувалися дані про результат виконання останнього запиту до PostgreSQL при тестуванні.

Результати проведених досліджень зображені на рис. 2.

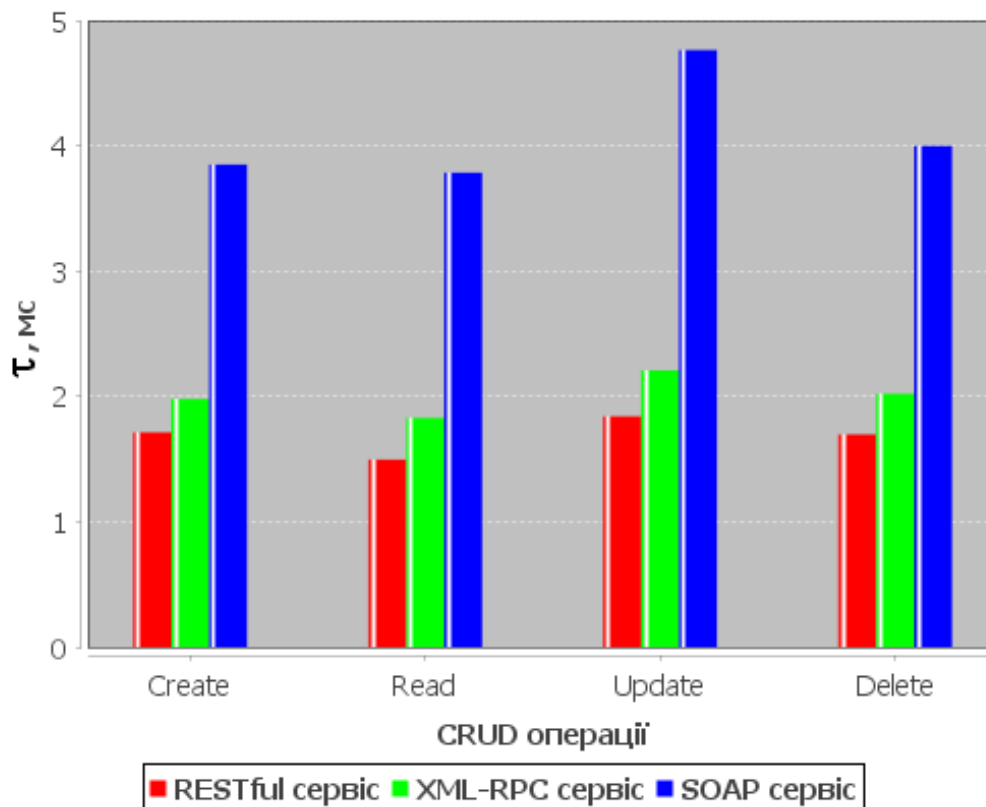


Рис. 2. Час відгуку сервісів при роботі з даними PostgreSQL

Джерело: розроблено автором.

Як видно з рис. 2, у всіх розглянутих випадках Web-сервіс на основі SOAP мав значно більше значення часу відгуку при виконанні операцій читання, оновлення, створення та видалення даних PostgreSQL у порівнянні із XML-RPC і RESTful сервісами.

У той час значення τ для служб на основі XML-RPC і RESTful у всіх розглянутих випадках були близькі між собою, з невеликим збільшенням τ для XML-RPC сервісу (порядку 0,3 мс для операцій читання, створення, видалення та 0,4 мс для операції оновлення).

Тобто при виконанні CRUD операцій із даними PostgreSQL PHP RESTful Web-сервіс має найменший час відгуку (найвищу продуктивність), чим PHP Web-служби на основі XML-RPC і SOAP.

Висновки. Були проведені дослідження та встановлені особливості продуктивності PHP CRUD Web-сервісів при роботі з даними PostgreSQL.

Дослідження проводилися за допомогою розробленої Java-програми CRUD_Tester, яка формувала запити до сервісів, що працювали з даними СКБД та визначала їх час відгуку.

Як з'ясувалося, RESTful Web-сервіс є більш продуктивним при виконанні CRUD операцій над даними, що зберігаються в PostgreSQL, чим служби на основі SOAP та XML-RPC.

Надалі планується модернізувати програму CRUD_Tester для визначення продуктивності PHP CRUD Web-сервісів при масштабованих запитах до Web-вузла та провести подібні дослідження з іншими Web-сервісами та СКБД.

Список використаних джерел

1. Ernst M. D. Detection of Web Service substitutability and composability / M. D. Ernst, R. Lencevicius // *Proceedings of the 1st International Workshop on Web Services Modeling and Testing (WS-MaTe 2006)*. – 2006. – Pp. 123–135.
2. Облачные сервисы масштаба WWW / Т. Ноор, К. Шенг, Э. Нгу, Ш. Дустдар // *Открытые системы. СУБД*. – 2014. – № 07. – С. 26-29.
3. Performance Comparison of Web Service Engines in PHP, Java, and C / Т. Suzumura, S. Trent, М. Tatsubori, А. Tozawa, Т. Onodera // *Proceedings of the IEEE International Conference on Web Services (ICWS 2008)*. – 2008. – Pp. 385–392.
4. Точилін С. Д. Продуктивність RESTful та SOAP PHP Web-сервісів при пошуку в даних PostgreSQL / С. Д. Точилін // *Вісник ХНТУ*. – 2017. – № 2(61). – С. 234-238.
5. Точилін С. Д. Аналіз продуктивності XML-RPC та SOAP PHP Web-служб при пошуку в даних СКБД PostgreSQL / С. Д. Точилін // *Вісник ХНТУ*. – 2015. – № 4(55). – С. 142-146.
6. Mitchell L. J. *PHP Web Services* / L. J. Mitchell. – Sebastopol, CA : O'Reilly, 2016. – 168 p.
7. Ahmad Haafiz Waheed-ud-din. *Building RESTful Web Services with PHP 7* / Waheed-ud-din Ahmad Haafiz. – Birmingham : Packt Publishing, 2017. – 220 p.
8. Riggs S. *PostgreSQL 14 Administration Cookbook : Over 175 proven recipes for database administrators to manage enterprise databases effectively* / S. Riggs, G. Ciolli. – Birmingham : Packt Publishing, 2022. – 608 p.
9. Моргунов Е. П. *PostgreSQL. Основы языка SQL : учеб. пособие*. / Е. П. Моргунов. – СПб. : БХВ-Петербург, 2018. – 336 с.
10. Менаске Д. *Производительность Web-служб. Анализ, оценка и планирование* / Д. Менаске, В. Алмейда. – СПб. : ООО «ДиаСофтЮП», 2003. – 480 с.
11. Dewailly L. *Building a RESTful Web Service with Spring* / L. Dewailly. – Birmingham : Packt Publishing, 2015. – 107 p.

References

1. Ernst, M.D., Lencevicius, R. (2006, June). Detection of Web Service substitutability and composability. In *proceedings of 1st International Workshop on Web Services Modeling and Testing* (pp. 123–135).
2. Noor, T., Sheng, Q., Ngu, A., Dustar S. (2014). Oblachnyye servisy masshtaba WWW [Analysis of Web-Scale Cloud Services]. *Otkrytyye sistemy. SUBD – Open systems. DBMS*, 7, 26–29.
3. Suzumura, T., Trent, S., Tatsubori, M., Tozawa, A., Onodera, T. (2008, September). Performance Comparison of Web Service Engines in PHP, Java, and C. In *proceedings IEEE International Conference on Web Services* (pp. 385–392).
4. Tochilin, S.D. (2017). Produktivnist' RESTful ta SOAP PHP Web-servisiv pry poshuku v danykh PostgreSQL [Performance of RESTful and SOAP PHP Web-services for data search in PostgreSQL]. *Visnyk Khersons'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu – Bulletin of the Kherson National Technical University*, 2(61), 234-238.
5. Tochilin, S.D. (2015). Analiz produktivnosti XML-RPC ta SOAP PHP Web-sluzhb pry poshuku v danykh SKBD PostgreSQL [Performance analysis of XML-RPC and SOAP PHP Web-services for data search in PostgreSQL DBMS]. *Visnyk Khersons'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu – Bulletin of the Kherson National Technical University*, 4(55), 142-146.
6. Mitchell, L.J. (2016). *PHP Web Services*. O'Reilly Media.
7. Waheed-ud-din, A.H. (2017) *Building RESTful Web Services with PHP 7*. Packt Publishing.
8. Simon, R., Ciolli, G. (2022). *PostgreSQL 14 Administration Cookbook : Over 175 proven recipes for database administrators to manage enterprise databases effectively*. Packt Publishing.
9. Morgunov, E.P. (2018). *PostgreSQL. Osnovy yazyka SQL: uchebnoe posobie* [PostgreSQL. SQL Fundamentals: A Tutorial]. BKhV-Peterburg.
10. Menasce, D.A., Almeida, V. (2003). *Proizvoditel'nost' Web-sluzhb. Analiz, otsenka i planirovaniye* [Capacity Planning for Web Services: metrics, models, and methods]. ООО «DiaSoftYuP».
11. Dewailly, L. (2015) *Building a RESTful Web Service with Spring*. Packt Publishing.

Отримано 21.01.2022

UDC 004.42:004.75

Sergei Tochilin

PhD in Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Computer Systems and Networks, Zaporizhzhia Polytechnic National University (Zaporizhzhya, Ukraine)

E-mail: <mailto:tochnozp@gmail.com>. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2010-6358>. Scopus Author ID: [6602607112](https://orcid.org/6602607112)

PERFORMANCE OF PHP CRUD WEB SERVICES WHEN WORKING WITH POSTGRESQL DATA

When developing modern distributed computer systems that work with DBMS data, a service-oriented architecture is widely used. For the practical implementation of such systems, Web services are used, which are developed using various technologies.

At the same time, the performance of a Web service largely determines the possibility of its use in a distributed system.

PHP tools provide an efficient platform for building Web services that support various technologies.

PostgreSQL is one of the most common and productive DBMS. The performance of XML-RPC, SOAP and RESTful PHP Web services when searching PostgreSQL data, i.e. when performing a CRUD read operation, has been explored before.

At that time, similar studies for XML-RPC, SOAP and RESTful PHP Web services in the implementation of CRUD operations to create, update and delete PostgreSQL data were not made.

In this work, PHP CRUD Web services were developed to work with PostgreSQL data in the amount of 1 MB, as well as a tester program that evaluates their performance based on determining the response time when making Web requests.

With the help of the created programs, the analysis of performance of XML-RPC, SOAP and RESTful PHP CRUD Web services at work with PostgreSQL data is carried out.

The SOAP Web service had the highest response time when performing create, read, update, and delete operations on DBMS data, the XML-RPC service had the average, and the RESTful service had the lowest (best performance).

The results obtained indicate both the significant impact of service development technology on its performance, and the advisability of using RESTful Web services when creating applications with a service-oriented architecture for working with PostgreSQL DBMS data using CRUD operations.

Keywords: CRUD; PHP; PostgreSQL; Web service; XML-RPC; SOAP; RESTful.

Fig.: 2. References: 11.

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-1(27)-142-151

УДК 004.3

Вікторія Клим

кандидат технічних наук, доцент кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій

Університет митної справи та фінансів (Дніпро, Україна)

E-mail: v0123klim@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5887-1955>ResearcherID: [V-7697-2017](https://orcid.org/0000-0002-5887-1955)**ЕЛЕКТРОННЕ ГОЛОСУВАННЯ: УМОВИ ПРОЄКТУВАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ
СТВОРЕННЯ НАЦІОНАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ**

Стаття є оглядово-інформаційною. Аналіз публікацій показав проблеми становлення та поширення форм електронного уряду, обумовлених багатьма факторами – історичними, правовими, економічними, соціальними, політичними, – які склались у країні.

Метою роботи є визначення пріоритетних завдань щодо провадження, необхідних умов для проєктування, оптимальних шляхів створення та реалізації за сучасними технологіями національної ІС е-голосування з урахуванням світового досвіду та особливостей національного рівня.

У роботі розглянуто результати досвіду деяких країн Європи щодо застосування ІС е-голосування. Показано розвиток міжнародної нормативно-правової бази для таких ІС. Висвітлено наявні законодавчі документи України, що сприяють створенню та розвитку національної ІС е-голосування.

Надано детальний аналіз двох варіантів ІС е-голосування. Викладені основні характеристики блокчейн технології в застосуванні до ІС е-голосування. Сформульовані пріоритетні завдання щодо впровадження ІС е-голосування на загальнодержавному рівні в Україні.

Ключові слова: електронний уряд; система дистанційного електронного голосування; блокчейн технологія.

Рис.: 2. Бібл.: 19.

Актуальність теми дослідження. Розвиток і вдосконалення інформаційних технологій сприяє побудові відкритого інформаційного простору головних державних інститутів. До найбільш розвинутих секторів електронного уряду (е-уряду) в провідних країнах світу належать такі: е-парламент, е-референдум, е-петиції, е-опитування [1-3]. Запровадження різних форм електронної демократії повинно спростити діалог органів влади з громадськістю і підвищити ефективність механізмів конструктивного зворотного зв'язку із населенням для інституцій державного управління як на місцевому, так і на загальнодержавному рівні. Зрозуміло, що питання розробки та вдосконалення національних інформаційних систем (ІС) е-уряду є актуальними та своєчасними [4; 5].

Постановка проблеми. Системи електронного голосування (е-голосування) належить до найбільш важливих складових сучасного демократичного суспільства. Проблема створення ІС е-голосування державного рівня із застосуванням новітніх технологій полягає як у підвищенні якості та швидкості обробки даних, так і в безумовній відповідності до принципів демократії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Авторами багатьох робіт [1-6] відзначено, що на шляху становлення та поширення форм е-уряду для країн стають певні проблеми, оскільки процес впровадження форм е-уряду щільно пов'язаний із багатьма факторами і залежить від юридично-правового підґрунтя, історичних традицій, економічних, соціальних та політичних передумов, які склались в країні. Основними з них вважають наступні [3; 6]:

- відтворення (оновлення) комунікаційної інфраструктури;
- обізнаність більшості громадян у використанні цифрових технологій, наявність доступу громадян до мережі Інтернет по всій країні;
- наявність кваліфікованих вітчизняних фахівців для створення, підтримки та супроводу програмного забезпечення;
- наявність кваліфікованих фахівців для кіберзахисту мереж, інформаційних систем, банків даних від зовнішнього та внутрішнього втручання.

Подальше вирішення визначених проблем цілком залежить від державної політики щодо створення е-уряду загалом та меж його впровадження зокрема.

Досвід країн світу за певний період застосування систем е-голосування висвітлює як позитивні, так і негативні сторони такої форми волевиявлення громадян [2; 5; 7]. До головних переваг використання е-голосування в процесах державного рівня належить такі:

- висока швидкість підрахунку голосів, отримання результатів голосування в цілому;
- зменшення затрат часу працівників на виборчих дільницях під час виборів;
- зменшення затрат на виготовлення бюлетенів, транспортування бюлетенів до/з дільниць;

- зменшення кількості недійсних зіпсованих бюлетенів;
- висока зручність для людей похилого віку, людей із обмеженими можливостями, хворих людей;

- мобільність для людей, які перебувають у відрядженнях, за кордоном.

Суттєвими недоліками застосування е-голосування вважають такі:

- порушення таємності голосування під час ідентифікації виборця;
- збільшення затрат на придбання та обслуговування систем електронного голосування;
- збільшення затрат для комплексного кіберзахисту як мережевої інфраструктури, так і інформаційної системи електронного голосування;

- відсутність стандартів для систем електронного голосування;

- сумнівна прозорість процесу голосування;

- обмежені можливості перерахунку голосів;

- недовіра щодо об'єктивності електронного голосування в суспільстві.

В Україні системи е-голосування державного рівня перебувають лише на етапі постановки завдання [5; 8].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. В Україні системи е-голосування державного рівня перебувають лише на етапі постановки завдання [5; 8]. Тому є потреба, використовуючи світовий досвід, сформулювати необхідні умови для проектування, визначити оптимальні шляхи створення та реалізації національної інформаційної системи е-голосування.

Метою роботи є визначення пріоритетних завдань щодо впровадження, необхідних умов для проектування, оптимальних шляхів створення та реалізації за сучасними технологіями національної ІС е-голосування з урахуванням світового досвіду та особливостей національного рівня.

Виклад основного матеріалу. Уже на початку ХХІ сторіччя застосування систем електронного голосування в різних країнах призвело до протилежних за змістом результатів стосовно їх подальшого використання. Так, Велика Британія у 2005 році дійшла висновку, що системи е-голосування надто дорогі та не сприяють збільшенню участі у виборах [5]. Нідерланди у 2008 році повернулись до паперового голосування, де основною з причин стала небезпека таємності голосу; а у Німеччині в 2009 році е-голосування було проголошено неконституційним через брак публічності. На відміну від Норвегії, яка у 2014 році тимчасово призупинила процес упровадження е-голосування в контексті проблеми безпеки, Швейцарія постійно продовжує розширювати використання е-голосування, у якій до 30 % місцевих виборців здійснює інтернет-голосування. У Філіппінах е-голосування запроваджене по всій країні з 2010 року [5,6]. Багаторічний позитивний досвід застосування е-голосування в державному масштабі має Естонія, в якій насамперед, була затверджена низка законодавчих актів, і було створено базу даних цифрових підписів та ІД-карток усіх учасників голосування [1,8].

Таким чином, ключовим питанням у застосуванні національних систем електронного голосування в різних країнах стало створення відповідного нормативно-правового підґрунтя. Історія міжнародного права для систем електронного голосування бере початок з 2000 року, коли Європейська комісія запровадила проєкт КіберГолос (CyberVote) [8]. До участі в проєкті залучались такі великі комерційні компанії, як EADS Matra

Systems & Information, Nokia Research Centre, також заклади освіти Бельгії та Нідерландів разом із потенційними користувачами системи е-голосування [8]. Після встановлення регіональних міжнародно-правових стандартів електронного голосування Радою Європи (РЄ) в 2004 році було проголошено та затверджено Рекомендації Комітету міністрів (КМ) РЄ Rec(2004)11, а в 2017 році – Рекомендації CM/Rec(2017)5 країнам-членам з правових, організаційних та технічних стандартів е-голосування [9]. У 2020 році Вимоги до систем е-голосування були затверджені Радою демократичних виборів, а також Принципами використання цифрових технологій, прийнятими Венеціанською комісією [8; 9].

В Україні обговорення Концепції «Держава у смартфоні» почалось у 2019 році. Ключовими секторами розвитку е-демократії вбачаються е-парламент; е-голосування; е-правосуддя; е-медіація (досудове вирішення спорів); е-референдум; е-голосування; е-консультації; е-петиції; е-політичні кампанії; е-опитування [6]. Виданий Указ Президента України №558/2019 «Про деякі заходи щодо поліпшення доступу фізичних та юридичних осіб до електронних послуг» має за мету забезпечення належного функціонування та захисту даних у національних електронних інформаційних ресурсах, доступності та зручності електронних послуг для фізичних та юридичних осіб, а також запобігання корупції під час надання таких послуг [10]. Створене у 2019 році Міністерство цифрової трансформації України відповідає за формування та реалізацію державної політики у сфері цифровізації, відкритих даних, національних електронних інформаційних ресурсів та інтеперабельності, впровадження електронних послуг, електронних довірчих послуг тощо [6].

На сьогодні в законодавчій базі України створено вихідні умови для нормативно-правових механізмів подальшого розвитку національної ІС е-голосування [10-14], серед яких відзначимо найбільш вагомі.

Закон України «Про електронні довірчі послуги» дає можливість запровадити в Україні сучасні електронні методи ідентифікації особи, серед яких Mobile ID. Закон України «Про основні засади забезпечення кібербезпеки України» визначає основні цілі, напрями та принципи державної політики у сфері кібербезпеки, також повноваження та обов'язки державних органів в цій сфері. Прийнятий у 2019 році Виборчий кодекс України передбачає активне використання інформаційно-комунікативних технологій у частині реєстрації виборців та уточнення відомостей про виборців у Державному реєстрі виборців. Відповідно до Закону України «Про Державний реєстр виборців» Реєстр ведеться в електронній формі.

Відомо, що у 2020 р. центральна виборча комісія (ЦВК) України не дала згоду на тестування проекту е-голосування за обґрунтованими причинами [6]: недостатньо підготовлена технічна база; недостатній рівень розвитку суспільства, щоб запроваджувати голосування в Інтернеті; на сучасному етапі можна вести мову про застосування технічних засобів для автоматичного опрацювання бюлетенів або машин для голосування, засобів автоматичної ідентифікації виборців на дільницях та запровадження роботи Державного реєстру виборців в онлайн-режимі.

Проте план дій ЦВК України спрямований на перспективу провадження системи е-голосування, що відображено в таких заходах [5; 6; 16]:

1) розроблено Стратегічний план на період 2020-2025 рр., виконання якого серед іншого сприятиме створенню умов для запровадження в Україні новітніх виборчих технологій;

2) організовано роботу з нагляду за реалізацією проекту міжнародної технічної допомоги «Посилення кібербезпеки і прозорості виборчих процесів в Україні» згідно з Планом співпраці між Центральною виборчою комісією та Координатором проєктів ОБСЄ в Україні щодо діяльності, пов'язаної з виборами.

Також Національним координаційним центром кібербезпеки РНБО України відповідним міністерствам і відомствам запропоновано розробити попереднє технічне завдання, модель потенційних загроз та техніко-економічне обґрунтування впровадження онлайн-голосування у виборчий процес в Україні для подальшого всебічного вивчення та обговорення [16].

Отже, вищевказані документи та заходи складають основні напрями та термінові завдання щодо реалізації впровадження ІС е-голосування в Україні.

За міжнародними стандартами, на сьогодні в світі вже чітко розподілені такі поняття, як «стаціонарне електронне голосування» та «дистанційне електронне голосування» (онлайн-голосування). У першому випадку виборці голосують на вибірковій ділянці під наглядом членів вибіркової комісії, у другому – за межами вибіркової ділянки з будь-якого місця. Відповідно до вказаного поділу відбувається розвиток систем е-голосування за двома напрямками.

На початковому етапі створення та розвитку електронних систем голосування переслідувалось завдання цифрового моделювання «класичного» паперового голосування. Саме з таких позицій тестові випробування такого е-голосування завжди проводилось паралельно із «класичним» паперовим голосуванням [1; 5]. Схема опрацювання та аудита даних в ІС е-голосування, що відбувається на виборчій ділянці, показано в спрощеному вигляді на рис. 1: учасники е-голосування проходять ідентифікацію та передають інформацію про свій вибір через технічні засоби (ТЗ) для автоматичного опрацювання бюлетенів (або машин для голосування) на сервер ідентифікації учасників голосування та підрахунку голосів. Процес ідентифікації вимагає взаємодії з базою даних Єдиного Державного Реєстру учасників голосування (ЄДР УГ). Контроль з боку спостерігачів (аудит) відбувається за результатом роботи сервера.

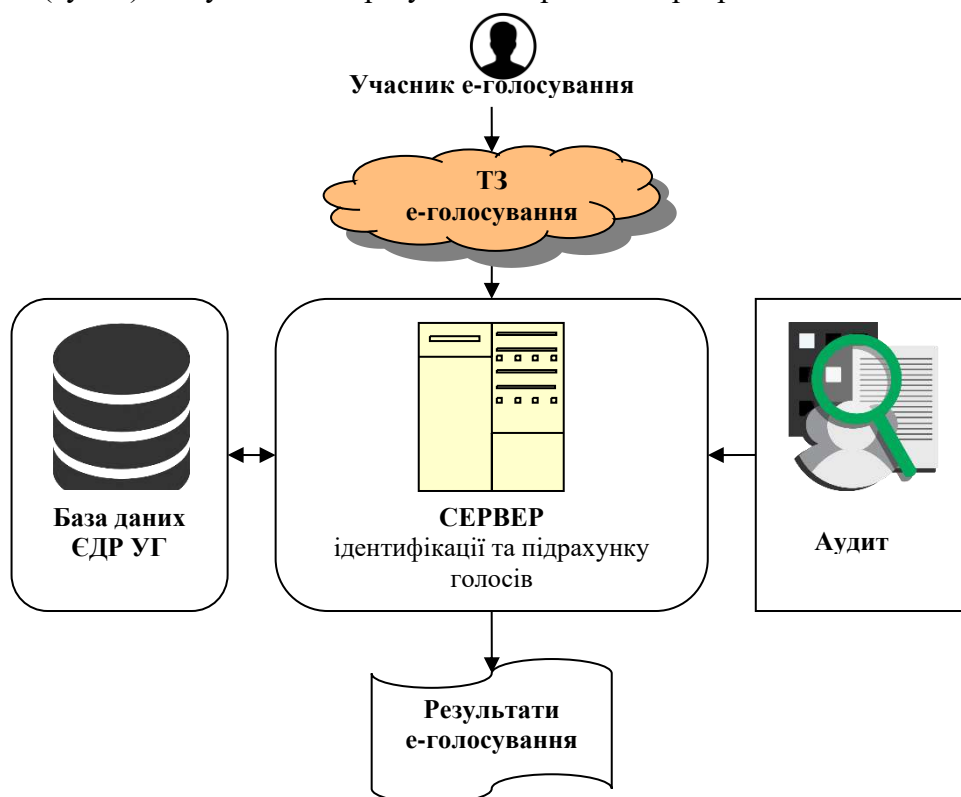


Рис. 1. Схема обміну та контролю даних в ІС е-голосування, що відбувається на виборчій ділянці

Джерело: розроблено авторкою.

Наведена схема ІС має характерний основний принциповий недолік: відсутність розриву між місцем (сервером) ідентифікації учасників голосування та підрахунку голосів учасників голосування [7]. Оскільки два основних процеси підпадають під контроль одних і тих же осіб, то зрозуміло, що виконання основних принципів демократичного голосування буде під загрозою [7].

Таким чином, розглянута система е-голосування має застосовуватись тільки паралельно із стандартним звичайним голосуванням паперовими бюлетенями, або в іншому варіанті застосовувати тільки її окремі частини функціоналу (створення та актуальна підтримка реєстрів учасників голосування, остаточна обробка на центральному сервері всіх даних з протоколів, отриманих на місцях виборчих дільниць).

Процес дистанційного е-голосування передбачає забезпечення значно більшої кількості процесів, основними з яких є наступні [7]:

- однозначної ідентифікації-аутоідентифікації учасників голосування;
- таємності волевиявлення учасників голосування;
- перевірки та додаткового контролю підрахунку голосів;
- достовірності переданих даних із зафіксованими даними на сервері обробки даних;
- контролю за урахуванням особистого голосу учасника голосування тільки один раз.

Згідно з викладеними позиціями маємо схему ІС дистанційного е-голосування показану на рис. 2.

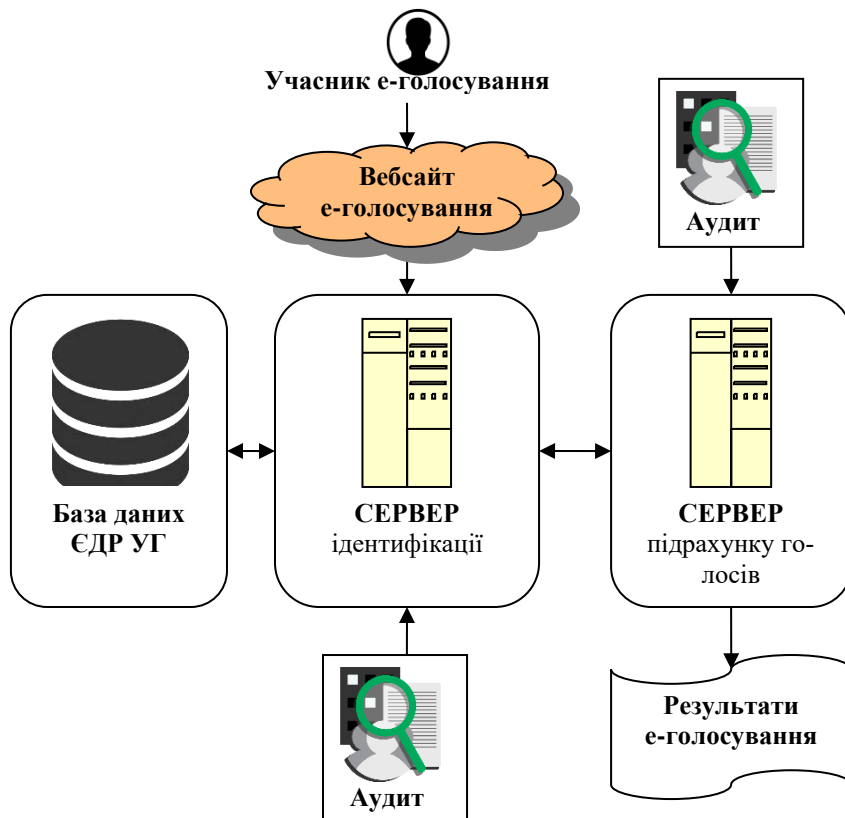


Рис. 2. Схема обміну та контролю даних в ІС дистанційного е-голосування
Джерело: розроблено авторкою.

Далі розглянемо відомі підходи до вирішення викладених вище задач, які застосовують на різних етапах процесу електронного голосування.

На етапі ідентифікації учасників голосування для ІС е-голосування постає характерна проблема – повторна ідентифікація. На цьому етапі дуже поширені методи біометричної ідентифікації: за відбитками пальців, сканування яких використовують в 45 країнах, та за радужкою ока (прикладом є вибори в Сомалі). Деякі країни: Гвінея, Конго, Ліберія – при реєстрації на виборах видають спеціальне посвідчення особистості для ідентифікації на вибіркових дільницях. Крім того, в Кенії, Гані, Нігерії таке посвідчення також включає відбитки пальців [7]. Використання спеціальних чорнил, які важко змити, для помітки учасників голосування, було застосовано в 2014 році на виборах в Афганістані [7; 9]. У випадку дистанційного е-голосування для надійності ідентифікації учасників голосування центральною виборчою комісією Естонії з 2017 року затверджено використання особистих ID-карток із чіпом та кардрідером [6].

Необхідно вказати окремо, що біометричні датчики смартфонів (датчик відбитку пальця, радужки ока і т. ін.) використовувати в електоральних системах для аутентифікації неможливо, оскільки вони тільки підтверджують, що особа є власником цього смартфона [7]. Тобто власник п'яти смартфонів може аутентифікуватись п'ять раз. Але датчики смартфонів можна використати для підтвердження доступу до додатку, що використовується для голосування, для того, щоб стороння людина, отримавши доступ до смартфона, не віддав голос за його дійсного власника.

Під час наступного етапу голосування – безпосередньої віддачі свого голосу – основною проблемою для ІС є гарантування таємниці волевиявлення учасників голосування. Ця задача дуже складна для вирішення у випадку стаціонарного е-голосування: електронне обладнання (комп'ютери), через які відбувається е-голосування на виборчих дільницях, відкрито для хакерських атак через низьку захищеність програмного забезпечення. Відомі випадки, коли комп'ютери на виборчих дільницях перепрограмували для гри в шахи (Данія, 2006) та через мобільний телефон (Індія, 2010) [7].

Застосування новітніх технологій в ІС дистанційного е-голосування, зокрема блокчейн технологій, може вирішити задачу забезпечення таємності волевиявлення учасників голосування. Відомо, що крім основної області застосування – криптоіндустрії, інформаційні системи на базі блокчейну застосовують у сфері фінансових послуг, державних установ та послуг, логістики, охорони здоров'я, енергетики і багато інших [17]. Саме надійність системи блокчейн дозволяє використовувати її для підвищення ефективності обміну інформацією. Крім того, неможливість підробки даних усередині самої системи блокчейн робить її корупційностійкою системою. У виборчих процесах національного рівня вже існують приклади застосування блокчейн технології для проведення онлайн-голосування в тестовому режимі [7; 17-19]. Отже, розглянемо основні характеристики блокчейн технології в застосуванні до ІС е-голосування.

За принципом роботи блокчейн технології транзакція фіксує або отримання (при реєстрації) або передачу (кидання в урну заповненого бюлетеня) бюлетеня між учасниками процесу голосування [7; 17]. У визначеному сенсі задачею для ІС є врахування транзакцій. У цьому випадку врахування транзакцій – це фіксація всіх переходів активу (бюлетеня) від одної людини до іншої (між учасниками процесу голосування). Отже, саме блокчейн-технологія реалізує вирішення задачі відокремлення місця підрахунку реальних учасників дистанційного голосування та місця підрахунку бюлетенів із відданими голосами за рахунок наявності двох окремих незалежних серверів (рис. 2). Зрозуміло, що проблеми із помилками членів виборчих комісій, хакерські атаки можуть стати причиною знищення, змін в записах транзакцій, або їх призупинення. Однак технологія блокчейн містить системи обліку на основі розподілених реєстрів, які суттєво знижують такі ризики [18; 19]. Також у блокчейні реєстр власників не зберігається на одному сервері. Його копії одночасно оновлюються на множині незалежних комп'ютерів, що з'єднані через

мережу Інтернет. Отже, зрозуміло, що в блокчейні реєстри із даними про власників активів неможливо підробити. Ці дані зберігаються на комп'ютерах великої кількості учасників мережі. Для того, щоб інформація у всіх користувачів була абсолютно повною та коректною, в блокчейні використовують поняття «консенсусу» [17-19]. У випадку, коли деякі учасники мережі вимкнуть свої комп'ютери та частина транзакцій у них не відобразиться або їх записи будуть не коректними, це не вплине на роботу мережі. Процедура консенсусу, тобто згоди, дає можливість повністю відновити коректну інформацію.

Таким чином, обрання блокчейн технології при створенні ІС е-голосування зумовлено наступними причинами:

- транзакції проходять практично миттєво, тільки на їх підтвердження може знадобитись певний час;
- операції конфіденційні та анонімні;
- усі операції зафіксовані в ланцюзі блоків транзакцій;
- інформація зберігається надійно, оскільки історія всіх операцій записана в блокчейні і розподілена по всім учасникам мережі, при цьому кожний блок містить інформацію про всі попередні операції з самого початку.

Також високий рівень довіри до блокчейну з боку ІТ-спеціалістів ґрунтується на вирішенні деяких важливих завдань кіберзахисту процесу голосування [7]:

- кодування результатів під час процесу голосування (проміжкові результати) за допомогою шифрування на блокчейні;
- використання електронних підписів, які гарантують анонімність та секретність виборців;
- гарантування прозорості всіх транзакцій, які згідно з принципом технології блокчейн неможливо фальсифікувати.

Тем не менш, проблеми недосконалості блокчейн технології виникають за певних обставин, які розглянуто нижче.

Технологічні проблеми блокчейн технології пов'язані з масштабованістю, тобто можливості системи обробляти велику кількість транзакцій. Відомі типи блокчейну, які потенційно незахищені перед хакерськими атаками, а також перед «атаками 51 %», коли в повній відповідності з правилами системи, група користувачів може змінити записи в конкретному блокчейні за рахунок великих комп'ютерних потужностей. Також до недоліків використання блокчейн технології відносять правові ризики, невиправдано завищені ресурсо- та енергомісткість [17-19].

Але вказані мінуси блокчейн технології не зупиняють швидкості її поширення в багатьох сферах діяльності. Причому ефективність застосування блокчейна визначено за головними критеріями процесів: зростанням швидкості обміну інформацією, зменшенням часових витрат, підвищенням якості, надійності та доступності послуг, наявності прозорості та зменшення ризиків.

Висновки. Таким чином, для можливого впровадження систем е-голосування на загальнодержавному рівні на Україні в найближчому майбутньому необхідно виконати пріоритетні завдання, а саме: підготувати сучасну технічну базу, що в першу чергу передбачає переоснащення технологічної інфраструктури на всіх вузлах прийому-передачі інформації, задіяних в процесі голосування (на дільницях, в закладах державного управління, центральній виборчій комісії), із забезпеченням високого рівня кіберзахисту, максимально збільшити відсоток населення України з вільним доступом до інтернет-зв'язку високої якості; здійснити застосування технічних засобів для автоматичного опрацювання бюлетенів або машин для голосування, засобів автоматичної ідентифікації виборців на дільницях та коректної роботи Державного реєстру виборців в онлайн-режимі. Також у законодавчій базі Україні існують

вихідні умови для розвитку нормативно-правових механізмів щодо створення та впровадження національної ІС е-голосування згідно міжнародних стандартів. Водночас участь виборців в е-голосуванні передбачає визначення загальної системи ідентифікації через індивідуальні електронні ідентифікатори (наприклад паспорти або ID-картки). Створення ІС е-голосування із застосуванням блокчейн технології вирішує принципіальну проблему забезпечення таємності волевиявлення учасників голосування. Крім того, основні характеристики блокчейн технології, до яких зокрема відносять високу швидкість обробки інформації, мінімум часових витрат, наявність прозорості визначають реальні перспективи її реалізації в національній ІС е-голосування.

Список використаних джерел

1. Лахижа М. І. Електронна демократія в Україні: специфіка становлення, стан та перспективи / М. І. Лахижа // Державно-управлінські студії. – 2019. – № 4. – С. 1-12.
2. Зарубіжний досвід впровадження електронного урядування / за заг. ред. д-ра наук з держ. упр., проф. С. А. Чукут. – К., 2008. – 200 с.
3. Меркулова Т. В. Развитие электронного правительства в Украине на фоне мировых тенденций / Т. В. Меркулова, Е. Ю. Кононова // Журнал институциональных исследований. – 2010. – Т. 2, № 4. – С. 47-58.
4. Ghassan Z. Qadah Electronic voting systems: Requirements, design, and implementation / Z. Qadah Ghassan, Rani Taha // Computer Standards & Interfaces. – 2007. – Vol. 29. – Is. 3. – Pp. 376–386.
5. Полупан М. Підґрунтя для ефективного впровадження електронних виборів та інтернет-голосування як ключових інструментів е-демократії / М. Полупан // Scientific collection «InterConf». – 2020. – № 3 (33). – С. 41–49.
6. Тімченко М. Особливості функціонування системи електронного голосування: зарубіжний досвід та можливості впровадження в Україні / М. Тімченко // Епістемологічні дослідження в філософії, соціальних і політичних науках. – 2021. – Т. 4, № 2. – С. 115-123.
7. Чикишев Н. Электронное голосование: технологии на выборах в разных странах [Электронный ресурс] / Н. Чикишев. – Режим доступа: <https://dev.by/news/inet-election>.
8. Апплгейт М. Интернет-голосування: питання до розгляду. Загальний огляд для органів управління виборами. Біла книга IFES. 2020 [Електронний ресурс] / М. Апплгейт, Т. Чанускот, В. Басистий. – Режим доступа: <https://politosvita.ba.org.ua/novyny/inshi-zahody/globalnedoslidzhennya-ifes-internet-golosuvannya-pytannya-do-rozglyadu-zagalnyj-oglyad-dlya-organiv-administruvannya-vyboriv/>.
9. Маурер Ардіта Дріза. Цифрові технології у виборах. Питання, висновки та перспективи [Електронний ресурс] / Маурер Ардіта Дріза. – Режим доступа: <https://rm.coe.int/presentation-coe-publication-digital-technologies-in-elections-ardita-/16809e86d3>.
10. Про деякі заходи щодо поліпшення доступу фізичних та юридичних осіб до електронних послуг : Указ Президента України № 558/2019 // Урядовий кур'єр. – № 144 (31.07.2019).
11. Про електронні довірчі послуги : Закон України № 2155-VIII від 05.10.2017 р. //Голос України. – № 206 (07.11.2017).
12. Про основні засади забезпечення кібербезпеки України : Закон України № 2163-VIII від 05.10.2017 р. //Голос України. – № 208 (09.11.2017).
13. Виборчий кодекс України // Голос України. – № 251 (28.12.2019).
14. Про Державний реєстр виборців [Електронний ресурс] : Закон України № 698-V від 23.07.2020 р. – Режим доступа: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/698-16#Text>.
15. КВУ назвав головні ризики запровадження е-голосування в Україні [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ukrinform.ua/rubric-society/3386401-kvu-nazvav-golovni-riziki-zaprovadzenna-egolosuvanna-v-ukraini.html>.
16. Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 27 січня 2016 року «Про Стратегію кібербезпеки України» [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/96/2016>.
17. Потапова К. Р. Система онлайн-голосування на базі технології блокчейн / К. Р. Потапова, Д. В. Довжик // XIV конференція молодих вчених «Прикладна математика та компютеринг-2021» (Київ, 17-19 листопада 2021 р.). – К. : Просвіта. – С. 261-265.

18. Khan K. M. Secure Digital Voting System based on Blockchain Technology [Electronic resource] / Khan K. M., Arshad, Junaid, Khan M. M. – Access mode: <https://core.ac.uk/download/pdf/155779036.pdf>.

19. Jafar U. Blockchain for Electronic Voting System – Review and Open Research Challenges [Electronic resource] / U. Jafar, M.J.A. Aziz; Z. Shukur // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21. – P. 5874. – Access mode: <https://doi.org/10.3390/s21175874>.

References

1. Lahizha, M. (2019). Elektronna demokratsiia v Ukraini: spetsyfyka stanovlennia, stan ta perspektyvy [E-democracy in Ukraine: specifics of formation, state and perspectives]. *Derzhavno-upravlinnski studii. – Public administration studies*, 4, 1-12.

2. Kaminska, T., Kaminskyi, A., Pasichnyk M. (2008). *Zarubizhnyi dosvid uprovdzhennia elektronnoho uriaduvannia [Foreign experience in implementing e-government]*.

3. Merkulova, T., Kononova, E. (2010). Razvytye elektronnoho pravytelstva v Ukrayne na fone myrovyykh tendentsyi [Development of e-government in Ukraine with the background of world trends] *Zhurnal ynstytutsionalnykh issledovanyi. – Journal of institutional research*, 4(2), 47-58.

4. Qadah Ghassan, Z., Taha, Rani. (2007). Electronic voting systems: Requirements, design, and implementation. *Computer Standards & Interfaces*, 29(3), 376-386.

5. Polupan, M. (2020). Pidgruntia dlia efektyvnoho vprovadzhenia elektronnykh vyboriv ta internet-holosuvannia yak kliuchovykh instrumentiv e-demokratii [The basis for the effective implementation of electronic elections and online voting as key tools of e-democracy]. *Scientific collection «InterConf»*, 3(33), 41-49.

6. Timchenko, M. (2021). Osoblyvosti funktsionuvannia systemy elektronnoho holosuvannia: zarubizhnyi dosvid ta mozhlyvosti vprovadzhenia v Ukraini [Features of the electronic voting system: foreign experience and opportunities for implementation in Ukraine]. *Epistemolohichni doslidzhennia v filosofii, sotsialnykh i politychnykh naukakh – Epistemological research in philosophy, social and political sciences*, 2(4), 115–123.

7. Chykyshev, N. (2020). *Elektronnoe holosovanye: tekhnolohyy na vyborakh v raznykh stranakh [Electronic voting: technologies in elections in different countries]*. <https://dev.by/news/inet-election>.

8. Applheit, M., Chanussot, T., Basystyi, V. (2020). Internet-holosuvannia: pytannia do rozghliadu. Zahalnyi ohliad dlia orhaniv upravlinnia vyboramy. Bila knyha IFES. 2020. [Online voting: a problem for consideration. General overview for election administration departments. IFES White Paper. 2020]. <https://politovita.ba.org.ua/novyny/inshi-zahody/globalne-doslidzhennya-ifes-internet-golosuvannya-pytannya-do-rozglyadu-zagalnyj-oglyad-dlya-organiv-administruvannya-vyboriv/>.

9. Maurer, A. (2020). Tsyfrovi tekhnolohii u vyborakh. Pytannia, vysnovky ta perspektyvy [Digital technologies in elections. Questions, conclusions and prospects]. <https://rm.coe.int/presentation-coe-publication-digital-technologies-in-elections-ardita-/16809e86d3>

10. Pro deiaki zakhody shchodo polipshennia dostupu fizychnykh ta yurydychnykh osib do elektronnykh posluh [On some measures to improve access of individuals and legal entities to electronic services], Decree of the President of Ukraine № 558/2019. *Uriadovi kurier – Government courier*, 144.

11. Pro elektronni dovirchi posluhy [On electronic trust services], Law of Ukraine № 2155-VIII. *Holos Ukrainy – Voice of Ukraine*, 206.

12. Pro osnovni zasady zabezpechennia kiberbezpeky Ukrainy [On Basic Principles of Cyber Security of Ukraine], Law of Ukraine № 2163-VIII. *Holos Ukrainy. – Voice of Ukraine*, 208.

13. Vyborchyi kodeks Ukrainy [Electoral Code of Ukraine]. *Holos Ukrainy. – Voice of Ukraine*, 251.

14. Pro Derzhavnyi reistr vybortsiv [On the State Register of Voters], Law of Ukraine № 698-V. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/698-16#Text>.

15. KVV nazvav holovni ryzyky zaprovadzhenia e-holosuvannia v Ukraini [CVU named the main risks of introducing e-voting in Ukraine]. (2022). <https://www.ukrinform.ua/rubric-society/3386401-kvu-nazvav-golovni-riziki-zaprovadzenna-egolosuvanna-v-ukraini.html>.

16. Pro Stratehiiu kiberbezpeky Ukrainy [On the decision of the National Security and Defense Council of Ukraine of January 27, 2016 "On the Cyber Security Strategy of Ukraine"], Decree of the President of Ukraine. <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/96/2016>.

17. Potapova, K., Dovzhyk, D. (2021). Systema onlain-holosuvannia na bazi tekhnolohii blokchein [Online voting system based on blockchain technology]. *XIV konferentsiia molodykh vchenykh «Prykladna matematyka ta kompiutynh-2021» – XIV Conference of Young Scientists "Applied Mathematics and Computing-2021"* (pp. 261-265). Prosvita.

18. Khan, K.M., Arshad, J., Mubashir, K. (n.d.). Secure Digital Voting System based on Blockchain Technology. <https://core.ac.uk/download/pdf/155779036.pdf>.

19. Jafar, U. Aziz, M.J.A. Shukur, Z. (2021) Blockchain for Electronic Voting System. *Review and Open Research Challenges. Sensors, 21*, 5874. <https://doi.org/10.3390/s21175874>.

Отримано 05.02.2022

UDC 004.3

Viktoriia Klym

PhD in Technical Sciences

Associate Professor of Cybersecurity and Information Systems Department

University of Customs and Finance (Dnipro, Ukraine)

E-mail: v0123klim@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5887-1955>

ResearcherID: [V-7697-2017](https://orcid.org/0000-0002-5887-1955)

ELECTRONIC VOTING: CONDITIONS OF DESIGN AND TECHNOLOGY OF THE NATIONAL INFORMATION SYSTEM CREATION

The article is of an overview and information nature. The development and improvement of information technology (IT) contributes to the construction of an open information space of major state institutions. Electronic voting (e-voting) is one of the important components of a modern democratic society. In Ukraine, the issue of an integrated approach to the development and implementation of the national information system (IS) of e-voting has become relevant over the past two years.

The analysis of publications showed a number of problems on the way to the formation and spread of electronic government in the country, which depend on many factors according to the legislative field, historical traditions, economic, social and political preconditions.

The aim of the work is to determine the priority tasks for implementation, the necessary conditions for design, optimal ways to create and implement modern technologies of national e-voting IS, taking into account world experience and national characteristics.

The paper considers the results of the experience of some European countries in the use of e-voting. The development of the international legal framework for such IS is shown. Existing legislative documents of Ukraine that promote the creation and development of national e-voting IS are presented.

Priority tasks for the implementation of electronic voting IS at the national level in Ukraine have been formulated. A detailed analysis of stationary e-voting IS and on-line e-voting IS is provided to determine the main tasks, features of application at the stages of the voting process, provided schemes for data exchange and control. The main characteristics of blockchain technology in application to electronic voting IS are discussed. The effectiveness of blockchain technology according to the main criteria of the voting process is shown.

Keywords: e-government; on-line e-voting system; blockchain technology.

Fig.: 2. **References:** 19.

РОЗДІЛ III. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-1(27)-152-160

УДК 628.3

Марія Твердохліб¹, Інна Трус², Микола Гомеля³, Катерина Толстенкова⁴

¹кандидат технічних наук, асистент кафедри екології та технології рослинних полімерів
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: madamtverdohleb@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9731-1969>
ResearcherID: [AAO-7072-2021](https://orcid.org/0000-0002-9731-1969), Scopus Author ID: [57189384600](https://orcid.org/0000-0002-9731-1969)

²кандидат 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)

³доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри екології та технології рослинних полімерів
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: m.gomelya@kpi.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1165-7545>
ResearcherID: [J-4345-2017](http://orcid.org/0000-0003-1165-7545), Scopus Author ID: [6507653734](http://orcid.org/0000-0003-1165-7545)

⁴студент
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ ВІД ІОНІВ МАНГАНУ ПРИ ВИКОРИСТАННІ РОЗЧИНІВ НАТРІЙ ГІПОХЛОРИТУ

Окислювальні способи є досить ефективними для вилучення іонів мангану з води, тому були використані розчини натрій гіпохлориту для інтенсифікації процесів окислення сполук мангану в артезіанській воді. Встановлено, що ступінь вилучення мангану залежить від витрати окиснюючого агенту та концентрації іонів мангану у воді. Проведені дослідження дозволили вдосконалити методи очищення води від іонів мангану при їх окисленні натрій гіпохлоритом та встановити, що ефективність очищення води зростає як при збільшенні витрати окиснюючого агенту, так і при підвищенні концентрації іонів мангану у воді.

Ключові слова: артезіанська вода; деманганация; окислення; натрій гіпохлорит; концентрація; доза; окиснюючий агент.

Рис.: 7. Бібл.: 10.

Актуальність теми дослідження. Одним із найважливіших завдань сучасності є охорона навколишнього природного середовища. Раціональне використання водних ресурсів, очищення природних і стічних вод набувають особливо актуального значення, оскільки вони тісно пов'язані з охороною природних вод від забруднень.

З огляду на те, що тенденція погіршення якості джерел питного водопостачання залишається стійкою протягом багатьох років, унаслідок чого спостерігається погіршення як гігієнічних, так і фізико-хімічних характеристик води. Така ситуація викликає особливу занепокоєність світової громадськості. Всесвітня організація охорони здоров'я серед комплексу найважливіших питань на перший план ставить вирішення проблеми питного водопостачання як невід'ємної частини реалізації програми охорони здоров'я в усьому світі.

Відповідно до останніх даних Всесвітньої організації охорони здоров'я, близько 80 % підвищення захворюваності населення спричинені вживанням неякісної питної води. Проблема забезпечення населення питною водою та доступу до її споживання є глобальною екологічною проблемою, однією із важливіших відображених у плані дій на XXI століття та Декларації прийнятих на міжнародній конференції ООН в 1992 році в Ріо-де-Жанейро.

Проблема якості питної води особливо гостро стоїть для населення України, оскільки за останні роки зміна клімату та політичних ситуацій призвели до зниження кількості і якості водних ресурсів. Поверхневі та підземні водні об'єкти піддаються значному антропогенному впливу, внаслідок чого часто містять широкий спектр невластивих їм забруднень.

В останні роки склалася така ситуація, що більша частина населення навіть через системи централізованого водопостачання із поверхневих водойм, а також із артезіанських свердловин, споживає питну воду, яка не відповідає нормативним документам щодо її якості. Завищеними є показники присутності іонів жорсткості, заліза, мангану, амонію та ряду важких металів.

Поверхневі та підземні джерела водопостачання можуть містити домішки як природного, так і антропогенного походження. Їхній склад постійно змінюється через протікання природних процесів окислення і відновлення, а також під впливом людської діяльності. Хоча вважається, що підземні води менше піддаються сторонньому впливу, проте в деяких випадках, залежно від умов їх природного формування, спостерігається підвищений вміст окремих компонентів. Необхідно вирішувати проблему вилучення таких забруднюючих речовин до нормативних значень.

Манган відноситься до елементів, що мають безпосередній вплив на якість води, оскільки він є компонентом багатьох природних мінералів та порід, тому його вимивання неможливо уникнути. Близько 70 % підземних вод містять сполуки мангану в концентраціях, що в багато разів перевищують норми ГДК, тому для питних цілей без попереднього очищення застосування таких вод є неможливим [1].

Постановка проблеми. Інтенсивний розвиток галузей промисловості та сільського господарства спричиняє погіршення та зменшення ресурсів питної води. Як у поверхневих, так і підземних водах спостерігається підвищення концентрації різних елементів і сполук, небезпечних для людини. На жаль, видалення цих домішок традиційними методами не завжди задовольняє досягнення нормованих показників якості води. Тому пошук нових, більш сучасних, відповідно ефективних методів очищення води є завжди актуальним.

У природних умовах сполуки мангану здебільшого зустрічаються у вигляді карбонатів, сульфатів, хлоридів, у поєднанні з гумусовими сполуками, іноді у вигляді фосфатів. Присутність сполук мангану призводить до заростання та забруднення водопровідної мережі, відповідно створює певні проблеми під час очищення води.

Очищення природних вод від сполук мангану має ключове значення, враховуючи його токсичність та здатність акумулюватися в живих організмах, досягати високих концентрацій та завдавати негативного впливу на здоров'я людей. На сьогодні проблема очищення води від іонів мангану є досить складною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Попри великий обсяг опублікованих результатів досліджень за цим напрямом, описаних технологічних процесів, у тому числі каталітичних методів очищення води від іонів Mn^{2+} [2; 3], проблема значною мірою залишається не вирішеною. Обумовлено це тим, що вилучення іонів мангану з води сорбційними [4], іонообмінними [5], мембранними [6], електрохімічними [7] методами проходить недостатньо ефективно. Особливо в присутності іонів жорсткості, концентрація яких у природних водах здебільшого набагато вища за концентрацію іонів мангану та заліза. Це призводить до значного зниження ємності сорбентів та іонообмінних матеріалів по іонах мангану й заліза, а також до зниження селективності мембран за іонами цих металів. Більше того сполуки кальцію, у процесі фільтрування, відкладаються на поверхні мембрани, призводячи до різкого скорочення терміну їх експлуатації та зниження продуктивності. Утворені в процесі очищення води сполуки мангану отруюють сорбенти та іоніти, блокуючи їх пори, за рахунок чого знижується їхня сорбційна та обмінна ємність.

Слід зазначити, що сорбційні, іонообмінні, а особливо мембранні методи є досить дорогими з обмеженою продуктивністю. Тому більш перспективними є окислювальні методи очищення води від іонів мангану. Проте окиснення іонів мангану в аерованому водному середовищі проходить дуже повільно.

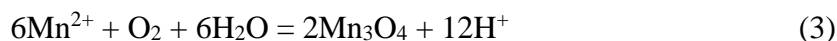
Відповідно до розрахунків Дж. Хема автокаталітична реакція окиснення мангану киснем відбувається відповідно до рівняння (1).

$$d[\text{Mn(II)}]/dt = -k_0[\text{Mn}^{2+}] + k_1[\text{Mn}^{2+}][\text{O}_2][\text{OH}^-]^2. \quad (1)$$

Відповідно до термодинамічних розрахунків, якщо в аерованій воді знаходяться одночасно у мікрограмових кількостях (5–6 мкг/дм³) іони Mn^{2+} і Fe^{2+} , то вони будуть окиснюватися і гідролізуватися у водному середовищі за такими реакціями:



$$K_{\text{Fe}} = [\text{H}^+]/[\text{FeOH}^+][\text{O}_2] = 10^{49.09};$$



$$K_{\text{Mn}} = [\text{H}^+]/[\text{Mn}^{2+}][\text{O}_2] = 10^{36.54}.$$

Оскільки константа $K_{\text{Fe}} > K_{\text{Mn}}$, то окиснення і гідроліз заліза протікає набагато швидше, ніж мангану.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Швидкість окиснення іонів Mn^{2+} зростає з підвищенням рН середовища, концентрації кисню та температури середовища. Проте у водному середовищі при температурі до 30 °С, $\text{pH} \leq 9$ та розчинності кисню до 10 мг/дм³ швидкість окиснення мангану є дуже низькою, що вимагає розробки способів інтенсифікації процесу.

Постановка завдання. Існуючі методи вилучення сполук мангану на практиці часто не забезпечують заявлених показників очищеної води. Або ж відомі розроблені технології мають високу вартість і не завжди дозволяють отримати воду високої якості. Викладене вище переконує про перспективність інтенсифікації процесів окиснення іонів Mn^{2+} в процесах окиснення та осадження сполук мангану при використанні окисних реагентів, що сприятиме більш ефективному окисненню сполук мангану при реалізації технологій деманганації води.

Виклад основного матеріалу. Загально відомі методи очищення води від сполук мангану можна умовно поділити на реагентні та безреагентні. Основою безреагентних методів є попереднє аерування води, яке може здійснюватися різними способами, і подальше фільтрування через зернисте завантаження, наприклад, через кварцевий пісок. Методи реагентної обробки полягають у фільтруванні води крізь мінеральне завантаження з попереднім дозуванням коагулянтів, флокулянтів, підлугуючих реагентів.

І в тому, і в іншому випадку головною метою є окиснення йонів мангану, оскільки в окисленому стані вони, як правило, нерозчинні, що в подальшому дає змогу відділення утворених суспензій тим чи іншим способом, наприклад, фільтруванням або відстоюванням. Застосування реагентного методу очищення дає більше можливостей для досягнення показників якості питної води із значним перевищенням початкового вмісту у воді сполук мангану.

Відомо, що процеси окиснення мангану протікають ефективніше при використанні окисників, таких як активний хлор, натрій гіпохлорит, перекис водню або озон [8; 9]. Слід зазначити, що найповніше манган видаляється при окисненні озоном, складність приготування озону та велика його собівартість обмежують використання цього методу. При окисненні мангану хлором рН води повинно бути $\geq 9,0$.

Манган у водному середовищі може існувати в семи стадіях окиснення в межах від +2 до +7. Зазвичай у природних водах при рН 4–7 переважає двовалентна форма Mn^{2+} . Сполуки мангану важче окислюються киснем та реагують з іншими речовинами. При підвищенні рН та збільшенні окислювально-відновного потенціалу води (наприклад, у разі додавання вапна чи хлору) $\text{Mn}(\text{II})$ може окислюватися до $\text{Mn}(\text{IV})$. Можливі й інші

стани окислення, але Mn (III) є стабільним лише як комплекс, іони Mn (V) і Mn (VI) нестабільні в нейтральних розчинах, а Mn (VII) у вигляді перманганат іону (MnO_4^-), сильно окислюється і не утворюється в більшості природних вод [10].

Частіше за все іони мангану зустрічаються в артезіанських водах, що використовуються в локальних системах водопостачання з відносно невеликою продуктивністю. Як правило, воду на таких станціях водопідготовки знезаражують з використанням натрій гіпохлориту. Тому було проведено дослідження оцінки ефективності очищення артезіанської води від йонів мангану за допомогою натрій гіпохлориту. Процес проводили в статичних умовах, дозуючи розчин натрій гіпохлориту у модельний розчин з концентраціями по іонах мангану 1; 5; 15 та 30 мг/дм³ у стехіометричних співвідношеннях Mn^{2+} до ClO^- 1мг : 1,3 мг згідно з реакцією 4.



Розчини відстоювали протягом 4-х годин, фіксуючи зміну концентрацій мангану кожну годину. Як видно з рис. 1 та 2 при концентрації іонів мангану 1 мг/дм³ за 4 години концентрацію мангану вдалося знизити до 0,4–0,5 мг/дм³. При цьому ступінь очищення не перевищував 45–60 %. Надлишок натрій гіпохлориту в такому розведеному розчині практично не впливав на ефективність очищення. Навіть трикратний надлишок доданого натрій гіпохлориту забезпечує лише вилучення сполук мангану на рівні 55 %.

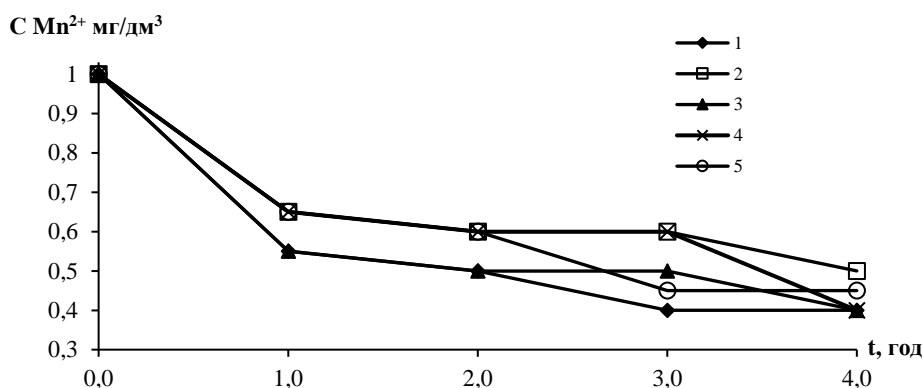


Рис. 1. Залежність залишкової концентрації іонів мангану (II) у артезіанській воді від часу відстоювання та дози натрій гіпохлориту при співвідношенні $Mn^{2+}:Cl^-$: 1:1(1); 1:1,5(2); 1:2(3); 1:2,5(4); 1:3(5) за початкової концентрації мангану 1 мг/дм³
Джерело: розроблено авторами.

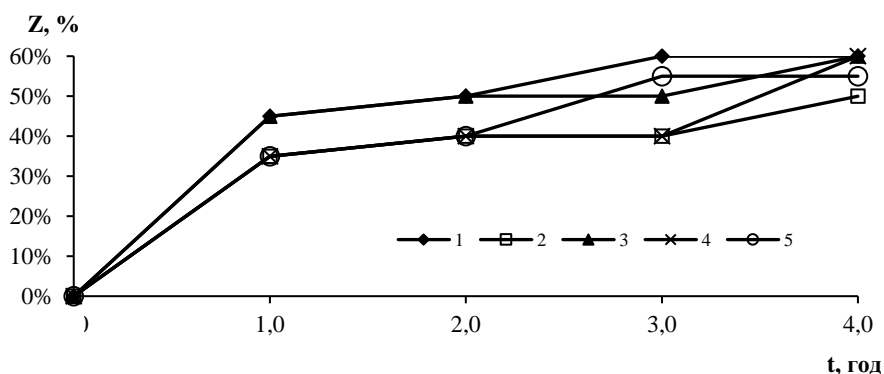
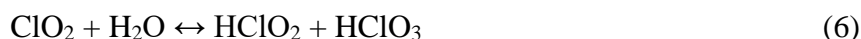


Рис. 2. Залежність ступеня вилучення мангану (II) у артезіанській воді від часу відстоювання та дози $NaClO$ при співвідношенні $Mn^{2+}:Cl^-$: 1:1(1); 1:1,5(2); 1:2(3); 1:2,5(4); 1:3(5) за початкової концентрації мангану 1 мг/дм³
Джерело: розроблено авторами.

Початкове значення рН розчину у цьому випадку було 9,306, кінцеві значення були на рівні 8,892–8,906. Це пов'язано з підкисленням розчину при окисненні йонів мангану по реакції 4. Також пояснити це можна розкладом аніону ClO_2^- з дегазацією у вигляді Cl_2 або ClO_2 . При розчиненні цих сполук у воді відбувається підкислення середовища за рахунок відповідних реакцій:



Цікаво зауважити, що при концентрації іонів мангану 5 мг/дм^3 ступінь очищення води натрій гіпохлоритом сягав 64–95 % (рис. 3) при цьому ефективність очищення зростала зі збільшенням надлишку натрій гіпохлориту. При співвідношенні йонів мангану до іонів гіпохлориту 1 : 3 впродовж 4-х годин відстоювання залишкова концентрація мангану становила $0,25 \text{ мг/дм}^3$, що відповідає ступеню вилучення мангану на рівні 95 % (рис. 4). Як і в попередньому випадку спостерігалось зниження рН водного середовища з початкового значення 9,229 до значень 8,986–8,859. При цьому чим більше був надлишок натрій гіпохлориту, тим більше становив показник різниці рН.

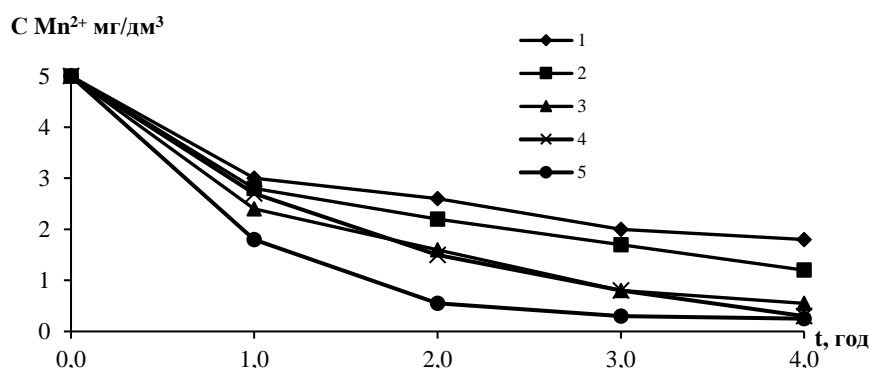


Рис. 3. Залежність залишкової концентрації іонів мангану (II) у артезіанській воді від часу відстоювання та дози натрій гіпохлориту при співвідношенні $\text{Mn}^{2+}:\text{Cl}^-$: 1:1(1); 1:1,5(2); 1:2(3); 1:2,5(4); 1:3(5) за початкової концентрації мангану 5 мг/дм^3
Джерело: розроблено авторами

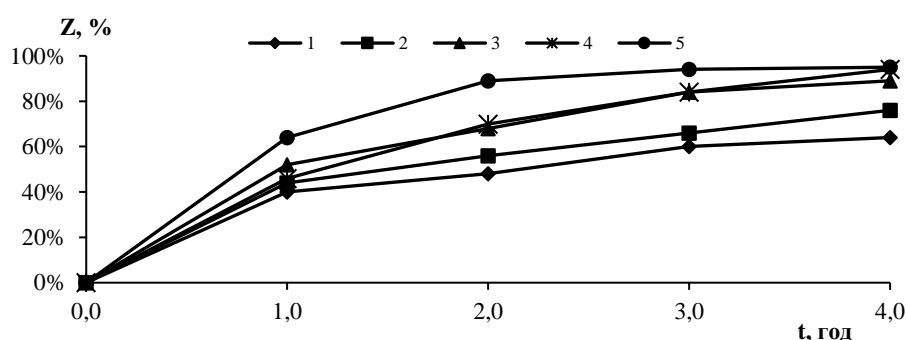


Рис. 4. Залежність ступеня вилучення мангану (II) у артезіанській воді від часу відстоювання та дози NaClO при співвідношенні $\text{Mn}^{2+}:\text{Cl}^-$: 1:1(1); 1:1,5(2); 1:2(3); 1:2,5(4); 1:3(5) за початкової концентрації мангану 5 мг/дм^3
Джерело: розроблено авторами

При концентрації іонів мангану 15 мг/дм^3 ступінь очищення становив 97,7–100 %. На ряду з цим залишкової концентрації по іонах мангану на рівні $0,1 \text{ мг/дм}^3$ було досягнуто при 20 %-му надлишку натрій гіпохлориту через 4 години (рис. 5). За 40 %-го і більше надлишку натрій гіпохлориту вдалося повністю окислити іони марганцю та досягти 100 % ступеню очищення води (рис. 6).

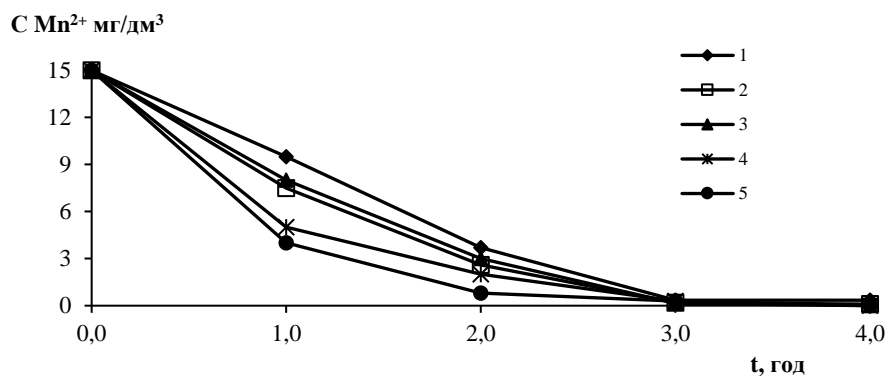


Рис. 5. Залежність залишкової концентрації йонів мангану (II) у артезіанській воді від часу відстоювання та дози натрій гіпохлориту при співвідношенні $Mn^{2+}:Cl^-$: 1:1(1); 1:1,2(2); 1:1,4(3); 1:1,6(4); 1:2(5) за початкової концентрації мангану 15 мг/дм³

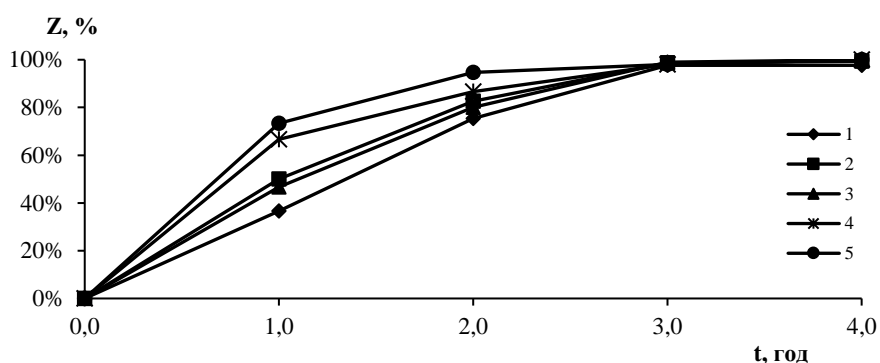


Рис. 6. Залежність ступеня вилучення мангану (II) у артезіанській воді від часу відстоювання та дози $NaClO$ при співвідношенні $Mn^{2+}:Cl^-$: 1:1(1); 1:1,2(2); 1:1,4(3); 1:1,6(4); 1:2(5) за початкової концентрації мангану 15 мг/дм³

Джерело: розроблено авторами.

За концентрації 30 мг/дм³ було досягнуто повного вилучення мангану(II) при всіх співвідношеннях концентрацій Mn^{2+} до ClO^- через 4 години відстоювання (рис. 7). При цьому вже за 2 години контакту натрій гіпохлориту у 60 %-му надлишку з іонами мангану було досягнуто їх повне окислення (рис. 8).

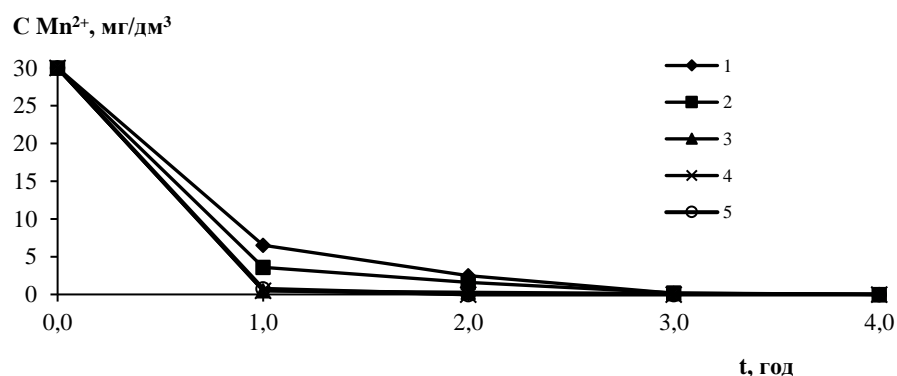


Рис. 7. Залежність залишкової концентрації йонів марганцю (II) у артезіанській воді від часу відстоювання та дози гіпохлориту натрію при співвідношенні $Mn^{2+}:Cl^-$: 1:1(1); 1:1,2(2); 1:1,4(3); 1:1,6(4); 1:2(5) за початкової концентрації марганцю 30 мг/дм³

Джерело: розроблено авторами.

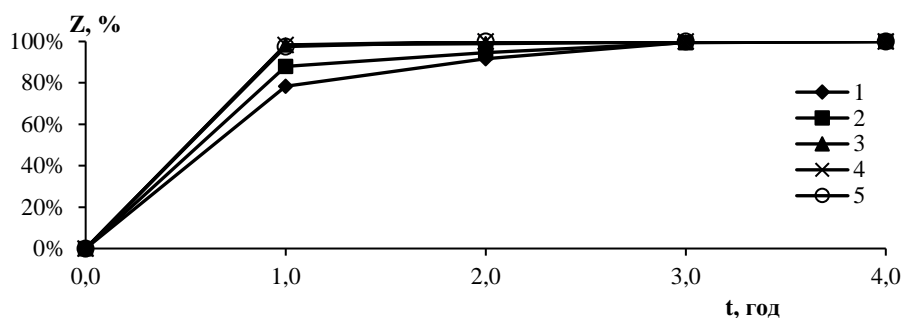


Рис. 8. Залежність ступеня вилучення марганцю (II) у артезіанській воді від часу відстоювання та дози NaClO при співвідношенні $\text{Mn}^{2+}:\text{Cl}^-$: 1:1(1); 1:1,2(2); 1:1,4(3); 1:1,6(4); 1:2(5) за початкової концентрації марганцю 30 мг/дм^3

Джерело: розроблено авторами.

Було помічено зміну значення рН середовища в залежності від доданого надлишку натрій гіпохлориту при початкових концентраціях мангану 15 мг/дм^3 та 30 мг/дм^3 . За менших доз натрій гіпохлориту окислення іонів Mn^{2+} відбувалося не повністю, про що свідчать залишкові концентрації іонів мангану на рівні $0,3\text{--}0,1 \text{ мг/дм}^3$, при цьому, спостерігалось зниження рН водного середовища з рівня $9,160$; $9,260$ до показників $8,147$; $7,681\text{--}7,811$ відповідно. При додаванні більшої дози натрій гіпохлориту відбувалося повне окислення іонів мангану, при цьому було зафіксовано незначне зниження рН з $9,16$ до $8,5$ та з $9,26$ до $8,02$. Якщо говорити про менші початкові концентрації мангану 1 мг/дм^3 та 5 мг/дм^3 у воді, реакція окислення натрій гіпохлоритом проходила не до кінця, про що свідчать залишкові концентрації іонів мангану у всіх випадках, відповідно, зміна рН середовища була незначною.

Очевидно, що ефективність використання натрій гіпохлориту зростає при підвищенні вмісту іонів мангану у воді. Використання гіпохлориту як окисника для очищення води від сполук мангану доцільне при концентраціях вище 5 мг/дм^3 по іонах Mn^{2+} . Чим вище концентрація іонів мангану, тим менша кількість натрій гіпохлориту необхідна на його окислення. Важливим також є те, що при вищих початкових концентраціях мангану у воді суттєво скорочується час контакту з натрій гіпохлоритом необхідний на повне вилучення іонів мангану.

Висновки. Проведено оцінювання ефективності застосування натрій гіпохлориту в ролі окисника при очищенні артезіанської води від іонів двовалентного мангану. За статичних умов було визначено, що на ступінь вилучення мангану впливає як його початкова концентрація у воді так і доза гіпохлориту натрію. При цьому очищення води від іонів мангану проходить ефективніше з початковими концентраціями вище 5 мг/дм^3 . За концентрації іонів мангану 30 мг/дм^3 спостерігалось повне його вилучення за 4 години відстоювання при будь-якому співвідношенні концентрацій мангану та натрій гіпохлориту. При цьому за більших доз натрій гіпохлориту можливо досягти суттєвого зменшення часу контакту для повного вилучення іонів мангану.

Список використаних джерел

1. Alvarez-Bastida C. Drinking water characterization and removal of manganese. Removal of manganese from water / C. Alvarez-Bastida, V. Martínez-Miranda, M. Solache-Ríos, I. Linares-Hernández, A. Teutli-Sequeira, G. Vázquez-Mejía // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2018. – Vol. 6(2) – Pp. 2119-2125.
2. Yang H. Oxidants-assisted sand filter to enhance the simultaneous removals of manganese, iron and ammonia from groundwater: Formation of active MnOx and involved mechanisms / H. Yang, X. Tang, X. Luo, G. Li, H. Liang, S. Snyder // Journal of Hazardous Materials. – 2021. – Vol. 415. – 125707.

3. Cheng Y. Effects of dissolved oxygen on the start-up of manganese oxides filter for catalytic oxidative removal of manganese from groundwater / Y. Cheng, T. Huang, C. Liu, S. Zhang // *Chemical Engineering Journal*. – 2019. – Vol. 371. – Pp. 88-95.
4. Daghbandan A. A comprehensive study on the applicability of tea leaves and rice straw as novel sorbents for iron and manganese removal from running water in a fixed-bed column / A. Daghbandan, B. A. Souraki, M. A. Zadeh // *Korean Journal of Chemical Engineering*. – 2022. – Pp. 1-10.
5. Neculita C. M. A review of the implications and challenges of manganese removal from mine drainage / C. M. Neculita, E. Rosa // *Chemosphere*. – 2019. – Vol. 214. – Pp. 491-510.
6. Du X. Peroxymonosulfate-assisted electro-oxidation/coagulation coupled with ceramic membrane for manganese and phosphorus removal in surface water / X. Du, K. Zhang, B. Xie, J. Zhao, X. Cheng, L. Kai, ... H. Liang // *Chemical Engineering Journal*. – 2019. – Vol. 365. – Pp. 334-343.
7. Seyedpour S. F. Low fouling ultrathin nanocomposite membranes for efficient removal of manganese / S. F. Seyedpour, A. Rahimpour, H. Mohsenian, M. J. Taherzadeh // *Journal of Membrane Science*. – 2018. – Vol. 549. – Pp. 205-216.
8. Zhao F. Study on the effect of manganese (II) removal with oxidation and coagulation aid of potassium manganite / F. Zhao, X. Li, Y. Yang // *3rd Intern Conf Bioinformatics Biomedical Eng Beijing*. – 2009. – № 9. – Pp. 11–13.
9. Knocke WR. Kinetics of manganese and iron oxidation by potassium permanganate and chlorine dioxide / WR Knocke, JE Van Benschoten, MJ Kearney, A Soborski, DA Reckhow // *J Am Water Works Assoc*. – 1991. – № 9, Vol. 83(6). – Pp. 80–7.
10. Rumsby P.C. Speciation of manganese in drinking water / P.C. Rumsby, L. Rockett, H. Clegg, J. Jonsson, V. Benson, M.M. Harman, T. Doyle, L. Rushton, D.J. Wilkinson, P. Warwick // *Toxicology Letters*. – 2014. – № 229. – Pp. 120–131.

References

1. Alvarez-Bastida, C., Martínez-Miranda, V., Solache-Ríos, M., Linares-Hernández, I., Teutli-Sequeira, A., & Vázquez-Mejía, G. (2018). Drinking water characterization and removal of manganese. Removal of manganese from water. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), 2119-2125.
2. Yang, H., Tang, X., Luo, X., Li, G., Liang, H., & Snyder, S. (2021). Oxidants-assisted sand filter to enhance the simultaneous removals of manganese, iron and ammonia from groundwater: Formation of active MnOx and involved mechanisms. *Journal of Hazardous Materials*, 415, 125707.
3. Cheng, Y., Huang, T., Liu, C., & Zhang, S. (2019). Effects of dissolved oxygen on the start-up of manganese oxides filter for catalytic oxidative removal of manganese from groundwater. *Chemical Engineering Journal*, 371, 88-95.
4. Daghbandan, A., Souraki, B. A., & Zadeh, M. A. (2022). A comprehensive study on the applicability of tea leaves and rice straw as novel sorbents for iron and manganese removal from running water in a fixed-bed column. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 1-10.
5. Neculita, C. M., & Rosa, E. (2019). A review of the implications and challenges of manganese removal from mine drainage. *Chemosphere*, 214, 491-510.
6. Du, X., Zhang, K., Xie, B., Zhao, J., Cheng, X., Kai, L., ... & Liang, H. (2019). Peroxymonosulfate-assisted electro-oxidation/coagulation coupled with ceramic membrane for manganese and phosphorus removal in surface water. *Chemical Engineering Journal*, 365, 334-343.
7. Seyedpour, S. F., Rahimpour, A., Mohsenian, H., & Taherzadeh, M. J. (2018). Low fouling ultrathin nanocomposite membranes for efficient removal of manganese. *Journal of Membrane Science*, 549, 205-216.
8. Zhao, F, Li, X, Yang, Y. (2009). Study on the effect of manganese (II) removal with oxidation and coagulation aid of potassium manganite. *3rd Intern Conf Bioinformatics Biomedical Eng Beijing*, 9, 11–13
9. Knocke, WR, Van Benschoten, JE, Kearney, MJ, Soborski, A, Reckhow, DA. (1991). Kinetics of manganese and iron oxidation by potassium permanganate and chlorine dioxide. *J Am Water Works Assoc.*, 83(6), 80–7.
10. Rumsby, P.C., Rockett, L., Clegg, H., Jonsson, J., Benson, V., Harman, M.M., Doyle, T., Rushton, L., Wilkinson, D.J., Warwick, P. (2014). Speciation of manganese in drinking water. *Toxicology Letters*, 229, 120–131.

Отримано 24.01.2022

UDC 628.3

Mariya Tverdohlib¹, Inna Trus², Mukola Gomelya³, Katerina Tolstenkova⁴

¹PhD in Technical Sciences, Assistant of Department of ecology and technology of plant polymers
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: madamtverdohleb@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9731-1969>

ResearcherID: [AAO-7072-2021](https://orcid.org/0000-0002-9731-1969). **Scopus Author ID:** [57189384600](https://orcid.org/0000-0002-9731-1969)

²PhD 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)

³ Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of ecology and technology of plant polymers,
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: m.gomelya@kpi.ua. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-1165-7545>

ResearcherID: [J-4345-2017](http://orcid.org/0000-0003-1165-7545). **Scopus Author ID:** [6507653734](http://orcid.org/0000-0003-1165-7545)

⁴student of Department of ecology and technology of plant polymers
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

INVESTIGATION OF MANGANESE IONS REMOVAL FROM WATER USING SODIUM HYPOCHLORITE SOLUTIONS

The creation of effective demanganization technologies by the development of new and intensification of known processes of manganese removal from natural waters are currently of increasing importance.

The search for promising ways to demanganize water to regulatory values is a topical issue for the modern water treatment domain.

Recent publications of methods for extraction of manganese ions from water by sorption, membrane, ion exchange methods were reviewed. The prospects of application of oxidative methods for water demanganation are shown.

The purpose of the article is to investigate the manganese ions removal methods from water during their oxidation by sodium hypochlorite and to establish the dependence of the efficiency of demanganization on the consumption of oxidizing agent and the concentration of manganese ions in water.

The study presents the application of sodium hypochlorite as an oxidant in the purification of artesian water from manganese ions. It was determined in static conditions that the degree of manganese removal is affected by both its initial concentration in water and the dose of sodium hypochlorite. Water purification process is more efficient with initial manganese concentrations above 5 mg/dm³. At a manganese ion concentration 30 mg/dm³, its complete removal was achieved in 4 hours of settling at a stoichiometric ratio of manganese and sodium hypochlorite in water and at any excess of oxidant.

The process of manganese ions oxidation in artesian water by sodium hypochlorite depending on its dose and contact time was studied. The dose of oxidant for the removal of manganese ions from artesian water was also determined. Thus, the research allowed to improve the methods of water purification from manganese ions during their oxidation by sodium hypochlorite and found that the water purification efficiency increased both with increasing consumption of oxidizing agent and increasing the concentration of manganese ions in water.

Keywords: artesian water; demanganation; oxidation; sodium hypochlorite; concentration; dose; oxidizing agent.

Fig.: 7. References: 10.

РОЗДІЛ IV. ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-1(27)-161-171

UDC 621.314.222.6

Eugen Bardyk¹, Ihor Zakliuka²

¹PhD in Technical Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Energy Sources
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: bardik1953@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0002-5776-1500>

²Undergraduate of the Department of Energy Sources
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: ihorzakliuka1@gmail.com

COMPLEX MODELING OF TECHNICAL CONDITION AND REGIMES OF VOLTAGE REGULATION OF CONTROL DEVICES UNDER LOAD OF POWER TRANSFORMERS

The scientific work considers issues (tasks) of the technical condition assessment and voltage regulation in power system load nodes using power transformers on-load tap-changer devices by fuzzy modeling methods. A linguistic model of TC class determining and decision-making on the operation strategy for OLTC devices is presented. A fuzzy algorithm for voltage regulation in load nodes by OLTC devices is proposed, taking into account resource constraints. A voltage control modes test study under changing the nodal load was conducted for the consumers power supply system of the distribution network.

Keywords: power transformers; technical condition; linguistic model; voltage regulation; fuzzy logic.

Fig.: 5. Tables: 3. References: 17.

Relevance of the research. Amidst the liberalization of the electricity industry of Ukraine, the requirements for ensuring the reliability of electricity supply to consumers, in particular, the quality of electricity, are significantly increasing. Deviation of electricity quality parameters, of which main one is the voltage at the consumer terminals, is strictly regulated and allowed in normal operation $\pm 5\%$ of rated voltage and $\pm 10\%$ in emergency [1; 2]. However, the analysis of accidents in modern power systems (PSs) with power plants of different types shows that the probability of accidents in PSs with significant deviations of voltage and frequency is not completely excluded. The basic factor, which essentially affects the reliability of the electric power industry is the solid deterioration of electrical equipment, including power transformers (PTs) which are the most common and the most responsible elements of the PS [2; 3]. The connection of distributed generation sources (DGSs) also exacerbates the problem of keeping the voltage within acceptable limits in terms of load changes and the topology of the electrical network, as voltage reduction can lead to a decrease power generation by DRG [4]. Therefore, the issue of automatic voltage stabilization in the PS load nodes and on the buses of the power plant's own needs in all operation modes is an urgent task.

Problem statement. Among the various methods of voltage regulation [1; 5; 6; 7; 8; 9] currently available in the PS, the most common is the regulation under load at the PT terminals by changing the transformation coefficient [1; 5] using on-load tap-changer (OLTC). The OLTC PT operation practice shows that the resource of its elements is small and therefore the repair service involves the PT decommission with a corresponding interruption of electricity supply to consumers. The accident rate analysis of high-power PTs for 1985-2010 shows that the share of emergencies caused by OLTC failures reaches 15-40% [10]. As a result, automatic voltage regulators are often disconnected from the mains, which reduces the electricity quality.

Thus, an important task is the development of new and advanced basic methods and models for evaluating the technical condition (TC) and the algorithms for regulating the voltage in load nodes driven by the OLTC PT.

Existing traditional methods and models of TC PT diagnosing are based on the use of "strict norms" for the parameters values that separate one TC class from another, which are enshrined in the relevant regulations [2; 11]. Incomplete and discrete information about TC of OLTC,

which is due to the periodicity of parameter measurements, as well as significant subjectivity in the expert TC determination by qualified personnel of the operating organizations repair service severely complicates the task of assessing TC of OLTC PT [11; 12].

The difficulty in identifying analytical relationships between TC parameters changes and TC class of an object requires the use of data mining methods to build appropriate models for estimating TC of OLTC [2; 13; 14], which allows presenting in a single form heterogeneous information about the object.

In this case, using fuzzy set theory is effective both for the TC diagnostic tasks of OLTC devices and for the selection and formation of voltage control algorithms. Thus, it is necessary to develop a linguistic model for assessing the TC of OLTC based on data mining and to build and implement algorithms for intelligent control of voltage control modes in distribution networks by OLTC taking into account resource constraints.

Analysis of recent research and publications. Currently, there are a bulk works devoted to the development of models for assessing TC PT and its individual elements based on a set of measurements and tests [2; 3; 6; 7; 11; 15; 16] and algorithms for voltage regulation in the PS distribution networks. [2; 9; 11] dealt with the TC index definition problem, identification and defect development level in terms of deterministic and probabilistic and fuzzy nature of information, but TC assessment issues of OLTC devices were not considered. The papers [2; 3; 12] presented models for estimating and forecasting TC individual elements, particularly, OLTC PT devices, but they did not identify resource constraints and did not consider voltage control modes. In [1; 15; 16] traditional and fuzzy models and algorithms for voltage regulation at the supply nodes by OLTC PT devices were proposed, but their resource limits were not considered.

Uninvestigated parts of a common problem. Despite a bulk of works on TC modeling as a whole PT and its individual elements (including OLTC), as well as voltage control modes in distribution networks, there is a complex TC modeling problem, identification and consideration resource constraints of OLTC devices voltage regulation in fuzzy voltage regulation models in load nodes by PT voltage regulators.

Research objective. The purpose of the article is to build a complex fuzzy mathematical model for estimating the technical condition and OLTC voltage regulation algorithms of oil PT. To achieve the above, it is necessary to solve the following tasks:

- to identify measurements groups, tests and criteria for OLTC TC diagnosing;
- to form input linguistic variables and membership functions of their term sets and TC classes of OLTC devices fuzzy model;
- to develop a fuzzy knowledge base of the linguistic model for determining the TC class and decision-making strategy of OLTC devices operation;
- to develop a fuzzy algorithm and software for voltage regulation in the load node by OLTC PT devices taking into account their TC;
- to conduct a test study of voltage control modes taking into account the OLTC resource constraints.

The statement of basic material. *Estimation linguistic model of OLTC device.* The most common OLTC device defects and damage are: oil characteristics deterioration, the contactor contacts overheating, wearing of contactor seals and selector contacts, OLTC device mechanical wear, drive kinematics damage [1; 8; 9; 10; 12]. The following tests and measurements are used to evaluate TC of OLTC device [2; 10]: dissolved gases chromatographic analysis in the OLTC contactor (DGCA), physico-chemical analysis of the contactor oil characteristics, determination TC parameters of OLTC device, measuring the parameters of the conductive parts of the contactor.

Within the possible change range in the TC parameters of OLTC, the following areas of normal and abnormal operation modes can be defined: d1- «normal operation area», range from parameter values after commissioning (or after repair) to values that limit the normal operation area; d2 - «risk

operation area», the parameters values range that limit the normal operation area to the maximum allowable values in operation; d3- «operation area in the defect presence (pre-emergency state)», at least one of OLTC parameters exceeds the maximum permissible values in operation.

Consider the criteria for diagnosing OLTC TC based on some types of results of tests and measurements.

Linguistic variables and diagnostic TC parameters term sets of the fuzzy knowledge base of the mathematical model for assessing the TC OLTC, which are determined by the DGCA results (gas concentration H₂, C₂H₂, C₂H₆, CH₄, C₂H₄, CO, CO₂), physico-chemical analysis (tangent delta of dielectric losses in transformer oil *tgδ*, breakdown voltage *U_{np}*, moisture content in the transformer oil of contactor *W*, acid number KOH), drive mechanism monitoring (drive electric motor current *I*), current-carrying parts tests of the transformer and contactor (the transient contacts resistance of the contactor *R*) are as follows [2,10]:

$C_1 = \{T_{C1}^L, T_{C1}^M, T_{C1}^B\}$ - gases ratio $M_1 = \frac{C_2H_4}{C_2H_2}$, r.u.; $C_2 = \{T_{C2}^L, T_{C2}^M, T_{C2}^B\}$ - gases ratio $M_2 = \frac{CH_4 + C_2H_6 + C_2H_4}{C_2H_2}$, r.u.; $C_3 = \{T_{C3}^L, T_{C3}^M, T_{C3}^B\}$ - electric motor current of the OLTC drive *I*, A ; $C_4 = \{T_{C4}^L, T_{C4}^M, T_{C4}^B\}$ - transient contacts resistance of contactor, *R*, Ohm; $C_5 = \{T_{C5}^L, T_{C5}^M, T_{C5}^B\}$, $C_6 = \{T_{C6}^L, T_{C6}^M, T_{C6}^B\}$, $C_7 = \{T_{C7}^L, T_{C7}^M, T_{C7}^B\}$, $C_8 = \{T_{C8}^L, T_{C8}^M, T_{C8}^B\}$, $C_9 = \{T_{C9}^L, T_{C9}^M, T_{C9}^B\}$, $C_{10} = \{T_{C10}^L, T_{C10}^M, T_{C10}^B\}$, $C_{11} = \{T_{C11}^L, T_{C11}^M, T_{C11}^B\}$ - hydrogen concentrations dissolved in oil (H₂), μl / l; methane (CH₄), μl / l; ethane (C₂H₆), μl / l, ethylene (C₂H₄), μl / l; acetylene (C₂H₂), μl / l; carbon monoxide (CO), μl / l; carbon dioxide (CO₂), μl / l in accordance; $C_{12} = \{T_{C12}^L, T_{C12}^M, T_{C12}^B\}$ - (*tgδ*) %; $C_{13} = \{T_{C13}^L, T_{C13}^M, T_{C13}^B\}$ - *U_{np}*, kV; $C_{14} = \{T_{C14}^L, T_{C14}^M, T_{C14}^B\}$ - *W*, g/t; $C_{15} = \{T_{C15}^L, T_{C15}^M, T_{C15}^B\}$ - KOH, mgKOH/g oil.

DGCA results interpretation. In a normal OLTC operation, the gas composition in contactors corresponds to the arc oil destruction (due to arc discharge) with the main gases H₂ and C₂H₂. In the contacts wear process, their heating and overheating levels increase in accordance with the criteria (table 1) and the C₂H₄ concentration increase relatively to C₂H₂. To diagnose contact damage, the gases ratio, which characterize heating C₂H₂, C₂H₆ and CH₄ to the "arc" gas C₂H₂, is used $M_1 = \frac{C_2H_4}{C_2H_2}$, $M_2 = \frac{CH_4 + C_2H_6 + C_2H_4}{C_2H_2}$.

Table 1

Contacts overheating criteria in the contactor

Gases ratio	«Normal mode»	«Needs attention»	Possible damage
M ₁	<1	≥1; ≤5	≥5
M ₂	<0,8	≥0,8; ≤4	≥4

Source: designed by the authors.

The main factors and parameters that significantly affect the OLTC failure risk during operation are: contactor contacts wear, characterized by the gases ratio (M₁) and (M₂); electric motor current of the OLTC drive *I*; transient contacts resistance of contactor, *R*. The generated input linguistic variables of the fuzzy model for estimating the TC OLTC are: $C_1 = \{T_{C1}^L, T_{C1}^M, T_{C1}^B\}$ - gases ratio $M_1 = \frac{C_2H_4}{C_2H_2}$, r.u.; $C_2 = \{T_{C2}^L, T_{C2}^M, T_{C2}^B\}$ - gases ratio $M_2 = \frac{CH_4 + C_2H_6 + C_2H_4}{C_2H_2}$, r.u.;

$C_3 = \{T_{C3}^L, T_{C3}^M, T_{C3}^B\}$ – electric motor current of the OLTC drive I , A; $C_4 = \{T_{C4}^L, T_{C4}^M, T_{C4}^B\}$ – transient contacts resistance of contactor, R , Ohm.

The following values are assigned to the term sets $T_{C_i}^j$ of input linguistic variables: $T_{C_i}^L$ – low parameter value (correspond to OLTC state – «d1»); $T_{C_i}^M$ – medium parameter value (correspond to OLTC state – «d2»); $T_{C_i}^B$ – big parameter value (correspond to OLTC state – «d3»). Existing normative documents the actual TC practice using traditional methods shows that the criterion parameters values fluctuate within (5 ÷ 10) % [1; 2]. Therefore, the fixed norms vagueness in the linguistic model can be limited to ± (5-7) %. The terms membership functions of the model input linguistic variables for TC OLTC estimating are presented in Fig. 1.

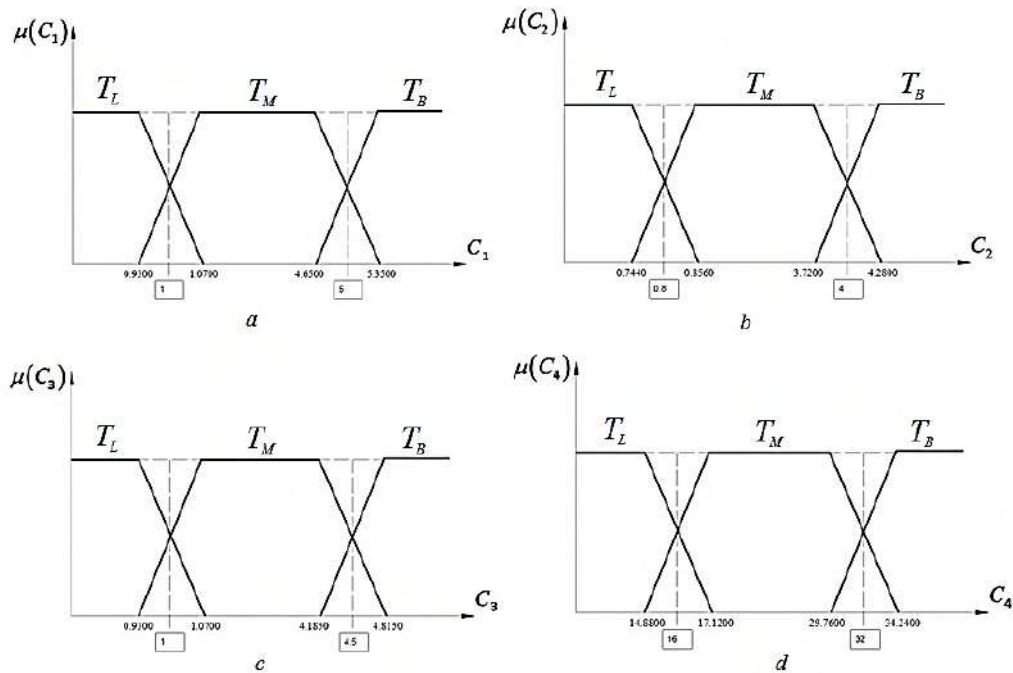


Fig. 1. Basic membership functions forms of fuzzy terms of input linguistic variables: a – variant 1, b – variant 2, c – variant 3, d – variant 4

Source: designed by the authors.

The developed rules base for the TC OLTC classification has the form:

1. IF ($C_1 = T_{C1}^L$), AND ($C_2 = T_{C2}^L$), AND ($C_3 = T_{C3}^L$), AND ($C_4 = T_{C4}^L$), THEN $d = d_1$
2. IF ($C_1 = T_{C1}^L$), AND ($C_2 = T_{C2}^L$), AND ($C_3 = T_{C3}^L$), AND ($C_4 = T_{C4}^M$), THEN $d = d_1$
3. IF ($C_1 = T_{C1}^L$), AND ($C_2 = T_{C2}^L$), AND ($C_3 = T_{C3}^M$), AND ($C_4 = T_{C4}^L$), THEN $d = d_1$
-
25. IF ($C_1 = T_{C1}^M$), AND ($C_2 = T_{C2}^L$), AND ($C_3 = T_{C3}^M$), AND ($C_4 = T_{C4}^M$), THEN $d = d_2$
26. IF ($C_1 = T_{C1}^M$), AND ($C_2 = T_{C2}^L$), AND ($C_3 = T_{C3}^M$), AND ($C_4 = T_{C4}^B$), THEN $d = d_2$
27. IF ($C_1 = T_{C1}^M$), AND ($C_2 = T_{C2}^L$), AND ($C_3 = T_{C3}^B$), AND ($C_4 = T_{C4}^L$), THEN $d = d_2$
-
79. IF ($C_1 = T_{C1}^B$), AND ($C_2 = T_{C2}^B$), AND ($C_3 = T_{C3}^B$), AND ($C_4 = T_{C4}^L$), THEN $d = d_3$
80. IF ($C_1 = T_{C1}^B$), AND ($C_2 = T_{C2}^B$), AND ($C_3 = T_{C3}^B$), AND ($C_4 = T_{C4}^M$), THEN $d = d_3$
81. IF ($C_1 = T_{C1}^B$), AND ($C_2 = T_{C2}^B$), AND ($C_3 = T_{C3}^B$), AND ($C_4 = T_{C4}^B$), THEN $d = d_3$

TC OLTC classification. According to [13,14], the classification problem is to assign the object given by the informative features vector $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, to one of the previously described classes $\{d_1, d_2, \dots, d_m\}$.

For the above rules set, the object belonging degree $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ to the classes d_j is defined:

$$\mu_{dj} = (X^*) = \max_{p=1..k_j} w_{jp} \min_{i=1..n} (\mu_{jp}(x_i^*)), j = 1, m,$$

where $\mu_{jp}(x_i)$ – login membership function x_i fuzzy term $a_{i,jp}$; $a_{i,j1}$ – fuzzy term by which the variable x_i is estimated in the rule with the number jp , $p = 1..k_j$; k_j – the number of rules describing the class d_j .

The class with the maximum affiliation degree is chosen as a solution:

$$y^* = \arg \max (\mu_{d1}(X^*), \mu_{d2}(X^*), \dots, \mu_{dm}(X^*)).$$

The functional connections structure of the linguistic TC OLTC assessment model is shown in Fig. 2.

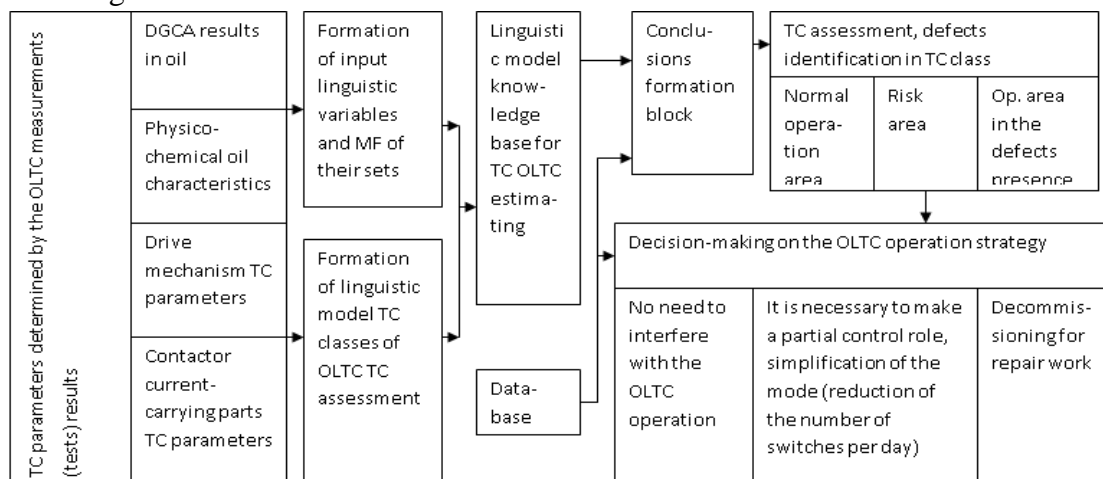


Fig. 2. The functional connections structure of the linguistic TC OLTC assessment model
Source: designed by the authors.

For 110 kV PT, in particular, transformer type TDN-40000/110 substation power supply system (Fig. 4), the initial data and model-experimental TC OLTC diagnostics results are shown in tables 2 and 3 for different combinations of vehicle parameters in 15 operating modes.

Table 2

The TC OLTC parameters monitoring results in different operating modes

№	C ₂ H ₆ µg / l	C ₂ H ₄ µg / l	C ₂ H ₂ µg / l	CH ₄ µg / l	$\frac{C_2H_4}{C_2H_2}$	$\frac{CH_4 + C_2H_6 + C_2H_4}{C_2H_2}$	I, A	R, µOhm
1/2	85/275	194/325	37/120	4,5/3,7	5,243/2,7	7,662/4,15	2,3/4,8	16,16/31
3/4	50/190	50/302	10/60,4	1/5	5/5	10,1/8,22	1/3,8	16/16,9
5/6	51/25	95/10	46/10	4,5/0,5	2/1	3,27/3,55	2/1	17/16,3
7/8	2/110	25/176	30/60,4	0,2/10	0,83/2,91	0,9/4,9	0,85/2,5	15,35/13,5
9/10	60/88	185/125,5	47,8/87	21,5/15,6	3,8/3,2	5,57/4,1	0,41/1,05	16,89/15,86
11/12	63,5/16	98/24	133/26	26/1,5	0,73/0,923	1,4/1,596	0,5/2	15/17,5
13/14	90/54	156/86	45/48	30/54	4,466/1,8	6,133/4,1	0,8/4,65	16/25,5
15	34	47	120	14	0,38	0,8	0,49	14,9

Source: designed by the authors.

Table 3

The TC OLTC classification results of the power transformer

№	The belonging function value to the TC OLTC class			The MF maximum value	Defined TC class
	μ_{D1}	μ_{D2}	μ_{D3}	μ_{Dmax}	
15	0,59	0,054	0	0,59	d1
7	0,79	0,21	0	0,79	d1
13	0	0,5	0	0,5	d2
9	0	0,9	0	0,9	d2
8	0	1	0	1	d2
1	0	0,153	0,572	0,572	d3
14	0	0,313	0,69	0,69	d3

Source: designed by the authors.

Fuzzy mathematical model of voltage regulation in load nodes by OLTC. The analysis of existing methods of voltage regulation in electrical networks by OLTC has shown that the voltage regulation laws have implemented in automatic voltage regulators, providing the required regulation quality, do not take into account the available OLTC resource [1; 5; 6; 15; 16], which reduces their operation reliability. Based on the diagnostics results in the complex mathematical model, the TC OLTC is determined and restrictions on the allowable switches number for a certain specified service life are formed. This parameter is an additional input variable in the fuzzy Mamdani algorithm [13; 17] voltage regulation in the load node by OLTC devices.

The following basic principles are implemented in the algorithm: the voltage on the consumers busbars must be maintained within the normalized DSTU; the operation OLTC PT must be blocked in the event of a short-term voltage failure due to short circuits, starts and self-starting of electric motors. The following parameters are fed to the input of the controller, which operates according to the Mamdani algorithm: voltage on the consumer’s busbars; voltage change rate and limitation on the number of switches during the observation period; the OLTC current position, and the output is removed from the switching direction and the time for which this switching must be performed. The terms of the input and output linguistic variables of the fuzzy voltage regulator are given below: voltage in the load node $U = \{T_{DH}^U, T_H^U, T_{MH}^U, T_B^U, T_{DB}^U\}$; voltage change rate $dU / dt = \{T_H^{dU/dt}, T_{BH}^{dU/dt}, T_{\Pi}^{dU/dt}\}$; OLTC movement direction $NAP = \{T_{BH}^{PIH}, T_H^{PIH}, T_{BB}^{PIH}\}$; OLTC device branches position $X = \{T_{HC}^X, T_C^X, T_{BC}^X\}$; switch delay $t_3 = \{T_{DM}^3, T_M^3, T_C^3, T_B^3, T_{DB}^3\}$; number of switches $N_{перем} = \{T_M^{N_{перем}}, T_C^{N_{перем}}, T_B^{N_{перем}}\}$

Membership functions graphs of the input and output linguistic variables terms are shown in Fig. 3.

The rule base fragment in the voltage regulation system of fuzzy Mamdani algorithm in the load node, which is built taking into account the above principles and approaches, has the following form:

1. IF $(U = T_H^U)$ AND $(X = T_{HC}^X)$ AND $(dU / dt = T_H^{dU/dt})$ AND $(N_{перем} = T_M^{N_{перем}})$ THEN $t_3 = T_{DM}^3$ AND $NAP = T_{BH}^{PIH}$.
2. IF $(U = T_H^U)$ AND $(X = T_{HC}^X)$ AND $(dU / dt = T_H^{dU/dt})$ AND $(N_{перем} = T_C^{N_{перем}})$ THEN $t_3 = T_{DM}^3$ AND $NAP = T_{BH}^{PIH}$.
3. IF $(U = T_H^U)$ AND $(X = T_{HC}^X)$ AND $(dU / dt = T_H^{dU/dt})$ AND $(N_{перем} = T_B^{N_{перем}})$ THEN $t_3 = T_{DM}^3$ AND $NAP = T_{BH}^{PIH}$.

.....

33. IF $(U = T_{MH}^U)$ AND $(dU / dt = T_{BH}^{dU/dt})$ AND $(N_{перем} = T_B^{N_{перем}})$ THEN $t_3 = T_{DB}^3$ AND $NAP = T_H^{P_{HH}}$.

34. IF $(U = T_{MH}^U)$ AND $(dU / dt = T_{II}^{dU/dt})$ AND $(N_{перем} = T_C^{N_{перем}})$ THEN $t_3 = T_B^3$ AND $NAP = T_H^{P_{HH}}$.

35. IF $(U = T_{MH}^U)$ AND $(dU / dt = T_H^{dU/dt})$ AND $(N_{перем} = T_B^{N_{перем}})$ THEN $t_3 = T_{DB}^3$ AND $NAP = T_H^{P_{HH}}$.

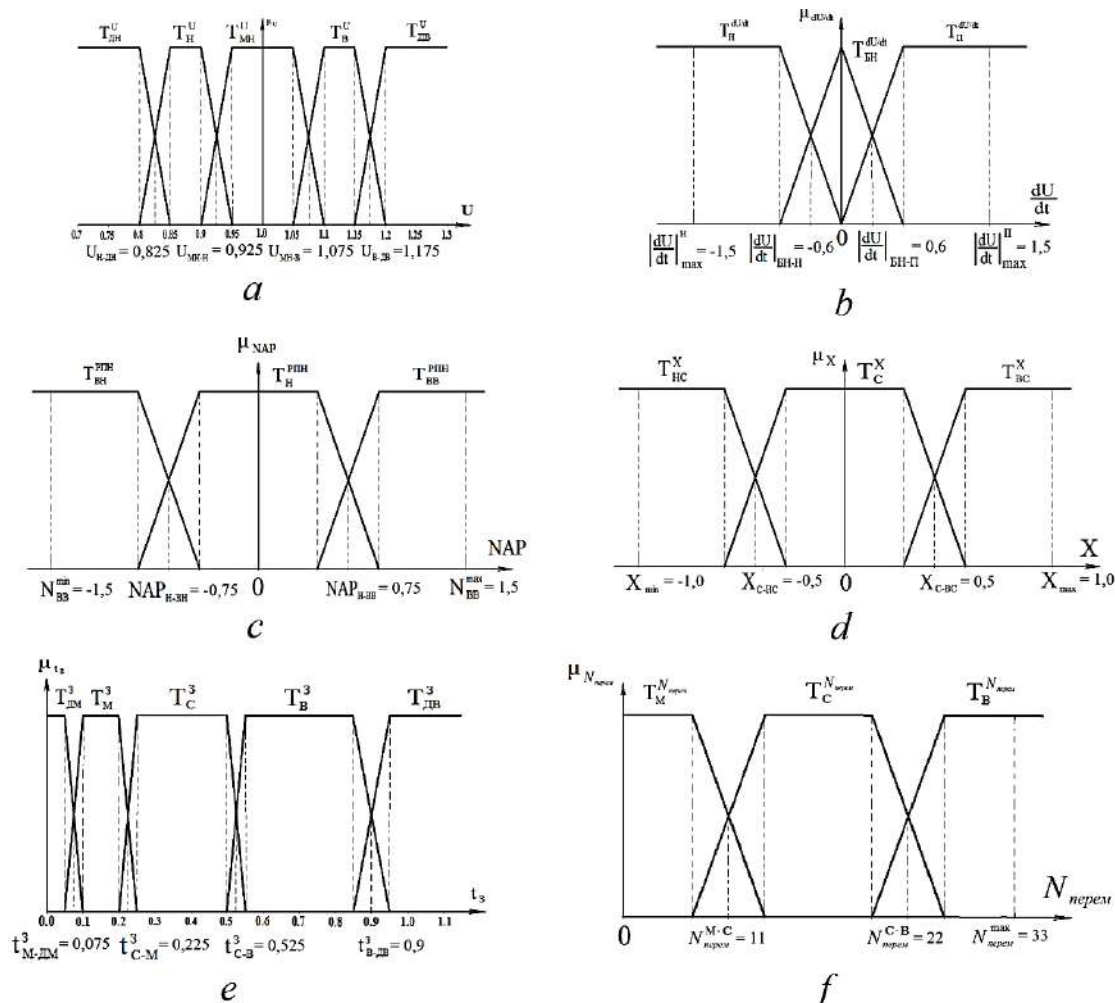


Fig. 3. Membership functions graphs of the input and output linguistic variables terms of fuzzy controller:

a – voltage in the load node, b – voltage change rate, c – OLTC movement direction, d – OLTC device branches position, e – switch delay, f – number of switches

Source: designed by the authors.

To test the developed complex mathematical model, the TC OLTC and the voltage control modes study in the load node for the power supply circuit, which is shown on fig. 4, were performed, which the elements parameters have the following values: transformer type TDN-40000/110 – capacity $S=40$ MVA, transformation coefficient-115/11, short circuit voltage $U_k = 10,5$ % ; overhead line ПЛ – total active and inductive resistance $r_{nл} = 13,6$ Ohm,

$x_{nl} = 18,4$ Ohm, length $l_{nl} = 40$ km; cable line КЛІ – length $l_{клі} = 12$ km, total active and inductive resistance $r_{клі} = 1,014$ Ohm, $x_{клі} = 0,456$ Ohm; load – full capacity $S_H = 30$ MVA, rated load voltage $U_H = 10,5$ kV, capacity factor $\cos \varphi = 0,6$.

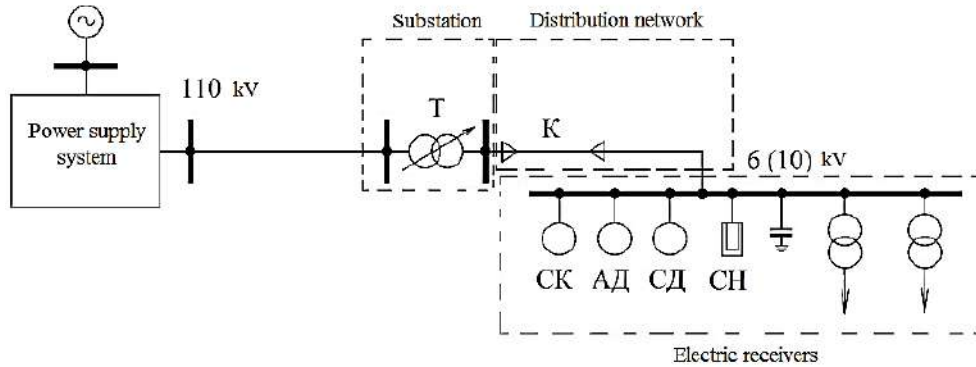


Fig. 4. The load node consumers power supply system scheme

Source: designed by the authors.

The voltage level on the busbars in the load change conditions is maintained within acceptable limits by the PT fuzzy voltage regulator, which implements the counter-regulation law and is determined from the equation:

$U_H = U_C - I_{ЛЗ} \cdot Z_{38}$, where U_H – voltage on the consumer busbars; U_C – voltage on the infinite power system busbars (voltage on the secondary winding of the transformer); Z_{38} – the connection resistance between the consumer busbar and the infinite power system; $I_{ЛЗ}$ – current in the communication line of the power supply circuit.

The study results of voltage regulation processes in the distribution network for various limitations of the switches number are shown in fig. 5, which are determined by the results of the TC OLTC evaluation.

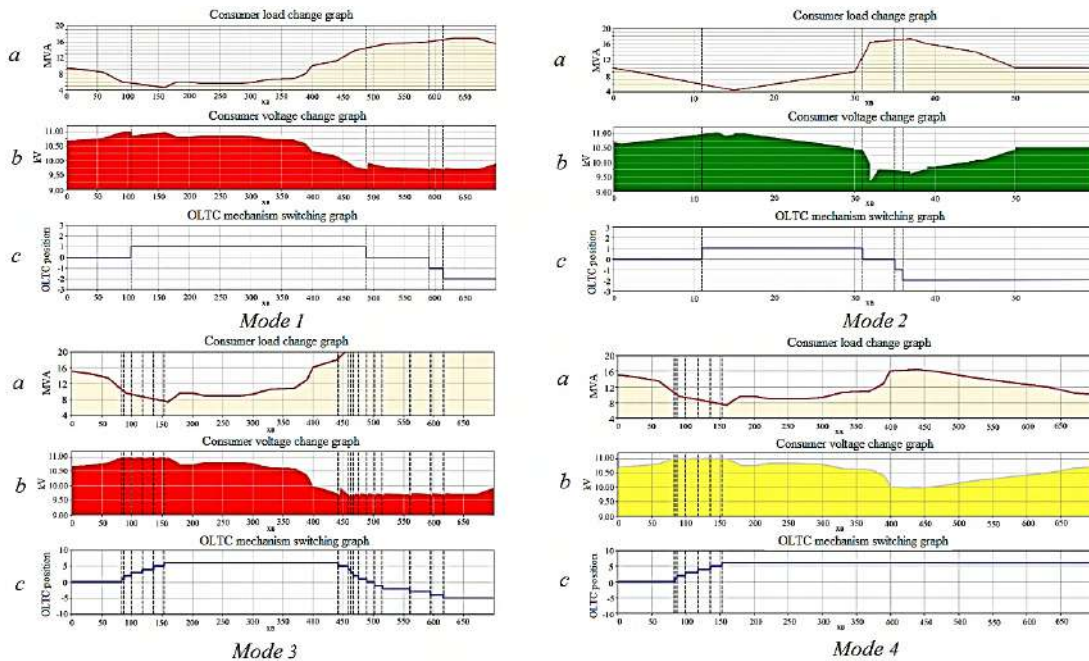


Fig. 5. The load changing processes (a), the voltage in the load node (b) and the OLTC branches position (c) in different operating modes

Source: designed by the authors.

Conclusions. Ensuring the required level of operational reliability, electricity quality of modern PSs requires considering TC and the PT service life in the implementation of voltage control algorithms in the load nodes. A fuzzy model of TC class determination and decision-making on the OLTC operation strategy has been developed. A fuzzy algorithm is proposed and software for voltage regulation in the load node by OLTC PT is developed taking into account their TC. Modeling and test calculations of voltage control modes in the load nodes of the PS distribution network are performed, given the OLTC resource limitations. Studies have shown the feasibility and effectiveness of TC fuzzy modeling and voltage control modes by OLTC device, in particular, the required voltage regulation quality in the load nodes is provided with fewer switches.

References

1. Hrabko, V.V. (2005). *Modeli i zasoby rehulivannia napruhy za dopomohoiu transformatoriv z prystroiamy RPN [Models and means of voltage regulation with the help of transformers with on-load tap-changers]*. UNIVERSUM-Vinnytsia.
2. Kosteriev, M.V., & Bardyk, Ye.I. (2011). *Pytannia pobudovy nechitkykh modelei otsinky tekhnichnoho stanu ob'ektiv elektrychnykh system [Questions of construction of fuzzy models for assessing the technical condition of electrical systems]*. NTUU "KPI".
3. Bardyk, E., & Bolotnyi, N. (2018). Development of a model for determining a priority sequence of power transformers out of service. *Eastern-european journal of enterprise technologies*, (3/8(93)), 6-15.
4. Yandulskiy, O.S., Nesterko, A.B., Trunina, H.O., & Tymokhin, O.V. (2017). Zmenshennia kilkosti spratsiuvan systemy RPN transformatora v elektrychnii merezhi z dzherelamy rozoseredzhenoho heneruvannia [Reduction of the number of tripping of the on-load tap-changer system in the electric network with sources of dispersed generation]. *Visnyk KNU imeni Mykhaila Ostrohradskoho, Kremenchuk – Bulletin of the Kremenchug National University named after Mikhail Ostrogradsky*, 1(3(104)), 33-38.
5. Mokin, B.I., Hrabko, V.V., & Lvov, Sh.Yu. (1999). Kompiuterne modelivannia systemy rehulivannia napruhy v elektrychnykh merezhakh [Computer modeling of voltage regulation system in electrical networks]. *Problemy sozdanyia novykh mashyn i tekhnolohii. Sbornyk nauchnykh trudov Kremenchuhs'koho hosudarstvennoho unyversyteta – Problems of creating new machines and technologies*, 2, 143-146.
6. Yan-Yih Hu, & Feng-Chang Lu. (1998). A combined artificial neural network-fuzzy dynamic programming approach to reactive power/voltage control in a distribution substation. *IEEE transaction on Power Systems*, 13(4), 1265-1271.
7. Feng-Chang Lu, & Yan-Yih Hu. (1997). Fuzzy dynamic programming approach to reactive power/voltage control in a distribution substation. *IEEE transaction on Power Systems*, 12, 681-687.
8. Porudominskii, V.V. (1974). *Ustroistva perekliucheniia transformatorov pod nagruzkoi [Devices for switching transformers under load]* (2nd ed. Transformers, vol. 25). Energiia.
9. Rensi, R. (1996). Transformatory s perekliucheniem pod nagruzkoi [Transformers with switching under load]. *Mirovaia energetika – World Energy*.
10. Alekseev, B.A. (2008). Kontrol sostoianniia ustroistv regulirovaniia transformatorov pod nagruzkoi [Control of the state of control devices for transformers under load]. *ELEKTRO*, (4), 41-46.
11. Bardyk E., & Bolotnyi N. (2017). Parametric identification of fuzzy model for power transformer based on real operation data. *Eastern-european journal of enterprise technologies*, (6/8 (90)), 4-10.
12. Karpov, Yu.O., Lezhniuk, P.D., Rubanenko, O.Ye., & Pyrizhok, M.I. (2001). Prohnozuvannia yakosti funktsionuvannia prystroiv rehulivannia pid napruhoiu transformatoriv v umovakh nechitkykh rezultativ vyprovovuvan [Forecasting the quality of operation of voltage control devices of transformers in the conditions of fuzzy test results]. *Visnyk Vinnyts'koho politekhnichnoho instytutu – Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute*, (5), 58-65.
13. Shtovba, S.D. (2007). *Proektirovanie nechetskikh sistem sredstvami MATLAB [Designing fuzzy systems using MATLAB]*. Goriachaia liniia – Telekom.

14. Leonenkov, A.V. (2005). *Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB fuzzyTECH [Fuzzy modeling in the MATLAB fuzzyTECH environment]*. BKhV-Peterburg.
15. Shavranskyi, M.V., Kohuch, Ya.R., & Shavranskyi, V.M. (2008). Systema nechitkoho vyvodu rehuliuвання napruhy merezhi v prohramnomu seredovyshchi MATLAB [System of fuzzy output voltage regulation of the network in the software environment MATLAB]. *Naftohazova enerhetyka – Oil and gas energy*, (3(8)), 44-49.
16. Zhmak, E.I., & Manusov, V.Z. (2001). Obosnovanie printcipa nechetkogo regulirovaniia napriazheniia s pomoshchiu RPN transformatorov [Justification of the principle of fuzzy voltage regulation with the help of transformer tap changers]. *Sbornik nauchnikh trudov NGTU – Collection of scientific works of NSTU*, (2), 133-138.
17. Terekhov, V.M. (2000). Algoritmy faziregulatorov v elektrotekhnicheskikh sistemakh [Algorithms of phase regulators in electrical systems]. *Elektrichestvo – Electricity*, (12), 55-63.

References (in language original)

1. Грабко В. В. Моделі і засоби регулювання напруги за допомогою трансформаторів з пристроями РПН : монографія / В. В. Грабко. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 109 с.
2. Костерев М. В., Бардик Є. І. Питання побудови нечітких моделей оцінки технічного стану об'єктів електричних систем / М. В. Костерев, Є. І. Бардик. – К. : НТУУ «КПІ», 2011. – 148 с.
3. Vardyk E. Development of a model for determining a priority sequence of power transformers out of service / E. Vardyk, N. Bolotnyi // *Eastern-european journal of enterprise technologies*. – 2018. – № 3/8(93). – Рр. 6-15.
4. Зменшення кількості спрацювань системи РПН трансформатора в електричній мережі з джерелами розосередженого генерування / О. С. Яндульський, А. Б. Нестерко, Г. О. Труніна, О. В. Тимохін // *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. – 2017. – № 3(104). – Ч. 1. – С. 33-38.
5. Мокін Б. І. Комп'ютерне моделювання системи регулювання напруги в електричних мережах / Б. І. Мокін, В. В. Грабко, Ш. Ю. Львов // *Проблемы создания новых машин и технологий*. – 1999. – Вып. 2. – С. 143-146.
6. Yan-Yih Hu. A. combined artificial neural network-fuzzu dynamic programming approach to reactive power/voltage control in a distribution substation / Hu Yan-Yih, Lu Feng-Chang // *IEEE transagtion on Power Systems*. – 1998. – Vol. 13, Issue 4. – P. 1265-1271.
7. Feng-Chang Lu. Fuzzy dynamic programming approach to reactive power/voltage control in a distribution substation / Lu Feng-Chang, Hu Yan-Yih // *IEEE transagtion on Power Systems*. – 1997. – Vol. 12. – Рр. 681-687.
8. Порудоминский В. В. Устройства переключения трансформаторов под нагрузкой / В. В. Порудоминский. – изд. 2-е, перераб. и исправ. : Трансформаторы. – М. : Энергия, 1974. – Вып. 25. – 288 с.
9. Рэнси Р. Трансформаторы с переключением под нагрузкой / Р. Рэнси // *Мировая энергетика*. – 1996.
10. Алексеев Б. А. Контроль состояния устройств регулирования трансформаторов под нагрузкой / Б. А. Алексеев // *ЭЛЕКТРО*. – 2008. – № 4. – С. 41-46.
11. Vardyk E. Parametric identification of fuzzy model for power transformer based on real operation data / E. Vardyk, N. Bolotnyi // *Eastern-european journal of enterprise technologies*. – 2017. – № 6/8(90). – Рр. 4-10.
12. Прогнозування якості функціонування пристроїв регулювання під напругою трансформаторів в умовах нечітких результатів випробовувань / Ю. О. Карпов, П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, М. І. Пиріжок // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. – 2001. – № 5. – С. 58-65.
13. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С. Д. Штовба. – М. : Горячая линия - Телеком, 2007. – 288 с.
14. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB fuzzyTECH / А. В. Леоненков. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
15. Шавранський М. В. Система нечіткого виводу регулювання напруги мережі в програмному середовищі MATLAB / М. В. Шавранський, Я. Р. Когуч, В. М. Шавранський // *Нафтогазова енергетика*. – 2008. – №3 (8). – С. 44-49.

16. Жмак Е. И. Обоснование принципа нечеткого регулирования напряжения с помощью РПН трансформаторов / Е. И. Жмак, В. З. Манусов // Сборник научных трудов НГТУ. – 2001. – № 2. – С. 133-138.

17. Терехов В. М. Алгоритмы фазирегуляторов в электротехнических системах / В. М. Терехов // Электричество. – 2000. – № 12. – С. 55-63.

Отримано 29.01.2022

УДК 621.314.222.6

Євген Бардик¹, Ігор Заклюка²

¹кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри відновлюваних джерел енергії

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: bardik1953@gmail.com, **ORCID:** <https://orcid.org-0002-5776-1500>

²магістрант освіти кафедри відновлюваних джерел енергії

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: ihorzakliuka1@gmail.com

КОМПЛЕКСНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ І РЕЖИМІВ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ ПРИСТРОЇВ РЕГУЛЮВАННЯ ПІД НАВАНТАЖЕННЯМ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Нині з розвитком ринкових відносин в електроенергетиці України, старінням основних фондів, збільшенням частки відновлюваних джерел енергії загострюється проблема забезпечення режимної надійності сучасних ЕЕС унаслідок підвищення вірогідності виникнення аварійних ситуацій, які супроводжуються значним відхиленням напруги у вузлах навантаження. Найбільш поширеним способом регулювання напруги є регулювання пристроями регулювання напруги під навантаженням (РПН) СТ, які є достатньо ненадійними елементами СТ з малим ресурсом працездатності, що спричиняє часті відключення автоматичних регуляторів напруги СТ від мережі зі зниженням якості напруги. Складність виявлення аналітичних залежностей між зміненням параметрів ТС і класом ТС об'єкта потребує використання методів інтелектуального аналізу даних для розробки моделей оцінки ТС пристроїв РПН СТ та побудови алгоритмів управління режимами регулювання напруги в розподільних мережах з урахуванням ресурсних обмежень об'єкта.

Аналіз досліджень і останніх публікацій, присвячених питанням розробки математичних моделей оцінки ТС і ризику відмови СТ та пристроїв РПН СТ, способам і алгоритмам регулювання напруги у вузлах навантаження ЕЕС показав, що існує необхідність удосконалення математичного і програмного забезпечення оцінки ТС, ризику відмови СТ та створення ефективних алгоритмів регулювання напруги у вузлах навантаження з відповідальними споживачами.

Незважаючи на значну кількість робіт, присвячених моделюванню технічного стану окремих елементів СТ, зокрема, пристроїв РПН та режимів регулювання напруги у розподільних мережах, існує задача комплексного моделювання ТС, визначення і врахування ресурсних обмежень пристроїв РПН в нечітких моделях регулювання напруги у вузлах навантаження регуляторами напруги СТ.

Метою роботи є побудова комплексної математичної моделі оцінки технічного стану і алгоритмів регулювання напруги пристроїв РПН силових масляних трансформаторів.

Запропоновано при реалізації алгоритмів регулювання напруги у вузлах навантаження ЕЕС пристроями РПН СТ комплексний підхід, що ґрунтується на врахуванні ТС і ресурсу працездатності об'єкта. Розроблено лінгвістичну модель визначення класу ТС і прийняття рішень щодо стратегії експлуатації пристроїв РПН СТ; побудовано нечіткий алгоритм і розроблено програмне забезпечення регулювання напруги у вузлі навантаження пристроями РПН СТ з урахування їх ТС; проведено тестове дослідження режимів регулювання напруги у вузлі навантаження з урахуванням ресурсних обмежень для пристроїв РПН СТ.

Ключові слова: силові трансформатори; технічний стан; лінгвістична модель; регулювання напруги; нечітка логіка.

Рис.: 5. Табл.: 3. Бібл.: 17.

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-1(27)-172-183

УДК 697.95-52

Вячеслав Лобов¹, Людмила Єфіменко², Сергій Бойко³, Олексій Городній⁴

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій
Криворізький національний університет (Кривий Ріг, Україна)

E-mail: lobovvjcheslav@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6833-2819>

²кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій,
Криворізький національний університет (Кривий Ріг, Україна)

E-mail: liudmyla.yefimenko@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3333-8951>

³кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних технологій електронних засобів
Національний університет «Запорізька політехніка» (Запоріжжя, Україна)

E-mail: bsn1987@i.ua. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-9778-2202>

Scopus Author ID: [56417478200](https://orcid.org/56417478200)

⁴кандидат технічних наук, доцент кафедри електроніки, автоматики, робототехніки і мехатроніки
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: aleksey.gorodny@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-5303-9564>

Scopus Author ID: [55327980200](https://orcid.org/55327980200)

МЕТОДИКА ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТУ В ПРИМІЩЕННІ

Метою статті є дослідження сучасних систем автоматизованого контролю і керування мікрокліматом у приміщеннях з урахуванням оптимізації технологічних параметрів: температури, вологості та інших з розробкою простої методики проєктування систем керування мікрокліматом в приміщенні з удосконаленою математичною моделлю, побудованою на основі правил прикладної теорії цифрових автоматів.

Представлено огляд науково-технічної літератури та статей на тему автоматизації систем управління, використовуючи сучасну елементну базу. Показано системи, що використовуються нині та їхні недоліки для якісного виконання поставленої мети. Під час оцінювання метеорологічних умов приміщень основне значення надано параметрам температури і вологи повітря. Дослідження виконувалось із розробленням математичної моделі і використанням правил прикладної теорії цифрових автоматів. Запропоновано методику проєктування системи для керування мікрокліматом в приміщенні на основі використання цифрового автомата. Розроблено алгоритм оптимального управління системою керування мікрокліматом у приміщенні

Ключові слова: приміщення; мікроклімат; збурюючі фактори; автоматизація; цифровий автомат; методика.

Рис.: 3. Табл.: 11. Бібл.: 21.

Актуальність теми дослідження. Сучасні системи автоматизованого контролю і керування мікрокліматом приміщень промислового призначення або житлового помешкання дозволяють створювати нормальні умови праці та відпочинку людей. Мікроклімат – це комплекс метеорологічних умов у приміщенні, які характеризуються температурою, відносною вологістю, повітрообміном, швидкістю руху повітря, вмістом у повітрі кисню, частинок пилу тощо і визначають умови внутрішнього середовища, що впливають на тепловий обмін людей з оточенням шляхом конвекції, теплового випромінювання та випаровування вологи тощо. При оцінці метеорологічних умов приміщень основне значення має температура і волога повітря. Як відомо, оптимальними для мікроклімату приміщень у теплу пору року вважаються: температура повітря 22-25° С, відносна вологість – 30-60 %. Взимку оптимальна температура в приміщенні повинна становити 18-19° С (для помірного поясу) і 17-18° С (для жаркого). Відносна вологість повітря (при температурі повітря 18-20° С) має бути в межах 40-60 %. Ці умови визначаються поєднанням температури й відносною вологістю та шляхом зміни швидкості руху повітря, яке повинно бути не більше за 0,25 м/с, температури оточуючих людину поверхонь та інтенсивністю теплового (інфрачервоного) опромінення, тощо.

Постановка проблеми. Унаслідок не правильного алгоритму роботи або порушення режимів при несправності технологічного обладнання: вентиляторів, підлоги (електричної або водяної), іонізатори, засувок, повітряних каналів тощо, або параметри мікроклімату в приміщенні, не забезпечують оптимальні метеорологічні умови, тобто поєднання параметрів мікроклімату: температури і вологи повітря у приміщенні при неправильно спроектованій системі для керування мікрокліматом в приміщенні, або при неправильній

експлуатації цього обладнання виникає відхилення від стандартних метеорологічних умов у приміщенні. Особливо даються взнаки зміни температури та вологості від нормованих або заданих значень повітря. Причиною відхилень температури і вологи повітря, та інших параметрів у приміщенні можуть мати також недостатнє опалення в зимовий період, перенаселення приміщення, виконання робіт при недостатній вентиляції та інші. Тому важливо мати ефективну просту методику проектування автоматизованої системи для керування мікроклімату в приміщенні на базі використання для неї простого пристрою керування. Алгоритм системи повинен бути простим і надійним при експлуатації технологічного обладнання, що забезпечує безперебійну його роботу. Система керування мікроклімату в приміщенні повинна працювати з урахуванням зовнішніх умов навколишнього середовища (температури повітря назовні, пори року, реагувати на кліматичні зміни). З цих причин надана тема статті є актуальною.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. На сьогодні проводяться масштабні дослідження в галузі створення ефективних методів та технологій, що дозволяють вирішувати керування технологічним процесом при автоматичному керуванні мікрокліматом у приміщенні. Існує значна кількість робіт, присвячених теоретичному та експериментальному дослідженню процесів керування мікроклімату в приміщенні [1-4]. У цих роботах сучасні системи регулювання мікроклімату в приміщеннях вирізняються ефективністю використання різноманітних пристроїв керування, оснащених спеціалізованими алгоритмами керування, вони стають «розумнішими», мають більшу функціональність, додаткові зручності та можливості [5-8]. Значна увага дослідників приділена питанням аналітичного моделювання процесу підтримки температурного режиму в приміщенні [9-14], що дозволило розробити різні методики проектування систем керування мікрокліматом у приміщеннях та на їх основі реалізувати різноманітні технічні пристрої. Так, у роботі [15] представлено універсальний восьми канальний мікропроцесорний регулятор-вимірювач на базі однокристалльної мікроЕОМ MSC51. За допомогою цього пристрою виконується контроль і регулювання системи мікроклімату та каналного опалення, вентиляційних установок загально-обмінного типу, припливно-витяжної вентиляції каналного типу. Прилад робить вимір фізичних параметрів контрольованих вхідними первинними перетворювачами і дозволяє виконувати установку програмованих робочих параметрів за допомогою вбудованої клавіатури керування. Крім того, прилад дозволяє робити корекцію вимірюваних параметрів для усунення погрешностей первинних перетворювачів, здійснює відображення результатів вимірів на вбудованому світлодіодному чотирирозрядному цифровому індикаторі та формує сигнали керування зовнішніми виконавчими механізмами. Проте методика проектування автоматичного керування мікрокліматом у приміщенні є не досконалою. Алгоритми роботи пристроїв потребують доопрацювання для забезпечення підтримки заданих значень температури і вологи повітря.

Останнім часом присвячується велика кількість робіт періодичному здійсненню ідентифікації об'єкта керування на основі отриманої моделі з виконанням прогнозування, використання нечіткої логіки, нейро-нечітких моделей, ANFIS-моделей і цифрових автоматів (ЦА) [16-21]. Методи керування з використанням прогнозуючої моделі належать до класу алгоритмів, у яких динамічна модель використовується для прогнозування та оптимізації процесу в режимі реального часу. Недоліками цих методів є порівняно складні методики проектування, непрості алгоритми керування. Однак вони мають схеми формування зворотного зв'язку та високі адаптивні властивості, що дозволяють здійснювати квазіоптимальне керування нелінійними нестационарними об'єктами зі складною структурою в режимі реального часу з урахуванням обмежень на керуючі та вихідні змінні. Сьогодні для керування різними технологічними процесами дослідники використовують математичні моделі та правила прикладної теорії ЦА, які дозволяють ство-

ривати універсальні алгоритми, спроектувати просту та доступну до реалізації функціональну і принципову схеми ЦА. Як показали результати досліджень, основне призначення автоматизованої системи керування мікроклімату в приміщенні полягає у відслідковуванні поточного стану приміщення з погляду його мікрокліматичних показників, вибір режиму роботи, відповідно до технологічних умов використання приміщення, а також необхідність керування мікрокліматичними показниками приміщення в режимі реального часу. На основі порівняльного аналізу технологічних аспектів задач керування мікрокліматом у приміщенні зроблено висновок про актуальність проблеми автоматизованого керування при забезпеченні нормованих і заданих параметрів з оптимізацією цього процесу в режимі реального часу. Це вказує на необхідність розробки удосконалених простих методик проектування мікроклімату в приміщенні з можливістю розробити модель процесу керування мікрокліматом у приміщенні на основі використання методології чіткої логіки.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Відомі сучасні системи керування мікроклімату в приміщенні здатні лише фіксувати відхилення вимірюваного параметра від його встановленого значення, однак не в змозі з відповідною похибкою підтримувати параметри температури і вологості з урахуванням зміни аварійних режимів, що враховують гранично допустимі параметри температури та вологості повітря та інших технологічних параметрів. При цьому треба, щоб аварійна і вимірювальна інформація надходила одночасно від засобів первинних перетворювачів (датчиків) до входів керуючого пристрою. Це дозволяє врахувати значну інерційність температури та відносної вологості та скоротити час керування мікрокліматом у приміщенні. Як показали результати досліджень, найбільш удосконаленою є методика проектування мікроклімату в приміщенні на основі цифрових автоматів з можливістю розробити простий пристрій керування на основі використання мікросхем середнього ступеня інтеграції.

Мета статті. Метою даної статті є дослідження сучасних систем автоматизованого контролю і керування мікрокліматом у приміщеннях із врахуванням оптимізації технологічних параметрів: температури, вологості та інших з розробкою простої методики проектування систем керування мікроклімату в приміщенні з удосконаленою математичною моделлю, побудованою на основі правил прикладної теорії цифрових автоматів.

Виклад основного матеріалу. Викладемо методику проектування ЦА, призначеного для керування мікроклімату в приміщенні, який діє на основі двох основних режимів роботи: керування параметрами температури й вологості повітря. Використовуючи процес заміни букв алфавітів S, X, Y, цифрового автомата двійковими векторами виконаємо кодування і представляємо його роботу таблицями. У лівій частині таблиці перераховуються всі букви (наприклад, вхідного алфавіту), а в правій – двійкові вектори, які ставляться у відповідність цим буквам (табл. 1 – Таблиця переходів, табл. 2 – Таблиця виходів і табл. 3 – Переходи-виходи ЦА). Для розробки ЦА відповідно до таблиць переходів і виходів приймаємо 8 вхідних сигналів, 8 вихідних сигналів і 6 перехідних станів.

Таблиця 1

Переходи ЦА

Стан ЦА	Входи						
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇
S ₀	S ₀	S ₁	S ₂	S ₅	S ₅	S ₀	S ₃
S ₁	S ₀	S ₁	S ₂	S ₅	S ₅	S ₀	S ₃
S ₂	S ₀	S ₁	S ₂	S ₅	S ₅	S ₀	S ₃
S ₃	S ₀	S ₃	S ₃	S ₅	S ₅	S ₀	S ₃
S ₄	S ₀	S ₄	S ₄	S ₅	S ₅	S ₀	S ₃
S ₅	S ₀	S ₁	S ₂	S ₅	S ₅	S ₀	S ₅

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 2

Виходи ЦА

Стан ЦА	Входи						
	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇
S ₀	y ₈	y ₁	y ₂	y ₇	y ₇	y ₈	y ₅
S ₁	y ₈	y ₁	y ₂	y ₇	y ₇	y ₈	y ₅
S ₂	y ₈	y ₁	y ₂	y ₇	y ₇	y ₈	y ₅
S ₃	y ₈	y ₁	y ₁	y ₇	y ₇	y ₈	y ₁
S ₄	y ₈	y ₂	y ₂	y ₇	y ₇	y ₈	y ₅
S ₅	y ₈	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄	y ₈	y ₈

Джерело: розроблено авторами.

Входи x₁-x₅ використовуємо для введення інформації у ЦА від первинних перетворювачів (датчиків) про стан температури повітря у цифровому вигляді, а входи x₆-x₈ – про вологості повітря в приміщенні. Наявність сигналу на вході x₁ вказує на те, що температура в приміщенні в нормі (t норма), на вході x₂-температура висока (t жарко) і на вході x₃ – низька температура (t холодно). У приміщенні може бути два аварійних режиму по гранично допустимій температурі, які визначаються первинними перетворювачами. Так, за наявності сигналу на вході x₄ вважається, що температура гранично висока і режим приймається як аварійно жарко (t ав. жарко), на вході x₅ – максимально низька температура і режим аварійно холодно (t ав. холодно).

Входи x₆, x₇ використовуємо для введення інформації у ЦА від первинних перетворювачів (датчиків) про стан вологи повітря у цифровому вигляді. Якщо вологість повітря в приміщенні знаходиться в межах заданого значення (φ норма), то на вхід x₆ подається відповідна інформація, при підвищенні вологості від заданого значення (φ підвищена) з'являється сигнал на вході x₇, а при зниженні (φ знижена) на вході x₈. Первинні перетворювачі температури і вологи встановлюються експериментально в точках приміщення, де температура і волога повітря відповідають дійсним значенням.

Температурний режим у приміщенні підтримується шляхом зміни роботи вентилятора (y₁) і нагрівального елемента (y₂), за допомогою системи керування цим обладнанням. При цьому видається на індикацію два аварійних режиму по гранично допустимій температурі: аварійно жарко (y₃) і аварійно холодно (y₄). Режим вологості підтримується увімкненням розпилювача води (y₅), а зменшення вологості шляхом одночасного ввімкнення вентилятора й нагрівального елемента (y₆). При керуванні мікрокліматом у приміщенні передбачається режим аварійного вимкнення (y₇) і загального вимкнення (y₈). Контроль аварійних режимів виконується первинними перетворювачами, їх цифрова інформація вводиться на входи ЦА, що знижує інерційність температури та відносної вологості та швидше здійснюється дозування керуючого впливу на виконавчі органи.

Стан цифрового автомата можна умовно поділити на 3 підгрупи: нормальний стан (всі показники в нормі, S₀), відхилення від нормального стану: S₁ – висока температура t жарко, S₂ – низька температура t холодно, S₃ – вологість φ підвищена, S₄ - вологість φ знижена, «аварійне» стан (S₅). При побудові табл. 1 (переходи ЦА) враховуємо, що перехід в «нормальне» стан S₀ відбувається при подачі вхідних сигналів x₁ або x₆, а з «нормального» стану ЦА може перейти в будь-який інший стан. При переході до стану S₃ та S₄ (відхилення вологості від заданого значення) на вихід системи управління виконуючими пристроями, для цього подаються відповідні сигнали y₅, щоб розбризкати воду в повітрі приміщення і для підвищення вологості або сигнал y₆, щоб поглинути її, включивши нагрівальний елемент, наприклад ТЕН (табл. 2). ЦА перебуваючи в станах S₃ та S₄, сигнали на управління виконуючими пристроями на збільшення або зменшення вологості не подаються, а лише формується сигнал керування на активізацію вентилятора, щоб рівномірно розподілити вологість по приміщенню, або виконати рівномірний нагрів, щоб ліквідувати вологу в повітрі. Ці

стани мають пріоритет над станами S_1 або S_2 («жарко»/ «холодно»). Але самим пріоритетним станом ЦА є «аварійне» стан S_5 . Для регулювання температури в приміщені передусе подача з ЦА вихідного сигналу y_7 , який сповіщає про перехід ЦА в аварійний стан і він залишається в цьому стані, поки температура повітря в ньому не нормалізується. Далі цифровий автомат відновить свою роботу, і буде підтримувати необхідні температури і вологості в приміщені з формуванням відповідних вихідних сигналів y_1 - y_4 .

Використовуючи дані табл. 1 і табл. 2 будуємо суміщену таблицю переходів-виходи ЦА (табл. 3) і матрицю сполук (табл. 4). У загальному випадку, використовуючи суміщену таблицю переходів-виходів ЦА (табл. 3), будуємо граф роботи ЦА (рис. 1), вершинами якого є стану переходів $S_0 - S_5$, а на дугах вказані його стану входів-виходів.

Таблиця 3

Переходи-виходи ЦА

Стан ЦА	Входи						
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
S_0	S_0/y_8	S_1/y_1	S_2/y_2	S_5/y_7	S_5/y_7	S_0/y_8	S_3/y_5
S_1	S_0/y_8	S_1/y_1	S_2/y_2	S_5/y_7	S_5/y_7	S_0/y_8	S_3/y_5
S_2	S_0/y_8	S_1/y_1	S_2/y_2	S_5/y_7	S_5/y_7	S_0/y_8	S_3/y_5
S_3	S_0/y_8	S_3/y_1	S_3/y_1	S_5/y_7	S_5/y_7	S_0/y_8	S_3/y_1
S_4	S_0/y_8	S_4/y_2	S_4/y_2	S_5/y_7	S_5/y_7	S_0/y_8	S_3/y_5
S_5	S_0/y_8	S_1/y_1	S_2/y_2	S_5/y_3	S_5/y_4	S_0/y_8	S_5/y_8

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 4

Матриця з'єднань

Стан ЦА	S_0	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
S_0	$x_1/y_8 \vee x_6/y_8$	x_2/y_1	x_3/y_2	x_7/y_5	x_8/y_6	$x_4/y_7 \vee x_5/y_7$
S_1	$x_1/y_8 \vee x_6/y_8$	x_2/y_1	x_3/y_2	x_7/y_5	x_8/y_6	$x_4/y_7 \vee x_5/y_7$
S_2	$x_1/y_8 \vee x_6/y_8$	x_2/y_1	x_3/y_2	x_7/y_5	x_8/y_6	$x_4/y_7 \vee x_5/y_7$
S_3	$x_1/y_8 \vee x_6/y_8$	-	-	$x_2/y_1 \vee x_3/y_1 \vee x_7/y_1$	x_8/y_6	$x_4/y_7 \vee x_5/y_7$
S_4	$x_1/y_8 \vee x_6/y_8$	-	-	x_7/y_5	$x_2/y_2 \vee x_3/y_2 \vee x_8/y_2$	$x_4/y_7 \vee x_5/y_7$
S_5	$x_1/y_8 \vee x_6/y_8$	x_2/y_1	x_3/y_2	-	-	$x_4/y_3 \vee x_5/y_4$ $x_7/y_8 \vee x_8/y_8$

Джерело: розроблено авторами.



Рис. 1. Граф роботи ЦА

Джерело: розроблено авторами.

Для визначення логічних рівнянь роботи ЦА складаємо таблицю кодування, необхідні для обчислення кількості розрядів k :

$$k_{\text{вх}} = \lceil \log_2 |X| \rceil, k_{\text{вих}} = \lceil \log_2 |y| \rceil, k_{\text{ст}} = \lceil \log_2 |S| \rceil.$$

Оскільки $X = x_1, x_2, x_2, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8 = 8$, то $k_{\text{вх}} = \lceil \log_2 8 \rceil = 3$, а $Y = y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7, y_8 = 8$ - $k_{\text{вих}} = \lceil \log_2 8 \rceil = 3$ і $S = s_0, s_1, s_2, s_4, s_5 = 6$ - $k_{\text{ст}} = \lceil \log_2 6 \rceil = 3$.

Знаючи кількість входів, виходів і переходів, будуємо їх таблиці кодування (табл. 5-7)), у ролі елементів пам'яті вибираємо D-тригера, для яких дана таблиця переходів (табл. 8) і повну таблицю кодування (табл. 9), на якій введені такі позначення: $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ - відповідні розряди кодів переходів ЦА.

Таблиця 5

Кодування входів

Входи	Код
X_1	0 0 0
x_2	0 0 1
x_3	0 1 0
x_4	0 1 1
x_5	1 0 0
x_6	1 0 1
x_7	1 1 0
x_8	1 1 1

Таблиця 6

Кодування виходів

Виходи	Код
y_1	0 0 0
y_2	0 0 1
y_3	0 1 0
y_4	0 1 1
y_5	1 0 0
y_6	1 0 1
y_7	1 1 0
y_8	1 1 1

Таблиця 7

Кодування станів

Стан ЦА	Код
S_0	0 0 0
S_1	0 0 1
S_2	0 1 0
S_3	0 1 1
S_4	1 0 0
S_5	1 0 1

Таблиця 8

Переходи D-триггера

Стан переходів D-триггера	Вхідні сигнали	
	0	1
0	0	1
1	0	1

Таблиця 9

Повна таблиця кодування сигналів

$\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3$	$x_1=000$	$x_2=001$	$x_3=010$	$x_4=011$	$x_5=100$	$x_6=101$	$x_7=110$	$x_8=111$
0 0 0	000 / 111	001 / 000	010 / 001	101 / 110	101 / 110	000 / 111	011 / 100	100 / 101
0 0 1	000 / 111	001 / 000	010 / 001	101 / 110	101 / 110	000 / 111	011 / 100	100 / 101
0 1 0	000 / 111	001 / 000	010 / 001	101 / 110	101 / 110	000 / 111	011 / 100	100 / 101
0 1 1	000 / 111	011 / 000	011 / 000	101 / 110	101 / 110	000 / 111	011 / 000	100 / 101
1 0 0	000 / 111	100 / 001	100 / 001	101 / 110	101 / 110	000 / 111	011 / 100	100 / 001
1 0 1	000 / 111	001 / 000	010 / 001	101 / 010	101 / 011	000 / 111	101 / 111	101 / 111

Джерело: розроблено авторами.

Використовуючи дані табл. 8 і 9, будуємо структурну схему ЦА (рис. 2), яка має дві комбінаційні схеми збудження тригерів КС1 і схеми виходів КС2, три тригера Т1...Т3 і введені такі позначення:

$\beta'1, \beta'2, \beta'3, \beta1, \beta2, \beta3$ - відповідно прямі та інверсні входи, $U1, U2, U3$ - виходи комбінаційної схеми КС1, $\lambda'1, \lambda'2, \lambda'3, \lambda1, \lambda2, \lambda3$ - прямі та інверсні виходи тригерів Т1...Т2 і $W1, W2, W3$ - виходи ЦА.

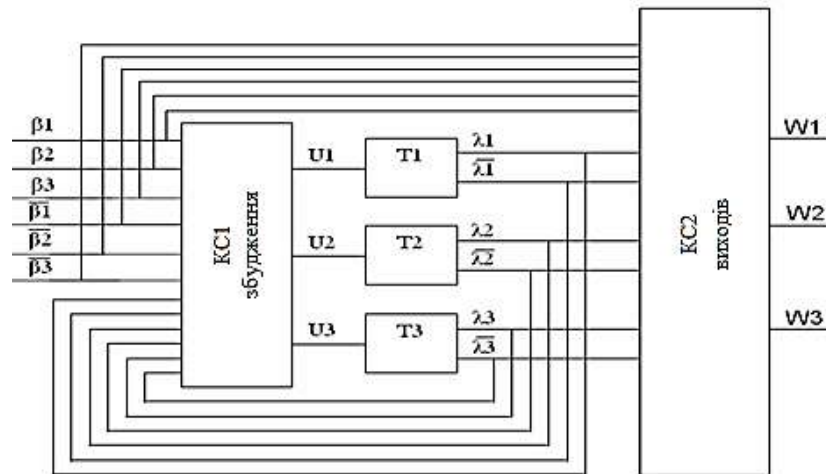


Рис. 2. Структурна схема ЦА

Джерело: розроблено авторами.

Для кодування входів збудження тригерів ЦА використаємо логічні стани табл. 10 і складемо булеві функції, а для виходів – дані табл. 11.

Таблиця 10

Кодування збудження ЦА

λ ₁	λ ₂	λ ₃	β ₁			β ₂			β ₃			β ₁			β ₂			β ₃			β ₁			β ₂			β ₃		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0
0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0
1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0
1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1
			U ₁	U ₂	U ₃	U ₁	U ₂	U ₃	U ₁	U ₂	U ₃	U ₁	U ₂	U ₃	U ₁	U ₂	U ₃	U ₁	U ₂	U ₃	U ₁	U ₂	U ₃	U ₁	U ₂	U ₃	U ₁	U ₂	U ₃

Джерело: розроблено авторами.

За табл. 10 складаємо булеві функції збудження (U₁, U₂, U₃):

$$\begin{aligned}
 U_1 = & \beta_1'\beta_2'\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3' + \beta_1'\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3' + \beta_1'\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3' + \beta_1'\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3' + \\
 & + \beta_1'\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3' + \beta_1'\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3 + \beta_1'\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3' + \beta_1'\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3 + \beta_1'\beta_2'\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3' + \\
 & + \beta_1\beta_2'\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3 + \beta_1\beta_2'\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3' + \beta_1\beta_2'\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3 + \beta_1\beta_2'\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3' + \beta_1\beta_2'\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3 + \\
 & + \beta_1\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3 + \beta_1\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3' + \beta_1\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3 + \beta_1\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3' + \beta_1\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3 + \\
 & + \beta_1\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3' + \beta_1\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3 \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U_2 = & \beta_1'\beta_2'\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3 + \beta_1'\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3' + \beta_1'\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3 + \beta_1'\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3' + \\
 & + \beta_1'\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3 + \beta_1'\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3' + \beta_1\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3' + \beta_1\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3 + \beta_1\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3' + \\
 & + \beta_1\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3 + \beta_1\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3' \quad (2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U_3 = & \beta_1'\beta_2'\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3' + \beta_1'\beta_2'\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3 + \beta_1'\beta_2'\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3' + \beta_1'\beta_2'\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3 + \\
 & + \beta_1'\beta_2'\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3 + \beta_1'\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3 + \beta_1'\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3' + \beta_1'\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3 + \beta_1'\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3' + \\
 & + \beta_1'\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3 + \beta_1'\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3' + \beta_1'\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3 + \beta_1'\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3' + \beta_1'\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3 + \\
 & + \beta_1'\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3' + \beta_1'\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3 + \beta_1'\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3' + \beta_1'\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3 + \beta_1'\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3' + \\
 & + \beta_1\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3 + \beta_1\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3' + \beta_1\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3 + \beta_1\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3' + \beta_1\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3 + \\
 & + \beta_1\beta_2\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3 \quad (3)
 \end{aligned}$$

Після мінімізації логічних рівнянь (3)...(5) маємо такі функції збудження:

$$\begin{aligned}
 U_1 = & \beta_1'\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3' + \beta_1'\beta_2\lambda_1\lambda_2\lambda_3' + \beta_1\beta_2'\beta_3\lambda_1' + \beta_1\beta_2'\beta_3\lambda_2' + \beta_1\beta_3\lambda_1\lambda_2\lambda_3 + \\
 & + \beta_2\beta_3\lambda_1 \quad (4)
 \end{aligned}$$

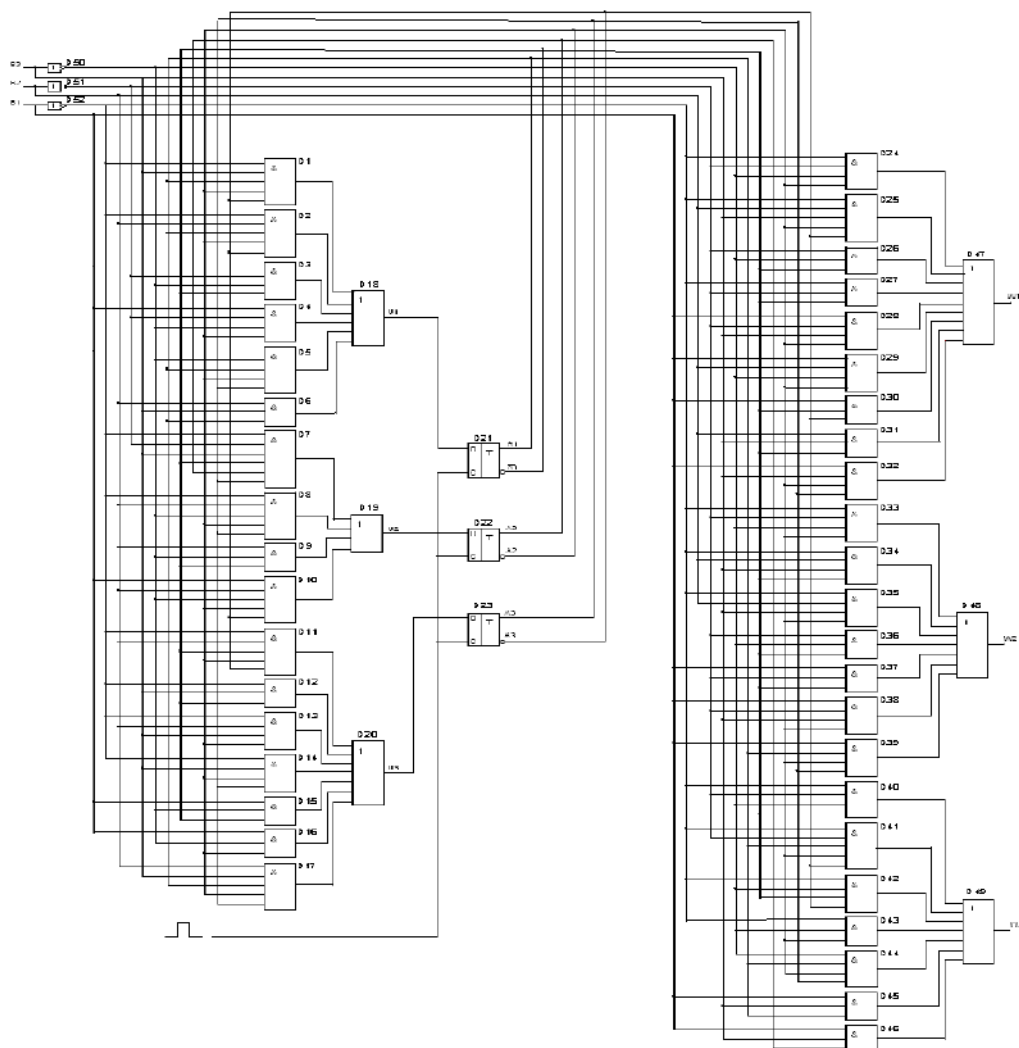


Рис. 3. Функціональна схема ЦА для керування мікроклімату в приміщенні
Джерело: розроблено авторами.

Висновки. Використовуючи прикладну теорію цифрових автоматів, розроблена методика проектування систем керування мікроклімату в приміщенні, яка дозволила отримати рівняння булевих функцій. Складено інженерний підхід до підтримки заданого мікроклімату за рахунок регулювання температури та вологості повітря у приміщенні. Розроблений цифровий автомат для підтримки заданого мікроклімату в приміщенні має 8 вхідних сигналів, 8 вихідних сигналів та 6 перехідних станів. Логічні рівняння дозволили розробити просту функціональну схему ЦА для керування мікроклімату в приміщенні, яка легко реалізується на мікросхемах середньої ступені інтеграції, наприклад, КР1561, або інших пристроях, наприклад, в мікроконтролерах.

Напрямом подальших досліджень є збільшення функцій цифрового автомата, таких як повітрообмін, швидкість руху повітря, вміст у повітрі частинок пилу, CO₂ тощо.

Список використаних джерел

1. Глоба Л. С. Розробка інформаційних ресурсів та систем / Л. С. Глоба, Т. М. Кот. – К. : НН ІТС НТУУ «ХПІ», 2012. – 322 с.
2. Мікроклімат промислових приміщень [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.protrud.com>.
3. Строкань О. В. Програмно-інформаційна система оптимізації мікроклімату у виробничому приміщенні / О. В. Строкань // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Серія «Нові рішення в сучасних технологіях». – 2014. – Випуск 48. – С. 92-96.

4. Варфоломеев Ю. М. Системы и оборудование для создания микроклимата помещений: Учебник для студентов и колледжей строительного профиля и бакалавров строительных вузов / О. Я. Кокорин, Ю. М. Варфоломеев. (Среднее профессиональное образование) (Гриф). – М. : Изд. Инфра-М., 2011. – 273 с.
5. Система контролю мікроклімату в приміщенні на базі контролеру Siemens TC65T / М. М. Ткач, В. М. Назаренко, В. Й. Лобов, М. О. Котляр // Адаптивні системи автоматичного управління. – 2010. – № 17(37). – С. 130-138.
6. Строкань О. В. Інформаційно-програмна система управління мікрокліматом в зерносковищі / О. В. Строкань, В. В. Прокопенко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», серія «Нові рішення в сучасних технологіях». – 2015. – Вип. 46(1155). – С. 104-108.
7. Смірнов Д. А., Автоматизація процесу керування температурно-вологісним режимом у фермерській теплиці / Д. А. Смірнов, О. В. Матус. // Вісник навчально-наукового інституту автоматики, кібернетики та обчислювальної техніки НУВГП: зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП. – 2019. – вип. 6. – с. 85-93.
8. Прокопенко Т. О. Інтелектуальна система керування температурно-вологісним режимом теплиці / Т. О. Прокопенко // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. – 2015. – Вип. 209, ч. 1. – С. 140-147.
9. Автоматика инженерных систем зданий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.lenprom.spb.ru/avtomatika>.
10. Шульц О. В. Дослідження та розробка інформаційно-управляючої scada-системи процесом опалення у теплиці / О. В. Шульц // 70-а наук.-практ. конф. студентів «Енергозабезпечення, електротехнології, електротехніка та інтелектуальні управляючі системи в АПК». – К. : НУБіП України, 2016. – С. 82.
11. Автоматизация систем вентиляции и кондиционирования воздуха : учеб. пособие / Е. С. Бондарь, А. С. Гордиенко, В. А. Михайлов, Г. В. Нимич. – К. : Видавничий будинок «Апангіост-Прим», 2005. – 560 с.
12. Control System s for Heating, Ventilating, and Air Conditioning / Roger W. Haines, Douglas C. Hittlc. – New York : Springer Science +Business Media Inc., 2006. – 366 p.
13. Системный анализ оптимизации общеобменной вентиляции и кондиционирования воздуха / А. А. Рымкснич. – М. : Стройиздат, 1990. – 300 с.
14. Голінко І. М. Структурне моделювання системи керування для штучного мікроклімату / І. М. Голінко, А. П. Ладашок // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2010. – С. 53-56.
15. Франовський І. О. Дослідження автоматизованої системи управління мікрокліматом приміщень: дипломна робота магістра за спеціальністю «151 – автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / І. О. Франовський. – Тернопіль : ТНТУ, 2019. – 104 с.
16. Борисов А. Н. Принятие решений на основе нечетких моделей. Примеры моделей / А. Н. Борисов, О. А. Крумберг, И. П. Федоров. – Рига : Знание, 1990. – 184 с.
17. Ротштейн А. П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткая логика, генетические алгоритмы, нейронные сети / А. П. Ротштейн. – Винница : УНІВЕРСУМ – Вінниця, 1999. – 320 с.
18. Демківський Є. О. Система підтримки прийняття рішень при прогнозуванні нестационарних процесів / Є. О. Демківський, П. І. Бідюк // Наукові праці Миколаївського державного гуманітарного університету ім. Петра Могили. – 2008. – Вип. 77. – С. 137-159.
19. Потенциал нейро-нечеткой методологии для оценки уровня шума ветровых турбин / В. Николич, Д. Петкович, Л. Пор, С. Шамширбанд, М. Замани, Ж. Шойбашич, С. Мотамеди // Механические системы и обработка сигналов. – 2016. – С. 715-722.
20. Кравець П. І. Нейромережеві компоненти систем керування динамічними об'єктами з їх апаратно-програмною реалізацією на FPGA / П. І. Кравець, В. М. Шимкович, П. Омельченко // Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка : зб. наук. пр. – К. : Век+, 2013. – № 59. – С. 78-85.
21. Прикладна теорія цифрових апаратів / В. І. Жабін, І. А. Жуков, І. А. Клименко, В. В. Ткаченко. – К. : НАУ, 2007. – 364 с.

References

1. Globa, L.S., Kot, T.M. (2012). *Rozrobka informatsiinykh resursiv ta system [Development of information resources and systems]*. NN ITS NTUU «KPI».
2. Mikroklimat promyslovykh prymishchen [Microclimate of industrial premises]. <https://www.protrud.com>.
3. Strokan, O.V. (2014). Prohramno-informatsiina systema optymizatsii mikroklimatu u vyrobnychomu prymishcheni [Software and information system for optimizing the microclimate in the production room]. *Visnyk natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya "Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh" – Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series "New solutions in modern technologies"*, 48, 92-96.
4. Varfolomeev, Yu.M., Kokorin, O.Ya. (2011). *Sistemy i oborudovanie dlia sozdaniia mikroklimata pomeshchenii [Systems and equipment for creating a microclimate of premises] (Secondary vocational education) (Vulture)*. Infra-M.
5. Tkach, M.M., Nazarenko, V.M., Lobov, V.I., Kotlyar, M.O. (2010). Systema kontroliu mikroklimatu v prymishcheni na bazi kontroleru Siemens TC65T [Indoor microclimate control system based on Siemens TC65T controller]. *Adaptyvni systemy avtomatychnoho upravlinnia – Adaptive automatic control systems*, (17(37)), 130-138.
6. Strokan, O.V., Prokopenko, V.V. (2015). Informatsiino-prohramna systema upravlinnia mikroklimatom v zernoskhovyshchi [Information and software system for microclimate management in the granary]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "Kharkivskiy politekhnichnyi instytut", seriya «Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh» – Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", series "New solutions in modern technologies"*, 46(1155), 104–108.
7. Smirnov D. A., Matus O. V. (2015). Automation of the process of temperature and humidity conditions control in the green house. *Visnyk navchalno-naukovoho instytutu avtomatyky, kibernetiky ta obchyslivalnoi tekhniky NUVHP: coll. of sci. works*, Rivne: NUWEE, 2019 (6), 85-93.
8. Prokopenko, T.O. (2015). Intelktualna systema keruvannia temperaturno-volohisnym rezhymom teplytsi [Intelligent control system of temperature and humidity of the greenhouse]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Seriya: Tekhnika ta enerhetyka APK – Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Series: Engineering and energy of agro-industrial complex*, 209(1), 140-147.
9. Avtomatyka ynzhenerskykh system zdanyi [Automation of building engineering systems]. <http://www.lenprom.spb.ru/avtomatika>.
10. Schultz, O.V. (2016). Doslidzhennia ta rozrobka informatsiino-upravliaiuchoi scada-systemy protsesom opalennia u teplytsi [Research and development of information-control scada-system of the heating process in the greenhouse]. *70-a nauk.-prakt. konf. studentiv «Enerhozabezpechennia, elektrotekhnolohii, elektrotekhnika ta intelektualni upravliaiuchi systemy v APK» – 70th scientific-practical. conf. students "Energy supply, electrical technology, electrical engineering and intelligent control systems in agriculture"* (p. 82). ULES of Ukraine.
11. Bondar, E.S., Gordisnko, A.C., Mikhailov, U.A., Nimich, G.V. (2005). *Avtomatyzatsiia system ventyliatsyy y kondytsionirovannia vozdukh [Automation of ventilation and air coordination systems: textbook. Allowance]*. Apangiostr-Prim Publishing House.
12. Roger W. Haines, Douglas C. Hittlc. (2006). *Control System s for H eating, Ventilating, and Air Conditioning*. Springer Science + Business Media Inc.
13. Rymksnich, A.A. (1990). *Systemnyi analiz optymizatsii obshcheobmennoi ventyliatsyy y kondytsionirovannia vozdukh [System analysis of optimization of ventilation exchange and air conditioning]*. Stroiizdat.
14. Golinko, I.M., Ladashok, A.P. (2010). Strukturne modeliuvannia systemy keruvannia dlia shtuchnoho mikroklimatu [Structural modeling of control system for artificial microclimate]. *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii – East Iranian Journal of Advanced Technologies*, 53-56.
15. Franovsky, I.O. (2019). *Doslidzhennia avtomatyzovanoi systemy upravlinnia mikroklimatom prymishchen: dyplomna robota mahistra za spetsialnistiu «151 – avtomatyzatsiia ta kompiuterno-intehrovani tekhnolohii» [Research of the automated control system of microclimate of premises: master's thesis on a specialty "151 – automation and computer-integrated technologies"]*. TNTU.
16. Borisov, A.N., Krumberg, O.A., Fedorov, I.P. (1990). *Priniatie reshenii na osnove nechetkykh modelei. Primery modelei [Making decisions based on fuzzy models. Examples of models]*. Zinatne.

17. Rothstein, A.P. (1999). *Intellektualnye tekhnologii identyfikatsii: nechetkaia logika, geneticheskie algoritmy, neironnye seti* [Intelligent identification technologies: fuzzy logic, genetic algorithms, neural networks]. UNIVERSUM – Vinnytsia.
18. Demkivsky, E.A., Bidyuk, P.I. (2008). Systema pidtrymky pryiniattia rishen pry prohnouzuvanni nestatsionarnykh protsesiv [Decision support system for forecasting non-stationary processes]. *Naukovi pratsi Mykolaivskoho derzhavnogo humanitarnoho universytetu im. Petra Mohyly – Scientific works of Mykolayiv State University for the Humanities P. Mogilia*, 77, 137-159.
19. Nikolich, V., Petkovich, D., Por, L., Shamshirband, S., Zamani, M., Shoibashich, J., Motamedi S. (2016). Potentsial neuro-nechetkoi metodologii dlia otsenki urovnia shuma vetrovykh turbin [The potential of neuro-fuzzy methodology for estimating the noise level of wind turbines]. *Mekhanicheskie sistemy i obrabotka signalov – Mechanical systems and signal processing*, 715-722.
20. Kravets, P.I., Shymkovych, V.M., Omelchenko, P. (2013). Neiomerezhevi komponenty system keruvannya dynamichnyimi ob'ektamy z yikh aparatno-programnoi realizatsiieiu na FPGA [Neural network components of control systems for dynamic objects with their hardware and software implementation on FPGA]. *Visnyk NTUU «KPI». Informatyka, upravlinnia ta obchysliualna tekhnika – Bulletin of NTUU "KPI". Informatics, management and computer engineering*, (59), 78-85.
21. Zhabin, V.I., Zhukov, I.A., Klymenko, I.A., Tkachenko, V.V. (2007). *Prykladna teoriia tsyfrovyykh aparativ* [Applied theory of digital devices]. NAU.

Отримано 25.01.2022

UDC 697.95-52

Vyacheslav Lobov¹, Lyudmila Efimenko², Serhii Boiko³, Oleksiy Gorodny⁴

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Avtomation, Computer Sciences and Technology
Kryvyi Rih National University (Kryvyi Rih, Ukraine)

E-mail: lobovvjcheslav@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6833-2819>

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Avtomation, Computer Sciences and Technology
Kryvyi Rih National University (Kryvyi Rih, Ukraine)

E-mail: liudmyla.yefimenko@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3333-8951>

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information Technology of Electronic Media
Zaporizhzhya Polytechnic National University (Zaporizhzhya, Ukraine)

E-mail: bsn1987@i.ua ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9778-2202> Scopus Author ID: [56417478200](https://orcid.org/0000-0001-9778-2202)

⁴PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electronics, Automation, Robotics and Mechatronics
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: aleksey.gorodny@gmail.com ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5303-9564> Scopus Author ID: [55327980200](https://orcid.org/0000-0001-5303-9564)

METHODOLOGY FOR THE INDOOR MICROCLIMATE CONTROL SYSTEM DESIGN

The development of digital technology in recent decades has been rapid. The number of areas of application of DA continues to grow steadily. For example, in the last few years they have been actively implemented in automated systems of various technological processes. During the writing of the article, it was found that the current requirements for software and the rapid pace of technical systems cause growing interest in the theory of digital automata and discrete automata in general. This makes it possible to solve increasingly complex problems and, at the same time, achieve greater efficiency.

The aim of this article is to study modern systems of automated control and management of indoor climate with optimization of technological parameters: temperature, humidity, etc. with the development of simple methods for designing indoor climate control systems with advanced mathematical model based on the rules of applied digital theory. The research was performed using a mathematical model and rules of applied theory of digital automata, which allows to create universal algorithms and design a simple and easy for implementation functional and schematic diagram of digital automata.

Using the applied theory of digital automata, the equations of Boolean functions are obtained. An engineering approach to maintaining a given microclimate by regulating the temperature and humidity in the room. Developed digital circuit breaker to maintain a given microclimate in the room has eight input signals, eight output signals and six transient states. Logical equations allowed to develop a simple functional circuit of DA to control the microclimate in the room, which is quite easy to implement on chips of medium integration, such as KRI561, or other devices, such as microcontrollers.

Keywords: premises; microclimate; disturbing factors; automation; digital automaton; methods.

Fig.: 3. Table: 11. References: 21.

РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-1(27)-184-198

УДК 691.327:539.383

Юрій Крусь

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент
доцент кафедри автомобільних доріг, основ і фундаментів
Національний університет водного господарства та природокористування (Рівне, Україна)
E-mail: alkrous@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5271-7765>

ЗВ'ЯЗОК МІЖ НАПРУЖЕННЯМИ І ДЕФОРМАЦІЯМИ БЕТОНУ ЗА РІЗНИХ СИЛОВИХ РЕЖИМІВ КОРОТКОЧАСНОГО ОСЬОВОГО СТИСКУ

Запропонована зручна для користування та математичного опрацювання апроксимативна функція діаграми деформування, що відображає зв'язок між напруженнями й деформаціями бетону за «жорсткого» силового режиму однорідного стиску. Її одночасне застосування з отриманою раніше діаграмою для м'якорезимного навантажування надає можливість отримати стабільну й вільну від зайвих чинників впливу діаграму стану бетону, придатну для базованих на деформаційній моделі перерізів розрахунків зігнутих залізобетонних елементів (конструкцій) за всіма групами граничних станів та оцінки неоднорідного напружено-деформованого стану перерізів елементів (конструкцій) на будь-якій стадії навантажування аж до руйнування.

Ключові слова: бетон; діаграми деформування і стану; «м'який» і «жорсткий» режими навантажування; деформаційна модель перерізів.

Рис.: 1. Табл.: 1. Бібл.: 60.

Актуальність теми дослідження. В останні роки при проектуванні зігнутих залізобетонних конструкцій (згинальних, позацентрово стиснутих і розтягнутих і т. ін.) застосовують аналітичні методи розрахунку із залученням деформаційних моделей перерізів. Такий підхід дозволяє більш повно враховувати особливості роботи конструкційних матеріалів (бетону й арматури) і оцінювати неоднорідний напружено-деформований стан (НДС) перерізів елементів (конструкцій) на будь-якій стадії навантажування (дограничній, граничній і позаграничній) аж до руйнування, а також із єдиних позицій розраховувати конструкції за всіма групами граничних станів – за несучою здатністю (міцністю, стійкістю, витривалістю) та за придатністю до нормальної експлуатації (деформаціями (прогинами, переміщеннями, кутами повороту та ін.), утворенням і розкриттям тріщин та ін.).

Основним інструментом деформаційної розрахункової моделі є фактична діаграма стану бетону, що встановлює зв'язок між його напруженнями σ_b і відносними деформаціями ε_b у стиснутій і розтягнутій зонах перерізу. Найчастіше таку діаграму отримують, вдаючись до непрямих методів, випробовуючи в стандартному силовому режимі еталонні бетонні призми позацентровим стиском [1; 2] або армовані призмове зразки центральним стиском [3; 4; 5], досліджуючи зразки-циліндри з бетону в спеціальній тензометричній трубі [6], піддаючи залізобетонні балки з пружними вставками «чистому» згину [7; 8; 9] та ін. Очевидно, що в усіх цих дослідженнях важко домогтись єдиності діаграми стану бетону, оскільки на її окреслення, а отже, на параметри нелінійності деформування матеріалу істотно впливає ціла низка чинників: форма й розміри експериментальних зразків, ступінь їхнього армування, наявність або відсутність і рівень попереднього напруження арматури, ексцентриситет прикладання зовнішнього навантаження та ін.

Саме тому питання графоаналітичної побудови й математичного описання базованої на зрозумілих і точних фізичних уявленнях функціональної залежності діаграми стану бетону розглядаємо як важливу й актуальну проблему.

Постановка проблеми. Відсутність єдиної методики отримання діаграми стану бетону ставить під сумнів достовірність результатів виконаних розрахунків, не дозволяє порівнювати, пояснювати та пов'язувати в єдине ціле накопичені поколіннями до-

слідників численні і здебільшого унікальні експериментальні й теоретичні дані, утруднює осмислення та якісне провіщання специфічних явищ механіки деформівних бетону й залізобетону, не дає можливості оцінювати наявні теорії та орієнтуватись при обранні напрямів формування більш прогресивних поглядів, гальмує відкриття нових можливостей у практиці інженерних розрахунків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Далі розглядаємо роботу лише стиснутого бетону, керуючись поширеною практикою та вважаючи, що для розтягу можуть бути застосовані аналогії. Крім того, розрізняємо діаграму деформування бетону, отриману в результаті стандартних лабораторних випробувань еталонних бетонних зразків осьовим стиском, і діаграму стану бетону, що характеризує його роботу в неоднорідно деформівних поперечних перерізах зігнутих елементів і конструкцій.

Отже, як відомо з теорії пластичності [10], розвиток деформацій зі зростанням навантаження й окреслення діаграми $\sigma_b \sim \varepsilon_b$, установлюваної після проведення випробувань руйнуванням еталонних призмових зразків із бетону в умовах ступінчастого короткочасного осьового стиску, істотно залежать від того, чи зберігається постійною впродовж досліджень швидкість деформування $V_\varepsilon = d\varepsilon/dt = const$ або ж швидкість подачі напружень $V_\sigma = d\sigma/dt = const$. У першому випадку за так званого «жорсткого» навантажування після досягнення максимального значення напружень \bar{R}_b , якому відповідає деформація $\bar{\varepsilon}_{bR}$ (див. пунктирну лінію на рис. 1), на кривій $\bar{\sigma}_b \sim \bar{\varepsilon}_b$ (тут свідомо деформації позначаємо без верхньої риски, маючи на увазі, що тим же самим деформаціям ε_b за різних режимів навантажування відповідають відмінні одне від одного значення напружень σ_b і $\bar{\sigma}_b$) виявляється низхідна ділянка, і подальше зростання деформацій супроводжується падінням величини напружень до критичної міцності $\bar{R}_{bu} < \bar{R}_b$, якій відповідає гранична (або інакше – критична) деформація $\bar{\varepsilon}_{bu} > \bar{\varepsilon}_{bR}$, яка фіксує кінцеву точку усталеного деформування матеріалу. У другому випадку, визначуваному як «м'яке» навантажування, досягнення максимуму напружень R_b , якому відповідає деформація ε_{bR} (див. суцільну лінію на рис. 1), призводить до швидкого вичерпання несучої здатності бетону, так що низхідну ділянку кривої $\sigma_b \sim \varepsilon_b$ зафіксувати не вдається.

«М'який» режим навантажування може бути реалізований при проведенні випробувань руйнуванням еталонних призмових зразків із бетону згідно з чинними стандартами [11; 12] на традиційних гідравлічних пресах. При цьому отримують досить стабільну одновіткову лише з висхідною ділянкою діаграму стиску $\sigma_b = f(\varepsilon_b)$.

«Жорсткий» режим навантажування через відсутність єдиної методики створюють за допомогою відмінних від стандартних спеціально виготовлених дорогих випробувальних пресів, що дозволяють зберігати постійною швидкість приросту відносних деформацій [13; 14; 15], або допоміжних пристосувань, здатних сприймати зусилля і розвантажити бетон після досягнення максимуму стискаючих напружень, тобто після переходу через вершину кривої стиску [15; 16; 17; 18; 19; 20]. Однак надійність отриманих при цьому діаграм деформування бетону залишає привід для сумнівів. Про це свідчать і самі прихильники прямого експериментального шляху встановлення кривої стиску, наводячи результати вивчення чутливості її окреслення до зміни жорсткості елементів самої випробувальної установки та швидкості деформування [1; 7; 14; 17; 21], а також указуючи на істотний вплив на якість експериментальних даних такого суб'єктивного чинника, як практичних навичок проведення відповідних досліджень, і насамперед – реакції експериментатора,

особливо при фіксації показників вимірювальної апаратури на низхідній вітці роботи бетону в умовах його інтенсивно зростаючих деформацій при близьких до руйнуючих навантаженнях [3; 20; 22; 23]. Як наслідок, результати різних дослідів не завжди придатні для порівняння між собою, а часто, за твердженням авторів [4; 14; 24], – дуже суперечливі.

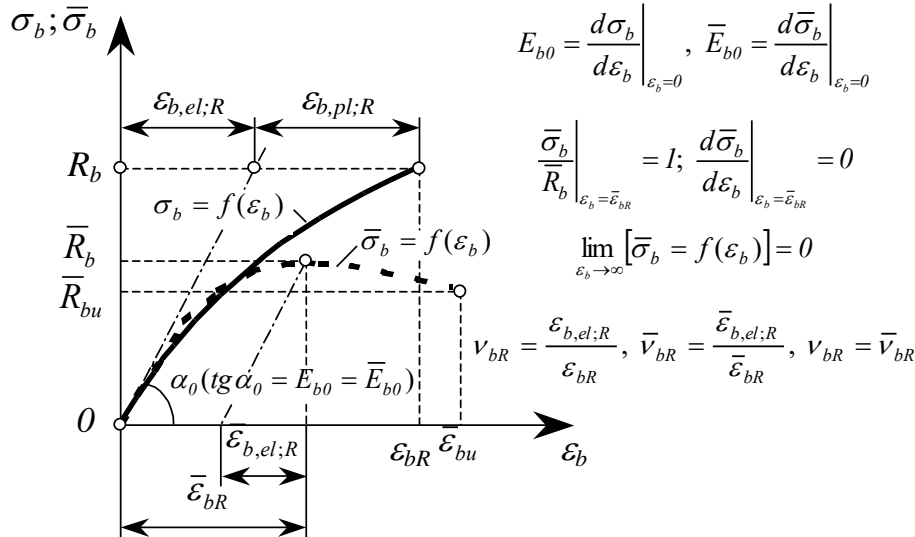


Рис. 1. Діаграми деформування бетону за різних силових режимів короткочасного осьового тиску до руйнування та їхні основні параметри:

— «м'який» режим; - - - «жорсткий» режим

Описані режими навантажування дозволяють одержати діаграми тиску бетону $\bar{\sigma}_b \sim \varepsilon_b$ і $\sigma_b \sim \varepsilon_b$ в умовах однорідного НДС із властивим йому рівномірним розподілом деформацій і напружень у перпендикулярних до напрямку дії навантаження перерізах центрально навантажених елементів. У той же самий час у реальних умовах експлуатації найбільш поширеним є неоднорідний НДС, що має місце, зокрема у стиснутій зоні зігнутих і позацентрово навантажених елементів (конструкцій). Характеризуючись нерівномірним у геометричному відношенні й у часі розподілом деформацій і напружень у перпендикулярних до подовжньої осі перерізах зігнутих елементів, такий стан визначає опір більшості будівельних конструкцій деформуванню й руйнуванню.

У низці наукових публікацій [7; 25; 26] висловлюється думка, що саме одночасним застосуванням діаграм деформування $\sigma_b \sim \varepsilon_b$ і $\bar{\sigma}_b \sim \varepsilon_b$, одержаних випробуваннями бетону в умовах однорідного тиску, можна вирішити давню наукову проблему відшукання надійної й переконливої діаграми стану бетону $\sigma_{b,fl} = f(\varepsilon_b)$, що а) відображає функціональний зв'язок між напруженнями й деформаціями бетону неоднорідно стиснутої зони у зігнутих бетонних і залізобетонних елементах (конструкціях); б) придатна у випадку справедливості гіпотези плоских перерізів і суміщення нульових деформацій і нульових напружень на єдиній нейтральній осі (більш відомої як «гіпотеза Бернуллі»); в) є основним інструментом деформаційної розрахункової моделі перерізів.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій засвідчує, що недостатньо дослідженими у загальній проблемі є питання теоретичного обґрунтування, розробки та апробування діаграми жорсткорезимного деформування бетону, комплексне застосування якої одночасно з діаграмою деформування в умовах «м'якого» силового режиму уможливить отримати надійну й переконливу діаграму стану бетону.

Мета й завдання досліджень. Основною метою досліджень є графоаналітична побудова та математичне описання базованої на зрозумілих і точних фізичних уявленнях залежності $\bar{\sigma}_b \sim \varepsilon_b$, експериментальне отримання якої, як зазначалось вище, викликає серйозні технічні труднощі й значні економічні витрати, а точність здійснених вимірювань і достовірність одержаних результатів – великі сумніви. Зазначена залежність характеризує деформування й руйнування бетону за «жорсткого» силового режиму осьового стиску, а її одночасне застосування з раніше отриманою залежністю $\sigma_b \sim \varepsilon_b$ для м'якорезимного навантажування надасть можливість побудувати діаграму стану бетону $\sigma_{b,fl} = f(\varepsilon_b)$.

Для реалізації поставленої мети вирішувались такі завдання:

1) розробити базовані на сучасних уявленнях про природу міцності й деформування та впливаючих із сутності фізичних і механічних процесів у бетоні критерії, яким має відповідати залежність $\bar{\sigma}_b \sim \varepsilon_b$;

2) запропонувати зручну для користування та математичного опрацювання (інтегрування, диференціювання, розкладання в ряди і т. ін.) структуру функціональної залежності у вигляді $\bar{\sigma}_b = f(\varepsilon_b)$;

3) скласти граничні умови та визначити постійні коефіцієнти функціональної залежності $\bar{\sigma}_b = f(\varepsilon_b)$, які б мали строгий фізичний зміст та одночасно були б параметрами діаграми деформування;

4) виконати порівняльний аналіз результатів розрахунку із застосуванням запропонованої залежності $\bar{\sigma}_b = f(\varepsilon_b)$ з відповідними експериментальними даними, тобто визначити апроксимативні властивості зазначеної залежності.

Виклад основного матеріалу. Раніше була одержана нескладна і водночас зручна для практичного застосування з задовільними апроксимативними властивостями залежність $\sigma_b \sim \varepsilon_b$, що характеризує деформування бетону за «м'якого» режиму короткочасного осьового стиску аж до руйнування (див. суцільну лінію на рис. 1), у формі дробово-лінійної функції вигляду [27; 28]

$$\sigma_b = \frac{R_b(\varepsilon_b/\varepsilon_{bR})}{(1-\nu_{bR})(\varepsilon_b/\varepsilon_{bR}) + \nu_{bR}} = \frac{R_b\eta_\varepsilon}{(1-\nu_{bR})\eta_\varepsilon + \nu_{bR}}, \quad (1)$$

де $\eta_\varepsilon = \varepsilon_b/\varepsilon_{bR}$ – рівень відносних деформацій у бетоні; решта позначень проілюстровані на рис. 1.

При математичному моделюванні залежності $\bar{\sigma}_b \sim \varepsilon_b$, що описує роботу бетону за «жорсткого» режиму короткочасного осьового стиску до руйнування, керувались її відповідністю таким базованим на сучасних уявленнях про природу міцності й деформування та впливаючим із сутності фізичних і механічних процесів у бетоні [13; 14; 26; 29; 30; 31] критеріям (див. пунктирну лінію на рис. 1):

– окреслення розрахункової діаграми деформування, побудованої з використанням прийнятої апроксимуючої функції, подібне до форми фактичної кривої стиску, одержаної дослідним шляхом;

– застосована функція визначена й неперервна на всьому діапазоні деформування, ліва границя якого знаходиться в початку координат;

– вона невід'ємна на цьому замкненому проміжку та звертається в нуль лише у вихідній точці, тобто має в початку координат строгий мінімум;

– прийнята функція, не маючи вертикальних асимптот на всьому інтервалі роботи матеріалу, монотонно зростає й так само монотонно спадає відповідно на висхідній і низхідній ділянках зазначеної області;

- її перша похідна звертається в нуль у точці якісної зміни напрямку кривої стиску, тобто апроксимуюча функція має строгий максимум;
- при зростанні відносної деформації напруження асимптотично наближаються до нуля в правій частині зони деформування;
- аналітична залежність вирізняється порівняльною простотою запису, що дозволяє без особливих труднощів знаходити її обернену функцію, а також однаково легко виражати параметри нелінійності роботи бетону як через напруження, так і через відносні деформації на будь-якій стадії навантажування;
- вона зручна для математичних операцій (інтегрування, диференціювання, розкладання в ряди і т. ін.);
- апроксимуюча функція містить строгі параметри фізичної нелінійності та передбачає можливість простого трансформування діаграми деформування бетону при врахуванні різних додаткових чинників (характеру, швидкості та тривалості дії навантаження та ін.).

Усім вище переліченим вимогам до аналітичної залежності між напруженнями й відносними деформаціями бетону за «жорсткого» режиму короткочасного осьового стиску до руйнування в математичній формі $\bar{\sigma}_b = f(\varepsilon_b)$ найбільшою мірою відповідає дробова функція вигляду [32]

$$\bar{\sigma}_b = \frac{A\varepsilon_b}{1 + B\varepsilon_b^C}, \quad (2)$$

де A, B, C – постійні коефіцієнти, що характеризують матеріал та визначаються з виконання таких граничних умов:

- 1) за певної відносної деформації $\varepsilon_b = \bar{\varepsilon}_{bR}$ напруження в бетоні досягає максимального значення $\bar{\sigma}_b = \bar{R}_b$;
- 2) перша похідна $d\bar{\sigma}_b/d\varepsilon_b$, що у графічній інтерпретації являє собою тангенс кута нахилу дотичної до кривої $\bar{\sigma}_b \sim \varepsilon_b$, при $\varepsilon_b = 0$ дорівнює початковому модулю пружності бетону E_{b0} ;
- 3) перша похідна $d\bar{\sigma}_b/d\varepsilon_b$ при $\varepsilon_b = \bar{\varepsilon}_{bR}$ звертається в нуль.

У загальному випадку при апроксимуванні діаграми деформування бетону будь-якою іншою функцією з більшою кількістю постійних коефіцієнтів, наприклад – чотирьох, ще одним вузлом інтерполяції може бути прийнята точка з координатами ($\varepsilon_b = \bar{\varepsilon}_{bu}; \bar{\sigma}_b = \bar{R}_{bu}$), де має виконуватись додаткова четверта гранична умова $d^2\bar{\sigma}_b/d\varepsilon_b^2|_{\varepsilon_b = \bar{\varepsilon}_{bu}} = 0$, що свідчить про перегин кривої $\bar{\sigma}_b \sim \varepsilon_b$ у зафіксованій точці.

Розкриття 1-ої граничної умови дає такий результат:

$$\bar{R}_b = \frac{A\bar{\varepsilon}_{bR}}{1 + B\bar{\varepsilon}_{bR}^C} \Rightarrow A\bar{\varepsilon}_{bR} = \bar{R}_b(1 + B\bar{\varepsilon}_{bR}^C) \Rightarrow A = \frac{\bar{R}_b(1 + B\bar{\varepsilon}_{bR}^C)}{\bar{\varepsilon}_{bR}}. \quad (3)$$

Продиференціювавши формулу (2) по ε_b , будемо мати

$$\frac{d\bar{\sigma}_b}{d\varepsilon_b} = \frac{A}{1 + B\varepsilon_b^C} - \frac{AB\varepsilon_b^C C}{(1 + B\varepsilon_b^C)^2} = \frac{A(1 + B\varepsilon_b^C - B\varepsilon_b^C C)}{(1 + B\varepsilon_b^C)^2}. \quad (4)$$

З урахуванням (4) реалізація 2-ої та 3-ої граничних умов призводить до виразів відповідно

$$E_{b0} = \left. \frac{d\bar{\sigma}_b}{d\varepsilon_b} \right|_{\varepsilon_b=0} = A; \tag{5}$$

$$\left. \frac{d\bar{\sigma}_b}{d\varepsilon_b} \right|_{\varepsilon_b=\bar{\varepsilon}_{bR}} = \frac{A(1 + B\varepsilon_{bR}^C - B\varepsilon_{bR}^C C)}{(1 + B\varepsilon_{bR}^C)^2} = 0 \Rightarrow B\varepsilon_{bR}^C = \frac{1}{C-1}. \tag{6}$$

У результаті сумісного розв’язання рівнянь (3), (5) і (6) відносно постійних коефіцієнтів A , B і C одержимо формули для визначення цих параметрів, а саме:

$$A = E_{b0}; \quad B = \frac{E_{b0}\bar{\varepsilon}_{bR} - \bar{R}_b}{\bar{R}_b \bar{\varepsilon}_{bR}^{E_{b0}\bar{\varepsilon}_{bR}/(E_{b0}\bar{\varepsilon}_{bR} - \bar{R}_b)}}; \quad C = \frac{E_{b0}\bar{\varepsilon}_{bR}}{E_{b0}\bar{\varepsilon}_{bR} - \bar{R}_b}. \tag{7}$$

Беручи до уваги вирази (7), математична залежність (2), що описує діаграму деформування бетону в «жорсткому» режимі короткочасного осьового стиску до руйнування для усього робочого діапазону від початку прикладання навантаження до максимального напруження $\bar{\sigma}_b = \bar{R}_b$ при відносній деформації $\varepsilon_b = \bar{\varepsilon}_{bR}$ і подальшому поступовому зниженні напруження до критичної міцності $\bar{\sigma}_b = \bar{R}_{bu}$, який відповідає гранична відносна деформація $\varepsilon_b = \bar{\varepsilon}_{bu}$, запишеться так:

$$\bar{\sigma}_b = \frac{E_{b0}\varepsilon_b}{1 + \frac{E_{b0}\bar{\varepsilon}_{bR} - \bar{R}_b}{\bar{R}_b \bar{\varepsilon}_{bR}^{E_{b0}\bar{\varepsilon}_{bR}/(E_{b0}\bar{\varepsilon}_{bR} - \bar{R}_b)}} \varepsilon_b^{E_{b0}\bar{\varepsilon}_{bR}/(E_{b0}\bar{\varepsilon}_{bR} - \bar{R}_b)}}. \tag{8}$$

Якщо скористатись відомим співвідношенням проф. В. І. Мурашева $R_b = E'_{bR}\varepsilon_{bR} = \nu_{bR}E_{b0}\varepsilon_{bR}$ [33] і позначити $\bar{\eta}_\varepsilon = \varepsilon_b/\bar{\varepsilon}_{bR}$, то математична модель деформування бетону (8) набуває більш зручної для практичного застосування форми, а саме:

$$\bar{\sigma}_b = \frac{R_b(\varepsilon_b/\bar{\varepsilon}_{bR})}{\nu_{bR} + (1 - \nu_{bR})(\varepsilon_b/\bar{\varepsilon}_{bR})^{1/(1-\nu_{bR})}} = \frac{R_b\bar{\eta}_\varepsilon}{\nu_{bR} + (1 - \nu_{bR})\bar{\eta}_\varepsilon^{1/(1-\nu_{bR})}}. \tag{9}$$

Стосовно отриманої залежності (9) відзначимо таке:

– вона задовольняє всім граничним умовам, засвідчуючи про відповідність усталеним і вищесформульованим уявленням про міцність і деформування бетону, тобто при $\varepsilon_b=0$, $\varepsilon_b = \bar{\varepsilon}_{bu}$ і $\varepsilon_b \rightarrow \infty$ маємо відповідно $\bar{\sigma}_b=0$, $\bar{\sigma}_b = \bar{R}_b$ і $\bar{\sigma}_b \rightarrow 0$;

– вона коректно ілюструє роботу бетону як нелінійно деформівного матеріалу, що може перебувати в стані від ідеально пластичного до ідеально пружного, тобто при $\nu_{bR} \rightarrow 0$ і $\nu_{bR} \rightarrow 1$ маємо відповідно $\bar{\sigma}_b = \bar{R}_b$ і $\bar{\sigma}_b = E_{b0}\varepsilon_b$.

Як бачимо, формула (9), на відміну від багатьох інших подібних виразів (див. таблицю), відповідає сучасним уявленням про природу міцності й деформування бетону, не містить жодних емпіричних коефіцієнтів, які здебільшого не мають ніякого фізичного змісту та характеризують лише певний бетон у конкретних умовах його випробування. Присутність же строго зафіксованих міцнісних і деформативних характеристик, які одночасно є діаграмними параметрами та характеризують нелінійність деформування бетону, робить досить просто структурно оформлену залежність (9) гнучкою щодо дослідних точок і однаково придатною як для наукових досліджень, так і для інженерних розрахунків.

Апроксимативні властивості залежності (9) аналізували за даними випробувань циліндричних зразків (усього 27 штук) із важкого бетону (на звичайних заповнювачах) різної міцності ($R_b=15,72\dots110,01$ МПа) і віку (31...56 діб) короткочасним осьовим стиском із постійною швидкістю приросту деформацій $V_\varepsilon = d\varepsilon_b/dt=(1,5\pm0,7)\times 10^{-5} c^{-1}$ до руйнування

[34]. Статистичні характеристики варіаційних рядів нормального розподілу співвідношень $\sigma_b^{exp} / \sigma_b^{th}$ визначені за [35] та свідчать про задовільну збіжність дослідних напружень σ_b^{exp} і відповідних їм розрахункових значень σ_b^{th} , обчислених за отриманою формулою (9) (коефіцієнт варіації змінюється у межах $\pm(4,49...9,17)\%$, а показник точності $P = \pm(1,16...3,74)\% < 5\%$).

Таблиця

*Закономірності зв'язку між напруженнями
й деформаціями центрально стисненого бетону*

№ з/п	Автори	Рік	Вигляд рівняння зв'язку $\sigma_b = f(\varepsilon_b)$
1	2	3	4
I. Квадратичні, кубічні, степеневі багаточленні й степенєво-квадратичні функції			
1	Gerstner F. J. [36]	1831	$\sigma_b = \alpha \varepsilon_b - \beta \varepsilon_b^2, \text{ де } \alpha = E_{b0};$ $\beta = (E_{b0} - E'_{bR}) / (2\varepsilon_{bR}) = [1 - E'_{bR} / E_{b0}] (E_{b0} / 2\varepsilon_{bR});$ $E_{b0} = \operatorname{tg} \alpha_0 = \lim_{\substack{\sigma_b \rightarrow 0 \\ \varepsilon_b \rightarrow 0}} (\sigma_b / \varepsilon_b) - \text{модуль пружності бетону};$ $E'_{bR} = R_b / \varepsilon_{bR} - \text{граничний січний модуль пружнопластичності бетону}$
	Залігер Р. [37]	1931	
	Столяров Я. В. [38]	1941	
2	Hognestad E. [39]	1951	$\sigma_b = R_b (2\eta_\varepsilon - \eta_\varepsilon^2) - \text{так звана парабола Ріттера}$
	Hognestad E., Hanson N. W., McHenry D. [40]	1955	
	Rüsch H. [41]	1960	
3	Лолейт А. Ф. [42]	1933	$\sigma_b = E_{b0} \varepsilon_b - A_3 \varepsilon_b^3$
4	Schüle F. [43]	1909	$\sigma_b = \alpha \varepsilon_b^m - \beta \varepsilon_b^2$
5	Sturman G., Shah S., Winter G. [44]	1965	$\sigma_b = A \varepsilon_b + B \varepsilon_b^n$
II. Поліноміальні функції			
6	Young L. E. [45]	1960	$\sigma_b = A \cdot \eta_\varepsilon - B \cdot \eta_\varepsilon^2 + C \cdot \eta_\varepsilon^3,$ $\text{де } A = E_{b0}; B = 2E_{b0} \varepsilon_{bR} - 3R_b; C = E_{b0} \varepsilon_{bR} - 2R_b$
7	Saenz L. P. [46]	1964	$\sigma_b = R_b \sum_{k=1}^4 A_k \eta_\varepsilon^k$
	Гуца Ю. П., Лемиш Ю. П. [30; 47]	1985	
8	Байков В. М., Горбатов С. В., Димитров З. А. [25]	1977	$\sigma_b = R_b \sum_{k=1}^5 A_k \eta_\varepsilon^k$
	Бамбура А. М., Бачинський В. Я. [48; 49]	1980	
		1987	
III. Тригонометричні функції			
9	Young L. E. [45]	1960	$\sigma_b = R_b \sin[(\pi/2) \cdot \eta_\varepsilon]$
	Everard N. J. [50]	1967	
10	Hsu C. T., Mirza M. S. [51]	1969	$\sigma_b = R_b \left[\sin(\pi \eta_\varepsilon / 2) + 0,2 \eta_\varepsilon (e^{1-\eta_\varepsilon} - 1) \right]$
11	Остапенко А. Ф. [52]	1992	$\sigma_b = A \cdot \sin(F \cdot \varepsilon_b) + B \cdot \cos(F \cdot \varepsilon_b) + C \cdot \varepsilon_b + D$
IV. Дробові функції			
12	Desayi P., Krishnan S. [53]	1964	$\sigma_b = R_b \left[A \eta_\varepsilon / (1 + B \eta_\varepsilon^2) \right]$
13	Saenz L. P. [54]	1964	$\sigma_b = R_b \frac{A \eta_\varepsilon}{1 + B \eta_\varepsilon + C \eta_\varepsilon^2}$
14	Sargin M., Handa V. K. [55]; Sargin M. [56]	1969 1971	$\sigma_b = R_b \frac{A \eta_\varepsilon + (D-1) \eta_\varepsilon^2}{1 + (A-2) \eta_\varepsilon + D \eta_\varepsilon^2}$

Закінчення табл.

1	2	3	4
15	Wang P.-T., Shah S. P., Naaman A. E. [57] Ahmad S. H., Shah S. P. [58]	1978 1978	$\sigma_b = R_b \frac{A\eta_\varepsilon + B\eta_\varepsilon^2}{1 + C\eta_\varepsilon + D\eta_\varepsilon^2}$
16	Popovics S. [59; 60]	1970, 1973	$\sigma_b = R_b \frac{n\eta_\varepsilon}{n-1+\eta_\varepsilon^n}$, де $n_{concretes} = 0,4 \times 10^{-3} R_b + 1$; $n_{cement\ mortars} = 0,15 \times 10^{-3} R_b + 1,5$; $n_{cement\ pastes} = 12$; тут R_b вимірюється у <i>psi=фунт/кв. дюйм</i> ($kPa=psi \times 6,89476$)

Примітка. У вищенаведених формулах $\eta_\varepsilon = \varepsilon_b / \varepsilon_{bR}$ – відносний рівень деформацій; $\alpha, \beta, m, n, A, A_3, A_k, B, C, D, F$ – сталі коефіцієнти матеріалу, які переважно визначаються дослідним шляхом і не мають значення фізичних констант; решта позначень – такі ж самі, що й на рис. 1.

Висновки. 1) Базуючись на сучасних уявленнях про природу міцності й деформування нелінійно деформованих матеріалів та з використанням параметрів, що мають точний і зрозумілий фізичний зміст, запропоновано позбавлене зайвого емпіризму, зручне для користування та математичного опрацювання рівняння зв'язку (тобто апроксимуюча функція діаграми деформування), що відображає залежність між напруженнями й деформаціями бетону за «жорсткого» силового режиму осьового стиску.

2) Порівняльний аналіз результатів розрахунку напружень із відповідними експериментальними даними свідчить про достатню обґрунтованість і коректність викладеного методичного підходу до графічної побудови та математичного апроксимування зазначеної діаграми деформування.

3) Перспективним вважаємо одночасне застосування запропонованої діаграми жорсткорезимного однорідного деформування разом із відомою діаграмою для умов «м'якого» силового режиму однорідного стиску для отримання стабільної й вільної від зайвих чинників впливу діаграми стану бетону як основного інструмента деформаційної моделі перерізів. Таким чином як в наукових дослідженнях, так і в інженерному проектуванні з'явиться можливість з єдиних позицій не лише розраховувати зігнуті залізобетонні елементи (конструкції) за усіма групами граничних станів, але й більш повно враховувати особливості роботи конструкційних матеріалів (зокрема бетону) і оцінювати неоднорідний напружено-деформований стан перерізів елементів (конструкцій) на будь-якій стадії навантажування аж до руйнування.

Список використаних джерел

1. Веретенников В. И. О влиянии размеров и формы сечения элементов на диаграмму деформирования бетона при внецентренном сжатии / В. И. Веретенников, А. А. Бармотин // Бетон и железобетон. – 2000. – № 5. – С. 27–30.
2. Холмянский М. М. К механизму деформирования и разрушения бетона при сжатии и растяжении / М. М. Холмянский // Бетон и железобетон. – 1989. – № 9. – С. 25–26.
3. Гвоздев А. А. О полной диаграмме сжатия бетона, армированного поперечными сетками / А. А., Гвоздев А. В. Шубик, Н. Г. Матков // Бетон и железобетон. – 1988. – № 4. – С. 37–39.
4. Роговой С. И. Нелинейное деформирование в теории железобетона и расчёт прочности нормальных сечений : монография / С. И. Роговой. – Полтава, 2002. – 183 с.
5. Таль К. Э. О деформативности бетона при сжатии / К. Э. Таль // Исследование прочности, пластичности и ползучести строительных материалов : сб. трудов ЦНИПС. – М. : Госстройиздат, 1955. – С. 202–207.
6. Мурашкин Г. В. К определению диаграммы « σ – ε » бетона с ниспадающим участком. Железобетонные конструкции / Г. В. Мурашкин, С. А. Бутенко, И. Д. Яворский // Экспериментально-теоретические исследования. – 1984. – С. 20–25.
7. Бачинский В. Я. Связь между напряжениями и деформациями бетона при кратковременном неоднородном сжатии / В. Я. Бачинский, А. Н. Бамбура, С. С. Ватагин // Бетон и железобетон. – 1984. – № 10. – С. 18–19.

8. Гузеев Е. А. Исследование силовых и энергетических параметров разрушения бетона по полностью равновесным диаграммам его деформирования / Е. А. Гузеев, В. И. Шевченко, Л. А. Сейланов // Изв. вузов. Сер. Строительство и архитектура. – 1986. – № 8. – С. 1–5.
9. Дегтерев В. В. Деформативность бетона сжатой зоны в зависимости от её формы и характера армирования / В. В. Дегтерев // Бетон и железобетон. – 1986. – № 8. – С. 42–43.
10. Безухов Н. И. Теория упругости и пластичности / Н. И. Безухов. – М. : Госиздат техн.-теоретич. лит-ры, 1953. – 420 с.
11. ГОСТ 24452-80. Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона. – [Дата введения 1982-01-01]. – Изд. офиц. – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 18 с.
12. ДСТУ Б В.2.7-217:2009. Бетони. Методи визначення призмочної міцності, модуля пружності і коефіцієнта Пуассона. – [Чинний з 2010-09-01]. – Вид. офіц. – К. : Мінрегіонбуд України, 2010. – 16 с.
13. Бамбура А. М. Експериментальні основи прикладної деформаційної теорії залізобетону : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01 / А. М. Бамбура. – Х., 2006. – 39 с.
14. Железобетонные конструкции. Основы теории, расчёта и конструирования : учеб. пособие для студентов строительных специальностей / Н. П. Блещик, Д. Д. Жуков, Д. Н. Лазовский и др. ; под ред. Т. М. Пецольда и В. В. Тура. – Брест : БГТУ, 2003. – 380 с.
15. Рюш Г. Исследование работы изгибаемых элементов с учётом упругопластических деформаций бетона : материалы международного совещания по расчёту строительных конструкций (Москва, декабрь, 1958 г.) / Г. Рюш. – М. : Госстройиздат, 1961. – С. 183–199.
16. Бич П. М. Экспериментально-теоретические исследования закритических характеристик бетона / П. М. Бич // Бетон и железобетон. – 1987. – № 3. – С. 26–27.
17. Ивашенко Ю. А. Исследование процесса разрушения бетона при разных скоростях деформирования / Ю. А. Ивашенко, А. Д. Лобанов // Бетон и железобетон. – 1984. – № 11. – С. 14–15.
18. Красинский Н. П. К определению полной диаграммы сжатия бетона. / Н. П. Красинский // Совершенствование методов расчёта и исследование новых типов железобетонных конструкций. – Л., 1987. – С. 92–97.
19. Роговой С. И. К совершенствованию деформационной модели расчёта бетона и железобетона / С. И. Роговой, Е. Н. Клюка, Р. И. Пахомов // Ресурсозберігаючі технології в проектуванні, землевпорядкуванні та будівництві : вісник КНУ ім. Михайла Остроградського. – Кременчук : ПП Щербатих О. В., 2011. – Вип. 1/2011 (66), ч. 1. – С. 108–114.
20. Узун И. А. Расчётные модели железобетонных элементов : монография / И. А. Узун. – Одесса : ИМК «Город мастеров», 2000. – 248 с.
21. Яшин А. В. Некоторые данные о деформациях и структурных изменениях бетона при осевом сжатии / А. В. Яшин // Новое о прочности железобетона / под ред. К. В. Михайлова. – М. : Стройиздат, 1977. – С. 17–30.
22. Бондаренко В. М. Расчётные модели силового сопротивления железобетона : монография / В. М. Бондаренко, В. И. Колчунов. – М. : Изд-во «АСВ», 2004. – 471 с.
23. Голишев О. Б. Курс лекцій з основ розрахунку будівельних конструкцій і з опору залізобетону / О. Б. Голишев, А. М. Бамбура. – К. : Логос, 2004. – 339 с.
24. Байков В. Н. Особенности разрушения бетона, обусловленные его ортотропным деформированием / В. Н. Байков // Бетон и железобетон. – 1988. – № 12. – С. 13–15.
25. Байков В. Н. Построение зависимости между напряжениями и деформациями сжатого бетона по системе нормируемых показателей / В. Н. Байков, С. В. Горбатов, З. А. Димитров // Изв. вузов. Сер. Строительство и архитектура. – 1977. – № 6. – С. 15–18.
26. Бондаренко В. М. Инженерные методы нелинейной теории железобетона / В. М. Бондаренко, С. В. Бондаренко. – М. : Стройиздат, 1982. – 287 с.
27. Бабищ Є. М. До питання побудови діаграми деформування бетону та визначення коефіцієнта повноти епюри напружень / Є. М. Бабищ, Ю. О. Крусь // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. праць. – Рівне : РДТУ, 2001. – Вип. 6. – С. 94–104.
28. Крусь Ю. А. К определению коэффициента полноты эпюры сжимающих напряжений в бетоне / Ю. А. Крусь // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій : зб. наук. праць Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України. – 2007. – Вип. 7. – С. 35–46.

29. Гвоздев А. А. К вопросу о поведении железобетонных конструкций в стадии, близкой к разрушению / А. А. Гвоздев, В. Н. Байков // *Бетон и железобетон*. – 1977. – № 9. – С. 22–24.
30. Гуца Ю. П. К совершенствования расчёта деформаций железобетонных элементов / Ю. П. Гуца, Л. Л. Лемыш // *Напряжённно-деформированное состояние бетонных и железобетонных конструкций* : сб. науч. трудов. – М. : НИИЖБ, – 1986. – С. 26–39.
31. Карпенко Н. И. Исходные и трансформированные диаграммы деформирования бетона и арматуры / Н. И. Карпенко, Т. А. Мухамедиев, А. Н. Петров // *Напряжённно-деформированное состояние бетонных и железобетонных конструкций* : сб. науч. трудов. – М. : НИИЖБ, 1986. – С. 7–25.
32. Бронштейн И. Н. Справочник по математике (для инженеров и учащихся втузов) / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М. : Гос. изд. техн.-теор. лит.-ры, 1956. – 608 с.
33. Мурашёв В. И. Трещиноустойчивость, жёсткость и прочность железобетона / В. И. Мурашёв. – М. : Проммашстройиздат, 1950. – 184 с.
34. Hsu L. S. Behavior of High Strength Concrete and Slender Reinforced Concrete Columns With and Without Steel Fibers : A Dissertation...PhD / Hsu L. S. ; Faculty of New Jersey Institute of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering. – October, 1992. – 266 p.
35. Леонтьев Н. Л. Техника статистических вычислений / Н. Л. Леонтьев. – М. : Лесная промышленность, 1966. – 352 с.
36. Gerstner F. J. R. Handbuch der Mechanik. Band 1 : Mechanik fester Körper / Gerstner F. J. R. – Prag, 1831. – 663 p.
37. Залигер Р. Железобетон: его расчёт и проектирование / Залигер Р. ; пер. с немец. Рейнберга Л. В. и Чечулина Н. Н. ; под ред. проф. Каменцева П. Я. 5-е изд. – М.-Л. : ГНТИ, 1931. – 671 с.
38. Столяров Я. В. Введение в теорию железобетона / Р. Залигер. – М.-Л. : Госстройиздат, 1941. – 447 с.
39. Hognestad E. A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members / Hognestad E. // *University of Illinois Engineering Experiment Station. Bulletin Series No. 399*. – 1951. – 128 p.
40. Hognestad E. Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design / Hognestad E., Hanson N. W., McHenry D. // *ACI Journal Proceedings*. – December 1955. – Vol. 52. – No 12. – Pp. 455–479.
41. Rüsч H. Research Toward a General Flexural Theory for Structural Concrete / Rüsч H. // *ACI Journal Proceedings*. – July 1960. – Vol. 57, No. 1. – Pp. 1–28.
42. Лолейт А. Ф. Инструкция для подбора сечений железобетонных элементов по критическим усилиям / А. Ф. Лолейт. – М. : ВНИИТОБ, 1933. – 82 с.
43. Schüle F. Untersuchung des Einflusses der Druckspannungen in Eisenbetonbalken und der Breite der Druckplatten. Längenänderungen von Mörtel und Beton beim Erhärten: Mitteilungen der Materialprüfungs-Anstalt am Schweiz / Polytechnikum in Zürich. Zürich : Selbstverl, 1909. – 86 s.
44. Sturman G. Effect of Flexural Strain Gradients on Microcracking and Stress-Strain Behaviour of Concrete / Sturman G., Shah S., Winter G. // *ACI Journal Proceedings*. – 1965. – Vol. 62, No. 3. – Pp. 805–822.
45. Young L. E. Simplifying Ultimate Flexural Theory by Minimizing the Moment of the Stress Block / Young L. E. // *ACI Journal Proceedings*. – November 1960. – Vol. 57, No. 5. – Pp. 549–556.
46. Saenz L. P. Discussion of Paper «Equation for the Stress-Strain Curve» by P. Desayi and S. Krishnan / Saenz L. P. // *ACI Journal Proceedings*. – September 1964. – Vol. 61, No. 9. – Pp. 1229–1235.
47. Гуца Ю. П. Расчёт деформаций конструкций на всех стадиях при кратковременном и длительном нагружениях / Ю. П. Гуца, Л. Л. Лемыш // *Бетон и железобетон*. – 1985. – № 11. – С. 13–16.
48. Бамбура А. Н. Диаграмма «напряжения-деформация» для бетона при центральном сжатии / А. Н. Бамбура // *Вопросы прочности, деформативности и трещиностойкости железобетона* : сб. науч. трудов. – Ростов-на-Дону : РИСИ, 1980. – С. 19–22.
49. Методические рекомендации по уточненному расчету железобетонных элементов с учетом полной диаграммы сжатия бетона / А. Н. Бамбура, В. Я. Бачинский, Н. В. Журавлева, И. Н. Пешкова. – К. : НИИСК Госстроя СССР, 1987. – 25 с.
50. Everard N. J. Ultimate Strength Design-Serviceability Investigation. A Unified Method for Reinforced Concrete Bridge Design / Everard N. J. // *ACI Journal Proceedings. Special Publication SP-23*. – April 1967. – Pp. 10–19.

51. Hsu C. T. Generalized Moment-Curvature Relationships for Singly and Doubly Reinforced Beams / Hsu C. T., Mirza M. S. // McGill University. Structural Concrete. Series No. 24. – 1969. – Pp. 1–48.
52. Остапенко А. Ф. Универсальная зависимость для диаграмм деформирования бетона, арматуры и железобетонных конструкций / А. Ф. Остапенко // Бетон и железобетон. – 1992. – № 7. – С. 23–24.
53. Desayi P., Krishnan S. Equation for the Stress-Strain Curve of Concrete / Desayi P., Krishnan S. // ACI Journal Proceedings. – March 1964. – Vol. 61, No. 3. – Pp. 345–350.
54. Saenz L. P. Discussion of Paper «Equation for the Stress-Strain Curve» by P. Desayi and S. Krishnan / L. P. Saenz // ACI Journal Proceedings. – September 1964. – Vol. 61, No. 9. – Pp. 1229–1235.
55. Sargin M. A General Formulation for the Stress-Strain Properties of Concrete : SM Report No. 3 / Sargin M., Handa V. K. // Solid Mechanics Division, University of Waterloo (Waterloo, Ontario, Canada). – May 1969. – 28 p.
56. Sargin M. Stress-Strain Relationships for Concrete and the Analysis of Structural Concrete Sections : SM Study No. 4 / Sargin M. // Solid Mechanics Division, University of Waterloo (Waterloo, Ontario, Canada), 1971. – 167 p.
57. Wang P.-T. Stress-Strain Curves of Normal and Lightweight Concrete in Compression / Wang P.-T., Shah S. P., Naaman A. E. // ACI Journal Proceedings. – November 1978. – Vol. 75, No 11. – Pp. 603–611.
58. Ahmad S. H. Complete Stress-Strain Curve of Concrete and Nonlinear Design. Proceedings CSCE-ASCE-ACI-CEB : International Symposium on Nonlinear Design of Concrete Structures / Ahmad S. H., Shah S. P. // University of Waterloo (Waterloo, Ontario, Canada). August 1979. – Pp. 61–81.
59. Popovics S. Preview of Stress-Strain Relationship for Concrete / Popovics S. // ACI Journal Proceedings. – March 1970. – Vol. 67, No. 3. – Pp. 243–248.
60. Popovics S. A Numerical Approach to the Complete Stress-Strain Curves for Concrete / Popovics S. // Cement and Concrete Research. – 1973. – Vol. 3, No. 5. – Pp. 583–599.

References

- Veretennikov, V. I., & Barmotin, A. A. (2000). O vliianii razmerov i formy secheniia elementov na diagrammu deformirovaniia betona pri vnetcentrennom szhatii [On influence of the size and shape of the cross-section of elements on the diagram of concrete deforming at eccentric compression]. *Beton i zhelezobeton – Concrete and reinforced concrete*, (5), 27–30.
- Kholmianskii, M. M. (1989) K mekhanizmu deformirovaniia i razrusheniia betona pri szhatii i rastiazhenii [To the mechanism of deforming and fracture of concrete at compression and tension]. *Beton i zhelezobeton – Concrete and reinforced concrete*, (9), 25–26.
- Gvozdev, A.A., Shubik, A.V., & Matkov, N.G. (1988). O polnoi diagramme szhatiia betona, armirovannogo poperechnymi setkami [On the complete diagram compression of concrete reinforced by transverse grids]. *Beton i zhelezobeton – Concrete and reinforced concrete*, (4), 37–39.
- Rogovoi, S.I. (2002). *Nelineinoe deformirovanie v teorii zhelezobetona i raschet prochnosti normalnykh sechenii* [Nonlinear deforming in the theory of reinforced concrete and calculation of the strength of normal cross-sections].
- Tal, K.E. (1955). O deformativnosti betona pri szhatii [On the deformativity of concrete at compression]. *Issledovanie prochnosti, plastichnosti i polzuchesti stroitelnykh materialov – Study of the strength, plasticity and creep of building materials* (pp. 202–207). Gosstroizdat.
- Murashkin, G.V., Butenko, S.A., & Iavorskii, I.D. (1984). K opredeleniiu diagrammy « σ – ε » betona s nispadaushchim uchastkom. Zhelezobetonnye konstruksii. [To the determination of the « σ – ε » diagram of concrete with a falling branch. Reinforced concrete structures]. *Ekspierimentalno-teoreticheskie issledovaniia – Experimental and theoretical studies* (pp. 20–25).
- Bachinskii, V.Ia., Bambura, A.N., & Vatagin, S.S. (1984). Sviaz mezhdu napriazheniiami i deformatciiami betona pri kratkovremennom neodnorodnom szhatii [Connection between stresses and strains of concrete under short-term inhomogeneous compression]. *Beton i zhelezobeton – Concrete and reinforced concrete*, (10), 18–19.
- Guzeev, E.A., Shevchenko, V.I., & Seilanov, L.A. (1986). Issledovanie silovykh i energeticheskikh parametrov razrusheniia betona po polnostiu ravnovesnym diagrammam ego deformirovaniia. *Izv. vuzov. Ser. Stroitelstvo i arkhitektura – Izvestiya vuzov. Ser. Construction and architecture*, (8), 1–5.

9. Degterev, V.V. (1986). Deformativnost betona szhatoi zony v zavisimosti ot ee formy i kharaktera armirovaniia [Deformativity of concrete compressed zone depending on its shape and the nature of reinforcement]. *Beton i zhelezobeton*, (8), 42–43.

10. Bezukhov, N.I. (1953). *Teoriia uprugosti i plastichnosti [Theory of elasticity and plasticity]*. Gosudarstvennoe izdatelstvo tekhniko-teoreticheskoi literatury.

11. Nauchno-issledovatel'skii institut betona i zhelezobetona (NIIZhB) Gosstroia SSSR. (1988). *Betony. Metody opredeleniia prizmennoi prochnosti, modul'ia uprugosti i koeffitsienta Puassona [Concretes. Methods for determining the prism strength, modulus of elasticity and the coefficient of Poisson]*. (GOST 24452-80). Izdatel'stvo standartov.

12. Derzhavne pidpriemstvo «Derzhavnyi naukovo-doslidnyi instytut budivelnykh konstrukttsii» (DP NDIBK). (2010). *Betony. Metody vyznachennia pryzmovoï mitsnosti, modul'ia pruzhnosti i koeffitsiienta Puassona [Concretes. Methods for determining the prism strength, modulus of elasticity and the coefficient of Poisson]* (DSTU B V.2.7-217:2009). Minrehionbud Ukrainy.

13. Bambura, A.M. (2006). *Eksperymentalni osnovy prykladnoi deformatsiinoi teorii zalizobetonu [Experimental bases of applied deformation theory of reinforced concrete]*. [Doctor dissertation abstract, Kharkivskiy derzhavnyi tekhnichnyi universytet budivnytstva ta arkhitektury].

14. Bleshchik, R.P., Zhukov, D.D., Lazovskii, D.N., Kazachek, A.A., Kondratchik, T.M., Petcold, T.M. ... & Shubert, I.M. (2003). *Zhelezobetonnye konstrukttsii. Osnovy teorii, rascheta i konstruirovaniia [Reinforced concrete structures. Bases of theory, calculation and design]*. (T. M. Petcold, & V. V. Tur, Ed.). Brestskii gosudarstvennyi tekhnicheskii univesitet.

15. Riush, G. (1961). *Issledovanie raboty izgibaemykh elementov s uchetom uprugoplasticheskikh deformatsii betona [Investigation of the work of bendable elements, taking into account the elastoplastic deformations of concrete]*. *Materialy mezhdunarodnogo soveshchaniia po raschetu stroitelnykh konstrukttsii – Study of the work of bending elements taking into account elastic-plastic deformations of concrete: materials of the international meeting on the calculation of building structures* (pp. 183–199). Gosstroizdat.

16. Bich, P.M. (1987). *Eksperimentalno-teoreticheskie issledovaniia zakriticheskikh kharakteristik betona [Experimental and theoretical investigations of the core characteristics of concrete]*. *Beton i zhelezobeton – Concrete and reinforced concrete*, (3), 26–27.

17. Ivashenko, Iu.A., & Lobanov, A.D. (1984). *Issledovanie protsessa razrusheniia betona pri raznykh skorostiakh deformirovaniia [Study of the destruction process of concrete at different deforming rates]*. *Beton i zhelezobeton – Concrete and reinforced concrete*, (11), 14–15.

18. Krasinskii, N.P. (1987). *K opredeleniiu polnoi diagrammy szhatiia betona [To determining of the full diagram of concrete compression]*. In *Sovershenstvovanie metodov rascheta i issledovanie novykh tipov zhelezobetonnykh konstrukttsii – Improvement of calculation methods and research of new types of reinforced concrete structures* (pp. 92–97).

19. Rogovoi, S.I., Kliuka, E.N., Pakhomov, R.I. (2011). *K sovershenstvovaniiu deformatsionnoi modeli rascheta betona i zhelezobetona [To the improvement of the deformational model for the calculation of concrete and reinforced concrete]*. *Resursozberigaiuchi tekhnologii v proektuvanni, zemlevporiadkuvanni ta budivnitctvi – Resource-saving technologies in design, land management and everyday life : Bulletin of KNU im. Mikhail Ostrogradsky*, 1/2011(66), 108–114.

20. Uzun, I.A. (2000). *Raschetnye modeli zhelezobetonnykh elementov [Calculation models of reinforced concrete elements]*. IMK «Gorod masterov».

21. Iashin, A.V. (1977). *Nekotorye dannye o deformatsiiax i strukturnykh izmeneniiax betona pri osevom szhatii [Some data on strains and structural changes of concrete at axial compression]*. In K. V. Mikhailov (Ed.), *Novoe o prochnosti zhelezobetona – New about the strength of reinforced concrete* (pp. 17–30). Stroizdat.

22. Bondarenko, V.M., & Kolchunov, V.I. (2004). *Raschetnye modeli silovogo soprotivleniia zhelezobetona [Calculation models of the force resistance of reinforced concrete]*. Izdatel'stvo «ASV».

23. Holyshev, O.B., & Bambura, A.M. (2004). *Kurs lektsii z osnov rozrakhunku budivelnykh konstrukttsii i z oporu zalizobetonu [Course of lectures on the bases of calculation of building structures and on the resistance of reinforced concrete]*. Lohos.

24. Baikov, V.N. (1988). Osobennosti razrusheniia betona, obuslovlennye ego ortotropnym deformirovaniem [Peculiarities of concrete fracture caused by its orthotropic deforming]. *Beton i zhelezobeton – Concrete and reinforced concrete*, (12), 13–15.
25. Baikov, V.N., Gorbatov, S.V., & Dimitrov, Z.A. (1977). Postroenie zavisimosti mezhdu napriazheniiami i deformatsiiami szhatogo betona po sisteme normiruemykh pokazatelei [Building of the relationship between stresses and strains of compressed concrete by the system of standardized indicators]. *Izv. vuzov. Ser. Stroitelstvo i arkhitektura – Izvestiya vuzov. Ser. Construction and architecture*, (6,) 15-18.
26. Bondarenko, V.M. & Bondarenko, S.V. (1982). *Inzhenerye metody nelineinoi teorii zhelezobetona [Engineering Methods of Nonlinear Theory of Reinforced Concrete]*. Stroiizdat.
27. Babych, Ye. M., & Krus, Yu. O. (2001). Do pytannia pobudovy diahramy deformuvannia betonu ta vyznachennia koefitsiienta povnoty epiury napruzhen [To the question of building of diagram of concrete deforming and determining of coefficient completeness epure of stresses]. *Resursoekonomni materialy, konstruksii, budivli ta sporudy – Resource-saving materials, structures, buildings and structures* (Vol. 6, pp. 94–104. RDTU.
28. Krus, Iu. A. (2007). K opredeleniiu koefitcianta polnoty epiury szhimaiushchikh napriazhenii v betone [To determining of coefficient completeness epure of compressive stresses in concrete]. *Mekhanika i fizyka ruinuvannia budivelnykh materialiv i konstruksii* (Vol. 7, pp. 35–46). Kameniar.
29. Gvozdev, A.A., & Baikov, V.N. (1977). K voprosu o povedenii zhelezobetonnykh konstruksii v stadii, blizkoi k razrusheniiu [To the question of the behavior of reinforced concrete structures in the stage close to destruction]. *Beton i zhelezobeton – Concrete and reinforced concrete*, (9), 22–24.
30. Gushcha, Iu.P., & Lemysh, L.L. (1986). K sovershenstvovaniia rascheta deformatsii zhelezobetonnykh elementov [To improving the calculation of strains of reinforced concrete elements]. *Napriazhenno-deformirovannoe sostoianie betonnykh i zhelezobetonnykh konstruksii – Stress-strain state of concrete and reinforced concrete structures* (pp. 26–39). NIIZhB.
31. Karpenko, N.I., Mukhamediev, T.A., & Petrov, A.N. (1986). Iskhodnye i transformirovannye diagrammy deformirovaniia betona i armatury [Initial and transformed diagrams of concrete and reinforcement deforming]. *Napriazhenno-deformirovannoe sostoianie betonnykh i zhelezobetonnykh konstruksii – Stress-strain state of concrete and reinforced concrete structures* (pp. 7–25). NIIZhB.
32. Bronshtein, I.N., & Semendiaev, K.A. (1956). *Spravochnik po matematike (dlia inzhenerov i uchashchikhsia vtuzov) [Handbook of Mathematics (for engineers and students of technical universities)]*. Gosudarstvennoe izdatelstvo tekhniko-teoreticheskoi literatury.
33. Murashev, V.I. (1950). *Treshchinoustoichivost, zhestkost i prochnost zhelezobetona [Crack sustainability, stiffness and strength of reinforced concrete]*. Prommashstroiiizdat.
34. Hsu, L.S. (1992). *Behavior of High Strength Concrete and Slender Reinforced Concrete Columns With and Without Steel Fibers* [PhD Dissertation, Faculty of New Jersey Institute of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering].
35. Leontev, N.L. (1966). *Tekhnika statisticheskikh vychislenii [Technique of statistical calculations]*. Lesnaia promyshlennost.
36. Gerstner, F.J.R. (1831). *Handbuch der Mechanik. Band 1: Mechanik fester Körper*.
37. Zaliger, R. (1931). *Zhelezobeton: ego raschet i proektirovanie [Reinforced concrete: its calculation and design]*. (5th ed.). (Reinberg, L. V., & Chechulin, N. N., Trans.; Kamentcev, P. Ia, Ed.). Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatelstvo.
38. Stoliarov, Ia.V. (1941). *Vvedenie v teoriuu zhelezobetona [Introduction to the theory of reinforced concrete]*. Gosstroiiizdat.
39. Hognestad, E.A (1951). *Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members*. University of Illinois Engineering Experiment Station, Bulletin Series No. 399.
40. Hognestad, E., Hanson, N.W., & McHenry D. (1955). Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design. *ACI Journal Proceedings*, 52(12), 455–479.
41. Rüsç, H. (1960). Research Toward a General Flexural Theory for Structural Concrete. *ACI Journal Proceedings*, 57(1), 1–28.
42. Loleit, A.F. (1933). *Instruktsiia dlia podbora sechenii zhelezobetonnykh elementov po kriticheskim usiliiam [Instructions for selecting cross-sections of reinforced concrete elements according to critical efforts]*. VNIITOB.

43. Schüle, F. (1909). *Untersuchung des Einflusses der Druckspannungen in Eisenbetonbalken und der Breite der Druckplatten. Längenänderungen von Mörtel und Beton beim Erhärten [Mitteilungen der Materialprüfungs-Anstalt am Schweiz, Polytechnikum in Zürich]*. Selbstverl.
44. Sturman, G., Shah, S., & Winter, G. (1965). Effect of Flexural Strain Gradients on Microcracking and Stress–Strain Behaviour of Concrete. *ACI Journal Proceedings*, 62(3), 805–822.
45. Young, L.E. (1960). Simplifying Ultimate Flexural Theory by Minimizing the Moment of the Stress Block. *ACI Journal Proceedings*, 57(5), 549–556.
46. Saenz, L.P. (1964). Discussion of Paper «Equation for the Stress-Strain Curve» by P. Desayi and S. Krishnan. *ACI Journal Proceedings*, 61(9), 1229–1235.
47. Gushcha, Iu.P., & Lemysh, L.L. (1985). Raschet deformatcii konstrukcii na vsehkh stadiiakh pri kratkovremennom i dlitelnom nagruzheniiakh [Calculation of structural deformations at all stages under short-term and long-term loadings]. *Beton i zhelezobeton – Concrete and reinforced concrete*, (1), 13–16.
48. Bambura, A.N. (1980). Diagramma «napriazheniia-deformatciia» dlia betona pri tcentralnom szhatii [«Stress-strain» diagram for concrete under central compression]. *Voprosy prochnosti, deformativnosti i treshchinostoikosti zhelezobetona – Issues of strength, deformability and crack resistance of reinforced concrete* (pp. 19–22). RISI.
49. Bambura, A.N., Bachinskii, V.Ia., Zhuravleva, N.V., & Peshkova, I.N. (1987). *Metodicheskie rekomendacii po utochnennomu raschetu zhelezobetonnykh elementov s uchetom polnoi diagrammy szhatiia betona [Methodical recommendations for the refined calculation of reinforced concrete elements, taking into account the complete diagram of concrete compression]*. NIISK Gosstroia SSSR.
50. Everard, N.J. (1967). Ultimate Strength Design–Serviceability Investigation. A Unified Method for Reinforced Concrete Bridge Design. *ACI Journal Proceedings*, Special Publication SP-23, 10–19.
51. Hsu, C.T., & Mirza, M.S. (1969). Generalized Moment–Curvature Relationships for Singly and Doubly Reinforced Beams. *Structural Concrete*, 24, 1–48.
52. Ostapenko, A.F. (1992). Universalnaia zavisimost dlia diagramm deformirovaniia betona, armatory i zhelezobetonnykh konstrukcii [Universal dependence for diagrams of concrete, reinforcement and reinforced concrete structures deforming]. *Beton i zhelezobeton – Concrete and reinforced concrete*, (7), 23–24.
53. Desayi, P., & Krishnan, S. (1964). Equation for the Stress-Strain Curve of Concrete. *ACI Journal Proceedings*, 61(3), 345–350.
54. Saenz, L.P. (1964). Discussion of Paper «Equation for the Stress-Strain Curve» by P. Desayi and S. Krishnan. *ACI Journal Proceedings*, 61(9), 1229–1235.
55. Sargin, M., & Handa, V.K. (1969). *A General Formulation for the Stress-Strain Properties of Concrete* [SM Report No. 3, Solid Mechanics Division, University of Waterloo (Waterloo, Ontario, Canada)].
56. Sargin, M. (1971). *Stress Strain Relationships for Concrete and the Analysis of Structural Concrete Sections* [SM Study No. 4, Solid Mechanics Division, University of Waterloo (Waterloo, Ontario, Canada)].
57. Wang, P.-T., Shah, S.P., & Naaman, A.E. (1978). Stress-Strain Curves of Normal and Lightweight Concrete in Compression. *ACI Journal Proceedings*, 75(11), 603–611.
58. Ahmad, S.H., & Shah, S.P. (1979). Complete Stress-Strain Curve of Concrete and Nonlinear Design. *Proceedings CSCE-ASCE-ACI-CEB: International Symposium on Nonlinear Design of Concrete Structures* (pp. 61–81). University of Waterloo (Waterloo, Ontario, Canada).
59. Popovics, S. (1970). Preview of Stress-Strain Relationship for Concrete. *ACI Journal Proceedings*, 67(3), 243–248.
60. Popovics, S. (1973). A Numerical Approach to the Complete Stress-Strain Curves for Concrete. *Cement and Concrete Research*, 3(5), 583–599.

Отримано 25.01.2022

UDC 691.327:539.383

Yurii Krus

PhD in Technical Sciences, Senior Research Fellow, Associate Professor
Associate Professor of the Department of Automobile Roads, Soil Bases and Foundations
National University of Water and Environmental Engineering (Rivne, Ukraine)
E-mail: alkrous@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5271-7765>

CONNECTION BETWEEN STRESSES AND STRAINS OF CONCRETE UNDER DIFFERENT FORCE MODES OF SHORT-TERM AXIAL COMPRESSION

Modern design of bended reinforced concrete constructions uses analytical methods of calculation involving deformative models, the main tool of which is the actual diagram of concrete state, which establishes the connection between its stresses σ_b and relative strains ε_b in compressed and tensile zones of the cross-section. Currently, there is no a unified methodics of establishing such a diagram, and researchers obtain it by indirect methods that differ from each other. That is why the graph-analytical building and mathematical description of the functional dependence of the diagram of concrete state based on clear and accurate physical representations we consider as an important and urgent problem.

The lack of a unified methodics for obtaining a diagram of concrete state cast doubt the reliability of the results of the calculations carried out, does not allow to compare, explain and link into a unified whole the many experimental and theoretical data accumulated by generations of researchers.

In a number of scientific publications, an opinion is expressed that a diagram of concrete state can be obtained by simultaneous using of diagrams of concrete deforming under different force modes of short-term axial compression – «soft» and «rigid», testing standard concrete specimens to failure at a constant rate of stress and strains growth respectively. If the «soft» force mode without unnecessary difficulties can be realized on traditional hydraulic presses, the creation of «rigid» mode requires the manufacture of different from standard special presses or auxiliary devices, capable of taking efforts and unloading concrete after reaching the maximum of compressive stresses. The lack of a unified approach to obtaining diagrams of deforming under rigid-mode loadings leads to contradictory results.

Insufficiently investigated in the general problem are the issues of theoretical justification, development and approbation of diagram of concrete rigid-mode deforming $\bar{\sigma}_b \sim \varepsilon_b$, complex application of which simultaneously with the diagram of deforming $\sigma_b \sim \varepsilon_b$ in conditions of «soft» force mode will allow to obtain a reliable and convincing diagram of concrete state.

The main purpose of the research is a graph-analytical building and mathematical description of the dependence $\bar{\sigma}_b \sim \varepsilon_b$, based on clear and accurate physical representations, which experimental obtaining causes serious technical difficulties and economic costs, and the accuracy of measurements made and the reliability of the results obtained causes big doubts.

The article develops the criteria to which the dependence $\bar{\sigma}_b \sim \varepsilon_b$ should correspond, based on modern ideas about the nature of strength and deforming and following from the essence of physical and mechanical processes in concrete; the adequate structure of the functional connection has been established; the boundary conditions have been drawn up and constant coefficients have been determined; a comparative analysis of the calculation results using the proposed dependence with the corresponding experimental data was performed.

As a result, an easy-to-use and mathematical processing of an approximate function of the diagram of deforming is proposed, which reflects the dependence between stresses and strains of concrete under the «rigid» mode of homogeneous compression. Its simultaneous use with the previously obtained diagram for soft-mode loading makes it possible to graphically build and mathematically describe a stable and free from excessive influencing factors the diagram of concrete state, suitable for based on the deformative model of cross-sections of modern calculations of bended reinforced concrete constructions for all groups of limiting states and assessment of the heterogeneous stress-strain state of constructional cross-sections at any stage of loading up to fracture.

Keywords: concrete; diagrams of deforming and state; «soft» and «rigid» loading modes; deformative model of cross-sections.

Fig.: 1. References: 60.

**Геннадій Болотов¹, Сергій Цибуля², Максим Болотов³,
Ірина Прибитько⁴, Світлана Ющенко⁵**

¹доктор технічних наук, професор, професор кафедри технологій зварювання та будівництва
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: bolotovgp@gmail.com. **ORCID:** [0000-0003-0305-2917](https://orcid.org/0000-0003-0305-2917)

ResearcherID: [H-5304-2014](https://orcid.org/H-5304-2014). **Scopus Author ID:** [6506157907](https://orcid.org/6506157907)

²доктор технічних наук, професор, директор навчально-наукового інституту механічної інженерії, технологій і транспорту Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: stcibula@gmail.com. **ORCID:** [0000-0002-7843-6061](https://orcid.org/0000-0002-7843-6061)

ResearcherID: [H-1391-2016](https://orcid.org/H-1391-2016). **Scopus Author ID:** [7005208349](https://orcid.org/7005208349)

³кандидат технічних наук, доцент, кафедри технологій зварювання та будівництва,
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: bolotovmg@gmail.com. **ORCID:** [0000-0002-0915-4132](https://orcid.org/0000-0002-0915-4132)

ResearcherID: [H-4183-2014](https://orcid.org/H-4183-2014). **Scopus Author ID:** [57190377278](https://orcid.org/57190377278)

⁴кандидат технічних наук, доцент, кафедри технологій зварювання та будівництва,
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: prybytko_ira@ukr.net. **ORCID:** [0000-0002-8550-8318](https://orcid.org/0000-0002-8550-8318)

ResearcherID: [F-7325-2014](https://orcid.org/F-7325-2014)

⁵кандидат технічних наук, доцент, кафедри технологій зварювання та будівництва,
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: rasssveta@ukr.net. **ORCID:** [0000-0003-0863-9020](https://orcid.org/0000-0003-0863-9020)

Scopus Author ID: [57190373626](https://orcid.org/57190373626)

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МІГРУЮЧИХ ІНГІБІТОРІВ КОРОЗІЇ (МК) ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОНУ

Ефективність дії мігруючих інгібіторів корозії буде визначатися не лише природою компонентів, що входять до його складу, а й співвідношенням концентрацій його пасиваторів анодної та катодної реакції. Визначено, що моноетаноламін та триетаноламін є типовими поверхнево-активними речовинами, що володіють низьким поверхневим натягом із задовільною здатністю до пасивації катодних реакцій, в той час, як NaNO₂ слугує пасиватором анодної реакції іонізації сталі. Результати показують, що найбільш ефективний антикорозійний ефект забезпечують суміші із рівним співвідношенням концентрацій адсорбційного та гальмуючого корозію складників (15TEA + 15NaNO₂ та 15MEA + 15NaNO₂ відповідно).

Ключові слова: бетон; залізобетон; корозія; експлуатаційна довговічність; арматура; антикорозійний захист; інгібітори корозії.

Рис.: 7. Бібл.: 34.

Актуальність теми дослідження. На сьогодні бетонні та залізобетонні конструкції є незамінною складовою будь-якого будівництва, що зумовлено насамперед його високими експлуатаційними якостями, надійністю, швидкістю зведення, тощо. Однак багаторічний досвід використання бетонних систем поряд із перевагами визначив і певні недоліки, пов'язаних передусім зі стрімким погіршенням технічного та експлуатаційного станів залізобетонних конструкцій (ЗБК) внаслідок значних корозійних впливів з боку атмосфери [1-3]. Таким чином, питання забезпечення надійного антикорозійного захисту металевих армуючих елементів ЗБК є пріоритетною задачею сучасного будівництва.

Постановка проблеми. Відомо, що основу бетону складає цементний камінь, що характеризується системою капілярних пор, та слугує своєрідним стоком вологи та агресивних компонентів навколишнього середовища (хлоридів, сульфатів, вуглекислого газу, тощо), останнє стає причиною цілої низки деструктивних змін у структурі та, відповідно, властивостях залізобетону [4]. Як показано в роботах [5; 6], з початком експлуатації конструкції, металева арматура залізобетону знаходиться в пасивованому стані лужного навколишнього середовища із рН \approx 12-12,5. З часом, відбувається зміна хімічного складу накопиченої порами рідини, що супроводжується зміною рН до рівня рН \approx 7 – 9.

Такі зміни, у свою чергу, призводять до порушення пасивного стану металу арматури та закладних елементів залізобетону, що згодом стає причиною погіршення їх адгезійних властивостей, утворення внутрішніх напружень та тріщин у бетоні внаслідок порушення цілісності конструкції та погіршенню експлуатаційних показників загалом (рис. 1).



Рис. 1. Наслідки корозійних впливів в елементах ЗБК

Джерело: розроблено авторами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як відомо, з'єднання арматурних прутків, у більшості випадків відбувається за допомогою зварювання із застосуванням дугових процесів [7; 8]. Зварні шви виявляються найбільш схильними до хімічної та електрохімічної корозії. Загалом, у системі протикорозійного захисту сталевих конструкцій застосовуються такі основні методи [9-13]:

1. Захисні лакофарбові, полімерні покриття.
2. Електрохімічний захист (катодний, анодний, протекторний).
3. Захисні металопокриття.
4. Захисні неметалічні покриття (на неорганічній основі).

Однак усі ці методи поряд із перевагами характеризуються і недоліками, що обмежують їх застосування як антикорозійний захист металевих елементів ЗБК.

В останні роки для вирішення проблеми корозії металу залізобетонних конструкцій широкого застосування набули інгібітори на основі різних аміносполук, солей бензойних кислот та нітритів бензоатних композицій [14-17]. Літературний аналіз стану питання показав, що найбільш сприятливі умови, з погляду повноти досліджень та висвітлювання в наукових джерелах, склалися навколо інгібіторів корозії, що вводять у бетонну суміш ще на етапі виготовлення залізобетонного виробу (так званий первинний захист) [18-20]. У створення промислових інгібіторів корозії в країнах СНД великий внесок внесли вчені: Л. Антропов (серії КІ, КП), Ю. Федоров (серії КХ, С-5 і ін.), С. Міскіджян, Ю. Висоцький, Ю. Бабей, А. Миндюк, А. Афанасьєв, Е. Чанкова, С. Тир (ХОСП-10), С. Балезін (ПБ-5, ПБ-8-2, катапіни, БА-6 і ін.), М. Подобаєв (серії ПКУ), Ю. Кузнецов (ІФХАН), В. Долінкін (серії І-1-А, І-1-В) та ін. [18-24].

Відмінною рисою інгібіторного методу захисту металовиробів від корозії є його відносна простота і дешевизна. Однак із часом захисна дія таких речовин знижується внаслідок активного розкладання їхніх компонентів у результаті реакції з агресивними елементами середовища. Так, наприклад, у роботі [25] встановлено руйнування моноетаноламіна при поглинанні CO_2 . Крім того, суттєву стурбованість викликає стан будівель побудованих до першої половини 80-х років ХХ століття. Оскільки, як показано в роботі [26], перші дослідження в області інгібування сталей з метою їх антикорозійного захисту припадають саме на 1985 рік, коли вітчизняними вченими вперше опубліковано роботу з дослідження впливу комплексної антикорозійної добавки на основі нітриту кальцію і нафталіноформальдегідної ПАР на пасивуючу здатність арматурних сталей.

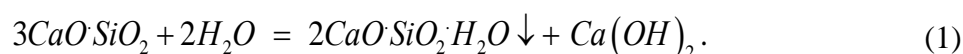
У зв'язку з цим з метою запобігання шкідливого атмосферного впливу на залізобетонні конструкції, що вже певний час перебувають в експлуатації все більшого поширення набувають мігруючі інгібітори корозії (МІК), речовини, що характеризуються гальною капілярною течією, здатні проникати в мікропори цементного каменю, досягати металоарматури створюючи на її поверхні захисний шар, який гальмуватиме появу та розвиток корозійних процесів. Так, автори робіт [27-29] припускають, що застосування МІК дозволить значно збільшити (в середньому на 20-40 років) терміни експлуатаційної надійності та довговічності залізобетонних виробів.

Водночас автори [30] стверджують, що більшість таких препаратів пасивації корозії, представлених на нашому ринку, малоефективні, що, головним чином, зумовлено недостатньо повною уявою про їхню дію, а також недосконалістю методології їх створення.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Таким чином, незважаючи на велику кількість наукових статей, присвячених розробці МІК у ролі антикорозійного захисту ЗБК, нині досі відсутній будь-який систематизований матеріал стосовно механізму їх захисної дії та ефективного співвідношення молярних концентрацій їх окремих складових.

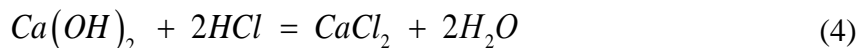
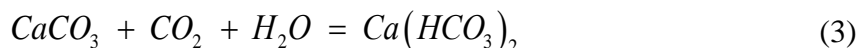
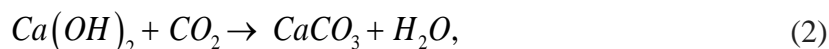
Мета роботи. У зв'язку з цим метою цієї роботи є визначення механізму забезпечення ефективної корозійної стійкості металевих елементів залізобетонних конструкцій із застосуванням мігруючих інгібіторів корозії.

Виклад основного матеріалу. Оскільки, як відомо, основу портланд цементу, що є вихідною речовиною при створенні сучасних залізобетонних конструкцій, становлять силікати кальцію, а саме: Аліт ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) – 40-65 % та Беліт ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) – 15-40 %, що є продуктами переробки вапняку та глини. У процесі водонасичення цементного каменю із навколишнього середовища в останньому відбувається його гідратація, тобто приєднання молекул адсорбованої води до молекул цементу. У результаті реакції утворюється гідроксид кальцію ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), яку прийнято називати поровою рідиною:



Як зазначалося вище, у природньому стані порова волога характеризується своїм лужним середовищем із $\text{pH} \approx 12$, що створює своєрідний бар'єр навколо металевої арматури та запобігає розвитку деструктивних процесів у залізобетоні. З часом експлуатації ЗБК, під впливом CO_2 , що знаходяться в повітрі відбувається карбонізація бетону із пониженням рівня pH порової рідини його цементного каменю до рівня $\text{pH} = 7 - 9$. Карбонізація може здійснюватися по двом напрямкам, що протікають як окремо, так і одночасно: 1) із утворенням нерозчинних у поровій рідині сполук - карбонату кальцію (CaCO_3), реакція утворення якого йде за схемою 2, який має здатність накопичуватися в мікро- та макропустотах цементного каменю утворюючи додатковий внутрішній тиск і як результат - розтріскування бетону; 2) із утворенням легкокорозчинних у поровій рідині сполук – гідроксид карбонату

кальцію ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$), реакція утворення якого - 3 та хлористого кальцію CaCl_2 - 4, що поступово вимиваються із структури бетонного каменю разом із його мікроелементами тим самим сприяючи дегенерації бетону по відношенню до металоарматури.



В обох випадках насичення залізобетону двоокисом вуглецю з часом стає ініціатором появи корозійних процесів в арматурі та металевих закладних елементах експлуатованих ЗБК і, відповідно, без належного їх протикорозійного захисту призводить до часткової або повної втрати несучої здатності та появи небезпеки аварійної ситуації в майбутньому.

З погляду надійного пасиватора корозії ЗБК викликаних карбонізацією значний інтерес представляють МІК на основі моноетаноламіну (МЕА). Тривале застосування водних розчинів моноетаноламіну з метою адсорбційного очищення газів від кислих компонентів H_2S , CO_2 , COS , CS_2 , SO_2 зумовило його широке промислове застосування для протикорозійного захисту залізобетону. Характерною особливістю МЕА як інгібітора корозії металоарматури є здатність вступати в реакцію з CO_2 , накопиченого поровою рідиною під час експлуатації, поглинаючи останній розпадатись із утворенням сполук (карбонатів та карбоматів), що підвищують рівень рН навколишнього середовища. Реакція протікає за наступною схемою:



де $2\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ – моноетаноламін.

Результати досліджень впливу інгібітора МЕА на швидкість протікання корозійних процесів в елементах ЗБК наведено в роботі [30]. При цьому відрізки арматурного дроту виконаних зі сталі ВСтЗсп діаметром 5 мм довжиною 100 мм зачищалися до металевого блиску та знежирювалися етиловим спиртом. Зразки розміщувалися в металевій опалубці таким чином, щоб оголені кінці арматури на 10 мм виступали за межі опалубки. Потім опалубку заповнювали бетонною сумішшю з цементно-піщано-водяним відношенням 1:2:0,4. Зразки витримувалися протягом 10 діб потім здійснювали розпалублення конструкції та поміщення її в корозійне середовище (5 % водний розчин NaCl).

На рис. 2 наведено результати сколів залізобетонних зразків без просочення інгібіторами та з просоченням. Ініціатором корозії виступав розчин соляної кислоти. Як видно з рис. 2, на зразку без просочення спостерігається суттєвий шар продуктів корозії, в той час як поверхня просоченого зразка зберігається в первинному стані.

Водночас, у періодичних виданнях існують дані щодо застосування нітриту натрію NaNO_2 як пасиватора корозії арматури залізобетону. Так, у роботі [29] відмічається висока ефективність NaNO_2 в широкому діапазоні концентрацій. В усіх випадках протикорозійну дію нітриту натрію пов'язують із утворенням на поверхні металу щільної окисної плівки Fe_2O_3 , що дозволяє утримувати метал арматури в пасивному стані.



Рис. 2. Дослідження протикорозійних властивостей інгібуючої суміші на основі МЕА:
а – без просочення; б – з просоченням МІК

Джерело: розроблено авторами.

Однак, як показано в роботі [26], наявність на поверхні арматурної сталі Fe_2O_3 не забезпечує 100 % захист останньої від корозійних впливів. Попри те, що товщина такого оксиду, як показано в роботі [31], становить 50-70 Å, іони хлору, які присутні в атмосферних опадах слугують активним деполаризатором, концентрована дія яких може призводити до руйнування $\gamma-Fe_2O_3$. Результати такої взаємодії досліджено в лабораторних умовах авторами [26] і наведені на рис. 3, а. Досліджувалася протикорозійна добавка на базі 1%-го $NaNO_2$. Металеві стержні витримувались у 3,5 % розчині $CaCl_2$ протягом 40 діб.

Проте досвід тривалого промислового застосування МІК з метою протикорозійного захисту ЗБК визначив перспективні напрямки розвитку галузі, переважно пов'язані із застосуванням комплексних інгібуючих добавок, захисна дія яких носить подвійний (синергічний) вплив. Відомі роботи [29; 32; 33], у яких вказується, що разом із пасивацією металоарматури такі інгібітори здатні модифікувати макроструктуру залізобетону з ущільненням його цементного каменю, збільшуючи його водонепроникність.

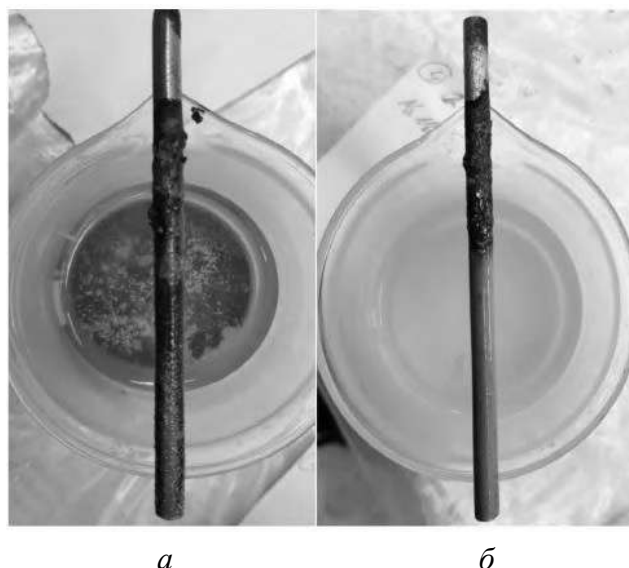


Рис. 3. Результати випробувань металевих стержнів, витриманих протягом 40 діб у 3,5 % розчині $CaCl_2$:

- а) із протикорозійною добавкою на основі 1%-го $NaNO_2$;
б) із комплексною антикорозійною добавкою 1%-го $NaNO_2$ + 0,5% ПСЕ,
де ПСЕ – добавки на основі ефірів полікарбоксилатів

Джерело: [26].

У ролі таких добавок виступають комплексні модифікатори структури та властивостей бетону, що являють собою симбіоз пасиватора корозії та поверхнево-активної речовини (ПАР), що знижує загальний поверхневий натяг рідини покращуючи, тим самим, проникаючу здатність інгібітору.

Так, у роботі [29] наведено результати лабораторних досліджень інгібуючих комплексів на основі МЕА із додаванням NaNO_2 та 0,2 г/л кремнійорганічного ПАР – КЕП-2. Як критерій оцінки ефективності дії МІК було обрано швидкість корозії сталі ВСтЗсп в 5%-му водному розчині NaCl (рис. 4, 5). Отримані результати порівнювалися із результатами досліджень інгібуючої суміші МЕА/ NaNO_2 без наявності ПАР у своєму складі.

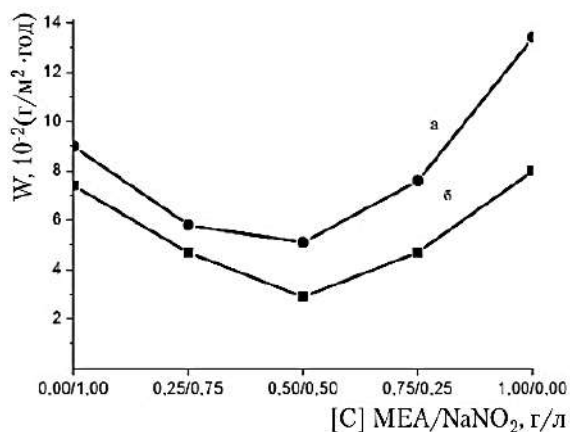


Рис. 4. Швидкість корозії ВСтЗсп в 5%-ому водному розчині NaCl в присутності інгібіторів:

а – суміш МЕА та NaNO_2 ; б – суміш додатково містить 0,2 г/л КЕП-2

Джерело: [29].

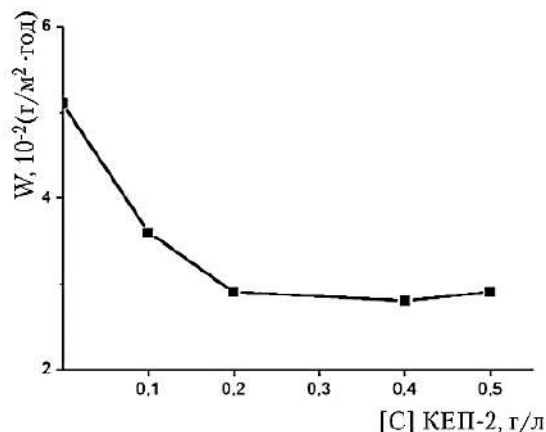


Рис. 5. Швидкість корозії ВСтЗсп в 5%-ому NaCl залежно від концентрації КЕП-2 в присутності суміші МЕА/ NaNO_2 (по 0,5 г/л)

Як видно із наведених кривих, спостерігається синергічний ефект під впливом МЕА та NaNO_2 , що самі автори роботи пов'язують із різкою відмінністю механізмів їхніх протикорозійних впливів. Встановлено, що МЕА є органічним інгібітором із яскраво вираженою катодною дією, водночас, як уже зазначалося, пасивуючий вплив нітриту натрію пов'язано з утворенням шару оксидів на поверхні металу й належить до анодних інгібіторів окислення металу. Додавання КЕП-2 до інгібуючої суміші підвищує ефективність дії композиції, що зумовлено гідрофобізацією поверхні металу арматури під впливом компонентів даного ПАР за рахунок утворення більш щільної захисної плівки із молекул інгібіторів [29].

У роботі [33] досліджено синергію інгібіторів на основі ПАР амінного типу, а саме МЕА та ТЕА (триетаноламін) в композиції із NaNO_2 . Дослідження здійснювали на сталі 08кп у водно-сольовому розчині NaCl , Na_2SO_4 та NaHCO_3 залежно від різного співвідношення концентрації складників МІК. Ефективне співвідношення молярних концентрацій елементів композиції оцінювали методом Остромисленського-Жоба (метод ізомолярних серій). Корозійний потенціал визначали методом поляризаційних вимірювань із використанням хлор-срібного електроду порівняння. Результати досліджень наведено на рис. 6 та 7.

Результати показують, що аміни в незначних концентраціях володіють слабким антикорозійним ефектом. Так, при концентрації ТЕА 30 mmol/l коефіцієнт гальмування корозії сталі 08кп, визначений за виразом (6) [28], дорівнює $\gamma = 1,3$ при цьому МЕА забезпечує якісніший антикорозійний захист із $\gamma = 7,4$:

$$\gamma = \frac{K_1}{K_2} = \frac{i_1}{i_2} \quad (6)$$

де K_1 , K_2 – швидкість корозії (розчинення) металу в середовищі без інгібітору і з ним [$\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$]; i_1 , i_2 – щільність корозійного струму в середовищі без інгібіторів та з інгібіторами, відповідно [$\text{А}/\text{см}^2$].

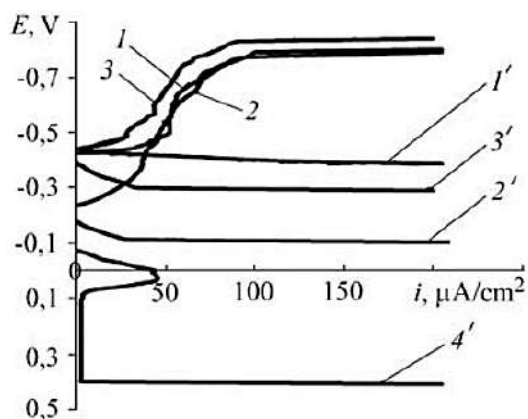


Рис. 6. Потенціостатичні катодні та анодні (зі штрихами) поляризаційні криві сталі 08кп: 1' – у фоновому водно-сольовому розчині (по 0,3 г/л NaCl, NaHCO₃, Na₂SO₄) та додатками (30 мтол/л): 2' – моноетаноламіну; 3' – триетаноламіну; 4' – нітриту натрію
Джерело: [33].

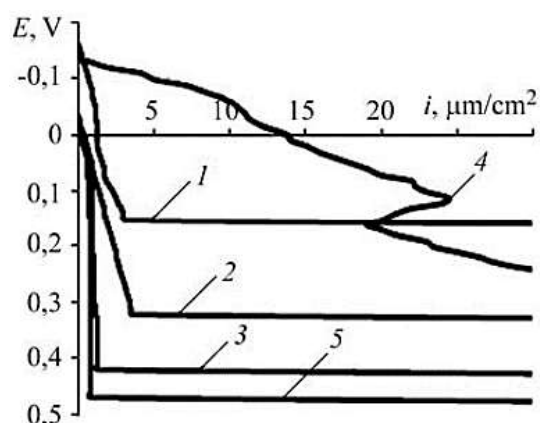


Рис. 7. Анодні потенціостатичні криві сталі 08кп у водно-сольовому розчині в присутності сумішей з різним співвідношенням (мтол/л) компонентів:
1) 5 TEA + 25 NaNO₂; 2) 20 TEA + 10 NaNO₂; 3) 15 TEA + 15 NaNO₂; 4) 25 TEA + 5 NaNO₂; 5) 15 MEA + 15 NaNO₂

У свою чергу, нітрит натрію, при тій же концентрації, проявив себе як найбільш ефективний пасиватор корозійних процесів сталі 08кп. Коефіцієнт гальмування корозії при цьому складав вже $\gamma = 45,3$ [33].

Однак, аналіз існуючих досліджень показав, що ефективність дії МІК буде визначатися не лише природою компонентів, що входять до його складу, а й співвідношенням концентрацій його пасиваторів анодної та катодної реакцій, а також адсорбційного складника. Як уже було показано, МЕА та ТЕА є типовими ПАР, що володіють низьким поверхневим натягом із задовільною здатністю до пасивації катодних реакцій, у той час як NaNO₂ слугує пасиватором анодної реакції іонізації сталі. Результати, наведені в [33] показують, що найбільш ефективний антикорозійний ефект забезпечують суміші із рівним співвідношенням концентрацій адсорбційного та гальмуючого корозію складників, криві 3 та 5 на рис. 7 (15 TEA + 15 NaNO₂ та 15 MEA + 15NaNO₂ відповідно). Отримані результати корелюють із результатами, наведеними в роботах [26; 34].

Висновки. Аналіз існуючих досліджень у сфері антикорозійного захисту ЗБК, що певний час перебувають в експлуатації, дозволив виділити перспективні шляхи розвитку застосування МІК, які пов'язані зі створенням синергічних композицій, що складаються з інгібіторів адсорбційної та пасивуючої дії. Показано ефективність інгібуючих синергічних композицій на основі аміновмісних ПАР та неорганічного пасиватора натрію нітриту. Запропоновані композиції здатні проникати в пори цементного каменю та гальмувати як вже наявні осередки корозії металоарматури, так і запобігати їх появі за рахунок утворення пасивуючої захисної плівки.

Список використаних джерел

1. Колесник Д. Ю. Аналіз проблеми корозії цементобетону в атмосферних умовах і роль води у цьому процесі / Д. Ю. Колесник, В. Г. Сиченко, П. М. Коваль // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2006. – Вип. 13. – С. 141-160.
2. Аль-Хавари Ю. Р. Аналіз корозійного руйнування залізобетонних конструкцій в умовах Йорданії / Ю. Р. Аль-Хавари // Науковий вісник будівництва : зб. наук. праць. – 2015. – Вип.4. – С. 136-140.
3. Шляхи підвищення корозійної стійкості залізобетону. Вісник ЧНТУ / М. Г. Болотов, Г. П. Болотов, І. О. Прибисько, М. М. Корзаченко // Технічні науки та технології. – 2019. – № 4(18). – С. 247-258.
4. Болотов М. Г. Аналітичний огляд основних причин та наслідки аварій будівель та споруд, що сталися на території України за останні п'ять років / М. Г. Болотов // Вісник ЧНТУ. – 2013. – № 4. – С. 197-204.
5. Подобаев Н. И. Влияние анионного состава и рН коррозионной среды на адсорбцию и защитное действие солей алкилбензилпиридиния / Н. И. Подобаев, А. П. Либенский // Уч. зап. Моск. гос. пед. ин-та. – 1971. – № 340. – С. 131-141.
6. Пасивуюча обробка заліза та маловуглецевої сталі для тимчасового захисту від атмосферної корозії / М. Донченко, С. Фроленкова, Н. Білоусова, О. Срібна // Фіз.-хім. механіка матеріалів. Електрохімічний захист і корозійний контроль. – 2007. – № 6. – С. 124-129.
7. Болотов Г. П. Ручне дугове зварювання будівельних сталей малоамперною дугою модульованим струмом / Г. П. Болотов, М. Г. Болотов, С. В. Олексієнко // Вісник ЧНТУ. Технічні науки та технології. – 2015. – № 1(1). – С. 48-53.
8. Оцінка несучої здатності зварних з'єднань арматури залізобетону / М. Г. Болотов, Г. П. Болотов, Т. Р. Ганєєв, М. М. Корзаченко // Вісник ЧНТУ. Серія Технічні науки та технології. – 2017. – № 1(7). – С. 58-67.
9. Бабей Ю. И. Защита стали от коррозионно-механического разрушения / Ю. И. Бабей, Н. Г. Сопрунюк. – К. : Техника, 1981. – 126 с.
10. Шлугер М. А. Коррозия и защита металлов / М. А. Шлугер, Ф. Ф. Ажогин, Е. А. Ефимов. – М. : Металлургия, 1981. – 216 с.
11. Василенко И. И. Коррозионное растрескивание сталей / И. И. Василенко, Р. К. Мелехов. – К. : Наук. думка, 1977. – 264 с.
12. Bolotov M. The Deposition of Thin Metal Films in Low Temperature Plasma of Hollow Cathode Glow Discharge / Maksym Bolotov // 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). – 2020. – Pp. 90-94.
13. Болотов М. Г. Оптимізація процесу осадження тонких металевих плівок у тліючому розряді з порожнистим катодом / М. Г. Болотов // Вісник ЧНТУ. Технічні науки та технології. – 2016. – № 3(5). – С. 104-113.
14. Антропов Л. И. Ингибиторы коррозии металлов / Л. И. Антропов, Е. М. Макушин, В. Ф. Панасенко. – К. : Техніка, 1981. – 183 с.
15. Алцыбеева А. И. Ингибиторы коррозии металлов / А. И. Алцыбеева, С. З. Левин. – Л. : Химия, 1968. – 264 с.
16. Иванов Е. С. Ингибиторы коррозии металлов в кислых средах / Е. С. Иванов. – М. : Металлургия, 1986. – 175 с.
17. Решетников С. М. Ингибиторы кислотной коррозии металлов / С. М. Решетников. – Л. : Химия, 1986. – 144 с.
18. Маричев В. А. Активирующее и ингибирующее действие анионов на водородное охрупчивание при КР высокопрочных сталей / В. А. Маричев // Защита металлов. – 1985. – Т. 21, № 5. – С. 704-708.
19. Балезин С. А. Теоретические проблемы и практические задачи в области ингибиторов коррозии / С. А. Балезин // Ингибиторы коррозии. – М. : МГПИ, 1957. – С. 4-13.
20. Балезин С. А. Влияние ингибиторов на упрочнение металлов / С. А. Балезин, В. П. Завадская, В. В. Романов // Физ.-хим. механика матер. – 1977. – № 2. – С. 106-107.

21. Гонтмахер Н. М. Изучение влияния ингибиторов на коррозионное и электрохимическое поведение низкоуглеродистой стали Ст3 и некоторых легированных сталей в соляной кислоте / Н. М. Гонтмахер, О. А. Иващенко, А. Г. Бережная // Защита металлов. – 1995. – Т. 31, № 3. – С. 365-369.

22. Бабей Ю. И. Защитная способность ингибитора ХОСП-10 при МЦКУ стали / Ю. И. Бабей, М. Д. Максимишин // Физ.-хим. механика матер. – 1976. – Т. 12, № 5. – С. 82-85.

23. Миндюк А. К. Влияние ингибиторов, анионов и их совместное действие на наводороживание стали в условиях сернокислотной коррозии при повышенных температурах / А. К. Миндюк, Е. И. Свист // Физ.-хим. механика матер. – 1973. – Т. 9, № 4. – С. 17-23.

24. Талзи В. П. Исследование состава водного раствора моноэтаноламина, используемого для поглощения CO₂ из топливных газов, методом ЯМР / В. П. Талзи // Журнал органической химии. – 2016. – Т. 52, Вып. 7. – С. 935-939.

25. Талипов Л. Н. Исследование синергетического эффекта комплексной антикоррозионной добавки на основе поликарбоксилатов в модели поровой жидкости / Л. Н. Талипов, Е. Г. Величко, В. С. Семенов // Вестник МГСУ. – 2020. – Т. 15, вып. 6. – С. 824-833.

26. Мигрирующий ингибитор коррозии для бетонной арматуры и его эффективность / С. Н. Леонович, Л. С. Карпушенкова, С. А. Карпушенков // Материалы V Международной (XI Всероссийской) конференции. Строительство и застройка: жизненный цикл. – Чебоксары, 2020. – С. 252-259.

27. Ингибиторы коррозии стали в железобетонных конструкциях / С. Н. Алексеев, В. Б. Рапинов, Н. К. Розенталь, Н. М. Кашурников. – М.: Стройиздат, 1985. – 272 с.

28. Колесник Д. Ю. Розробка і дослідження мігруючого інгібітора корозії металоарматури для залізобетону. / Д. Ю. Колесник, П. М. Коваль // Нові технології в будівництві. – 2010. – № 1(19). – С. 67-70.

29. Физико-химические принципы создания мигрирующих ингибиторов коррозии стальной арматуры в бетоне / Н. Н. Андреев, И. А. Гедвилло, А. С. Жмакина, Д. С. Булгаков, Е. В. Старовойтова // Вестник ТГУ. – 2013. – Т. 18, вып. 5. – С. 2269-2274.

30. Cohen M. The breakdown and repair of inhibitive films in neutral solution / M. Cohen // Corrosion. – 1976. – Vol. 32(12). – Pp. 461-465.

31. Söylev T. A. Corrosion inhibitors for steel in concrete: state-of-the-art report / T. A. Söylev, M. G. Richardson // Construction and Building Materials. – 2008. – Vol. 22(4). – Pp. 609-622.

32. Ледовских В. М. Синергічні екстремуми сумішей інгібіторів корозії металів у водно-солевих розчинах / В. М. Ледовских, С. В. Левченко, С. М. Тулаінов // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2013. – № 6. – С. 107-111.

33. Бекназаров Х. С. Защита стали от коррозии олигомерными ингибиторами и их композициями / Х. С. Бекназаров, А. Т. Джалилов // Химия и химическая технология. – 2015. – № 1. – С. 50-52.

34. Пат. 6174461 США, МКИ С09К 003/00. Concrete sealers with migrating corrosion inhibitors: D. Jerry; Cortec Corporation. – 342436; Заявл. 29.06.1999; Опубл. 16.01.2001. НКИ 252/389.32.

References

1. Kolesnik, D.Yu., Sichenko, V.H., & Koval, P.M. (2006). Analiz problem korozii tsementobetonu v atmosferynyh umovah i rol vody u tsiomu protsesi [Analysis of the problem of cement concrete corrosion in the atmosphere conditions]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho zaliznychnoho transportu – Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 13, 141-160.

2. Al-Havari, Yu. R. (2015). Analiz korrozionnogo razrusheniia zhelezobetonnyh konstruksii v usloviyah Iordainii [Analysis of corrosive attack of reinforced concrete structures in Jordan]. *Naukovyi visnyk budivnytstva – Scientific bulletin of civil engineering*, 4, 136-140.

3. Bolotov, M.G., Bolotov, G.P., Prybytko, I.O., & Korzachenko, M.M. (2019). Shliahy pidvyshchennia koroziiinoi stiikosti zalizobetonu [Ways of increasing of reinforced concrete's corrosion strength]. *Visnyk ChNTU. Tehnichni nauky ta tehnolohii – Bulletin of ChNTU. Technical sciences and technologies*, 4(18), 247-258.

4. Bolotov, M.G. (2013). Analitichnyi ohliad osnovnyh prychn ta naslidky avarii budivel ta sporud, shcho stalysia n aterytorii Ukrainy za ostanni pjat rokov [Analytical report of main causes and consequences of accidents of buildings and structures on the territory of Ukraine for the past five years]. *Visnyk ChNTU – Bulletin of ChNTU*, 4, 197-204.

5. Podobaeв, N.I., & Libenskii, A.I. (1971). Vliianie anionnogo sostava i pH korozionnoi sredy na adsorbtsiu i zashchitnoe deistvie solei alkilbenzilpiridiniia [The influence of anion composition on adsorption and protective action of salts of the alkylbenzylpyridinium]. *Uchenye zapiski Moskovskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo instituta – Scientific proceedings of Mocsow state pedagogical institute*, 340, 131–141.

6. Donchenko, M., Frolenkova, S., Bilousova, N., & Sribna O. (2007). Pasyvuiucha obrobka zaliza ta malovuhletsevoi stali dlia tymchasovoho zahystu vid atmosfernoi korozii [Passivating treatment of iron and low-carbon steel for temporary protection against atmospheric corrosion]. *Fizyko-himichna mehanika materialiv. Electrohimichnyi zahyst i koroziiyni control – Physical-chemical mechanics of materials. Electrochemical protection and corrosion control*, 6, 124-129.

7. Bolotov, G.P., Bolotov, M.G., & Oleksienko, S.V. (2015). Ruchne duhove zvariuvannia budiv-elnyh stalei maloampernoii duhoiu moduliovanyм strumom [Hard arc welding of build steels by a littleampere arc with modulation of curent]. *Tehnichni nauky ta tehnolohii – Technical sciences and technologies*, 1(1), 48-53.

8. Bolotov, M.G., Bolotov, G.P., & Haniiev, T.R. (2017). *Otsinka nesuchoi zdatnosti zvarnuh zjednan armatury zalizobetonu [Evaluation of the carrying capacity of reinforced concrete welded armature joints]*, 1(7), 58-67.

9. Babey, Yu.I., & Sopruniuk, N.G. (1981). *Zashchita stali ot korrozionno-mehanicheskogo razrusheniia [The protection of the steel from corrosion-mechanical destruction]*. Tehnika.

10. Shluger, M.A., Azhogin, F.F., Efimov, E.A. (1981). *Koroziiia i zashchita metallov [Corrossion and protection of metallov]*. Metallurgiiia.

11. Vasilenko, I.I., & Melehov, R.K. (1977). *Korozionnoie rastreskivanie staley [Corrossion cracking of steels]*. Naukova dumka.

12. Bolotov, M. The Deposition of Thin Metal Films in Low Temperature Plasma of Hollow Cathode Glow Discharge / Bolotov, Maksym // 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), April 22 – 24, 2020. – Kyiv, 2020. – Pp. 90-94.

13. Bolotov, M.G. (2016). Optyimizatsiia protsesu osadzhenni tonkyh metalevyh plivok u tliiuchomu rozriadi z porozhnystym katodom [Optimization of the deposition process of thin metal in glow discharge with hollow cathode]. *Tehnichni nauky ta tehnolohii – Technical sciences and technologies*, 3(5), 104-113.

14. Antropov, L.I., Makushin, Ie.M., & Panasenko, V.F. (1981). *Ingibitory korrozii metallov [Inhibitors of metal corrosion]*. Tehnika.

15. Altsybeeva, A.I., & Levin, S.Z. (1968). *Ingibitory korrozii metallov [Inhibitors of metal corrosion]*. Himiia.

16. Ivanov, Ie.S. (1986). *Ingibitory korrozii metallov v kislyh sredah [Inhibitors of metal corrosion in the acid medium]*. Metallurgiiia.

17. Reshetnikov, S.M. (1986). *Ingibitory kislotnoy korrozii metallov [Inhibitors of metal acid corrosion]*. Himiia.

18. Marichev, V.A. (1985). Aktiviruyushcheye i ingibiruyushcheye deistviye anionov na vodorodnoye ohrupchivaniye pri KR vysokoprochnykh staley [Activate and absopal influence of anions on the hydrogen embrittlement at corrosive attack]. *Zashchita metallov – The protection of metals*, 21(5), 704-708.

19. Balezin, S.A. (1957). Teoreticheskiye problemy i prakticheskiye zadachi v oblasti ingibitorov korrozii [Theoretical problems and practical tasks in the area of corrosion inhibitors]. *Ingibitory korrozii – Corrosion inhibitors* (pp. 4-13).

20. Balezin, S.A., Zavadsкая, V.P., Romanov, & V.V. (1977). Vliyaniye ingibitorov na uprochneniye metallov [Effect of Inhibitors on Hardening of Metals]. *Fizyko-himicheskaya mehanika materialov – Physical-chemical mechanics of materials*, 2, 106-107.

21. Gontmaher, N.M., Ivashchenko, O.A., & Berezhnaya, A.G. (1995). Izucheniye vliyaniya ingibitorov na korrozionnoye i elektrohimi cheskoye povedeniye nizkouglerodistoy stali St3 i nekotorykh legirovannykh staley v solianoy kislyote [The investigation of influence of inhibitors on corrosion and electrochemical behavior of low-carbon steel Fe37-3FN and some alloyed steels at the hydrochloric acid]. *Zashchita metallov – The protection of metals*, 31(3), 365-369.

22. Babey, Yu.I., & Maksimishin, M.D. (1976). Zashchitnaya sposobnost inhibitora HOSP-10 pri MTsKU stali [Protective ability of the HOSP-10 inhibitor at MCCU steel]. *Fizyko-himicheskaya mehanika materialov – Physical-chemical mechanics of materials*, 12(5), 82-85.

23. Mindiuk, A.K., & Svist, Ye.I. (1973). Vliyaniye ingibitorov, anionov i ih sovmestnoye deystviye na navodorozhyvaniye stali v usloviyah sernokislотноy korrozii pri povyshennykh temperaturah [Influence of inhibitors, anions and their combined effect on hydrogenation of steel under conditions of sulfuric acid corrosion at elevated temperatures]. *Fizyko-himicheskaya mehanika materialov – Physical-chemical mechanics of materials*, 9(4), 17-23.

24. Talzi, V.P. (2016). Issledovaniye sostava vodnogo rastvora monoetanolamina, ispolzuyemogo dlya pogloshcheniya CO₂ iz toplivnykh gazov, metodom YaMR [The investigation of the composition of an aqueous solution of monoethanolamine used to absorb CO₂ from fuel gases by NMR]. *Zhurnal organicheskoy himii – Organic Chemistry Journal*, 52(7), 935-939.

25. Talipov, L.N., Velichko, Ye.G., & Semenov, V.S. (2020). Issledovaniye sinergeticheskogo effekta antikorozi onnoy dobavki na osnove polikarboksilatov v modeli porovoy zhidkosti [The investigation of the synergistic effect of a complex anticorrosive additive based on polycarboxylates in a pore fluid model]. *Vestnik MGSU – Bulletin of MSBU*, 15(6), 824-833.

26. Leonovich, S.N., Karpushenkova, L.S., & Karpushenkov, S.A. (2020). Migriruyushchiy ingibitor korrozii dlya betonnoy armatury i ego effektivnost [A migratory corrosion inhibitor for concrete reinforcement and its effectiveness]. *Materialy V Mezhdunarodnoy (XI Vserossiyskoy) konferentsii. Stroitelstvo i zastroyka: zhiznennyi tsykl – Materials of the V International (XI All-Russian) conference. Construction and Development: Life Cycle – 2020* (Cheboksary, November 25–26, 2020).

27. Alekseev, S.N., Ratinov, V.B., Rozental, N.K., & Kashurnikov, N.M. (1985). *Ingibitory korrozii stali v zhelezobetonnykh konstruktsiyah [Inhibitors of corrosion of steel in reinforced concrete structures]*. Stroiizdat.

28. Kolesnik, D.Yu., & Koval, P.M. (2010). Rozrobka i doslidzhennia migruyuchoho inhibitora korrozii metaloarmatury dlya zalizobetonu [Development and research of a migrating corrosion inhibitor of metal reinforcement for reinforced concrete]. *Novi tehnologii v budivnytstvi – New technologies in construction*, 1(19), 67-70.

29. Andreev, N.N., Gedvillo, I.A., Zhmakina, A.S., Bulgakov, D.S., & Starovoytova, Ye.V. (2013). Fiziko-himicheskiye printsipy sozdaniya migriruyushchih ingibitorov korrozii stalnoy armatury v betone [Physicochemical principles of creating migratory corrosion inhibitors for steel reinforcement in concrete]. *Vestnik TGU – Bulletin of TSU*, 18(5), 2269-2274.

30. Cohen, M. (1976). The breakdown and repair of inhibitive films in neutral solution. *Corrosion*, 32(12), 461-465.

31. Söylev, T.A., & Richardson, M.G. (2008). Corrosion inhibitors for steel in concrete: state-of-the-art report. *Construction and Building Materials*, 22(4), 609-622.

32. Ledovskih, V.M., Levchenko, S.V., & Tulainov, S.M. (2013). Synerhichni ekstremumy sumishey inhibitoriv korrozii metaliv u vodno-soliovoyh rozchynah [Synergistic extrema of mixtures of metal corrosion inhibitors in aqueous saline solutions]. *Fizyko-himichna mehanika materialiv – Physical and chemical mechanics of materials*, 6, 107-111.

33. Beknazarov, H.S., & Jalilov, A.T. (2015). Zashchita stali ot korrozii oligomernymi ingibitorami i ih kompozitsiyami [Protection of steel against corrosion by oligomer inhibitors and their compositions]. *Himiya i himicheskaya tehnologiya – Chemistry and chemical technology*, 1, 50-52.

34. Patent 6174461 USA, MKI C09K 003/00. Concrete sealers with migrating corrosion inhibitors: D. Jerry; Cortec Corporation. – 342436. 16.01.2001. NKI 252/389.32.

Отримано 27.01.2022

UDC 691.237:620.193

**Gennady Bolotov¹, Serhii Tsybulya², Maksym Bolotov³,
Iryna Prybytko⁴, Svitlana Yushchenko⁵**

¹Doctor in Technical Sciences, Doctor, Doctor of Department of welding technologies and Construction, Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: bolotovgp@gmail.com. **ORCID:** [0000-0003-0305-2917](https://orcid.org/0000-0003-0305-2917)
ResearcherID: [H-5304-2014](https://orcid.org/H-5304-2014). **Scopus Author ID:** [6506157907](https://orcid.org/6506157907)

²Doctor in Technical Sciences, Head of Educational-scientific institute of mechanic engineering, technology and transport Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: stcibula@gmail.com. **ORCID:** [0000-0002-7843-6061](https://orcid.org/0000-0002-7843-6061)
ResearcherID: [H-1391-2016](https://orcid.org/H-1391-2016). **Scopus Author ID:** [7005208349](https://orcid.org/7005208349)

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Welding Technologies and Construction Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: bolotovmg@gmail.com. **ORCID:** [0000-0002-0915-4132](https://orcid.org/0000-0002-0915-4132)
ResearcherID: [H-4183-2014](https://orcid.org/H-4183-2014). **Scopus Author ID:** [57190377278](https://orcid.org/57190377278)

⁴PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of welding technology and CAD/CAM/CAE systems of building structures,

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: prybytko_ira@ukr.net. **ORCID:** [0000-0002-8550-8318](https://orcid.org/0000-0002-8550-8318)
ResearcherID: [F-7325-2014](https://orcid.org/F-7325-2014)

⁵PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Department of Welding Technologies and Construction Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: rasssveta@ukr.net. **ORCID:** [0000-0003-0863-9020](https://orcid.org/0000-0003-0863-9020)
Scopus Author ID: [57190373626](https://orcid.org/57190373626)

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF MIGRATIVE CORROSION INHIBITORS (MCI) USAGE IN ORDER TO INCREASE THE EXPLOITATION DURATION OF REINFORCED CONCRETE

Currently, concrete and reinforced concrete structures are an indispensable component of any construction. However, during operation due to the active influence of aggressive components of the atmosphere and the environment, there is a destruction of the protective layer of concrete and corrosion of metal reinforcement.

The porous structure of cement stone, which is the basis of concrete, determines the degree of its hydration and, accordingly, penetration into it together with moisture aggressive components of the environment (various chlorides, sulfates, carbon dioxide, etc.). The latter leads to a change in the pH of the pore fluid and the development of low destructive processes in the structure of the concrete and metal reinforcement.

The detailed analysis of the situation showed that the most favorable conditions, in terms of complete coverage in scientific journals, have developed around primary corrosion protection of reinforced concrete structures, which consists in the use of corrosion inhibitors (substances based on various amino compounds, salts of benzoic acids and nitrites of benzoate compositions) at the stage of manufacturing reinforced concrete structures and products from them. The secondary protection of reinforced concrete structures that have been in operation for some time with the use of migrating inhibitor mixtures with good passivation ability and diffusion permeability is less studied, but very relevant.

However, to date, there is still no systematic material on the mechanism of their protective action and the effective ratio of molar concentrations of their individual components despite the large number of publications on the development of migrating corrosion inhibitors as corrosion protection of reinforcing elements of reinforced concrete structures.

In this regard, the purpose of this work is to determine the mechanism for ensuring effective corrosion resistance of metal elements of reinforced concrete structures with the use of migrating corrosion inhibitors.

It is shown that the effectiveness of migrating corrosion inhibitors will be determined not only by the nature of its components, but also by the ratio of concentrations of its passivators of anodic and cathodic reactions, as well as the adsorption component. Monoethanolamine and triethanolamine have been found to be typical surfactants with low surface tension with a satisfactory ability to passivate cathodic reactions, while NaNO₂ serves as a passivator for the anodic reaction of steel ionization. The results show that the most effective anticorrosive effect is provided by mixtures with equal ratio of concentrations of adsorption and corrosion inhibiting components (15TEA + 15NaNO₂ and 15MEA + 15NaNO₂, respectively).

Thus, research in the field of corrosion protection of reinforced concrete structures that have been in operation for some time has identified promising ways to develop migratory corrosion inhibitors, mainly related to the creation of synergistic composite compounds that will contain adsorption and passivation components. The effectiveness of inhibitory compositions, which include surfactants based on amine-type compounds, which in combination with sodium nitrites are able to penetrate into the pores of cement stone, reaching the metal reinforcement to inhibit both existing corrosion centers and prevent its occurrence in the future.

Keywords: concrete; reinforced concrete; corrosion; service life; fittings; corrosion protection; corrosion inhibitors.

Fig.: 7. **References:** 34.

**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 довідку про автора (ів), оформлені за встановленими вимогами, для попереднього розгляду редакційною колегією журналу «Технічні науки та технології». У випадку позитивного рішення про публікацію, стаття розміщується в макеті журналу. Остаточна вартість публікації формується після готовності макету журналу.

Для публікації статті у журналі «Технічні науки та технології» необхідно в обов'язковому порядку подати:

- електронний варіант статті, оформленої за зразком;
- довідку про авторів.

Інформація про сплату вартості публікації наукової статті подається після прийняття статті до друку, рецензування та розміщення статті в електронному макеті журналу.

Редакційна колегія забезпечує 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 (співавторами) 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 1 сторінки наукової статті становить **60 грн** (прохання обов'язково уточнювати вартість публікації). 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.

Матеріали необхідно надсилати на адресу: 14035, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95, корп. 1, к. 151.

Контактна особа: Сапон Сергій Петрович.

Тел. моб.: (097) 38-44-197

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

№ 1(27)

Відповідальний за випуск
Редактор
Технічний редактор

С. П. Сапон
О. С. Смєлова
І. М. Мекшун

Підписано до друку 01.06.2022. Формат 60×84/8. Ум. друк. арк. – 24,88.
Тираж 100 пр. Замовлення № 04/22.

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.