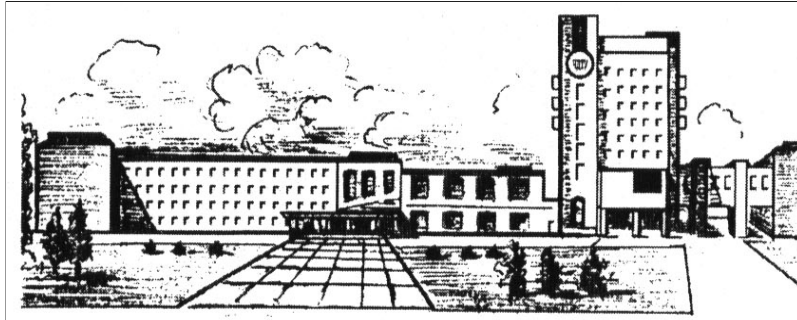


ISSN 2411-5363 (print)
ISSN 2519-4569 (online)

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



ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

№ 2(32)

Чернігів 2023

Друкується за рішенням вченої ради Національного університету «Чернігівська політехніка» (протокол № 4 від 27.03.2023 р.). Науковий журнал «Технічні науки та технології» внесено до переліку наукових фахових видань України, затвердженого Наказом Міністерства освіти і науки України від 11.07.2019 р. № 975 (зі змінами від 09.02.2021 № 157), відповідно до якого журналу надано категорію «Б».

Технічні науки та технології : науковий журнал / Національний університет «Чернігівська політехніка». – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2023. – № 2(32). – 418 с.

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

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

УДК 62:67.05

Головний редактор:

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

Заступник головного редактора:

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

Члени редакційної колегії:Прикладна механіка, матеріалознавство та машинобудування

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Інформаційно-комп'ютерні технології

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Енергетика, електротехніка та електромеханіка

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

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

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

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

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

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

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

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

Хімічні та харчові технології

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Будівництво та геодезія

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

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

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

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

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

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

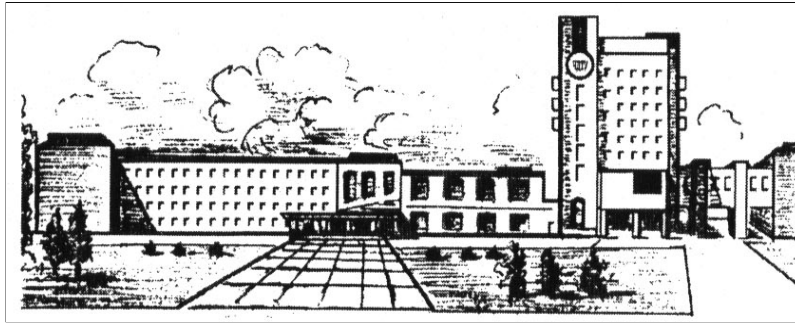
Шульц Р. В., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури;

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



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

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



TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

SCIENTIFIC JOURNAL

ISSUE № 2(32)

Chernihiv 2023

UDC 62:67.05

DOI: 10.25140/2411-5363-2023-2(32)

Published by the decision of the Academic Council of the Chernihiv Polytechnic National University (protocol № 4 dated 27.03.2023). Scientific journal "Technical sciences and technologies" is included into the list of scientific specialized editions of Ukraine, approved by the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine dated July 11, 2019 № 975 (as amended from February 9, 2021 № 157), according to which magazine is assigned a category «B».

Technical sciences and technologies : scientific journal / Chernihiv Polytechnic National University. – Chernihiv : Chernihiv Polytechnic National University, 2023. – № 2(32). – 418 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 akademiia;

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

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

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

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

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

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

Information and computer technologies

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Power engineering, electrical engineering and electromechanical engineering

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

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

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

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

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

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

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

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

Chemical and food technologies

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Construction and geodesy

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

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

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

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

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

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

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

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



ЗМІСТ

РОЗДІЛ I. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО
ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

<i>Пилипенко О., Ночвай В., Симон Р., Храбан Д., Погорильчук В.</i> Розробка та дослідження газотермічних покриттів підшипників ковзання.....	9
<i>Болотов Г., Болотов М., Олексієнко С., Руденко М.</i> Оптимізація процесу керування тліючим розрядом як джерела нагріву при дифузійному зварюванні.....	16
<i>Жерносеков А., Халіков В., Шатан О., Приходько В.</i> Імпульсні стабілізатори горіння дуги при зварюванні змінним струмом промислової частоти.....	26
<i>Кальченко В., Кологойда А., Пасов Г., Сіра Н., Зюзько Д., Пивовар Д.</i> Сучасні 3D-технології в машинобудуванні та автомобільному транспорті.....	33
<i>Клименко С., Клименко С., Копєйкіна М., Манохін А., Полонський Л.</i> Вихідні передумови розробки технології точіння наплавлених деталей.....	42
<i>Лебедев В., Лой С.</i> Коливач зварювального інструменту для апарата підводного зварювання мокрим способом.....	52
<i>Пилипенко О.</i> Наземно-бортові системи випробувань та діагностики вертолітних редукторів.....	60
<i>Sereda B., Kruglyak I., Sereda D.</i> Increasing the reliability of mechanisms of metallurgical equipment that uses SHS resource-saving technology.....	78
<i>Беляєва А.</i> Передумови створення механізованих підйомників для обслуговування повітряних ліній електропередач.....	83
<i>Бондар О., Пузирьов О.</i> Про точні розв'язки рівнянь осі й кута повороту перерізу пружної балки.....	88
<i>Пасов Г., Венжега В., Кузьельний Я., Кологойда А., Карпенко О.</i> Вивчення вимірювання температури в зоні різання із застосуванням анімаційного симулятора.....	95
<i>Манжос О., Пожусєв А., Михайлуца О.</i> Нестационарна реакція циліндричної оболонки з пружним шаром на дію рухомого радіального навантаження.....	107
<i>Петренко І., Болотов М., Ганєєв Т.</i> Компаративний аналіз технологій адитивного виробництва в галузі машинобудування.....	117
<i>Зубань Е., Бойко С., Єрошенко А.</i> Розробка конструкції вакуумного стола для деревообробного фрезерного верстата з числовим програмним керуванням.....	141
<i>Осадчий О., Парненко В.</i> Дизайн виробів машинобудування та вибір матеріалів для забезпечення технологічності їх конструкцій.....	150
<i>Трачук Є., Швед М., Швед Д.</i> Оптимізація каскадної схеми високошвидкісної екструзії.....	157
РОЗДІЛ II. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ	
<i>Єременко В., Монченко О., Корчева С., Чубко Л.</i> Метод статистичного оцінювання результатів клінічних досліджень при лікуванні артеріальної гіпертензії та ожиріння.....	164
<i>Волокита А., Герега Б.</i> Еволюція агентів навчання з підкріпленням за допомогою генетичного алгоритму.....	175
<i>Разживін О., Люта А., Марков О., Єрмакін Г.</i> Синтез нечіткого регулятора температури пастеризації молока.....	185
<i>Васильєва О.</i> Моделі виявлення та прогнозування динаміки інформаційних операцій у соціальних мережах.....	193
<i>Калюжна В.</i> Програмне забезпечення для ІВС експрес-аналізу параметрів ґрунту.....	201
<i>Nikolskiy S., Klymenko I.</i> Designing tools for automated data collection for IoT road condition monitoring systems.....	210
<i>Семендй С.</i> Підвищення ефективності безпроводових систем передачі даних в умовах застосування засобів радіоелектронної боротьби.....	224
<i>Корчан В., Морозова І.</i> Методи сумісності для ідентифікації пристроїв інтернету речей у гетерогенних мережах зв'язку на базі архітектури цифрових об'єктів.....	235

<i>Кравченко С., Сугоняк І., Марчук Г., Гришукун Є., Швед О.</i> UML-моделювання процесу розробки додатка планування розваг та меню готелів.....	240
<i>Сокоринська Н., Постернак Ю., Зайцева Л., Руденок О.</i> Метод адаптивного вибору розміру діаграм станів турбокодів у системах 5G та IoT	249

РОЗДІЛ III. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Гомеля М., Трус І., Глушко О., Макаренко І.</i> Визначення ефективності вилучення сульфатів на зворотньоосмотичній мембрані низького тиску	261
<i>Зайцев С., Кравченко В., Тіхенко В.</i> Методи визначення вмісту присадок в енергетичних оливах обладнання енергопідприємств.....	269
<i>Філінська Т., Філінська А., Павлюк С.</i> Дослідження властивостей функціональних добавок рослинного походження для майонезної продукції.....	282
<i>Очеретна А., Фролова Н.</i> Технологія отримання оліє-пряних сумішей.....	289

РОЗДІЛ IV. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

<i>Voytenko V., Olofsson B., Solodchuk M., Denisov Yu.</i> Components of a system for automatic detection of a zone of interest in images obtained from a UAV	300
<i>Єремєєв І., Єщенко О.</i> Системи автономного теплозабезпечення будівель.....	313
<i>Якушкін Т., Єришов Р., Степенко С.</i> Порівняльний аналіз топологій та алгоритмів для відстежувачів точки максимальної потужності у фотоелектричних системах.....	321

РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

<i>Ляшок Я., Подкопаєв С., Повзун О., Вірич С., Калиниченко В.</i> Енергоефективний матеріал із використанням ливарного відходу машинобудівного виробництва.....	340
<i>Менейлюк О., Руссий В.</i> Аналіз відомих методик пошуку оптимальних рішень відновлення пошкоджених будівель.....	355
<i>Fys M., Hubar Yu., Brydun A., Sohor A.</i> Comparison and accuracy of the methods for determining the area of parcels.....	363
<i>Цапко Ю., Бондаренко О., Цапко О., Горбачова О., Мазурчук С.</i> Механізм структуроутворення спученого шару пінококсу при впливі мінеральних речовин.....	379
<i>Гера О.</i> Вплив морфометричних параметрів рельєфу на площу поверхні земельних ділянок лісогосподарського призначення.....	389
<i>Колесников А., Замула М.</i> Неруйнівні методи контролю процесів тужавлення і твердіння будівельних композиційних матеріалів із крупним наповнювачем.....	397
<i>Терещук О., Мовенко В., Щербак Ю.</i> Проблеми екологічного стану Кременчуцького водосховища та шляхи їх подолання.....	407
ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ СТАТЕЙ.....	417

CONTENT

SECTION I. APPLIED MECHANICS, MATERIALS SCIENCE
AND MACHINE BUILDING

<i>Pylypenko O., Nochvai V., Symon R., Khraban D., Pohorylchuk V.</i> Development and research of thermal spraying coatings of slipping bearings.....	9
<i>Bolotov G., Bolotov M., Oleksienko S., Rudenko M.</i> Optimization of the glow discharge control process as a heat source while diffusion welding	16
<i>Zhernosekov A., Khalikov V., Shatan O., Prykhodko V., Zyuzko D., Pivovar D.</i> Impulse combustion stabilizers industrial frequency ac welding ARCS.....	26
<i>Kalchenko V., Kolohoida A., Pasov G., Sira N.</i> Modern 3d technologies in engineering and road transport.....	33
<i>Klymenko S., Klymenko S., Kopieikina M., Manohkin A., Polonsky L.</i> Initial prerequisites for the development of technology for turning welded parts	42
<i>Lebedev V., Loi S.</i> Welding tool oscillator for wet underwater welding apparatus	52
<i>Pilipenko O.</i> Ground-on-board systems for testing and diagnostics of helicopter gearboxes.....	60
<i>Sereda B., Kruglyak I., Sereda D.</i> Increasing the reliability of mechanisms of metallurgical equipment that uses SHS resource-saving technology	78
<i>Bieliaieva A.</i> Prerequisites for the creation of mechanised lifts for maintenance of overhead power lines	83
<i>Bondar O., Puzyrov O.</i> On exact solutions of the equations of the axis and angle of cross section of an elastic beam.....	88
<i>Pasov H., Venzheha V., Kuzhelnyi Ya., Kolohoida A., Karpenko O.</i> Study of temperature measurement in the cutting zone using an animated simulator	95
<i>Manzhos O., Pozhuyev A., Mikhailutsa O.</i> Non-stationary reaction of a cylindrical shell with a spring layer to the action of a moved radial load.....	107
<i>Petrenko I., Bolotov M., Hanieiev T.</i> Comparative analysis of additive production technologies in mechanical engineering.....	117
<i>Zuban E., Boyko S., Yeroshenko A.</i> Development of the vacuum table design for a CNC milling machine for wood processing	141
<i>Osadchyi O., Parnenko V.</i> Design for manufacturability and selection of materials of mechanical engineering products.....	150
<i>Trachuk Ye., Shved M., Shved D.</i> Optimization of cascade scheme of high-speed extrusion.....	157

SECTION II. INFORMATION AND COMPUTER TECHNOLOGIES

<i>Yeremenko V., Monchenko O., Korcheva S., Chubko L.</i> Method of statistical evaluation of the results of clinical research in the treatment of arterial hypertension and obesity	164
<i>Volokyta A., Hereha B.</i> Evolution of reinforcement learning agents using the genetic algorithm	175
<i>Razhyvin O., Liuta A., Markov O., Yermakin G.</i> Synthesis of fuzzy-regulator of milk pasteurization temperature	185
<i>Vasylieva O.</i> Models for detecting and forecasting the dynamics of information operations in social networks.....	193
<i>Kaliuzhna V.</i> Software for the information measuring system express-analysis of soil parameters	201
<i>Nikolskiy S., Klymenko I.</i> Designing tools for automated data collection for IoT road condition monitoring systems	210
<i>Semendiai S.</i> Improving the efficiency of wireless data transmission systems in the conditions of electronic warfare.....	224
<i>Korchan V., Morozova I.</i> Compatibility methods for identification of internet of things devices in heterogenous communication networks based on the architecture of digital objects.....	235

Kravchenko S., Suhoniak I., Marchuk H., Gryshkun Ye., Shved O. Uml modeling of the entertainment and hotel menu planning application development process	240
Sokorynska N., Posternak Yu., Zaitseva L., Rudenok O. The method of adaptive selection of the size of turbo code state diagrams in 5G and IoT systems	249

SECTION III. CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGIES

Gomelya M., Trus I., Hlushko O., Makarenko I. Determination of the efficiency of sulfate removal on a low-pressure reverse osmosis membrane	261
Zaitsev S., Kravchenko V., Tikhenko V. Methods of determining the content of additives in energy oils of equipment of power enterprises.....	269
Filinska T., Filinska A., Pavliuk S. Research of the properties of functional additives of plant origin for mayonnaise products.....	282
Ocheretna A., Frolova N. Technology of obtaining oil-spice mixtures	289

SECTION IV. ENERGY, ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTROMECHANICS

Voytenko V., Olofsson B., Solodchuk M., Denisov Yu. Components of a system for automatic detection of a zone of interest in images obtained from a UAV	300
Yeremeev I., Yeschenko O. Systems of autonomous heat supply of buildings	313
Yakushkin T., Yershov R., Stepenko S. Comparative analysis of topologies and algorithms for maximum power point trackers in photovoltaic systems.....	321

SECTION V. CONSTRUCTION AND GEODESY

Liashok Ya., Podkopayev S., Povzun O., Virych S., Kalynychenko V. Energy-efficient material with the use of machine-building production foundry waste	340
Menelyuk O., Russyi V. Analysis of known methods for finding optimal solutions for the restoration of damaged buildings	355
Fys M., Hubar Yu., Brydun A., Sohor A. Comparison and accuracy of the methods for determining the area of parcels	363
Tsapko Yu., Bondarenko O., Tsapko A., Gorbachova A., Mazurchuk S. Mechanism structure formation of a foamed foam layer under the influence of minerals.....	379
Gera O. Influence of the relief morphometric parameters on the surface area of the forestry land plots	389
Kolesnikov A., Zamula M. Non-destructive methods for controlling the setting process of building composite materials with coarse aggregates	397
Tereshchuk O., Movenko V., Shcherbak Yu. Problems of ecological condition of kremenchuk reservoir and ways of overcoming them.....	407

BASIC REQUIREMENTS FOR EXECUTION AND SUBMISSION OF MANUSCRIPTS OF SCIENTIFIC ARTICLES	417
--	------------

РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI: 10.25140/2411-5363-2023-2(32)-9-15

УДК 621.793.71

**Олександр Пилипенко¹, Володимир Ночвай², Роман Симон³,
Давид Храбан⁴, Володимир Погорильчук⁵**

¹доктор технічних наук, професор кафедри механічної інженерії
Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)
E-mail: chura.pilipenko255@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1200-0385>

²кандидат технічних наук, доцент кафедри механічної інженерії
Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)
E-mail: nochvajvm@ztu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3742-0837>

³аспірант кафедри механічної інженерії
Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)
E-mail: romansymon@ztu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4965-2603>

⁴аспірант кафедри механічної інженерії
Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)
E-mail: khraban.david@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2621-2370>

⁵аспірант кафедри механічної інженерії
Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)
E-mail: vovan479dd@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3559-2814>

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ГАЗОТЕРМІЧНИХ ПОКРИТТІВ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ

Наведено наявні в різних літературних джерелах рекомендації для вибору методів та матеріалів для отримання антифрикційних покриттів деталей машин. Приведено розроблений технологічний процес отримання антифрикційних покриттів методом газополуменевого наплення з використанням порошків марок БрКМц3-5, БрА10 та БрАЖ10-1,5. Встановлено, що зносостійкість покриттів з БрАЖ10-1,5, БрА10, БрКМц3-5 в порівнянні із зносостійкістю базових матеріалів збільшилась в 3...4 рази, у 2 рази та в 1,5 рази відповідно. Ваговий знос зразків із покриттями БрАЖ10-1,5, БрА10, БрКМц3-5 менший, ніж ваговий знос зразків зі сталі 20Х без покриттів.

Ключові слова: матеріал наплення; технологія нанесення покриття; ваговий знос покриття; зносостійкість антифрикційних покриттів; випробування покриттів.

Рис.: 4. Табл.: 1. Бібл.: 10.

Постановка проблеми. Одним із ефективних способів підвищення надійності та довговічності підшипників ковзання верстатів, машин та механізмів є нанесення на їх робочі поверхні зносостійких покриттів. Використання зносостійких покриттів при виготовленні підшипників ковзання дає можливість підвищити їхній ресурс роботи. Добитися високої зносостійкості робочої поверхні покриттів при їх мінімальній собівартості можна при правильному виборі покриттів та технології їх нанесення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У роботі [1] проведено аналіз технологій відновлення геометричних розмірів вкладишів підшипників ковзання газоперекачувальних агрегатів методами ручного, відцентрового заливання та методом газополуменевого наплення. Автор роботи рекомендує з метою зменшення вартості й часу ремонту вкладишів підшипників використовувати метод газополуменевого наплення [1].

При виборі газотермічних покриттів необхідно враховувати такі критерії: службове призначення та умови роботи деталі; функції покриття; властивості основного матеріалу; необхідні властивості покриття на основному матеріалі деталі; конструктивні особливості поверхні з покриттям [2].

До числа методів нанесення покриттів, які активно розвиваються, належать метод газополуменевого наплення. Цим способом можна виготовляти і відновлювати деталі машин, у тому числі й підшипники ковзання. Метод забезпечує високу продуктивність, дозволяє отримати покриття у широкому діапазоні товщини (0,1-3,0 мм) і спектра властивостей [3].

Газополуменеве напилення є одним із простих серед методів газотермічного напилення покриттів. Це дешевий і зручний у керуванні метод, який використовує вихідні матеріали різної форми і стану: порошки, стрижні, дріт. Джерелом енергії є полум'я горіння суміші пального газу з киснем [4]. Основні операційні параметри газополуменевого напилення: дистанція напилення 120...250 мм; максимальна температура поверхні деталі 250 °С. Пористість покриття 10...15 % [4].

Технологія газополуменевого напилення досить проста, а вартість обладнання та витрати на експлуатацію низькі. У зв'язку з цим даний спосіб знайшов найбільш широке застосування в практиці. Технологічний процес газополуменевого нанесення покриттів дозволяє напилювати порошкоподібні і дотові матеріали, відмітною рисою є простота і мобільність устаткування, але невисока температура полум'я унеможливило нанесення тугоплавких матеріалів. Як пальне газу в більшості випадків використовують ацетилен, можна також застосовувати пропан та водень [5].

Автори роботи [6] замінили традиційний спосіб відновлення антифрикційних властивостей підшипників ковзання газополуменевим напиленням. З метою усереднення коефіцієнтів термічного розширення і зниження ймовірності розтріскування покриття застосовували підшар ПТ-НА-01 [6].

З літературних джерел відомо, що для газотермічного напилення та наплавлення зносостійких та антифрикційних покриттів використовують порошки бронз. Кращі антифрикційні властивості мають олов'яні бронзи (БрО3Ц7С5Н1, БрО3Ц12С5, БрОФ6,5-0,44 та ін.) [7]. У важконавантажених вузлах тертя (дорожніх машин, важкого верстатного устаткування) застосовують високоміцні алюмінієві бронзи (БрА9Мц2, БрА9Ж4) [7]. Розроблені також порошки бронзи алюмінієвої БрА10 та бронзи олов'янофосфористі БрОФ-8-0,3, БрОФ-10-1 [8].

Для зміцнення вилок коробок передач автомобілів, бабітових підшипників, колодок опорних підшипників, напилення на деталі з конструкційних сталей, які працюють у морській воді (антифрикційні, зносостійкі в умовах змащування мастилом), застосовують порошкові матеріали марок: ПР-БрАЖНМц8,5-4-5-1,5; ПР-БрОН8,5-3; ПР-БрКМц3-1; ПР-БрМН40; ПР-БрОЦС5-5-5; ПР-БрА8,5. Для нанесення підшару покриття використовують порошок марки ПТ-НА-01 [9]. Для напилення покриттів на деталі машин та обладнання, які працюють в умовах корозії при підвищених температурах, та з метою отримання антифрикційних покриттів використовують порошки марок: ПГ-АН10(БрОФ-8-0,3); ПГ-АН11(БрОФ10-1); ПГ-АН12(БрА10); ПГ-АН13(МНМц-35-35); ПГ-АН14(МФ-9) [10].

Метою статті є розробка та дослідження газотермічних покриттів підшипників ковзання.

Виклад основного матеріалу. Розроблений технологічний процес отримання антифрикційних газотермічних покриттів підшипників ковзання складається з наступних основних технологічних операцій: підготовки матеріалів напилення (просушування, просіювання порошку); підготовки деталі (очищення від бруду та мастила; зняття залишків нерівномірного спрацювання; знежирювання поверхні; формування шорсткості поверхні); нанесення шару покриття; механічної обробки відновленої поверхні деталі; вихідного контролю якості.

Для отримання антифрикційних покриттів вибрані порошки марок: БрКМц3-5; БрА10; БрАЖ10-1,5. Як підшару покриття застосовано порошок ПТ-НА-01.

Перед напиленням порошки просилювали при температурі 100...120 °С протягом 2 годин. Розділення порошоків на фракції виконано з використанням механічного сита моделі 029. Для напилення використано порошки з розміром частинок 40...160 мкм.

Операція підготовки деталей та зразків-свідків для нанесення покриттів складається з наступних переходів: очищення від забруднень; зняття залишків нерівномірного спрацювання; знежирювання поверхні; формування шорсткості поверхні шляхом абразивно-струменевої обробки поверхонь корундом при тиску повітря 0,5...0,6 МПа і відстані від сопла до поверхні 80...100 мм.

Напилення покриттів виконано з використанням газополуменевої установки мод. Л5405А. Деталі типу «вал» закріплювали в центрах маніпулятора обертання деталі (установка КНПА-1), а плоскі деталі розміщували на робочому столі установки. На супорті установки КНПА-1 встановлювали пістолет-розпилювач установки Л5405А.

Попереднє нагрівання виробу до температури 150...250 °С виконувалось полум'ям пістолета-розпилювача. Після нагрівання деталі виконано напилення допоміжного (товщина 0,3...0,5 мм) та основного шару покриття (товщина 1...1,5 мм). Як робочий газ використано кисень, пропан-бутан та стиснуте повітря (табл. 1).

Таблиця 1 – Технологічні режими напилювання та механічної обробки покриттів

№ з/п	Параметр	Значення параметра
1.	Тиск кисню, МПа	0,5
2.	Витрати кисню, л/хв	40
3.	Тиск пропан-бутану, МПа	0,1
4.	Витрати пропан-бутану, л/хв.	18
5.	Тиск стиснутого повітря, МПа	0,1
6.	Витрати стиснутого повітря (охолоджувального), л/хв	12
7.	Витрати стиснутого повітря (транспортуючого), л/хв	5
8.	Витрати порошкових матеріалів, кг/год	3
9.	Дистанція напилювання, мм	200
10.	Чорнова обробка: – швидкість різання, м/хв – подача, мм/об. – глибина різання, мм. – матеріал різального інструменту	20...25 0,15...0,2 0,3...0,4 ВКЗ, гексаніт
11.	Фінішна обробка: – швидкість різання, м/хв – подача, мм/об. – глибина різання, мм – матеріал різального інструменту	25...30 0,1...0,15 0,15...0,2 гексаніт, ельбор-Р

Джерело: розроблено авторами.

Після відновлення деталі виконано візуальний огляд, контроль твердості та шорсткості відновленої поверхні, контроль розмірів та форми деталі.

Розроблені антифрикційні покриття наносили також на зразки-свідки для досліджень їхніх властивостей. Дослідження порівняльної зносостійкості зразків еталонних деталей та антифрикційних покриттів проводились на машині тертя. Схема контакту зразків при терті ковзанням: вал – пальчиковий зразок. Зразки для випробувань виготовлено у відповідності з рис. 1 та рис. 2.

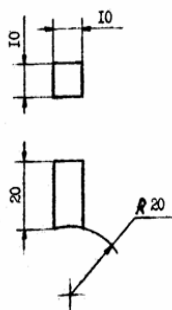


Рис. 1. Нерухомий зразок з напиленим покриттям для випробувань на машині тертя

Джерело: розроблено авторами.

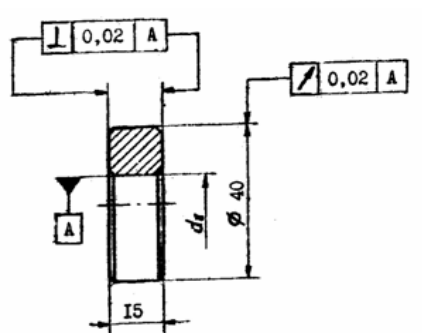


Рис. 2. Рухомий (що обертається) зразок для випробувань на машині тертя

Джерело: розроблено авторами.

Нерухомий зразок виготовлено зі сталі. Покриття напилено на ввігнуту поверхню зразка, що випробовують. Рухомий зразок (що обертається) виготовлено із загартованої сталі з твердістю HRC 45...50. При терті ковзання базових та напилених зразків по циліндричній поверхні рухомих зразків виконана оцінка їхньої зносостійкості.

По середньоарифметичним значенням результатів дослідів побудовані графіки залежності лінійного зносу зразків від часу випробувань (рис. 3) та графіки залежності зміни зносу від навантаження зразків (рис. 4).

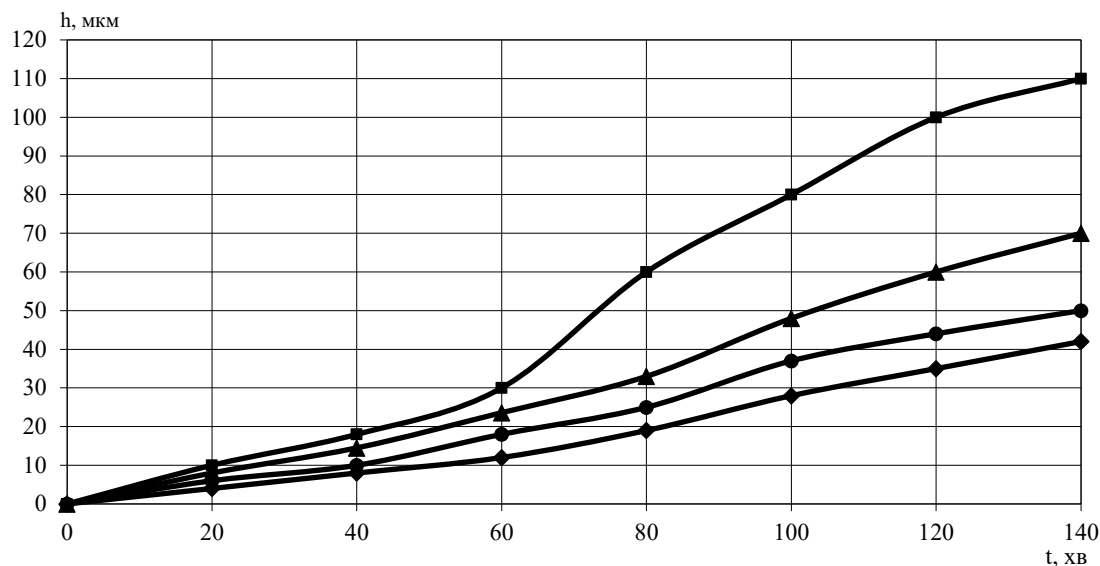


Рис. 3. Залежність лінійного зносу зразків від часу випробувань:

■ – базові зі сталі 20Х; ▲ – напилене покриття з БрКМц3-5;

● – напилене покриття з БрА10; ◆ – напилене покриття з БрАЖ10-1,5

Джерело: розроблено авторами.

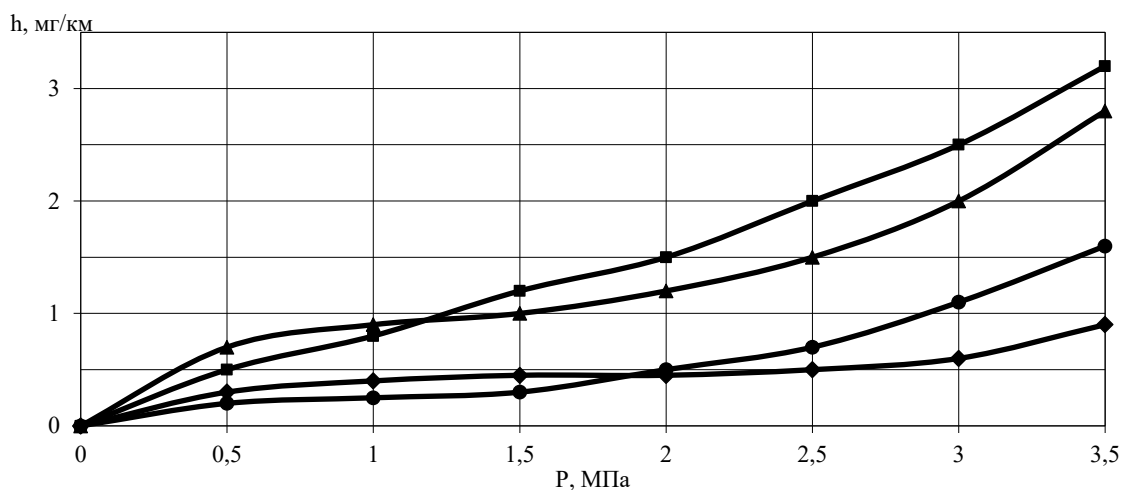


Рис. 4. Зміна зносу від навантаження рухомих зразків із сталі 45 (■, ▲), випробуваних відповідно з нерухомими зразками зі сталі 20Х та покриттям БрКМц3-5 (●, ◆)

Джерело: розроблено авторами.

Аналіз результатів експерименту показав, що найменшу зносостійкість мають базові зразки, а найбільшу – газотермічні покриття з БрАЖ10-1,5. Залежності вагового зносу, приведені до 1000 метрів шляху, підтверджують кращу зносостійкість напилених покриттів. Встановлено, що зносостійкість покриттів з БрАЖ10-1,5, БрА10, БрКМц3-5 в порівнянні із зносостійкістю базових матеріалів збільшилась в 3...4 рази, в 2 рази та в 1,5 рази відповідно.

При екстремальних режимах тертя зразків швидкість ковзання більше впливає на знос, ніж питоме навантаження. Це відбувається тому, що висока швидкість ковзання характеризується більшою концентрацією тепла в поверхневих шарах зразків. При невеликій швидкості має місце більш рівномірне температурне поле. При збільшенні навантаження при постійній швидкості ковзання спостерігаються незначні зміни температурного градієнта.

Висновки. Вивченням зносостійкості зразків з покриттями на основі сплавів БрАЖ10-1,5, БрАЖ10, БрКМц3-5 та зразків зі сталі 20Х встановлено, що в досліджених режимах випробувань зразків із покриттями знос менший, ніж базових. Зносостійкість покриттів з БрАЖ10-1,5, БрА10, БрКМц3-5 в порівнянні із зносостійкістю базових матеріалів збільшилась у 3...4 рази, в 2 рази та в 1,5 рази відповідно. Ваговий знос зразків із покриттями БрАЖ10-1,5, БрА10, БрКМц3-5 менший, ніж ваговий знос зразків зі сталі 20Х без покриттів. При екстремальних режимах тертя зразків більше впливає на знос швидкість ковзання, ніж питоме навантаження.

Розроблені антифрикційні покриття на основі міді відповідають сучасному рівню і можуть бути рекомендовані для отримання зносостійких покриттів на деталях при їх серійному випуску та відновленню спрацьованих деталей в ремонтних підприємствах.

Список використаних джерел

1. Діденко, О. Л. Відновлення геометричних розмірів вкладишів підшипників ковзання газоперекачувальних агрегатів / О. Л. Діденко // Проблеми тертя та зношування. – 2010. – № 54. – С. 88-94.
2. Критерии выбора материала покрытия и метода газотермического напыления / Ю. А. Харламов, Л. Г. Полонский, Ю. О. Нагорняк, В. Н. Наумчук, В. А. Яновский // Вісник НУБіП. Серія: Техніка та енергетика АПК. – 2017. – № 258. – С. 236-246.
3. Анализ методов повышения качества подшипников скольжения / Н. А. Зенкин, Н. В. Тарельник, А. Е. Коноплянченко, К. Антошевский, А. Д. Лазаренко // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2017. – № 2. – С. 55-60.
4. Харламов, Ю. А. Газотермическое напыление, современное состояние и перспективы развития / Ю. А. Харламов, Л. Г. Полонский // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2016. – № 2. – С. 5-19.
5. Хасуи А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки ; пер. с яп. В. Н. Попова ; под ред. В. С. Степина, Н. Г. Шестеркина. – М. : Машиностроение, 1985. – 240 с.
6. Гавриш П. А. Газотермическое напыление антифрикционного покрытия деталей перегружателя TAKRAF / П. А. Гавриш, Е. В. Бережная, Е. А. Соболев-Бутовченко // Науковий Вісник Донбаської державної машинобудівної академії – Краматорськ : Донбаська державна машинобудівна академія, 2016. – № 2. – С. 49-54.
7. Добровольський, О. Г. Сучасні антифрикційні матеріали / О. Г. Добровольський, В. А. Косенко // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. Серія: Будівельні машини і технологічне обладнання. – Київ : Київський національний університет будівництва і архітектури, 2016. – № 88. – С. 55-63.
8. Борисов, Ю. С. Порошки для газотермического напыления покрытий / Ю. С. Борисов. – К. : Знание, 1984. – 16 с.
9. Газотермическое напыление покрытий : [сб. рук. техн. матер. / ред. Е. Н. Казарова]. – К. : ИЭС им. Е. О. Патона, 1990. – 176 с.
10. Порошки металлические : ТУ 374-83. – К. : ЛОП ИЭС им. Е. О. Патона, 1983. – 7 с.

References

1. Didenko, O.L. (2010). Vidnovlennia heometrychnykh rozmiriv vkladyshev pidshypnykiv kovzannia hazoperekachuvalnykh ahrehativ [Renovation of geometrical expansions of bushings in bearings forging of gas pumping units]. *Problemy tertia ta znoshuvannia – Friction and wear problems*, (54), 88–94.

2. Kharlamov, Yu.A., Polonsky, L.G., Nagorniak, Yu.O., Naumchuk, V.N., & Yanovsky, V.A. (2017). Kriterii vybora materiala pokrytija i metoda gazotermicheskogo napyleniia [Criteria for the selection of the coating material and the method of thermal spraying]. *Visnyk nacionalnogo universitetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy – Scientific Herald of national University of life and enviromental Science of Ukraine*, (258), 236–246.

3. Zenkin, M.A., Tarelnik, N.V., Konoplyanchenko, A.E., Antoshevskii, K., & Lazarenko, A.D. (2017). Analiz metodov povysheniya kachestva podshipnikov skolzheniya [Analysis of methods for improving the quality of plain bearings]. *Kompressoroe i jenergeticheskoe mashinostroenie – Compressor and power engineering*, (2), 55-60.

4. Kharlamov, Yu.A., & Polonsky, L.G. (2016). Gazotermicheskoe napylenie, sovremennoe sostojanie i perspektivy razvitija [Thermal spraying, current state and development prospects]. *Visnyk Skhidnoukrains'koho natsionalnogo universytetu imeni Volodymyra Dalia – Bulletin of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, (2), 5–19.

5. Hasui, A., & Morigaki, O. (1985). *Naplavka i napylenie [Surfacing and spraying]. Mashinostroenie.*

6. Gavrish, P.A., Berezhnaya, E.V., & Sobolev-Butovchenko, E.A. (2016). Gazotermicheskoe napylenie antifrikcionnogo pokrytija detalej peregruzhatelja TAKRAF [Thermal spraying of antifriction coating of TAKRAF material handling equipment]. *Naukovyj Visnyk Donbas'koi derzhavnoi mashynobudivnoi akademii – Scientific Bulletin of the Donbass State Machine-Building Academy*, (2), 49–54.

7. Dobrovolsky, O.G., & Kosenko, V.A. (2016). Suchasni antyfryksijni materialy [Modern anti-friction materials]. *Hirnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny – Mining, construction, road and reclamation machines*, (88), 5563.

8. Borisov, Yu.C. (1984). *Poroshki dlja gazotermicheskogo napylenija pokrytij [Powders for thermal spraying of coatings].* Obshhestvo «Znanie».

9. Kazarova, E.N. (Ed). (1990). *Gazotermicheskoe napylenie pokrytij [Thermal spraying of coatings].* Institut elektrosvarki imeni E.O Patona.

10. Institut elektrosvarki imeni E.O. Patona. (1983). *Poroshki metallicheskie (TU IES 374-83) [Metallic powders TU IES 374-83].*

Отримано 21.04.2023

UDC 621.793.71

**Oleksandr Pylypenko¹, Volodymyr Nochvai², Roman Symon³,
Davyd Khraban⁴, Volodymyr Pohorylchuk⁵**

¹Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanical Engineering
State University «Zhytomyr Polytechnic» (Zhytomyr, Ukraine)

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

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

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

³Graduate Student of the Department of Mechanical Engineering
State University «Zhytomyr Polytechnic» (Zhytomyr, Ukraine)

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

⁴Graduate Student of the Department of Mechanical Engineering
State University «Zhytomyr Polytechnic» (Zhytomyr, Ukraine)

E-mail: khraban.david@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2621-2370>

⁵Graduate Student of the Department of Mechanical Engineering
State University «Zhytomyr Polytechnic» (Zhytomyr, Ukraine)

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

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THERMAL SPRAYING COATINGS OF SLIPPING BEARINGS

The use of anti-friction thermal coatings at the stage of manufacturing of machinery, machine and mechanism components opens new opportunities for increasing the working life of parts. The article analyzes the recommendations available in different literature sources for the choice of methods of obtaining anti-friction coating of machine parts. It is noted that the following criteria should be taken into account when selecting thermal coatings: service appointment; working conditions of details; coverage functions; properties of the basic material; necessary coating properties; constructive features of the surface with coating; limitation by applying method selection.

Bronze is included in the anti-friction materials. The best anti-friction properties have tin bronze. In the units of friction machines, heavy equipment are used high-strength aluminum bronze.

For anti-friction coating, the method of oxy-fuel coating spraying is selected. The method has a number of advantages: simplicity of the equipment, cheap and easy to manage method, the restored part has a flat surface. The developed technological process of coating spraying consists of the following basic operations: preparation of parts, preparation of powder, coating on a part, mechanical processing, output control.

For obtaining anti-friction coating there are powder alloys of following grades selected: BrkMts3-5; BrA10; BrAZ10-1,5. As a layer of coating powder of the PA-ON-01 brand is used. The coating was applied to the details of the machines and as witness samples for the investigation of their properties. The comparative wear resistance of samples of standard parts and parts with anti-friction coating was studied on the friction machine.

It has been found that wear resistance of coatings from Bráz10-1,5, BrA10, Brkmts3-5 in comparison with wear resistance of base materials increased in 3...4 times, in 2 times and in 1,5 times respectively.

The developed anti-friction coating can be recommended for receiving protective coatings on the parts at their serial release and restoration of the processed parts in the repair enterprises.

Key words: *spray material; coating technology; weight depreciation of the coating; depreciation resistance of anti-friction coating; tests of coatings.*

Fig.: 4. Table: 1. References: 10.

Геннадій Болотов¹, Максим Болотов², Сергій Олексієнко³, Михайло Руденко⁴

¹доктор технічних наук, професор, професор кафедри технологій зварювання та будівництва
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: bolotovgp@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0305-2917>
ResearcherID: [H-5304-2014](https://orcid.org/0000-0003-0305-2917), Scopus Author ID: [6506157907](https://orcid.org/0000-0003-0305-2917)

²кандидат технічних наук, доцент, кафедри технологій зварювання та будівництва,
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: bolotovmg@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0915-4132>
ResearcherID: [H-4183-2014](https://orcid.org/0000-0002-0915-4132), Scopus Author ID: [57190377278](https://orcid.org/0000-0002-0915-4132)

³кандидат технічних наук, доцент, кафедри технологій зварювання та будівництва,
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: sv.oleks@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5475-4439>
ResearcherID: [F-8197-2014](https://orcid.org/0000-0001-5475-4439), Scopus Author ID: [57190370561](https://orcid.org/0000-0001-5475-4439)

⁴старший викладач, кафедри технологій зварювання та будівництва,
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: rudenko.bear@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9542-7792>
ResearcherID: [G-6235-2014](https://orcid.org/0000-0001-9542-7792), Scopus Author ID: [57190378153](https://orcid.org/0000-0001-9542-7792)

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ТЛІЮЧИМ РОЗРЯДОМ ЯК ДЖЕРЕЛА НАГРІВУ ПРИ ДИФУЗІЙНОМУ ЗВАРЮВАННІ

На основі методів математичного планування експерименту визначено основні керуючі впливи, що характеризують зварювальний нагрів у тліючому розряді, серед яких є розрядний струм (I_p), який визначає загальну потужність, що виділяється в розрядному проміжку, та тиск газу (P), який змінює питомі енергетичні характеристики розряду.

Ключові слова: дифузійне зварювання; тліючий розряд; керування нагрівом; газорозрядна плазма.

Рис.: 5. Табл.: 1. Бібл.: 26.

Актуальність теми дослідження. У наш час для отримання якісних нероз'ємних з'єднань різнорідних матеріалів широко застосовуються методи зварювання у твердому стані. Найбільш поширеним серед них є дифузійне зварювання.

Широка номенклатура з'єднань, отримуваних за допомогою дифузійного зварювання, зумовлює комплекс специфічних вимог до джерел зварювального нагріву. Ці вимоги, головним чином, пов'язані з придатністю до зварювання широкого асортименту матеріалів і форм виробів, точністю регулювання питомої теплоємності та можливістю регулювання температури нагріву зразків у широких межах [1; 2]. Зважаючи на ці вимоги, серед усіх джерел енергії для дифузійного зварювання (індукційних, радіаційних, електроконтактних джерел нагріву) найбільш прийнятним є нагрівання розподіленою газорозрядною плазмою нормального тліючого розряду, що горить у середовищі інертних або активних газів при тисках 0,1 ... 100 кПа [3; 4].

Застосування тліючого розряду як джерела нагріву для дифузійного зварювання є ефективним насамперед завдяки широкому діапазону регулювання технологічних параметрів, високій адаптованості до змінного асортименту, а також високій енергоефективності (0,7-0,85) [5]. Усе це робить тліючий розряд надзвичайно ефективним джерелом нагріву для різноманітних технологічних процесів, у тому числі для дифузійного зварювання.

Постановка проблеми. Однак на сьогодні це джерело нагріву так і не отримало широкого промислового впровадження в процесах дифузійного зварювання, що, на нашу думку, пов'язано з дуже обмеженими уявленнями про специфіку механізму дії тліючого розряду як інструмента зварювального нагріву та, що найголовніше, про реалізацію керування його енергетичними параметрами в умовах високотемпературного нагрівання та засобів їх стабілізації в умовах дії зовнішніх енергетичних збурень. Як

наслідок, поява високого рівня дефектності та зниження продуктивності технологічного процесу загалом, оскільки оператору зварювальної установки доводиться приймати рішення стосовно керування параметрами режимів зварювання в умовах багатofакторного середовища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанню керування енергетичними характеристиками тліючого розряду в різних технологічних процесах, зокрема в умовах іонно-плазмового нанесення функціональних покриттів [6-8], тонких металевих плівок [9-11], хіміко-термічній обробці металів в плазмі тліючого розряду [12; 13] тощо присвячено достатню кількість робіт. У роботі [14] було здійснено спроби визначення ступеня впливу параметрів режиму тліючого розряду на ефективність нагріву в умовах дифузійного зварювання. Досліджування проводились шляхом певного варіювання величини параметрів у межах 25 % від середнього значення із подальшим визначенням їх впливу на ефективний ККД джерела нагріву.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Однак у роботі [14] не брався до уваги температурний стан катода (зварного виробу) і швидкість його нагрівання під час зварювання, а оцінювалася суто енергетична ефективність, тобто корисний енерговнесок джерела нагріву. Результатами роботи стала номограма для визначення ефективного ККД нагріву, яка має скоріше уможлидний характер, аніж реальне практичне застосування.

Таким чином, на сьогодні в літературі відсутні дані стосовно впливу параметрів режиму тліючого розряду на тепловий стан катода в умовах дифузійного зварювання та паяння.

Мета роботи. У зв'язку з цим мета даної роботи полягає в оптимізації процесу керування нагрівом в плазмі тліючого розряду в умовах дифузійного зварювання шляхом визначення з усієї сукупності параметрів режиму найбільш тісно пов'язаних із температурою катода (деталей, що зварюються) при нагріванні в газорозрядній плазмі тліючого розряду.

Виклад основного матеріалу. До основних параметрів режиму при нагріванні в полі тліючого розряду слід віднести електричні і технологічні складові, а саме: струм розряду, тиск в газорозрядній камері, протяжність міжелектродного проміжку (відстань катод-анод), род газу [15]. Залежності, отримані в ході експериментів, наведені на рис. 1, показують, що ці параметри істотно по-різному впливають на характер тепловиділення на катоді в процесі зварювального нагріву й визначаються, в основному, властивостями газового середовища, зокрема густиною струму розряду (j) і величиною катодного падіння потенціалу (U_k).

Так, наприклад, зростання тиску газу в газорозрядній камері неминуче призводить до збільшення густини струму розряду i , відповідно, температури катода. Швидкість нагріву при цьому також збільшується [16].

Підвищення струму розряду призводить до різкого зростання температури нагріву катода за рахунок збільшення повної потужності джерела нагріву $W = IU_p$. Однак при зварюванні масивних деталей, збільшення сили струму при постійному тиску в камері призводить до певного сповільнення нагріву катода, що зумовлено зростанням протяжності катодної плями розряду i , відповідно, зменшенням густини струму в плямі нагріву. Тобто джерело нагріву з концентрованого переходить у розподілене.

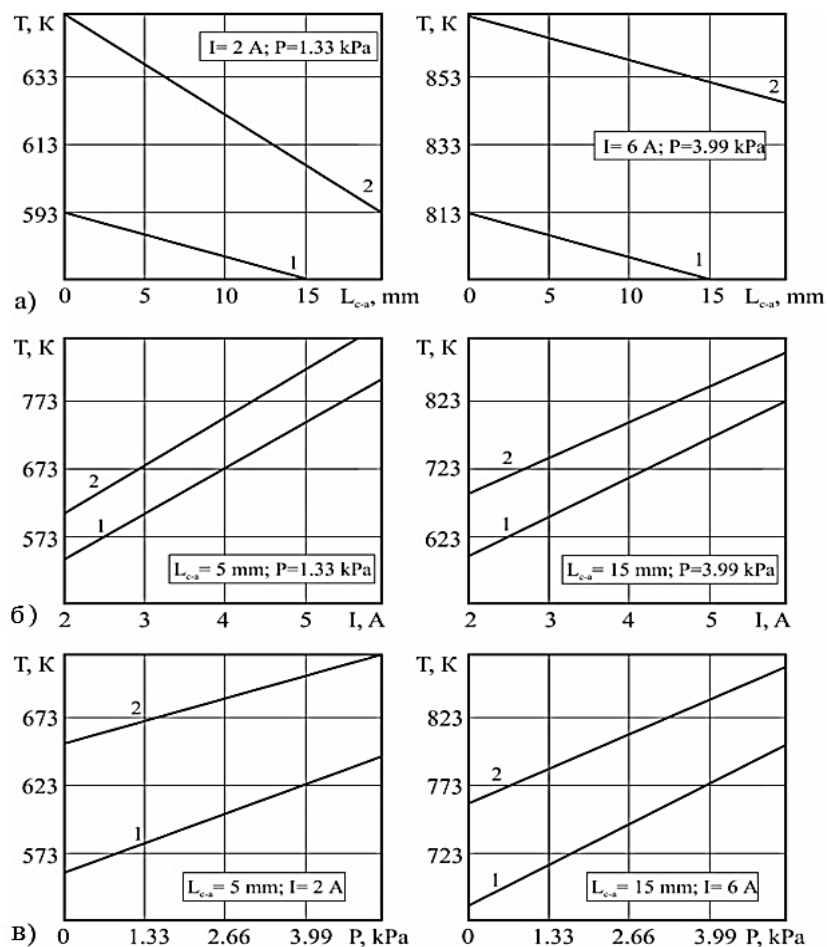


Рис. 1. Залежності температури нагріву катода (деталей, що зварюються) від міжелектродної відстані ($L_{к-а}$) (а); струм розряду (I_p) (б); тиск газу (P) (в):
 1 – в аргоні (де $U_k = 165 \text{ В}$); 2 – в азоті (де $U_k = 215 \text{ В}$)

Вплив сили розрядного струму та тиску в газорозрядній камері проілюстровано на рис. 2.

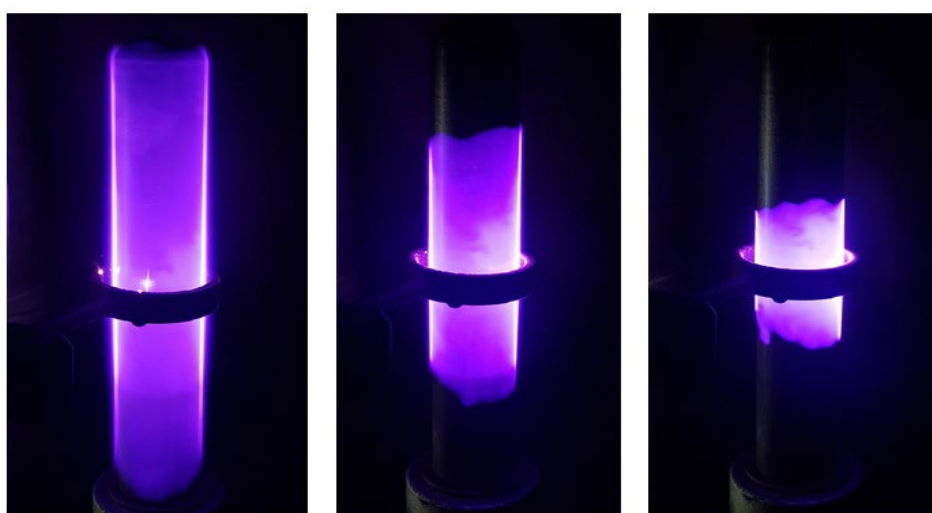


Рис. 2. Характер розподілу плями нагріву циліндричного катода (30×160 мм) нормальним тліючим розрядом зі збільшенням розрядного струму та тиску газу в робочій камері (опис у тексті)

Як видно із наведених залежностей, керування зварювальним нагрівом в тліючому розряді є складним, багатофакторним процесом, при якому кожен із наведених параметрів режиму може змінюватися в досить широких межах. У зв'язку з цим для забезпечення технічної і практичної реалізації керування ними в процесі зварювання, на цьому етапі, доцільним є визначення з усієї сукупності параметрів режиму оптимальних, тобто параметрів, найбільш тісно пов'язаних із температурою катода (деталей, що зварюються).

Визначення таких параметрів здійснювали за допомогою оцінки коефіцієнтів при відповідних чинниках статичних моделей, побудованих за допомогою методів математичного планування експерименту [17].

У модель заносилася сукупність параметрів з урахуванням можливості їх кількісної оцінки. Параметром оптимізації було призначено температуру нагріву катода T , °C. Як варійовані фактори приймали: міжелектродна відстань $L_{к-а, мм} (X_1)$, струм розряду $I_p (X_2)$, тиск в газорозрядній камері P , мм. рт.ст. (X_3) та род газу, точніше катодне падіння потенціалу для відповідного газу $U_k, В (X_4)$. В якості газового середовища було обрано аргон та азот із відповідними значеннями $U_k = 165 В$ для аргону та $U_k = 215 В$ для азоту.

Для зменшення впливу випадкових похибок вимірювань кожний дослід при проведенні експерименту повторювався 5 разів. Інтервали варіювання факторів і їх числові значення на верхньому і нижньому рівнях наведені в таблиці.

Таблиця – Рівні та інтервали варіювання факторів

Фактори	Інтервали варіювання, ΔX	Рівні варіювання		
		Нижній рівень, ($X_i = -1$)	Основний рівень	Верхній рівень, ($X_i = +1$)
Міжелектродна відстань ($L_{к-а}$), мм	5	5	10	15
Струм розряду I_p , А	2	2	4	6
Тиск в газорозрядній камері P , мм.рт.ст.	10	10	20	30
Газове середовище U_k , В		165 (Ar)		215 (N ₂)
Параметр оптимізації – температура катода T , °C.				

З метою визначення впливу значень варійованих факторів на величину параметра оптимізації застосовували повний факторний експеримент, матриця якого має вид 2^4 .

Експерименту, що містить таку кількість опитів відповідатиме лінійна модель, яка має такий вигляд:

$$y = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_4 \cdot X_4; \quad (1)$$

Розрахунок коефіцієнтів при відповідних факторах рівняння здійснювалася за формулами, наведеними в роботі [18]:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} y_i}{N}, \quad j = 0, 1, \dots, k, \quad (2)$$

де $\sum_{i=1}^N x_{ji}$ – алгебраїчна сума елементів вектор – стовпця кожного фактора; i – номер дослідів; j – номер фактору; N – число дослідів.

Коефіцієнт b_0 знаходили як середнє арифметичне значення параметра оптимізації $b_0 = 445,652$. Значення коефіцієнтів при відповідних факторах, розраховані за формулою (2), виглядають наступним чином: $b_1 = -27,625$; $b_2 = 93,125$; $b_3 = 61,375$; $b_4 = 26,875$.

Після визначення величини коефіцієнтів при відповідних факторах наша лінійна модель матиме такий вигляд:

$$y = 445,652 - 27,625 \cdot X_1 + 93,125 \cdot X_2 + 61,375 \cdot X_3 + 26,875 \cdot X_4; \quad (3)$$

Як відомо, величина коефіцієнта при відповідному факторі визначає ступінь його взаємодії із параметром оптимізації, тобто чим більше чисельна величина коефіцієнта, тим сильніше відповідний фактор впливатиме на нього [19]. У зв'язку з цим можна зробити висновок, що найбільш тісно з температурою на катоді пов'язані зміни струму розряду. Останнє дає нам підґрунтя вважати цей параметр режиму основним при керуванні зварювальним нагрівом у полі нормального тліючого розряду. Також слід виділити зміни тиску в газорозрядній камері. Як уже було сказано вище, зміни останнього суттєво впливають на питомі енергетичні характеристики в прикатодній ділянці розряду. Тому нехтувати цим параметром не можна.

Найбільш негативно серед досліджуваних параметрів на процес нагріву катода при зварюванні в тліючому розряді впливає збільшення міжелектродної відстані. Чому свідчить знак мінус при відповідному коефіцієнті. Це пояснюється тим, що збільшення відстані катод-анод призводить до стрімкого погіршення енергетичних характеристик розряду внаслідок зниження напруженості електричного поля в позитивному стовпі розряду. Практична реалізація управління енергетичними характеристиками плазми і стабілізацію тліючого розряду в умовах дії енергетичних збурень шляхом зміни міжелектродної відстані було реалізовано і продемонстровано в роботі [20].

Як показано в роботі [21], процес дифузійного зварювання в тліючому розряді являє собою послідовність наступних операцій: 1) іонне очищення деталей перед зварюванням; 2) термічний нагрів зони з'єднання до температури зварювання; 3) витримка при цій температурі, тобто власне зварювання; 4) охолодження після зварювання. Ці етапи відрізняються один від одного як тривалістю, так і енергетичними характеристиками тліючого розряду.

Як вже було показано, найбільш суттєвий вплив на нагрів деталей в полі тліючого розряду має зміна розрядного струму і тиску газу в робочій камері. На рис. 3 показано характер їх зміни на різних етапах дифузійного зварювання.

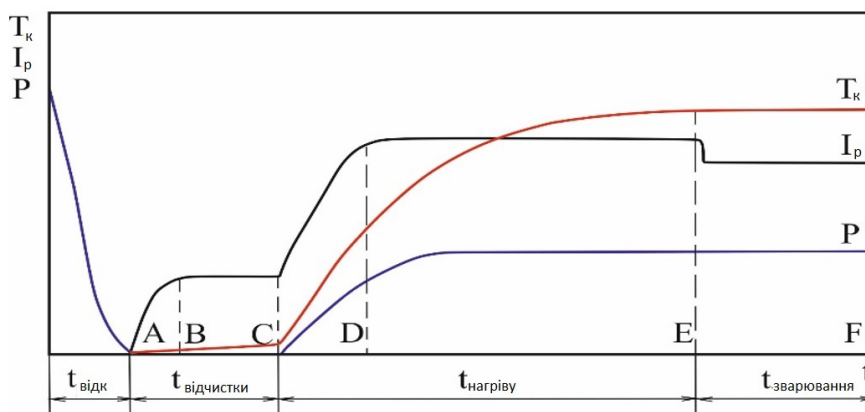


Рис. 3. Циклограма процесу дифузійного зварювання тліючим розрядом:
 I_p – розрядний струм, P – тиск газу, T_k – температура нагріву катода,
 $t_{\text{відк}}$ – тривалість відкачування, $t_{\text{від}}$ – час іонного очищення, $t_{\text{нагр}}$ – тривалість нагріву
заготовок до температури зварювання, $t_{\text{зв}}$ – час зварювання [22]

Нині в більшості сучасних застосовуваних на практиці зварювальних установок тліючого розряду налаштування параметрів режиму здійснюється оператором вручну [23]. При цьому завдання оператора зводиться до безперервного контролю за ходом процесу й підтримання на заданому рівні параметрів режиму на кожному етапі. Це різко погіршує психофізіологічні умови роботи оператора і вимагає підвищення кваліфікації працівників.

З метою покращення умов роботи оператора та відповідно продуктивності процесу нами було розроблено прилади контролю основних параметрів режиму нагріву – струму розряду та тиску газу. Ці пристрої мають зворотний зв'язок за цими параметрами для

контролю та стабілізації їх значення при відхиленні, а також програмні елементи керування (реле затримки часу) для встановлення тривалості процесів іонного очищення та ізотермічної витримки (зварювання). Прилади забезпечують регулювання струму розряду в діапазоні 1 ... 10 А і тиску газу в камері від 1,33 кПа до 13,3 кПа.

Основним елементом схеми регулятора зварювального струму, блок-схема якого наведена на рис. 4, є фазоімпульсний блок керування (ФБК) з кутом спрацьовування силових тиристорів регулятора напруги (РН). Блоки налаштування струмів іонного очищення ($I_{оч}$), нагріву ($I_{нагр}$) і зварювання ($I_{зв}$) підключаються до входу регулятора за допомогою контролера (К), а також реле часу (РЧ). На виході блоків налаштування струму іонного очищення і нагріву підключаються комутаційний інтегруючий блок, які забезпечують регульовану швидкість збільшення розрядного струму за експоненціальним законом у момент запалювання тліючого розряду і при переході від режиму іонного очищення до нагрівання. Сигнал про стан розряду приймається від датчика зварювального струму (ДЗС).

Виконавчими елементами (ВЕ) регулятора тиску газу в камері відкочування (рис. 5) є електропневматичні клапани, підключені до лінії вакууму (ВЕ1) і входу газу (ВЕ2), а також до лінії (ВЕ3). з'єднання камери з атмосферою. Керуючі сигнали U_{04} і U_{05} на вмикання електропневматичних клапанів надходять з виходів порогових елементів (ПЕ1) і (ПЕ2), запрограмованих за допомогою контролерів $K(P_0)$ і $K(P_{зв})$, на спрацьовують при досягненні тиску P_0 в камері (попереднє відкачування) і $P_{зв}$ (робочий тиск) відповідно. Мембранний датчик тиску (ДТ) з електричним вихідним сигналом контролює розрідження в робочій камері. Після закінчення зварювання оператор вручну подає сигнал U_{06} на пороговий елемент (ПЕ3) для пропуску повітря в камеру до атмосферного тиску Па. Порогові елементи, що представляють собою тригери, зібрані на логічних елементах серії К155. Задаючим елементом режиму в обох регуляторах є високо-стабільні регульовані джерела напруги.

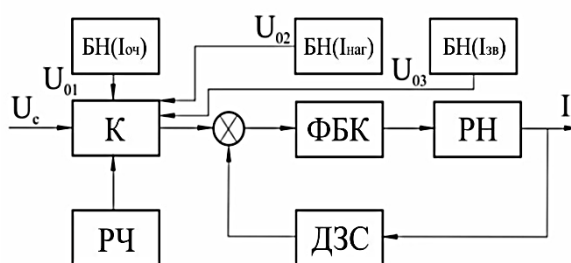


Рис. 4. Структурна схема регулятора зварювального струму: БН($I_{оч}$), БН($I_{нагр}$), БН($I_{зв}$) – блоки налаштування струму іонного очищення, нагріву та зварювання відповідно; К – контролер; ФБК – фазоімпульсний блок керування; РН – регулятор напруги; РЧ – реле часу; ДЗС – датчик зварювального струму

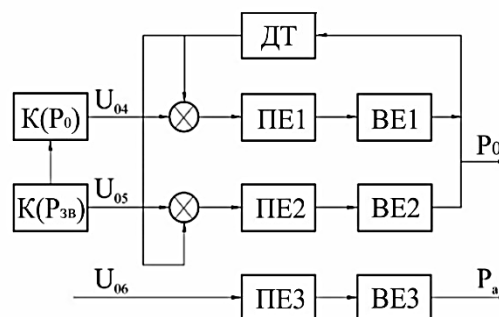


Рис. 5. Структурна схема регулятора тиску газу: ДТ – датчик тиску; ПЕ1, ПЕ2, ПЕ3 – порогові елементи; ВЕ1, ВЕ2, ВЕ3 – виконавчі елементи; $K(P_0)$ – контролер попередньої евакуації; $K(P_{зв})$ – регулятор робочого тиску (тиску зварювання)

При включенні зварювальної установки в регуляторі тиску газу спрацьовує пороговий елемент ПЕ1, який запускає вакуумний насос і відкриває лінію насос-камера, починаючи відкачування останньої. Після досягнення необхідного вакууму на розрядні електроди подається потенціал і регулятор струму встановлює заданий струм іонної очистки $I_{оч}$. Після закінчення часу іонного очищення (60...300 с) реле часу підключає регулятор

струму нагріву. При цьому робочий газ впускається в камеру через клапан (V_2) до певного тиску, встановленого контролером $C(P_{зв})$. Похибка підтримки заданого режиму на всіх стадіях процесу не перевищує 5 %.

Однак слід пам'ятати, що при нагріванні і зварюванні завжди існує ймовірність відхилення параметрів. Останнє неминуче призводить до зниження стійкості тліючого розряду і створення умов для утворення електричної дуги в міжелектродному проміжку. У зв'язку з цим рекомендуємо використовувати ці контрольні пристрої разом з технічними засобами стабілізації тліючого розряду, включеними в розрядний контур. Їхні детальні схеми та опис наведено в роботах [24-26].

Висновки. Таким чином, встановлено, що температура нагріву катода при дифузійному зварюванні в полі тліючого розряду суттєво залежить параметрів режиму, які необхідно враховувати при конкретних технологічних процесах.

Шляхом застосування методів математичного планування експерименту визначено, що основними керуючими впливами, що характеризують зварювальний нагрів у тліючому розряді, є розрядний струм (I_p), який визначає загальну потужність, що виділяється в розрядному проміжку, та тиск газу (P), який змінює питомі енергетичні характеристики розряду.

Розроблено технічні засоби контролю основних параметрів (I_p , P) тліючого розряду при дифузійному зварюванні, які забезпечують регулювання розрядного струму в межах 1...10 А і тиску газу в розрядній камері від 1,33 до 13,3 кПа.

Список використаних джерел

1. Investigation of Mass-Transfer Features with Usage of Ion-Modified Blocking Layer in Commuting Plate of Thermoelements / V. F. Mazanko, Iu. V. Falchenko, O. O. Novomlynets, I. V. Nahorna, S. M. Yushchenko // *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* – 2021. – 43, No. 2. – Pp. 209-217.
2. Vacuum Diffusion Welding of Intermetallic Alloy γ -TiAl with High-Temperature Alloy EI437B Through Nanolayered Interlayers / L. V. Petrushynets, I. V. Falchenko, A. I. Ustinov, O. O. Novomlynets, S. M. Yushchenko // 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). – Lviv, Ukraine, 2019. – Pp. 542-546.
3. Котельников Д. И. Технологические особенности применения тлеющего разряда при сварке / Д. И. Котельников // *Технология и организация производства.* – 1976. – №7. – С. 57-59.
4. Котельников Д. И. Нагрев тлеющим разрядом при диффузионной сварке / Д. И. Котельников // *Вестник Киевского политехнического института. Серия «Машиностроение».* – 1968. – № 5. – С. 56-60.
5. Котельников Д. И. Распределение плотности тока в катодном пятне тлеющего разряда. / Д. И. Котельников, Ю. Н. Крисанов // *Автоматическая сварка.* – 1979. – № 11. – С. 27-29.
6. Lima R. S. Thermal Spray Coatings Engineered from Nanostructured Ceramic Agglomerated Powder for Structural, Thermal Barrier and biomedical Applications: A Review / R. S. Lima, B. R. Marpel // *Journal of Thermal Spray Technology.* – 2007. – Vol. 16 (1). – Pp. 40-63.
7. Застосування композиційних порошків системи Al_2O_3 -Ti-Cu для підвищення корозійної стійкості плазмових покриттів / І. В. Смирнов, А. В. Чорний, І. А. Калашнікова, І. А. Селіверстов // *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування.* – 2009. – № 1. – С. 74-81.
8. Селіверстов І. А. Вплив параметрів процесу вакуумно-дугової металізації на якість порошкового матеріалу / І. А. Селіверстов // *Вісник Херсонського національного технічного університету.* – 2008. – № 3 (32). – С. 142-148.
9. Исследование характеристик плазмы в несбалансированной магнетронной распылительной системе / А. А. Соловьев, Н. С. Сочугов, К. В. Оскомов, С. В. Работкин // *Физ. плазмы.* – 2009. – Т. 35, № 5. – С. 443-452.
10. Устрйоство для осаждения тонких пленок с бомбардировкой быстрыми атомами аргона / А. С. Метель, В. П. Болбуков, М. А. Волосова, Ю. А. Григорьев // *Приборы и техника эксперимента.* – 2014. – № 3. – С. 114-121.
11. Данилин Б. С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. / Б. С. Данилин. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 328 с.
12. Рамазанов, К. Н. Ионное азотирование в неоднородной плазме тлеющего разряда / К. Н. Рамазанов, Д. З. Ишмухаметов, Н. С. Садаков // *Вестник УГАТУ.* – 2011. – №3. – С. 67-71.

13. Шехтман С. Р. Использование разряда с полым катодом для обработки поверхности конструкционных материалов. / С. Р. Шехтман, В. В. Будилов, Р. М. Киреев // Физика и химия обработки материалов. – 2001. – №2. – С. 31-35.
14. Болотов Г. П. Керування енергетичними характеристиками тліючого розряду в умовах дифузійного зварювання. / Г. П. Болотов, М. Г. Болотов, М. М. Руденко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2014. – № 1 (71). – С. 145-150.
15. Котельников Д. И. Физико-технические и технологические процессы сварки в тлеющем разряде : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. / Д. И. Котельников. – Москва : МВТУ, 1985. – 32 с.
16. Садовников Б. В. Диффузионная сварка в тлеющем разряде твердого сплава со сталью на опытном образце серийной установки ДС. / Б. В. Садовников // Электротехническая промышленность. Сер. Электросварка. – 1982. – Вып. 4. – С. 3-5.
17. Новик Ф. С. Математические методы планирования экспериментов в металловедении / Ф. С. Новик. – Москва : МИСИС. 1972. – 105 с.
18. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский ; под ред. Ю. П. Адлера. – Москва : Наука, 1976. – 278 с.
19. Налимов В. В. Теория эксперимента. / В. В. Налимов. – Москва : Наука, 1971.
20. Болотов М. Г. Усунення стабілізації електричних дуг у процесах зварювання та паяння в тліючому розряді / М. Г. Болотов, Г. П. Болотов // Наукові вісті КПП. – 2020. – № 3. – С. 50-57.
21. Дятлов В. И. Технология сварки в тлеющем разряде / В. И. Дятлов // Диффузионное соеднение в вакууме металлов, сплавов и неметаллических материалов. – Москва : ПНИЛДСВ, 1970. – С. 89-91.
22. Megalingam, M. Occurrence of ionization instability associated with plasma bubble in glow discharge magnetized plasma / M. Megalingam, B. Sarma // Plasma Sci. Technol. – 2019. – № 2. – С. 1-22.
23. Laimer, J. Glow Discharges Observed in Capacitive Radio-Frequency Atmospheric-Pressure Plasma Jets / J. Laimer, H. Stori. // Plasma Process. Polym. – 2006. – № 3. – Pp. 573-586.
24. Bolotov, M. G. Elimination of Electric Arc Stabilization in Precision Welding with High-Current Glow Discharge / M. G. Bolotov, G. P. Bolotov // 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). – 2019. – April. – Pp. 578-583.
25. Болотов, Г. П. Дослідження стійкості тліючого розряду з порожнистим катодом в умовах зварювання / Г. П. Болотов, М. Г. Болотов // Вісник ЧДТУ. – 2008. – № 36. – С. 100-106.
26. Bolotov, G. P. The ways of stabilization of high-current glow discharge in welding” / G. P. Bolotov, M. G. Bolotov, S. A. Stepenko // 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). – 2018. – Pp. 358- 363.

References

1. Mazanko, V. F., Falchenko, Iu. V., Novomlynets, O. O., Nahorna, I. V., & Yushchenko, S. M. (2021). Investigation of Mass-Transfer Features with Usage of Ion-Modified Blocking Layer in Commuting Plate of Thermoelements. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 43(2), 209-217.
2. Petrushynets L. V., Falchenko I. V., Ustinov A. I., Novomlynets, O. O., & Yushchenko, S. M. (2019). Vacuum Diffusion Welding of Intermetallic Alloy γ -TiAl with High-Temperature Alloy EI437B Through Nanolayered Interlayers. *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)* (pp. 542-546).
3. Kotelnikov, D. I. (1976). Tehnologicheskie osobennosti primeneniya tleyushogo razryada pri svarke [Technological features of glow discharge application while welding]. *Tehnologiya i organizaciya proizvodstva – Technology and organization of production*, (7), 57-59.
4. Kotelnikov, D. I. (1968). Nagrev tleyushim razryadom pri diffuzionnoj svarke [Heating by glow discharge while diffusion welding]. *Vestnik Kiev. politehn. In-ta. Ser. «Mashinostroenie» – Bulletin of the Kyiv Polytechnic Institute. Series “Engineering”*, (5), 56-60.
5. Kotelnikov, D. I., & Krisanov, Yu. N. (1979). Raspreделение plotnosti toka v katodnom pyatne tleyushogo razryada [Destrebuton of current density in a cathode spot of a glow discharge] *Avtomaticheskaya svarka – Automatic conflict*, (11), 27-29.
6. Lima, R. S., & Marpel, B. R. (2007). Thermal Spray Coatings Engineered from Nanostructured Ceramic Agglomerated Powder for Structural, Thermal Barrier and biomedical Applications: A Review. *Journal of Thermal Spray Technology*, 16(1), 40-63.

7. Smirnov, I.V., Chornii, A.V., Kalashnikova, I.A., & Seliverstov, I.A. (2009). Zastosuvannya kompozicijnih poroshkiv sistemi Al₂O₃-Ti-Cu dlia pidvishennia korozii noi stiikosti plazmovykh pokrittiv [The use of composite powders of the Al₂O₃-Ti-Cu system to increase the corrosion resistance of plasma coatings]. *Zbirnyk naukovykh prats nitsionalnoho universitetu korableubuduvannia – Collection of scientific works of the National University of Shipbuilding*, (1), 74-81.

8. Syeliverstov, I.A. (2008). Vpliv parametriv procesu vakuumno-dugovoyi metalizaciyi na yakist poroshkovogo materialu. [Impact of parameters of the vacuum-arc metallization process on the quality of the powder material]. *Visnik Hersonskogo nacionalnoho tehnicznego universitetu – Bulletin of the Kherson National Technical University*, 3(32), 142-148.

9. Solovev, A.A., Sochugov N.S., Oskomov K.V., & Rabotkin S.V. (2009). Issledovanie harakteristik plazmy v nesbalansirovannoj magnetronnoj raspylitelnoj sisteme [Investigation of plasma characteristics in an unbalanced magnetron sputtering system]. *Fiz. Plazmy – Plasma Phys*, 35(5), 443-452.

10. Metel, A.S., Bolbukov, V.P., Volosova, M.A., & Grigorev, Yu.A. (2014). Ustrojstvo dlya osazhdeniya tonkih plenok s bombardirovkoy bystryimi atomami argona [Device for deposition of thin films with bombardment with fast argon atoms]. *Pribory i tehnika eksperimenta – Instruments and technique of experiment*, (3), 114-121.

11. Danilin, B.S. (1989). *Primenenie nizkotemperaturnoj plazmy dlya naneseniya tonkih plenok [Application of low-temperature plasma for application of thin films]*. Energoatomizdat.

12. Ramazanov, K.N., Ishmuhametov, D.Z., & Sadakov, N.S. (2011). Ionnoe azotirovanie v neodnorodnoj plazme tleyushogo razryada [Ion nitriding in an inhomogeneous glow discharge plasma]. *Vestnik UGATU – Vestnik UGATU*, (3), 67-71.

13. Shehtman S.R., Budilov V.V., Kireev R.M. (2001). Ispolzovanie razryada s polym katodom dlya obrabotki poverhnosti konstrukcionnyh materialov [Use of a discharge with a hollow cathode for processing the surface of structural materials]. *Fizika i himiya obrabotki materialov – Physics and chemistry of material processing*, (2), 31-35.

14. Bolotov, G.P., Bolotov M.G., & Rudenko M.M. (2014). Keruvannya energetichnimi harakteristikami tliuchogo rozryadu v umovah difuzijnogo zvaryuvannia. [Control of the energy characteristics of a glow discharge in the conditions of diffusion welding.] *Visnik Chernihivskoho derzhavnoho tehnolohichnoho universitetu. Serii: Tehniczni nauki – Bulletin of the Chernihiv State Technological University. Series: Technical sciences*, (1(71)), 145-150.

15. Kotelnikov, D.I. (1985). *Fiziko-tehnicheskie i tehnologicheskie processy svarki v tleyushem razryade [Physico-technical and technological processes of welding in a glow discharge]*. [Doctor dissertation; MVTU].

16. Sadovnikov, B.V. (1982). Diffuzionnaya svarka v tleyushem razryade tverdogo splava so stalju na opytnom obrazce serijnoj ustanovki DS [Diffusion welding in a glow discharge of a hard alloy with steel on a pilot sample of a serial installation of DW]. *Elektrotehnicheskaya promyshlennost. Ser. Elektrosvarka – Electrotechnical industry. Ser. Electric welding*, 4, 3-5.

17. Novik, F.S. (1972). *Matematicheskie metody planirovaniya eksperimentov v metallovedenii [Mathematical methods of planning experiments in metallurgy]*. MISIS.

18. Adler, Yu.P., Markova, E.V., & Granovskii, Yu.V. (1976). *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnyh uslovij [Planning the experiment in search of optimal conditions]*. Nauka.

19. Nalimov, V.V. (1971). *Teoriia eksperimenta [The theory of experiment]*. Nauka.

20. Bolotov, M.G., & Bolotov G.P. (2020). Usunennya stabilizaciyi elektrichnih dug u procesah zvaryuvannia ta payannia v tliuchomu rozryadi [Elimination of stabilization of electric arcs in the processes of welding and soldering in glow discharge]. *Naukovi visti KPI – Naukovi visti KPI*, (3), 50-57.

21. Diatlov, V.I. (1970). *Tehnologiya svarki v tleyushem razryade. Diffuzionnoe soedinenie v vakuume metallov, splavov i nemetallicheskih materialov [Technology of strife in a smoldering discharge. Diffusion joining of metals, alloys and non-metallic materials in a vacuum]*. PNILDSV.

22. Megalingam, M., & Sarma, B. (2019). Occurrence of ionization instability associated with plasma bubble in glow discharge magnetized plasma. *Plasma Sci. Technol.*, 21, 1–22.

23. Johann Laimer, & Herbert Stori. (2006). Glow Discharges Observed in Capacitive Radio-Frequency Atmospheric-Pressure Plasma Jets. *Plasma Process. Polym.*, 3, 573–586.

24. Bolotov, M.G., & Bolotov, G.P. (April 2019). Elimination of Electric Arc Stabilization in Precision Welding with High-Current Glow Discharge. *2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)* (pp. 578-583).

25. Bolotov G.P., Bolotov M.G. (2008) Doslidzhennya stijkosti tliyuchogo rozryadu z porozhnistim katodom v umovah zvaryuvannya [Investigation of the stability of glow discharge with a hollow cathode under welding conditions]. *Visnik ChDTU – Bulletin of ChDTU*, (36), 100-106.

26. Bolotov G.P., Bolotov M.G., Stepenko S.A. (2018). The ways of stabilization of high-current glow discharge in welding. *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)* (pp.358- 363).

Отримано 04.05.23

UDC 621.791.12

Gennady Bolotov¹, Maksym Bolotov², Serhii Oleksienko³, Mykhailo Rudenko⁴

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: <https://orcid.org/0000-0003-0305-2917>

ResearcherID: [H-5304-2014](https://orcid.org/0000-0003-0305-2917), Scopus Author ID: [6506157907](https://orcid.org/0000-0003-0305-2917)

²PhD 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: <https://orcid.org/0000-0002-0915-4132>

ResearcherID: [H-4183-2014](https://orcid.org/0000-0002-0915-4132), Scopus Author ID: [57190377278](https://orcid.org/0000-0002-0915-4132)

³PhD 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: sv.oleks@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5475-4439>

ResearcherID: [F-8197-2014](https://orcid.org/0000-0001-5475-4439), Scopus Author ID: [57190370561](https://orcid.org/0000-0001-5475-4439)

⁴Prime Lecturer of Welding Technologies and Construction

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: rudenko.bear@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9542-7792>

ResearcherID: [G-6235-2014](https://orcid.org/0000-0001-9542-7792), Scopus Author ID: [57190378153](https://orcid.org/0000-0001-9542-7792)

OPTIMIZATION OF THE GLOW DISCHARGE CONTROL PROCESS AS A HEAT SOURCE WHILE DIFFUSION WELDING

Nowadays the diffusion welding is the most effective method to obtain undetachable joints, which is carried out in the solid phase without melting the metals that are welded due to thermomechanical influence. A large nomenclature of types of products performed by diffusion welding presents a set of requirements for diffusion welding heating sources, mainly related to their versatility and specialization in order to obtain the greatest technical and economic effect from its use. The experience of industrial application of diffusion welding shows that of the currently used energy sources (induction, radiation, electric contact, etc.), the heating of products with a glow discharge meets the specified requirements most fully, which allows to regulate the intensity of heating and the distribution of thermal energy in the heating zone within wide limits.

However, the wide industrial application of glow discharge is limited by a number of factors, mainly caused by the lack of understanding of the specifics of heating by this source and management of its main parameters during the welding process. The latter leads to an increase in the level of defectiveness of welded joints due to the human factor, since the operator of the diffusion welding installation in the glow discharge has to work in the conditions of a multifactorial process where it is necessary to control a significant number of technological parameters.

By applying mathematical methods of statistical analysis, the main parameters of the regime, which are most closely related to the temperature of the cathode of the glow discharge in the welding process, are determined in the work. It was determined that the greatest controlling influence on the heating temperature in the glow discharge field is the discharge current (I_p), which determines the total power released in the discharge interval, and the gas pressure (P), which changes the specific energy characteristics of the discharge.

On the basis of the conducted research, we have developed technical means of controlling these parameters during diffusion welding, which provide regulation of the discharge current within 1...10 A and the gas pressure in the discharge chamber from 1.33 to 13.3 kPa.

Keywords: diffusion welding; glow discharge; heating control; gas-discharge plasma.

Fig.: 5. Table: 1. References: 26.

Анатолій Жерносеков¹, Володимир Халіков², Олександр Шатан³, Віталій Приходько⁴

¹ доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
завідувач відділу імпульсних процесів і технологій дугового зварювання
Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України (Київ, Україна)

E-mail: zhernosekov@paton.kiev.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6404-2221>

² доктор технічних наук, старший науковий співробітник, старший викладач кафедри електричних мереж та систем
Національний технічний університет України «КПІ ім. І. Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: xvavlad@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1691-5005>

³ науковий співробітник, Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України (Київ, Україна)

E-mail: shatanaf57@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6553-7421>

⁴ провідний інженер відділу імпульсних процесів і технологій дугового зварювання

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України (Київ, Україна)

E-mail: cool_vetal@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0008-2544-2901>

ІМПУЛЬСНІ СТАБІЛІЗАТОРИ ГОРІННЯ ДУГИ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ЗМІННИМ СТРУМОМ ПРОМИСЛОВОЇ ЧАСТОТИ

У статті розглянуто розроблення пристроїв стабілізації зварювальної дуги змінного струму, що надають якісно інший рівень функціональності зварювальним трансформаторам промислової частоти. Показано, що попри стрімке поширення та використання інверторних джерел постійного струму для дугового зварювання металів, зварювання змінним струмом, із застосуванням простих і невибагливих зварювальних трансформаторів, які працюють на частоті струму промислової мережі живлення продовжує бути актуальним. Стосовно до ручного дугового зварювання покритими електродами та неплавким електродом на змінному струмі промислової частоти, проблема підвищення стійкості горіння дуги вирішується завдяки використанню імпульсних стабілізаторів горіння дуги. Вибір полярності імпульсів істотно впливає на параметри стабілізаційного пристрою та процесу зварювання змінним струмом. Проведені дослідження впливу полярності імпульсу на параметри самих імпульсних стабілізаторів горіння дуги. Розглянуто схемотехнічну реалізацію пристроїв стабілізації із застосування стабілізаційних імпульсів, полярність яких протилежна полярності струму дуги.

Ключові слова: змінний струм; промислова частота; джерело живлення; трансформатор; зварювальна дуга; імпульсні стабілізатори; параметри імпульсу.

Рис.: 7. Бібл.: 9.

Актуальність теми дослідження. Незважаючи на стрімке поширення та використання інверторних джерел постійного струму для дугового зварювання металів, зварювання змінним струмом, із застосуванням простих і невибагливих зварювальних трансформаторів, які працюють на частоті струму промислової мережі живлення, витримало перевірку часом і продовжує бути актуальним.

Перевагою інверторних джерел є порівняно невеликі маса та габарити, що ґрунтуються на роботі понижуючого трансформатора на підвищеній частоті в декілька десятків кГц. Загалом це надає можливості належної мобільності у процесі виконання робіт, але вимагає відповідних культур виробництва, обслуговування, інфраструктури ремонту інверторних джерел струму і т. ін. Також це пов'язано з використанням порівняно складних високотехнологічних систем управління та регулювання відповідних силових напівпровідникових ключових транзисторів. Причому здебільшого належні вольт-амперні характеристики таких джерел струму одержують за рахунок відповідного регулювання рівнів зворотних зав'язків по струму дуги та напруги на ній, а не за рахунок параметрів силової частини інвертора, які б обмежували можливі струмові перевантаження, що виникають у процесі зварювання.

Водночас зварювальні трансформатори, що працюють на промисловій частоті, і через це мають відносно значну масу, за своїм устроєм простіші й тому вимагають мінімального обслуговування та поточного ремонту. У них належні вольт-амперні характеристики одержують за рахунок відповідного конструктивного виконання магнітопроводу та розміщення обмоток. Такі зварювальні установки є не стільки електронними, скільки електротехнічними пристроями. Вони можуть працювати й на відкритих майданчиках та не критичні до несприятливих умов: запиленості, незначних опадів, ускладненому тепловому режиму роботи тощо.

Постановка проблеми. Дугове зварювання змінним струмом має як свої недоліки, так і переваги. За своїм технологічним впливом дуга змінного струму подібна до модуляції струму дуги постійного струму з частотою 50 Гц. Тобто структура металу зварного шва виявляється більш дрібнозернистою, а якість зварного шва краще, ніж при зварюванні постійним струмом покритими електродами. Крім того, треба зазначити відсутність магнітного дугтя при зварюванні змінним струмом, що є досить актуальним при зварюванні кореневих швів, а також труб великого діаметра. При зварюванні змінним струмом алюмінію та його сплавів неплавким електродом в інертних газах і їх сумішах досягається очищення поверхні виробів від окисних плівок. Тому джерела для зварювання змінним струмом залишаються ефективним інструментом для розробки нових технологій зварювання [1; 2].

До недоліків зварювання змінним струмом промислової частоти (50-60 Гц) належать: низька стійкість горіння дуги, зумовлена періодичними її згасаннями; у деяких випадках підвищене розбризкування металу й насичення його газами, яке також пов'язане з погіршенням стійкості горіння дуги. Проте цьому можна завадити пристроями стабілізації горіння дуги з використанням достатньо малокошторисних засобів промислової електроніки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема підвищення стійкості горіння дуги на змінному струмі промислової частоти вирішується завдяки використанню імпульсних стабілізаторів горіння дуги (ІСГД) [3-7]. Такого роду пристрої протягом років розроблялися, їх принципи оприлюднювалися та популяризувалися ІЄЗ ім. Є. О. Патона [8; 9]. З кожним наступним етапом розвитку елементної бази електронних компонентів відповідним чином модифікувалися конструктивні реалізації пристроїв ІСГД і, таким чином, використання сучасних компонентів їх схемотехнічно спростило та здешевило ці пристрої.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Принцип роботи ІСГД пояснюють епюри струму I_D дуги та напруги U_D на ній із накладеними імпульсами U_i стабілізації горіння дуги, що наведені на рис. 1. Є декілька варіантів подання стабілізаційних імпульсів, серед основних є згідно спрямований та зустрічно спрямований (рис. 2).

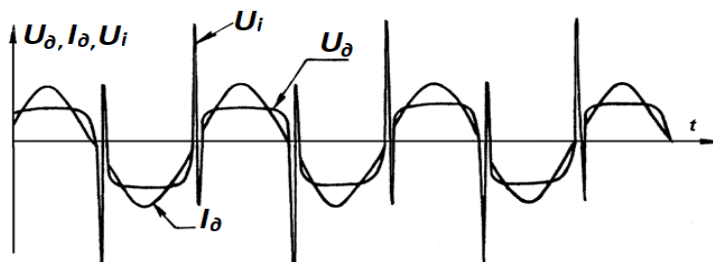


Рис. 1. Форми струму I_D дуги та напруги U_D на ній та імпульси U_i стабілізації горіння дуги

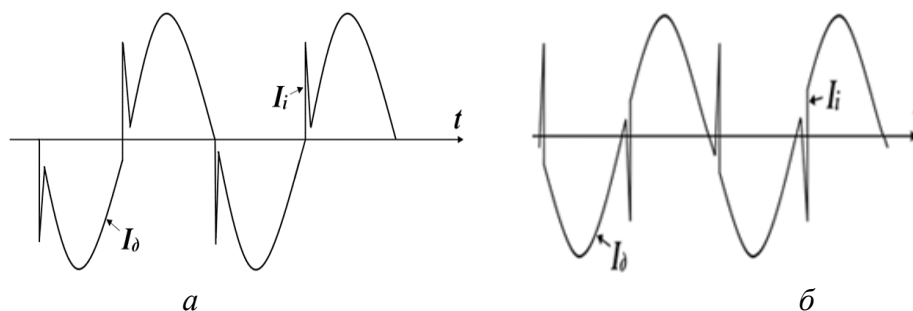


Рис. 2. Епюри зварювального струму та стабілізаційних імпульсів: а – згідно спрямований; б – зустрічно спрямований

Вибір полярності імпульсів істотно впливає на параметри стабілізаційного пристрою та процесу зварювання змінним струмом промислової частоти. В ІЄЗ ім. Є. О. Патона проведено дослідження щодо визначення впливу згідно та зустрічно спрямованого імпульсу на процес зварювання.

Метою дослідження є підвищення енергоефективності зварювальних джерел живлення змінного струму промислової частоти за рахунок розробки на сучасному рівні пристроїв стабілізації дуги.

Виклад основного матеріалу. Проведені дослідження впливу полярності стабілізаційного імпульсу на параметри пристроїв ІСГД. На рис. 3, 4 показано відповідно залежності тривалості стабілізаційного імпульсу (τ_i), та індуктивності (L) від зварювальних струмів (I_d) при згідно спрямованих та зустрічно спрямованих стабілізаційних імпульсах та різних напругах холостого ходу (U_{xx}). З рис. 3 видно, що при застосуванні в ІСГД згідно спрямованого імпульсу, тільки трансформатор з $U_{xx} = 80$ В може забезпечити регулювання зварювальних струмів від 75 до 600 А при прийнятних значеннях інших параметрів. Проте висока напруга U_{xx} призводить до підвищених габаритів та собівартості трансформатора.

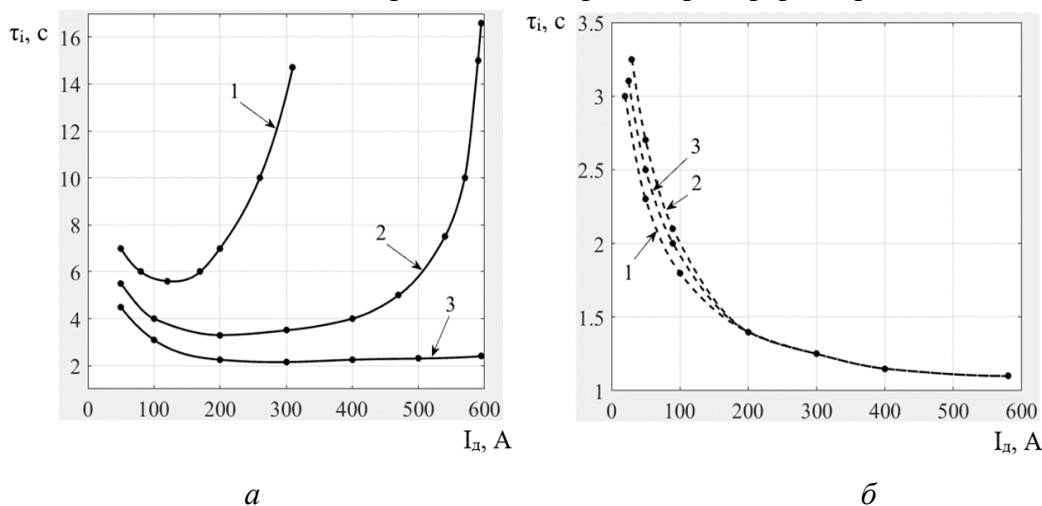


Рис. 3. Залежності тривалості стабілізаційного імпульсу ($\tau_i \times 10^{-4}, c$) від значення зварювального струму I_d (1- $U_{xx} = 45$ В; 2- $U_{xx} = 60$ В; 3- $U_{xx} = 80$ В):

а – згідно спрямований імпульс – суцільна крива;

б – зустрічно спрямований імпульс – штрихова крива

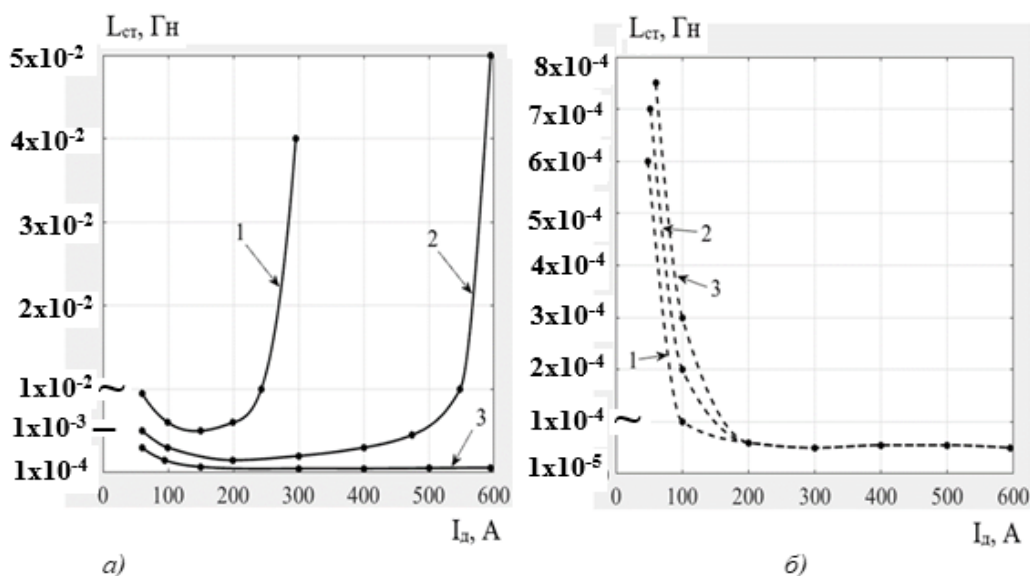


Рис. 4. Залежності індуктивності від значення зварювального струму (1- $U_{xx} = 45$ В; 2- $U_{xx} = 60$ В; 3- $U_{xx} = 80$ В):

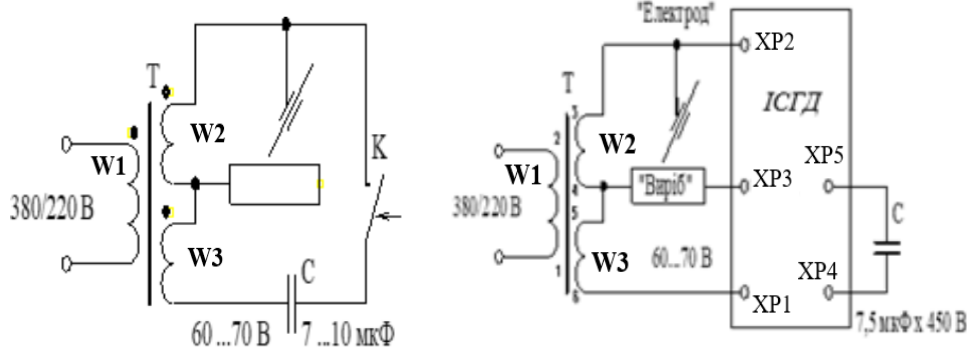
а – згідно спрямований імпульс – суцільна крива;

б – зустрічно спрямований імпульс – штрихова крива

Аналіз кривих показує, що робота устаткування зі згідно спрямованим імпульсом стабілізації дуги ускладнена в діапазоні малих (до 100 А) і великих (понад 250 А) зварювальних струмів. Зі зустрічно спрямованим імпульсом регулювання досягається в діапазоні 50...600 А вже при $U_{xx} = 45$ В. На малих значеннях зварювальних струмів збільшення $I_{ст}$ здійснюється за рахунок збільшення індуктивності самого трансформатора в цьому діапазоні. Застосування стабілізаційних імпульсів, полярність яких протилежна полярності струму дуги, переважніше.

При цьому можливо також одержати мінімальні масогабаритні показники джерела живлення та досягти високої електромагнітної сумісності за рахунок мінімального рівня вищих гармонік, що генерується в живлячу мережу [7].

Розглянемо схемотехнічну реалізацію ІСГД із застосування стабілізаційних імпульсів, полярність яких протилежна полярності струму дуги. Щоб одержати імпульси, достатньої потужності для підтримання активності дуги в інтервалі проміжку часу, близькому до спаду її струму до нуля, необхідно мати відповідне джерело струму (рис. 5). Це реалізується виконанням додаткової обмотки **W3** на магнітопроводі зварювального трансформатора **T**, приблизно тієї ж напруги, що і його основна вторинна обмотка **W2** та в частині фазування, увімкненій з останньою в тому ж напрямку. Напруга обмотки **W3** повинна становити близько 60 ... 70 В при потужності, що відбирається у 130 ... 160 ВА. Як альтернатива може бути взято й окремий мережевий трансформатор на 50 Гц із відповідними вказаними напругою вторинної обмотки та потужністю. Імпульси, що стабілізують горіння дуги із відповідними параметрами U_i та I_i , одержують короткочасним, на частку півперіоду, замиканням ключа **K** після переходу напругою дуги нульового рівня. Якщо як ключ використовувати зустрічно-паралельно включені тиристори, то, використовуючи властивість їх комутації, можна обмежитися тільки вибором моменту його увімкнення. Параметри та форма стабілізаційних імпульсів визначаються характеристиками контуру з обмоток **W2**, **W3**, конденсатора **C**, ключа **K**, напруги відповідних обмоток та струму дуги.



а)

б)

Рис. 5. Схема генерації імпульсів стабілізації горіння дуги (а) та схема з'єднання ІСГД зі зварювальним трансформатором (б)

Розглянемо один із варіантів реалізації ІСГД на прикладі розробленої принципової схеми (рис. 6).

Основою управляючої частини стабілізатора є компаратор, виконаний на операційному підсилювачі DA1:А, який генерує імпульси у формі меандра, фронти якого майже збігаються з переходом через нуль напруги на електроді. Конденсатори С2 та С3 разом із відповідними резисторами забезпечують належну завадостійкість та деякий зсув фронтів компаратора відносно напруги на **W2**, для забезпечення підвищеного значення напруги на електроді при холостому ході установки. У разі потреби, шляхом замикання - розмикання контактів PS2 може виконуватися деяка зміна постійної часу цього RC-фільтра. В подальшому підсилені по потужності, за допомоги комплементарної пари транзисторів VT4, VT5, вихідні імпульси

DA1:A, через конденсатор С6 та трансформатор Т1, диференціюються. Одержані в результаті цього відносно вузькі імпульси, які збігаються з тим чи іншим фронтом меандра й використовуються як вмикачі для відповідного тиристора (VS1,VS2). Останні у своєму зустрічно-паралельному з'єднанні й використовуються як ключ К (див. рис. 5, а).

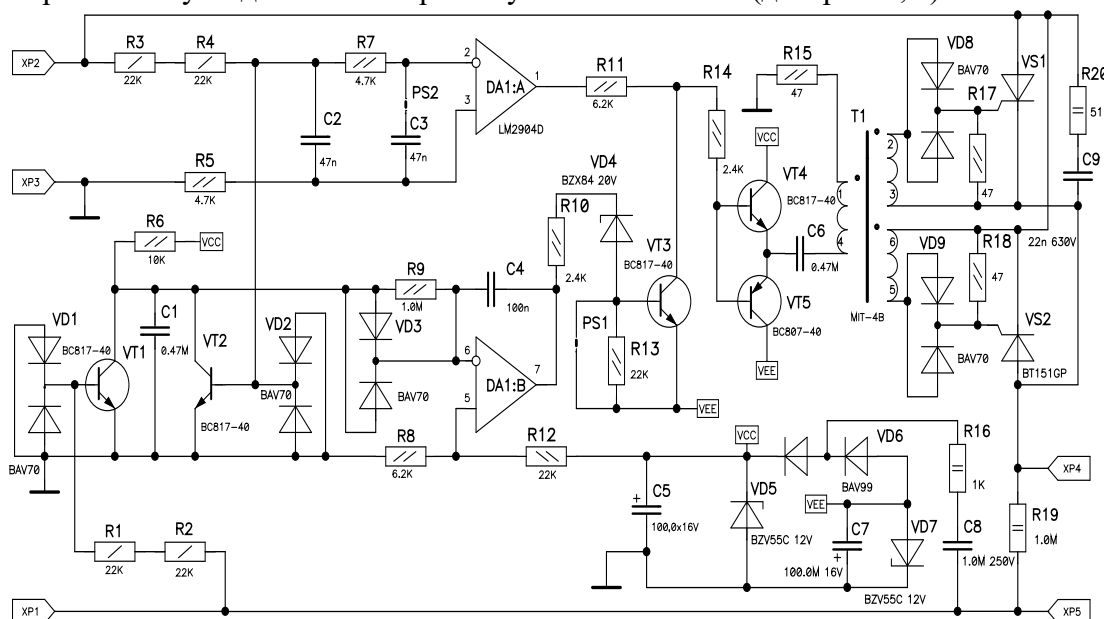


Рис. 6. Принципова схема одного із варіантів ІСГД

Функціонування стабілізатора забезпечує відносно малопотужний двополосний блок живлення $\pm 12\text{ V}$ (VCC, VEE), який зібраний на основі VD5,VD6,VD7 та пов'язаних із ними компонентів.

Вузол виконаний на основі VT1, VT2, VT3 та DA1:B реалізує функцію блокування ІСГД при тривалості холостого ходу установки більше ніж кілька секунд. Проте ця функція, якщо буде потреба, може блокуватися замиканням винесених контактів (джампера) PS1.

На рис. 7 показано конструктивну реалізацію такого типу ІСГД. Його монтаж виконано на відносно малорозмірній склотекстолітовій друкованій платі розміром 69,0×48,0 мм. Цьому сприяє використання так званих SMD-компонентів із використанням технології їх поверхневого монтажу (рис. 7, б). Як видно із рис. 7, а, для кожного із тиристорів, які використовуються як силовий ключ, не передбачено ніякого тепловідводу, через достатність розсіювання тепла власним корпусом. Поруч із тиристорами розміщено дві клеми для приєднання зовнішнього конденсатора С (рис. 7, б) контуру генерації стабілізаційних імпульсів.

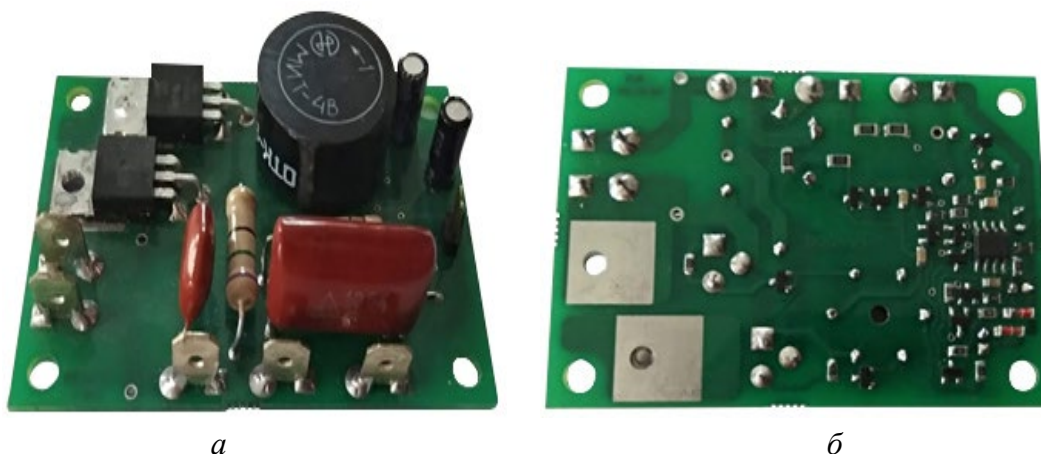


Рис. 7. Конструктивна реалізація стабілізатора:

а – зовнішній вигляд; б – технології поверхневого монтажу SMD-компонентів

Висновки. Досвід використання розроблених ІСГД дозволяє зробити висновок, що вони забезпечують достатньо високу стабільність горіння дуги від зварювального трансформатора змінним струмом при: ручному дуговому зварюванні низьколегованих конструкційних сталей електродами для змінного та постійного струму типу МР-3, АНО-4, УОНІ-13/55; дуговому зварюванні нержавіючих та інших спеціальних сталей плавкими електродами типу ОЗЛ-8, ОЗЛ-26, ЦЛ-39; дуговому зварюванні чавуну плавкими електродами типу ЦЧ-4; при аргонодуговому зварюванні неплавким електродом нержавіючих сталей, алюмінію і його сплавів при контактному способі початкового запалювання дуги.

Список використаних джерел

1. Разработка высокоэффективных способов дуговой сварки и их применение / И. Кидзи, К. Кобаяси, Д. Исии, Х. Ямаока // Автоматическая сварка. – 2003. – № 10-11. – С. 59-63.
2. Коротинський, О. Є. Високоєфективні джерела для дугового зварювання на основі ємнісних накопичувачів електричної енергії / О. Є. Коротинський, М. І. Скопюк, І. В. Вертецька // Автоматичне зварювання. – 2021. – № 3. – С. 47-53. – DOI: <http://doi.org/10.37434/as2021.03.08>.
3. Патент України № 109334 Пристрій для збудження та стабілізації процесу горіння дуги змінного струму МПК В 23 К 9/067 (2006.01), В 23 К 9/073 (2006.01) / Н. М. Махлін, О. Є. Коротинський, М. І. Скопюк ; заявл. № а2014 00292. – 10.08.2015, бюл. № 15.
4. Патент Україна № 114990 Пристрій стабілізації дуги змінного струму МПК В 23 К 9/067 (2006.01), В 23 К 9/073 (2006.01) / В. В. Бурлака, С. В. Гулаков, Заяв. № а2016 06797. – 28.08.2017, бюл. № 16.
5. Патент Україна №114998 Стабілізатор дуги змінного струму МПК В 23 К 9/067 (2006.01), В 23 К 9/073 (2006.01) / В. В. Бурлака, С. В. Гулаков, Заяв. № а2016 08173. – 28.08.2017, бюл. № 16.
6. Махлин, Н. М. Асинхронные возбудители и стабилизаторы дуги: анализ и методы расчета Ч. 2. / Н. М. Махлин, А. Е. Коротынский // Автоматическая сварка. – 2015. – № 7. – С. 28-40.
7. Бурлака В. В. Стабілізатор дуги змінного струму для зварювальних трансформаторів / В. В. Бурлака, С. В. Гулаков, С. К. Поднебенна // Автоматическая сварка. – 2018. – № 3. – С. 48-51. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/as2018.03.09>.
8. Сварочные источники питания с импульсной стабилизацией горения дуги / Б. Е. Патон, И. И. Заруба, В. В. Дименко, А. Ф. Шатан. – Київ : Екотехнологія, 2007. – 248 с.
9. Вищі гармоніки струму в трансформаторних джерелах живлення з імпульсними пристроями стабілізації горіння зварювальної дуги / А. М. Жерносеков, О. А. Андріанов, С. В. Римар, О. Ф. Шатан, А. О. Муха // Автоматичне зварювання. – 2022. – № 10. – С. 35-41. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2022.10.05>.

References

1. Kidzi, I., Kobayasi, K., Isiyi, D., & Yamaoka, Kh. (2003). Rozrobka vysokoefektyvnykh sposobiv duhovoho zvaryuvannia ta yikh zastosuvannia [Development of highly effective methods of arc welding and their application]. *Avtomatychne zvariuvannia – Automatic welding*, 10-11, 59-63.
2. Korotynskyy, O.E., Skopyuk, M.I., & Vertetska I.V. (2021). Vysokoefektyvni dzherela dlia dovhovichnoho zvariuvannia na osnovi yemnisnykh nakopychuvachiv elektrychnoi enerhii [Highly efficient sources for arc welding based on capacitive storage of electric energy]. *Avtomatychne zvariuvannia – Automatic welding*, 3, 47-53. <http://doi.org/10.37434/as2021.03.08>.
3. Makhlin, N.M., Korotynskyy, O.E., & Skopyuk, M.I. (2015). Prystriy dlya zbudzhennya ta stabilizatsiyi protsesu horinnya duhy zminnoho strumu [Device for excitation and stabilization of the AC arc burning process]. *Ukrayina, Patent № 109334 (10.08.2015, byul. № 15), МПК В 23 К 9/067 (2006.01), В 23 К 9/073 (2006.01)*.
4. Burlaka, V.V., & Hulakov, S.V. (2017). Prystriy stabilizatsiyi duhy zminnoho strumu [Device for stabilizing an alternating current arc]. *Ukraina, Patent № 114990 (28.08.2017, byul. №16), МПК V 23 К 9/067 (2006.01), V 23 К 9/073 (2006.01)*.
5. Burlaka, V.V., & Hulakov, S.V. (2017). Stabilizator duhy zminnoho strumu [Patent Ukraine No. 114998 Stabilizer of the arc of the strum]. *Ukraina, Patent №114998 (28.08.2017, byul. № 16), МПК V 23 К 9/067 (2006.01), V 23 К 9/073 (2006.01)*.

6. Makhlin, N.M., & Korotynskiy, A.Ye. (2015). Asinkhronnyye vozбудiteli i stabilizatory dugi: analiz i metody rascheta. Ch. 2 [Asynchronous exciters and arc stabilizers: analysis and calculation methods Part 2]. *Avtomatychne zvariuvannia – Automatic welding*, 7, 28-40.

7. Burlaka, V.V., Hulakov, S.V., & Pidnebenna, S.K. (2018). Stabilizator duhy zminnoho strumu dlya zvaryuvalnykh transformatoriv [Stabilizer of an alternating current arc for welding transformers]. *Avtomatychne zvariuvannia – Automatic welding*, 3, 48-51. <http://dx.doi.org/10.15407/as2018.03.09>.

8. Paton, B.Ye., Zaruba, I.I., Dimenko, V.V., & Shatan, A.F. (2007). *Svarochnye istochniki pitaniia s impulsnoi stabilizatsiei goreniia dugi [Welding sources of power with impulse stabilization of arc burning]*. Ekotekhnologiia.

9. Zhernosekov, O.M., Andrianov, O.O., Rimar S.V., Shatan, O.F., & Mukha, O.O. (2022). Vyshchi harmoniky strumu u transformatornykh dzherelakh zhyvlennia z impulsnymy prystroyamy stabilizatsiyi horinnya zvaryuvalnoi duhy [Higher current harmonics in transformer power sources with impulse devices for stabilizing welding arc combustion]. *Avtomatychne zvariuvannia – Automatic welding*, 10, 35-41. <https://doi.org/10.37434/as2022.10.05>.

Отримано 22.06.23

UDC 621.314.2: 621.791.03

Anatolii Zhernosekov¹, Volodymyr Khalikov², Oleksandr Shatan³, Vitalii Prykhodko⁴

¹Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of Department of Pulsed Processes and Technology of Arc Welding Paton Electric Welding Institute NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: zhernosekov@paton.kiev.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6404-2221>

²Doctor of Technical Sciences, Senior Research Fellow, Senior Lecturer of Electrical Networks and Systems Department, National technical University of Ukraine «Igor Sikorsky KPI» (Kyiv, Ukraine).

E-mail: xvavlad@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1691-5005>

³Scientific Researcher, Paton Electric Welding Institute NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: shatanaf57@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6553-7421>

⁴Lead Engineer, Paton Electric Welding Institute NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: cool_vetal@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2544-2901>

IMPULSE COMBUSTION STABILIZERS INDUSTRIAL FREQUENCY AC WELDING ARCS

The work deals with the development of AC welding arc stabilization devices that provide a qualitatively different level of functionality to industrial frequency welding transformers. It is shown that despite the rapid spread and use of inverter sources of direct current for arc welding of metals, welding with alternating current, using simple and unpretentious welding transformers, which work at the frequency of the current of the industrial power supply network, continues to be relevant. With regard to manual arc welding with coated electrodes and a non-fusible electrode on alternating current of industrial frequency, the problem of increasing the stability of arc burning is solved thanks to the use of impulse stabilizers of arc burning. The purpose of the study is to increase the energy efficiency of industrial frequency alternating current welding power sources due to the development of arc stabilization devices at the modern level.

The choice of the polarity of the pulses significantly affects the parameters of the stabilizing device and the AC welding process. Studies of the influence of the pulse polarity on the parameters of the pulse arc stabilizers themselves have been carried out. The schematic implementation of stabilization devices using stabilizing pulses, the polarity of which is opposite to the polarity of the arc current, is considered.

The experience of using the developed stabilizers allows us to conclude that they provide sufficiently high stability of arc burning from an alternating current welding transformer during manual arc welding of low-alloy structural steels covered with electrodes, arc welding of stainless and other special steels, arc welding of cast iron, during non-fusible argon arc welding electrode of stainless steels, aluminum and its alloys with the contact method of initial ignition of the arc.

Key words: alternating current; industrial frequency; power source; transformer; welding arc; pulse stabilizers; pulse parameters.

Fig.: 7. References: 9.

**Володимир Кальченко¹, Антоніна Кологойда², Геннадій Пасов³, Наталія Сіра⁴,
Дмитро Зюзько⁵, Дмитро Пивовар⁶**

¹ доктор технічних наук, професор, професор кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: vykalchenko74@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9072-2976>. **ResearcherID:** [G-6752-2014](https://orcid.org/0000-0002-9072-2976)

² кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування Національ-
ний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: kolohoida@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1742-2686>. **ResearcherID:** [I-1118-2014](https://orcid.org/0000-0002-1742-2686)

³ кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Наці-
ональний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: genapasov@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-7248-9085>. **ResearcherID:** [H-4455-2014](https://orcid.org/0000-0001-7248-9085)

⁴ кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Національ-
ний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: nnserraya@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6242-5210>. **ResearcherID:** [K-2658-2017](https://orcid.org/0000-0002-6242-5210)

⁵ здобувач вищої освіти, гр. ММБ-221

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: zyuzko2@gmail.com

⁶ здобувач вищої освіти, гр. ММБ-221

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: pppfox.god@gmail.com

СУЧАСНІ 3D-ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ ТА АВТОМОБІЛЬНОМУ ТРАНСПОРТІ

Розглянуто основні аспекти викладання дисципліни «Сучасні 3D-технології» для здобувачів вищої освіти галузей знань «Автомобільний транспорт» та «Галузеве машинобудування». Запропоновано використовувати комплексний підхід з метою формування цілісного уявлення щодо шляху проектування та виготовлення деталей і вузлів у автомобільній, машинобудівній та інших галузях. Розглянуто базові принципи створення просторових моделей. Проаналізовано послідовність побудови тіл, з метою їх подальшого використання та гнучкого редагування. Розглянуто технології 3D-друку та сканування виробів.

Ключові слова: 3D-технології; просторове моделювання; 3D-друк; 3D-сканер; зворотна інженерія.

Рис.: 7. Бібл.: 8.

Актуальність теми. Тенденції розвитку виробничих галузей спрямовані на високо-ефективне проектування та отримання кінцевого продукту за мінімально можливий період. При цьому основну роль у проектуванні виробів, розробці технічної документації та інших підготовчих етапах, а також на стадії виробництва, відіграють програмні методи САПР та 3D-технології. Отже, обов'язковою умовою якісної підготовки фахівців галузей знань «Автомобільний транспорт» та «Галузеве машинобудування» є вивчення сучасного стану та тенденцій розвитку 3D-технологій.

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток нових технологій виготовлення деталей, зокрема адитивних, викликає необхідність зміни підходу до підготовки висококваліфікованих робітників. Таким чином, необхідно постійно корегувати та оновлювати зміст дисциплін для навчання здобувачів вищої освіти. При цьому підхід до викладу інформації повинен мати комплексний характер, висвітлюючи всі взаємозв'язки між різними стадіями проектування та виробництва. Представлена в статті інформація буде мати оглядово-методичний характер і призначена для структуризації та узагальнення змісту дисципліни «Сучасні 3D-технології» при підготовці фахівців галузей знань «Автомобільний транспорт» та «Галузеве машинобудування».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [1] розглянуто системи просторового моделювання та базові принципи створення 3D-моделей шляхом комбінації різноманітних операцій. У посібнику [2] більш широко описано використання програмного пакета SolidWorks, при цьому детально розглянуто етапи та методи створення просторових моделей деталей. Також визначено поняття інжинірингу як невід'ємної складової сучасного виробництва. Розглянуто методи дослідження моделі та шляхи її оптимізації з метою отримання оптимальної конфігурації за критеріями міцності та кількості матеріалу. У роботах [3; 4] наведено методику моделювання деталей двигуна внутрішнього згорання з використанням

програмного забезпечення Delcam PowerShape. У світі також дуже поширене програмне забезпечення Catia, яке забезпечує більшість етапів виробництва, від створення просторових моделей до оформлення технічної документації та підготовки виробництва [5].

Останні десятиліття стрімкого розвитку набувають технології 3D-друку, загальні принципи їх використання та типи описані в роботі [6]. Найбільш цікавими для автомобілебудівної, машинобудівної та інших галузей є друк саме металевими матеріалами, які забезпечують високу міцність деталей. У роботі [7] описані досягнення вітчизняних учених у цьому напрямку. У роботі [8] розглянуто технології сканування об'єктів та описано наявні типи сканерів.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Однак нині відсутній комплексний методологічний підхід до вивчення сучасних 3D-технологій при підготовці фахівців технічних напрямів.

Мета статті. Головною метою роботи є дослідження стану розвитку та галузі використання сучасних 3D-технологій в автомобільному транспорті та галузевому машинобудуванні. Визначення цілісної структури викладання дисципліни «Сучасні 3D-технології» для здобувачів вищої освіти галузей знань «Автомобільний транспорт» та «Галузеве машинобудування».

Виклад основного матеріалу. У межах вивчення дисципліни «Сучасні 3D-технології» здобувачі вищої освіти повинні ознайомитись з основними етапами адитивного виробництва зокрема та виробництва загалом. Розуміти відмінність у підході до виготовлення деталей, а також виділяти загальні частини. Загалом процес виготовлення виробів включає:

- створення просторової моделі та креслення, підготовка технічної документації;
- написання коду для верстата з ЧПК або 3D-принтера;
- безпосередньо процес отримання деталі;
- контроль якості.

У традиційному виробництві процес створення деталі починається від отримання заготовки та включає відповідні металорізальні операції з поступовим зняттям матеріалу й формуванням необхідної геометрії. На відміну від цього, за адитивною технологією виробництва виключається стадія отримання заготовки та металорізальні операції. Деталь утворюють з нуля, поступовим наплавленням матеріалу у визначених геометрією місцях. Таким чином, така методика отримання деталей виключає наявність стружки, що дозволяє значно підвищити коефіцієнт корисного використання матеріалу. Часто після отримання максимально наближеної за формою заготовки здійснюють фінішні операції з метою покращення якості поверхні та підвищення точності.

Незалежно від типу обраного виробництва першим етапом є розробка концепції виробу та просторове моделювання. При цьому першочергове створення просторової моделі є пріоритетним, і тільки на її базі створюються необхідні креслення. Така послідовність дає змогу більш детально проаналізувати конструкцію деталі, за необхідності провести її оптимізацію, базові статичні та інші розрахунки й максимально автоматизувати створення креслень.

Залежно від обраного типу виробництва існує декілька підходів до послідовності створення просторових моделей та їх розташування у просторі. Наприклад, для виготовлення простої втулки (рис. 1, б) за адитивною технологією деталь буде розміщуватись на більшій опорній площині й у подальшому друкуватись з низу до гори. Таке розміщення втулки виключить необхідність створення додаткових елементів, таких як підтримка, та покращить точність деталі за рахунок відсутності навислих елементів. У цьому випадку просторову модель втулки слід створювати методом обертання її контуру навколо вертикальної осі (рис. 1, а), а потім вирізанням додавати кругові отвори. Остаточо, дерево створення моделі буде включати три базові операції (рис. 1, в).

Однак при виготовленні цієї ж деталі за традиційною схемою, тобто шляхом токарної обробки суцільної циліндричної заготовки або прутка, методика створення просторової моделі може відрізнятись. При цьому в найпростішому випадку деталь можна створити

аналогічно попередньому методу, однак при цьому ми не будемо мати ніякої інформації щодо заготовки та витрат матеріалу на виготовлення втулки. У зв'язку з цим на виробництві часто використовується метод створення просторових моделей деталей від заготовки.

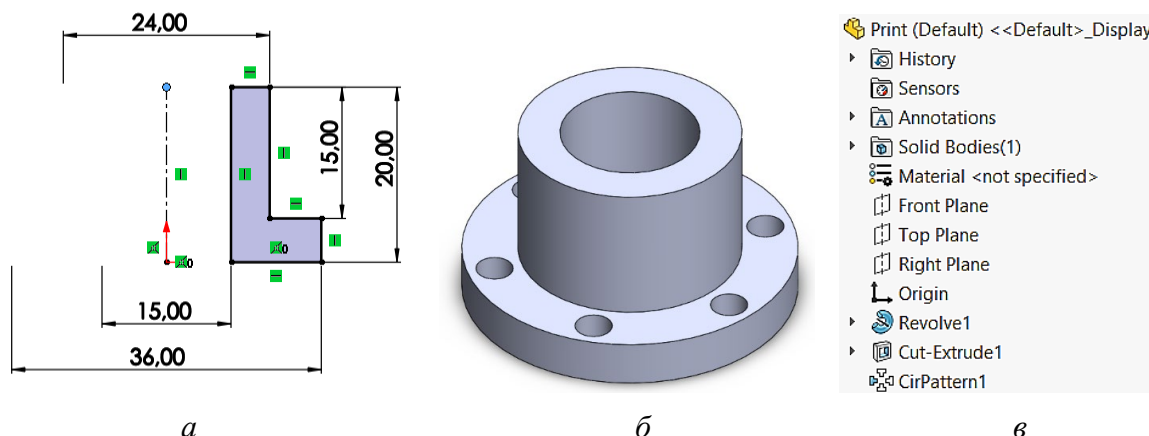


Рис. 1. Просторова модель втулки для 3D друку:
 а – основний ескіз; б – загальний вигляд; в – дерево побудови

Таким чином, при побудові 3D-моделі втулки перша операція буде відповідати за отримання циліндричної заготовки, ескіз операції наведено на рис. 2, а. Друга операція – повернутий виріз (рис. 2, б) відображає форму деталі після токарної обробки зовнішнього контуру. Далі аналогічно створюються центральний та кругові отвори (рис. 2, в). Вісь обертання втулки в цьому випадку буде горизонтальною. Дерево побудови наведено на рис. 2, г. Отже, при створенні просторової моделі за цією методикою можна отримати дані про загальну масу заготовки та кінцевого виробу, це дасть змогу визначити коефіцієнт корисного використання матеріалу, більш точно розрахувати собівартість виробу. Крім того, можна спостерігати за зміною деталі в процесі обробки, та визначати її проміжні характеристики.

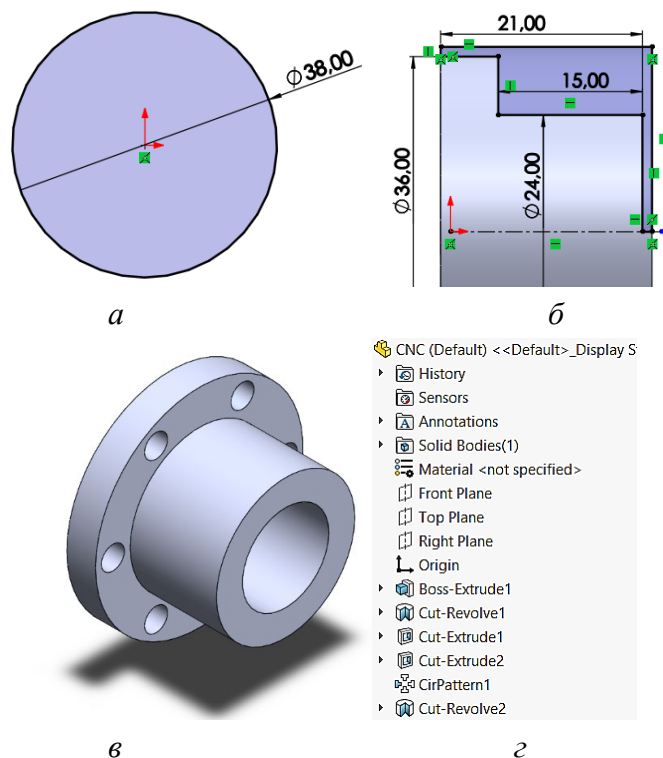


Рис. 2. Просторова модель втулки для виготовлення на верстаті з ЧПК:
 а – основний ескіз; б – перша операція: підрізання торця і точіння зовнішнього профілю; в – загальний вигляд; г – дерево побудови

Незалежно від обраної методики створення деталей, усі просторові моделі повинні відповідати певним вимогам:

– Модель повинна бути максимально простою для розуміння стороннім користувачем. Тобто повинна чітко прослідковуватись логіка побудови, не допускається наявність зайвих елементів, які були створені помилково.

– Створення будь-якої допоміжної геометрії повинно бути зумовлено конструкцією і, за можливістю, не використовуватись.

– Не допускається дублювати розміри деталі в різних ескізах, замість цього повинні використовуватись взаємозв'язки між елементами моделі, це розвантажить ескізи та в разі потреби редагування, зменшить кількість необхідних правок.

– Бажано створювати визначені ескізи, це також полегшить подальше редагування моделі та дозволить контролювати необхідні розміри, при цьому перевага також віддається взаємозв'язкам в моделі, а не розмірам елементів.

Створення деталі за адитивною технологією здійснюється за допомогою 3D-принтерів. Перша деталь була створена Чарльзом В. Халлом у 1983 році, з використанням стереолітографічного апарата SLA-1, який він сам створив. Загальними перевагами адитивної технології є:

- швидке виготовлення прототипу або деталі;
- можливість виготовлення виробів зі складною геометрією;
- зменшення кількості операцій, які необхідні для отримання продукції;
- підвищення ефективності виробів;
- зменшення відсотка відходів при виготовленні деталей.

Існує значна кількість різновидів 3D-принтерів (рис. 3). Їх розрізняють за типом матеріалу, що використовується, формою у якій він подається та джерелом формування деталі.

Нині в 3D-друці широко використовують різноманітні матеріали: пластик, метал та композитні матеріали. Вони можуть використовуватись у вигляді нитки, порошку або рідини. Для отримання готового виробу використовують: сопло нагріву, лазер, електронний промінь та інші.



Рис. 3. 3D-принтер

У машинобудівній та автомобільній промисловості 3D-друк використовують для виготовлення прототипів та готових виробів. За реальною моделлю більш просто виявити недоліки деталі та вузла загалом. Також значно зменшується час виготовлення прототипу та готової продукції.

З метою забезпечення 3D-друку просторову модель, за допомогою спеціальних програм, умовно розрізають на тонкі шари, які по чергово формуються принтером. При цьому робочий елемент принтера рухається по заданій траєкторії, що визначає конфігурацію певного шару. Програма керування принтером містить спеціальний G-код аналогічний коду, який використовується на верстатах з ЧПК. При цьому в програмі задається товщина шару, швидкість та траєкторія руху.

При роботі з пластиком найбільш поширеним методом друку є пошарове наплавлення, що належить до напряму створення деталей екструзією. Більш цікавим для машинобудівної та автомобільної промисловості є технологія друку металевих деталей. Виготовлення металевих деталей може здійснюватися за методом лазерного спікання, електронно-променевою плавкою та ін. В інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України [7] запропоновано технологію електронно-променевого 3D-друку з використанням порошкових металів для отримання виробів визначеної форми. Процес формування деталі відбувається у вакуумній камері. На принтері було створено лопатку газотурбінного двигуна (рис. 4). Отримана деталь відповідає всім технічним вимогам і може бути використана за призначенням.



Рис. 4. Лопатка газотурбінного двигуна створена 3D-друком

Окрім базового формування деталей, адитивні технології також дозволяють оптимізувати геометрію виробів. Так, наприклад, при формуванні титанового кронштейна (рис. 5, а), за рахунок виконання оптимізації в САД/САЕ програмі (рис. 5, б) була змінена його геометрія, шляхом видалення матеріалу в ненавантажених частинах (рис. 5, в). За рахунок цього масу виробу з 230 г зменшено до 138 г. При виготовленні даної деталі використовувався метод лазерного сплавлення металевого порошку.

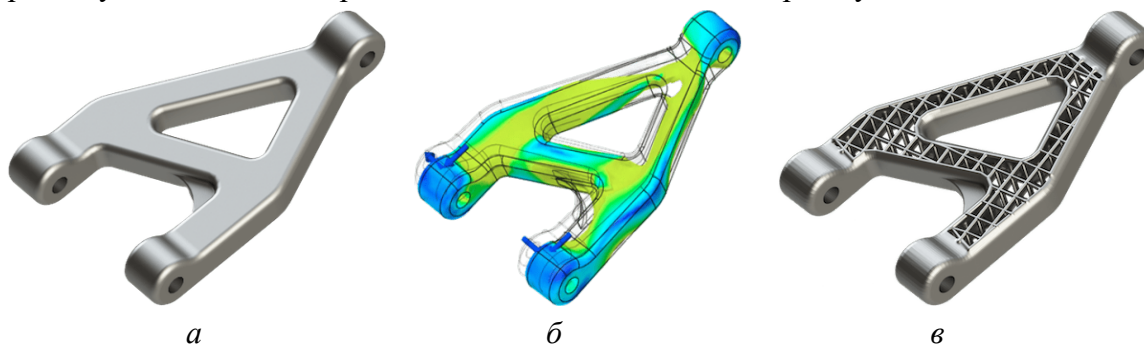


Рис. 5. Титановий кронштейн рами:

а – традиційна конструкція; б – оптимізація моделі; в – кінцева конфігурація

Досить часто виникає задача створення просторової моделі за вже наявною деталлю. Наприклад, коли в разі поломки вузла необхідно замінити його частини новими, при цьому документація не збереглась. Для простих деталей ця проблема не є складною, і при вимірюванні базових розмірів виконують її просторову модель та необхідні креслення. Однак у випадку деталей складної конфігурації точне відтворення всіх елементів є проблематичним.

Цю проблему вирішують шляхом використання 3D-сканерів [8]. Перші просторові сканери з'явилися ще у 80-х роках ХХІ ст. Звичайно, на той період вони мали не велику точність та багато інших недоліків. У сучасному світі використовуються більш прогресивні технології сканування топографії об'єктів. Загалом розрізняють контактні та безконтактні сканери. Крім машинобудівної та автомобільної галузей, вони також поширені в медицині при протезуванні, при створенні комп'ютерних ігор, в авіакосмічній та інших галузях.

У контактних сканерах (рис. 6) основним робочим елементом є щуп, який послідовно переміщуючись по поверхні деталі визначає її загальну конфігурацію. Такі сканери мають високу точність, однак через необхідність контакту з досліджуваною поверхнею можливе псування деталі. Також сканування можливе тільки для нерухомих об'єктів і є досить повільним у порівнянні з іншими видами.

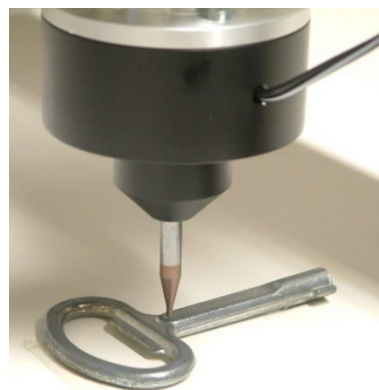
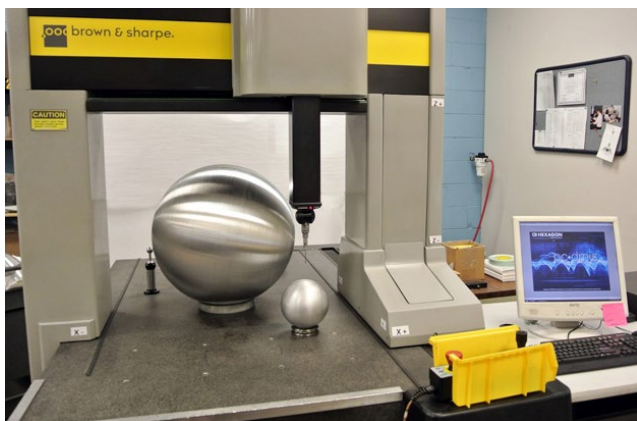


Рис. 6. Контактний 3D-сканер

Безконтактні сканери, на відміну від контактних, жодним чином не вносять зміни в геометрію деталі й розрізняються залежно від типу робочого проміння і технічного виконання. Розрізняють лазерні, оптичні, ультразвукові та інші сканери. При цьому найбільшою точністю вирізняються лазерні сканери, однак вони погано працюють для дослідження рухомих об'єктів. Оптичні сканери в роботі використовують більш безпечний лазер другого типу та добре відтворюють навіть рухомі тіла, можуть використовуватись для сканування людей. Однак для таких сканерів поверхня не може бути дзеркальною, прозорою або блискучою. Для сканування таких тіл їх попередньо покривають спеціальним матовим розчином. Ультразвукові сканери найбільш поширені в медичній галузі.

За технічним виконанням безконтактні сканери можуть бути портативні (рис. 7, а) або стаціонарні (рис. 7, б). Портативні сканери мають меншу вартість та легші у використанні, немає прив'язки до робочого столу. Проте вони мають нижчу точність у порівнянні зі стаціонарними. Крім того, вимагають застосування спеціальних маркерів. Ці маркери перед скануванням необхідно розмістити на досліджуваній поверхні, за ними система буде визначати положення сканера в просторі. Однак маркери залишають сліди на отриманій моделі, чим зменшують її якість. Стаціонарні сканери мають масивну основу, найчастіше у вигляді триноги та оснащені маніпулятором. При цьому орієнтація в просторі сканованої голівки визначається положенням маніпулятора, і тому маркувати деталі на поверхні не треба. До того ж такі сканери мають значно більшу точність.

3D-сканер використовує спеціальні програми, які аналізують отриману інформацію та перетворюють її полігональну поверхню, формуючи контур деталі. У подальшому отримана полігональна модель потребує редагування та правки, іноді перетворення в параметричну твердотільну модель.



Рис. 7. Безконтактні сканери:
а – портативний, б – стаціонарний

Важливим напрямом використання 3D-сканерів є перевірка точності виготовлення деталі. Для цього так само сканують поверхню деталі, проте на відміну від попереднього випадку, де за набором точок будували просторову модель, у цьому варіанті набір точок накладають на вже наявну вихідну поверхню моделі деталі та визначають ступінь відхилення реальних точок від базових, тим самим визначаючи точність виробу.

Висновки. Розглянуто основні аспекти викладання дисципліни «Сучасні 3D-технології» для здобувачів вищої освіти галузей знань «Автомобільний транспорт» та «Галузеве машинобудування». Пропонується використовувати комплексний підхід з метою формування цілісного уявлення щодо шляху створення та виготовлення деталей та вузлів у автомобільній, машинобудівній та інших галузях.

Розглянуто методи створення просторових моделей на прикладі простої деталі в системі SolidWorks. Визначено необхідність створення параметричних моделей. Визначено базові методики та принципи створення просторових моделей з урахуванням геометрії деталей. Проаналізовано послідовність побудови тіл з метою їх подальшого використання та гнучкого редагування.

Описано найбільш поширені технології 3D-друку та матеріали, які при цьому використовуються. Розглянуто галузі їх використання та переваги стосовно наявних технологій виготовлення деталей. Розглянуто принцип дії та типи 3D-сканерів та методи роботи з отриманою інформацією.

Список використаних джерел

1. Пальчевський Б. О. Системи 3D моделювання : навч. посіб. / Б. О. Пальчевський, Б. П. Валецький, Т. Л. Вараніцький. – Луцьк, 2016 – 176 с. – Електронна копія існує. – Режим доступу: https://lib.lntu.edu.ua/sites/default/files/2021-03/3D%20pidruchnik_2016.pdf.
2. Ворошук В. Я. Solidworks у завданнях 3D моделювання та інжинірингу технічних систем : навч. посіб. / В. Я. Ворошук, Т. М. Вітенко. – Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2021. –164 с. – Електронна копія існує. – Режим доступу: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/40547>.
3. Носов П. С. 3D параметричне моделювання прототипу двигуна внутрішнього згоряння засобами Delcam PowerSHAPE / П. С. Носов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 5 (7). – С. 11-14. – Електронна копія існує. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2013_5\(7\)_3](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2013_5(7)_3).
4. Якушенко С. О. Проектні розрахунки та 3D моделювання двигунів внутрішнього згоряння у САПР Delcam PowerShape 2013 / С. О. Якушенко, П. С. Носов // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві. – Одеса, 2013. – Вип. 4 (5). – С. 165-179. – Електронна копія існує. – Режим доступу: <http://dspace.opu.ua/jspui/handle/123456789/2687>.

5. Робота в програмному продукті САТІА. Загальні відомості. – Ч. 1: Методичні вказівки до виконання комп'ютерного практикуму / М. Г. Кришук, А. В. Трубін, Н. Ф. Тертишна, В. О. Єщенко. – Київ : НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”, 2017. – 78 с. – Електронна копія існує. Режим доступу: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/20081/1/001_CATIA.pdf.

6. Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects [Electronic resource] / M. Jiménez, L. Romero, I. A. Domínguez, M. del Mar Espinosa, M. Domínguez // *Complexity*. – Vol. 2019, Article ID 9656938. – Access mode: <https://doi.org/10.1155/2019/9656938>.

7. Науковці Академії розробили нове обладнання для виробництва комплектуючих до турбін та авіадвигунів [Електронний ресурс] / Прес-служба НАН України. – Режим доступу: <https://www.nas.gov.ua/UA/Messages/Pages/View.aspx?MessageID=8027&fbclid=IwAR118vkhOLB79VhQ-j5aeJvdBIsZMjGuqZU-3IVYECzTcGtJ5BBMgONaYcG>.

8. 3D сканер: 3D-сканування об'єктів та тривимірне моделювання від компанії KOLORO [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://koloro.ua/ua/3D-skaner-3D-skanirovanie-obektov-i-trehmernoje-modelirovanie.html>.

References

1. Palchevskiy, B.O., Valetskiy, B.P., Varanitskiy, T.L. (2016). *Systemy 3D modeliuvannia [3D modeling systems]*. https://lib.lntu.edu.ua/sites/default/files/2021-03/3D%20pidruchnik_2016.pdf.

2. Voroshchuk, V.Ia., & Vitenko, T.M. (2021). *Solidworks u zavdanniakh 3D modeliuvannia ta inzhynirynhu tekhnichnykh system [Solidworks in tasks of 3D modeling and engineering of technical systems]*. FOP Palianytsia V.A. <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/40547>.

3. Nosov, P.S. (2013). 3D parametrychne modeliuvannia prototypu dvyhuna vnutrishnoho zghoriannia zasobamy Delcam PowerSHAPE [3D parametric modeling of the internal combustion engine prototype using Delcam PowerSHAPE]. *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii – Eastern European Journal of Advanced Technologies*, 5(7), 11-14. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2013_5\(7\)_3](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2013_5(7)_3).

4. Yakushenko, S.O., & Nosov, P.S. (2013). Proektni rozrakhunky ta 3D modeliuvannia dvyhuniv vnutrishnoho zghoriannia u SAPR Delcam PowerShape 2013 [Design calculations and 3D modeling of internal combustion engines in CAD Delcam PowerShape 2013]. *Inform. tekhnolohii v osviti, nauksi ta vyr-vi. – Information technologies in education, science and production*, 4(5), 165-179. <http://dspace.opu.ua/jspui/handle/123456789/2687>.

5. Kryshchuk, M.H., Trubin, A.V., Tertyshna, N.F., & Yeshchenko, V.O. (2017). *Robota v prohramnomu produkti SATIA. Zahalni vidomosti. Chastyna 1: metodychni vkazivky do vykonannia kompiuternoho praktykumu [Work in the software product CATIA. General Information. Part 1: Methodological instructions for conducting a computer workshop]*. NTUU “KPI imeni Ihoria Sikorskoho”. https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/20081/1/001_CATIA.pdf.

6. Mariano Jiménez, Luis Romero, Iris A. Domínguez, María del Mar Espinosa, Manuel Domínguez. (2019). Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects. *Complexity*, ID 9656938. <https://doi.org/10.1155/2019/9656938>.

7. *Pres-sluzhba NAN Ukrainy [Press Service of the National Academy of Sciences of Ukraine]*. (16.07.2021). Naukovtsi Akademii rozrobyly nove obladdannia dlia vyrobnytstva komplektuiuchykh do turbin ta aviadvyniv [Scientists of the Academy developed new equipment for the production of components for turbines and aircraft engines]. <https://www.nas.gov.ua/UA/Messages/Pages/View.aspx?MessageID=8027&fbclid=IwAR118vkhOLB79VhQ-j5aeJvdBIsZMjGuqZU-3IVYECzTcGtJ5BBMgONaYcG>.

8. KOLORO. (n.d.). 3D skaner: 3D-skanuvannia ob'ektiv ta tryvymirne modeliuvannia vid kompanii KOLORO [3D scanner: 3D scanning of objects and three-dimensional modeling from the KOLORO company]. <https://koloro.ua/ua/3D-skaner-3D-skanirovanie-obektov-i-trehmernoje-modelirovanie.html>.

Отримано 01.05.23

**Volodymyr Kalchenko¹, Antonina Kolohoida², Gennadiy Pasov³, Nataliia Sira⁴,
Dmytro Zyuzko⁵, Dmytro Pivovar⁶**

¹ Doctor in Technical Sciences, Professor Department of Road Transport and Industrial Engineering
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: vkalchenko74@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9072-2976>. ResearcherID: [G-6752-2014](https://orcid.org/G-6752-2014)

² PhD in Technical Sciences, Department of Road Transport and Industrial Engineering
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: kolohoida@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1742-2686>. ResearcherID: [I-1118-2014](https://orcid.org/I-1118-2014)

³ PhD in Technical Sciences, Department of Road Transport and Industrial Engineering
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: genapasov@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7248-9085>. ResearcherID: [H-4455-2014](https://orcid.org/H-4455-2014)

⁴ PhD in Technical Sciences, Department of Road Transport and Industrial Engineering
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: nnserya@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6242-5210>. ResearcherID: [K-2658-2017](https://orcid.org/K-2658-2017)

⁵ student of higher education, gr. MMB-221

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: zyuzko2@gmail.com

⁶ student of higher education, gr. MMB-221

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: pppfox.god@gmail.com

MODERN 3D TECHNOLOGIES IN ENGINEERING AND ROAD TRANSPORT

The trends in the development of manufacturing industries are aimed at highly efficient design. 3D technologies play the main role in product design. Therefore, a mandatory condition for the high-quality training of specialists in the fields of knowledge "Road transport" and "Industrial engineering" is the study of the current state and trends in the development of 3D technologies.

The rapid development of new technologies for the production of parts, in particular additive ones, makes it necessary to change the approach to the training of highly qualified workers. The approach to the presentation of information should be comprehensive, highlighting all the interrelationships between the stages of design and production.

A significant number of works are devoted to spatial modeling in SolidWorks, Delcam PowerShape, Catia, etc. The main principles of creating models are described, the advantages of the program and the scope of application are defined. 3D printing and scanning technologies are developing rapidly.

However, there is currently no comprehensive methodological approach to the study of modern 3D technologies, when training specialists in technical areas.

The main goal is to study the state of development and the field of use of modern 3D technologies in automobile transport and industrial engineering.

The types and scope of use of 3D printers and scanners are analyzed. Positive and negative features of representatives of each type are determined.

The main aspects of teaching the discipline "Modern 3D technologies" are considered. The methods of creating spatial models in the SolidWorks system are considered. The most advanced 3D printing technologies and materials used are described. The principle of operation and types of 3D scanners are reviewed.

Keywords: 3D technologies; spatial modeling; 3D printing; 3D scanner; reverse engineering.

Fig.: 7. References: 8.

**Сергій Клименко¹, Сергій Клименко², Марина Копейкіна³,
Андрій Манохін⁴, Леонід Полонський⁵**

¹доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НАН України, заступник директора з наукової роботи
Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України (Київ, Україна)

E-mail: atmu@meta.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1464-3771>. Researcher ID: [Q-8928-2019](https://orcid.org/Q-8928-2019)
SCOPUS Author ID: [57221904325](https://orcid.org/57221904325)

²кандидат технічних наук, старший дослідник,
старший науковий співробітник відділу «Технологічного управління якістю обробки інструментами із НТМ»
Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України (Київ, Україна)

E-mail: alcon1202@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7913-5519>. Researcher ID: [FFQ-3675-2022](https://orcid.org/FFQ-3675-2022)
SCOPUS Author ID: [57197629303](https://orcid.org/57197629303)

³кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,
старший науковий співробітник відділу «Технологічного управління якістю обробки інструментами із НТМ»
Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України (Київ, Україна)

E-mail: atmu1@meta.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5956-5503>. Researcher ID: [FZY-5450-2022](https://orcid.org/FZY-5450-2022)
SCOPUS Author ID: [3633766140](https://orcid.org/3633766140)

⁴кандидат технічних наук, старший дослідник,
старший науковий співробітник відділу «Технологічного управління якістю обробки інструментами із НТМ»
Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України (Київ, Україна)

E-mail: the.manokhin@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1479-8482>. Researcher ID: [DGN-4506-2022](https://orcid.org/DGN-4506-2022)
SCOPUS Author ID: [37059129600](https://orcid.org/37059129600)

⁵доктор технічних наук, професор, професор кафедри механічної інженерії
Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)

E-mail: pol@ztu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4347-9088>. SCOPUS Author ID: [57221220964](https://orcid.org/57221220964)

ВИХІДНІ ПЕРЕДУМОВИ РОЗРОБКИ ТЕХНОЛОГІЇ ТОЧІННЯ НАПЛАВЛЕНИХ ДЕТАЛЕЙ

Визначено вихідні передумови розробки технології точіння наплавлених деталей, які включають розрахунок припусків та граничних розмірів виробу відповідно до технологічних переходів і товщини наплавленого покриття. Наведений підхід до встановлення глибини різання, яка забезпечує наявність у шарі покриття на обробленій деталі найкращих і найбільш сталих властивостей, що надає виробу кращі експлуатаційні показники, зокрема більшу зносостійкість. У загальному вигляді середня глибина різання може бути визначена за допомогою кривої відносної опорної поверхні профілю покриття, а з урахуванням методу Херста змінну частину глибини різання під час оброблення покриттів може бути визначено через фрактальну розмірність профілю їхньої поверхні. Розглянуто деякі підходи до визначення швидкості різання, які базуються на вимогах забезпечення якості шару наплавленого покриття і стійкості різального інструменту, та геометричних параметрів інструменту з урахуванням властивостей оброблюваного матеріалу.

Ключові слова: наплавлена деталь; припуск на механічну обробку; параметри режиму різання; геометричні параметри інструменту.

Табл.: 2. Рис.: 2. Бібл.: 12.

Актуальність теми дослідження. Розвиток сучасного машинобудування нерозривно пов'язаний із підвищенням надійності й довговічності деталей машин та механізмів, зниженням енерго- та матеріалоємності виробництва, потребує широкого використання нових прогресивних технологій. Унаслідок цього великого значення набуває забезпечення захисту поверхонь деталей і конструкцій від зносу. Здебільшого для цього використовують об'ємно леговані матеріали. Однак такий підхід стає більш проблематичним через дорожнечу та дефіцит легуючих елементів. На сьогодні економічно та технічно доцільно розвивати принципово інше ставлення до вибору матеріалів уже на стадії проектування виробів: механічна міцність деталей гарантується за рахунок застосування одного матеріалу, а специфічні властивості поверхні досягаються внаслідок формування на ній наплавленого шару з іншого матеріалу. У результаті забезпечується підвищення довговічності деталей, що поєднується з економією легуючих елементів, здешевленням виробів, можливістю їх багаторазового відновлення і використання. При реставрації деталей у 5–8 разів скорочується кількість технологічних операцій порівняно з виготовленням нових деталей, а вартість відновлення переважно на 30–50 % нижча за вартість їх виготовлення. Збільшення обсягу відновлення деталей дозволяє суттєво знизити витрати на запасні частини, а отже, і собівартість ремонту машин.

Постановка проблеми. У багатьох випадках механічна обробка деталей із наплавленим покриттям – важливий етап процесу формування зміцнених або відновлених виробів. Однак застосування наплавлених покриттів, враховуючи широку гаму сучасних покриттів, що характеризуються різними структурними особливостями та механічними властивостями, стримується у зв'язку з нестачею науково обґрунтованих рекомендацій щодо підготовки та реалізації процесу їхньої якісної механічної обробки. Обґрунтоване призначення припуску на обробку, вибір робочого матеріалу різального інструменту, превентивне призначення оптимальних режимів різання та геометричних параметрів інструменту багато в чому визначаються морфологією напавленої поверхні, гетерогенністю структури покриттів і, відповідно, неоднорідністю механічних властивостей шару покриття як за інтерфейсом, так і глибиною. Зазначене зумовлює як можливість ефективної обробки деталей з покриттям, так і працездатність різального інструменту та перспективи досягнення необхідної якості виробів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зазвичай за розрахунковий розмір припуску застосовують мінімальний припуск, достатній для усунення на переході, що виконується, похибок оброблення та дефектів поверхневих шарів (висот нерівностей профілю, глибини дефектного шару, сумарного відхилення поверхонь, похибок установлення деталі у пристосуванні), сформованих на попередніх переходах або операціях. Здебільшого розрахунок технологічних припусків для виготовлення деталей виконують розрахунково-аналітичним методом або згідно з таблицями з урахуванням методу отримання заготовки [1; 2].

Залежно від технологічних режимів нанесення і вмісту хімічних елементів у складі покриттів їхня твердість змінюється у широких межах. При цьому такі деталі з покриттями, як вали автомобілів і тракторів (місця під підшипники), прокатні валки (бочки) тощо, що мають володіти високою якістю поверхні, потребують механічної обробки. Загалом, технологія обробки покриттів залежить від співвідношення допусків на розміри заготовки, деталі з покриттям і покриття ($\delta_{\text{заг}}$, $\delta_{\text{дет}}$, $\delta_{\text{п}}$) [3]. Можливі три випадки: $\delta_{\text{заг}} > \delta_{\text{дет}}$ – за будь-яких значень $\delta_{\text{п}}$ покриття піддається обробці різанням; $\delta_{\text{заг}} = \delta_{\text{дет}}$ – покриття також піддається обробці; $\delta_{\text{заг}} < \delta_{\text{дет}}$ – при $\delta_{\text{заг}} - \delta_{\text{дет}} \geq \delta_{\text{п}}$ обробка покриття виключається; при $\delta_{\text{заг}} - \delta_{\text{дет}} < \delta_{\text{п}}$ покриття оброблюється.

Мінімальний припуск на обробку деталей з покриттями пропонується визначати за відомими у технології машинобудування методиками [4; 5]. Розрахункова формула для визначення припуску на обробку має вигляд $z = (Rz_0 + H_0) + |\rho_{\text{заг}} + \varepsilon|$, де Rz_0 , H_0 – висота макронерівностей і глибина дефектного шару покриття відповідно; $\rho_{\text{заг}}$, ε – просторове відхилення розташування поверхні вихідного покриття відносно базових поверхонь заготовки й похибка установки деталі з покриттям на операції обробки відповідно.

Формоутворення деталей із покриттям виконується різними методами лезової механічної обробки. Основний об'єм обробки припадає на точіння.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Водночас традиційні підходи до визначення припусків, вибору матеріалу різальної частини інструменту, призначення режимів різання та геометричних параметрів інструменту не враховують особливостей наплавлених деталей – наявності нерівностей на вихідній поверхні, гетерогенності структури, неоднорідності властивостей за інтерфейсом та глибиною покриття. Крім того, потрібно враховувати стан і розміри деталі на етапі до нанесення покриття.

Метою статті є вдосконалення підходу до визначення умов механічної обробки, зокрема, точіння, деталей із наплавленим поверхневим шаром з урахуванням морфології поверхні деталі та особливостей побудови припуску на обробку, робочого матеріалу різального інструменту, режимів різання, геометричних параметрів інструменту.

Виклад основного матеріалу. Розрахунок припусків на обробку потрібно виконувати після того, як попередньо обрано метод нанесення покриття і намічений маршрут механічної обробки поверхні з покриттям [1; 6]. Можлива схема розташування загальних і міжопераційних припусків і допусків під час зміцнення або відновлення деталей наведена на рис. 1 (a_{\min}, a_{\max} – задані розміри деталі, мм; b_{\min}, b_{\max} – розміри деталі після її виходу з ладу, мм; c_{\min}, c_{\max} – розміри деталі після попередньої механічної обробки перед відновленням, мм; d_{\min}, d_{\max} – проміжні розміри, отримані після чорнової механічної обробки, мм; l_{\min}, l_{\max} – вихідні розміри зміцненої або відновленої деталі, мм; T_a, T_b, T_c, T_d, T_l – допуски відповідно на розміри a, b, c, d, l , мкм; $\Delta_{\min}, \Delta_{\max}$ – величини мінімальної та максимальної зміни розміру деталі в разі її виходу з ладу, мм; z'_{\min}, z'_{\max} – мінімальний і максимальний припуски, що видаляються під час попередньої механічної обробки деталі перед зміцненням або відновленням, мм; z''_{\min}, z''_{\max} – мінімальний і максимальний припуски, що видаляються під час чистової механічної обробки зміцненої або відновленої деталі, мм; z'''_{\min}, z'''_{\max} – мінімальний і максимальний припуски, що видаляються під час чорнової механічної обробки зміцненої або відновленої деталі, мм; $\Delta h_{\min}, \Delta h_{\max}$ – мінімальна і максимальна товщини шару покриття, мм. Тут і нижче індекси при значеннях R_z, h, Δ_Σ і ϵ показують, з урахуванням показників якості яких поверхонь потрібно визначити значення цих параметрів).

Розрахунок припусків, граничних розмірів за технологічними переходами й товщини покриття на прикладі валів виконується в такій послідовності:

– виходячи із заданих і вибракувальних розмірів деталі, визначають величини мінімальної і максимальної зміни розміру деталі під час її виходу з ладу: $\Delta_{\max} = a_{\max} - b_{\max}$, $\Delta_{\min} = a_{\min} - b_{\min}$;

– для кожного технологічного переходу записуються значення $R_z, h, \Delta_\Sigma, \epsilon$ і T_d ; величина допуску на розмір визначається за таблицями залежно від квалітету точності; після попередньої механічної обробки перед зміцненням або відновленням визначають припуски і граничні розміри деталі:

$$z'_{\min} = 2 \left[(R_{zb} + h_b) + \sqrt{\Delta_{\Sigma b}^2 + \epsilon_c^2} \right], c_{\max} = b_{\max} - 2z'_{\min}, c_{\min} = c_{\max} - T_c;$$

– знаючи задані розміри деталі, а також величини R_z, h, Δ_Σ і T_d , за технологічними переходами, розраховуються припуски і проміжні розміри деталі при механічній обробці після її зміцнення або відновлення;

– визначаються припуски на чистову механічну обробку зміцненої або відновленої деталі та її граничні розміри після чорнової обробки:

$$2z''_{\min} = 2 \left[(R_{zd} + h_d) + \sqrt{\Delta_{\Sigma d}^2 + \epsilon_a^2} \right], d_{\min} = a_{\max} + 2z''_{\min}, d_{\max} = d_{\min} + T_d, 2z''_{\max} = 2z''_{\min} + T_a + T_d;$$

– визначаються припуски на чорнову механічну обробку зміцненої або відновленої деталі та її граничні розміри:

$$2z'''_{\min} = 2 \left[(R_{ze} + h_e) + \sqrt{\Delta_{\Sigma e}^2 + \epsilon_d^2} \right], l_{\min} = d_{\max} + 2z'''_{\min}, l_{\max} = l_{\min} + T_e, 2z'''_{\max} = 2z'''_{\min} + T_d + T_e;$$

– визначається товщина шару покриття під час зміцнення або відновлення деталі:

$$2\Delta h_{\min} = l_{\min} - c_{\max}, 2\Delta h_{\max} = l_{\max} - c_{\min};$$

– перевіряється коректність розрахунків припусків на кожному переході й товщині покриття:

$$2z'_{\max} - 2z'_{\min} = T_b + T_c, 2z''_{\max} - 2z''_{\min} = T_d + T_e, 2z'''_{\max} - 2z'''_{\min} = T_a + T_d, 2h_{\max} - 2h_{\min} = T_e + T_c.$$

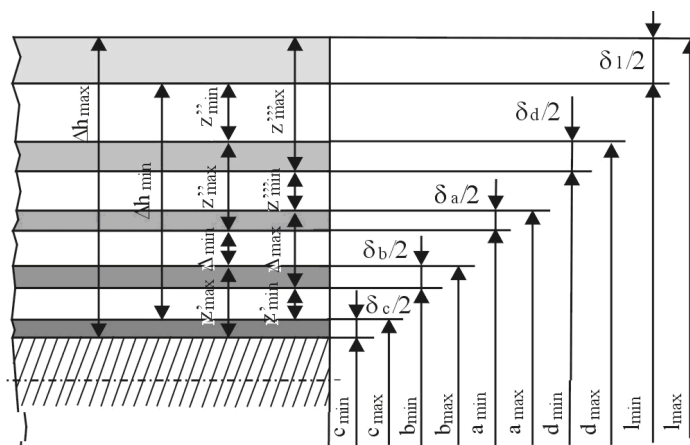


Рис. 1. Схема графічного розташування припусків і допусків при зміцненні або відновленні деталі типу вал

Як зрозуміло [7], не весь шар покриття за товщиною має стабільні властивості. Перехідний шар між основним металом і покриттям відрізняється від матеріалу покриття хімічним складом, структурою та властивостями. Верхній шар може містити шлаки, залишки присадного матеріалу й різні дефекти. Застосування в таких умовах розрахунково-аналітичного методу визначення товщини покриття не дає змоги врахувати якісних показників покриття. Це може призвести до того, що шар покриття, призначений для забезпечення ресурсу роботи, опиняється в зонах з пониженими механічними властивостями і, як наслідок, працездатність виробу з покриттями може бути меншою.

Щоб забезпечити високі експлуатаційні властивості деталей із покриттями можна використовувати такий підхід: на пробну заготовку наноситься шар покриття і проводиться пошарове його видалення; після кожного проходу інструменту вимірюється будь-який показник якості поверхні, наприклад, шорсткість або мікротвердість і будується відповідний графік зміни показника за глибиною покриття; ділянки, які мають найкращі та стабільні параметри якості, матимуть кращі експлуатаційні показники, зокрема, більшу зносостійкість; для забезпечення максимального ресурсу роботи деталі, бажано, щоб оброблена поверхня шару покриття перебувала в цій ділянці. Визначивши розміри ділянки з потрібними показниками якості, і розмістивши в ній шар покриття, що забезпечує ресурс роботи деталі, з урахуванням відомої перехідної ділянки необхідно скоригувати розміри вихідної заготовки під нанесення покриття. Після цього можна виготовляти деталі з покриттями та призначати припуски під механічну обробку.

Ефективна обробка наплавлених деталей багато в чому пов'язана з вибором матеріалу робочої частини різального інструменту. Аналіз хімічного складу й механічних властивостей наплавлених матеріалів та матеріалів інструментів, а також результати лабораторних та промислових досліджень працездатності інструментів при обробці деталей, наплавлених електродуговим методом, дозволили сформулювати загальні рекомендації з вибору матеріалу інструменту для обробки наплавлених покриттів (табл. 1) відповідно до позначення Міжнародного інституту зварювання.

При обробці наплавлених деталей глибина різання є одним з основних параметрів умов різання. У загальному випадку від неї залежать усі вихідні характеристики процесу оброблення: сили різання, температура в зоні різання, інтенсивність зношування інструмента, стан обробленої поверхні деталі. При цьому потрібно враховувати принципово різні умови призначення глибини різання для випадків обробки нерівного наплавленого поверхневого шару та під час чистової обробки основного масиву покриття. На рис. 2 наведено наочний приклад поздовжнього та поперечного перерізів шару покриття, наплавленого порошковою проволокою, пояснюючий вищенаведене.

Таблиця 1 – Рекомендації з вибору матеріалу інструменту для обробки наплавлених покриттів

Тип	Позначення	Твердість, HRC	Обробка	
			по корці	чистова
Низьколегована сталь, C < 0,4 %	A	40	киборит, борсиніт, Т5К10	киорит, борсиніт, композит 10, РсВN-ТiС45%, ВОК72, Т15К6
Низьколегована, сталь, C > 0,4 %	B	60	киборит, борсиніт	киборит, борсиніт, композит 10, РсВN-ТiС45%, ВОК72, силініт-Р, Т30К4
Аустенітна високомарганцева сталь	C	50	ВК15ОМ, ВК8, ТТ10К8, Т5К10	киборит, борсиніт, ВК8, ТТ10К8, Т15К6
Аустенітні хромо-нікелеві сталі	D	40	ВК8, ВК15ОМ	ВК4, ВК6М, ВК8, силініт-Р, композит 10, РсВN-ТiС45%
Хромисті сталі	E	45	киборит, борсиніт, Т5К10, Т15К6	киборит, борсиніт, композит 10, РсВN-ТiС45%, ВК6М, Т15К6, ВОК72
Швидкорізальні сталі	F	62	киборит, борсиніт	киборит, борсиніт, композит 10, РсВN-ТiС45%, силініт-Р, ВОК72
Хромовольфрамкові чавуни	G	60	киборит, борсиніт, ВК3М, ВК6М	киборит, борсиніт, композит 10, РсВN-ТiС45%, ВК6М, ВК6ОМ, ВОК72
Хромовольфрамкові сталі	H	45	киборит, борсиніт, Т15К6	киборит, борсиніт, композит 10, РсВN-ТiС45%, силініт-Р, Т15К6, ВК6М, ВОК72
Кобальтові сплави	N	40	киборит, борсиніт, Т15К6	киборит, борсиніт, композит 10, РсВN-ТiС45%, силініт-Р
Нікелеві сплави	Qa	55	киборит, борсиніт, ВК8, ВК10ОМ	борсиніт, композит 10, РсВN-ТiС45%, ВК6М, ВК6М, силініт-Р
	Qв	220НВ	ВК8, ВК10ОМ	ВК6М, ВК6М
Карбидні сплави	P	67	киборит, борсиніт, АТП	киборит, борсиніт, АТП, композит 10

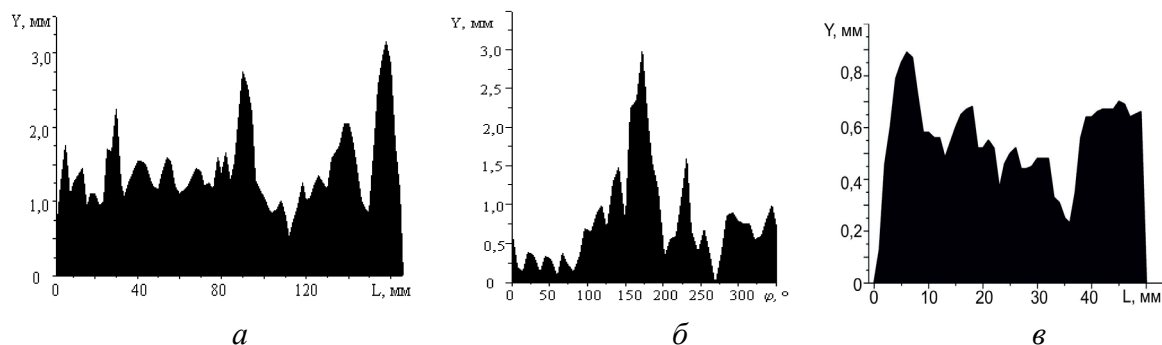


Рис. 2. Профілі поздовжнього (а, в) і поперечного (б) перерізів шару покриття, нанесеного електродуговим наплавленням проволокою ПП-Нп-25Х5ФМС (а, б) і мікродуговим наплавленням сплавом ЖС6К (в)

У зв'язку з тим, що на поверхні деталей з покриттям є значні макронерівності, їхню обробку необхідно проводити за кілька проходів.

У загальному вигляді під час обробки покриттів глибина різання складається з двох складових – змінної (у межах нерівного шару покриття) $t_{зм}$ і постійної (нижче нерівного шару покриття) $t_{пст}$. Середню величину $t_{ср}$ може бути визначено за допомогою кривої відносної опорної поверхні профілю покриття – $p = kt_p^u e^{nt_p}$, де p – рівень перерізу поверхні від вершини найбільшої нерівності площиною, паралельною середній площині; t_p – величина відносної опорної профілю поверхні на рівні p ; k, u, n – коефіцієнти.

Таким чином, фактична продуктивність процесу обробки покриттів не визначається добутком режимів різання v , S , t , заданими на верстаті, тому що змінна складова глибини різання t_{3M} повинна враховуватися або через розподіл матеріалу в шарі, що видаляється, або через її середню величину.

З урахуванням методу Херста [8], приймаючи, як функцію, довжину зразка і приймаючи коефіцієнт, що залежить від виду розподілу випадкової величини $\sim \pi/2$, забезпечуючи масштабну інваріантність, змінну частину глибини різання під час оброблення покриттів може бути визначено через фрактальну розмірність профілю їхньої поверхні, визначену комірковим методом – $t_{3M} = \text{const} (\delta^{3-D}/LR^2)$, де δ – характерний розмір комірки, за допомогою якої розглядається профіль; D – фрактальна розмірність профілю поверхні; L – довжина оброблюваного зразка; R – радіус зразка нижче нерівного шару покриття.

Максимальна величина змінної складової глибини різання визначається залежністю $t_{3M, \text{max}} = \sigma(\alpha L)^{2-D}$, де σ – квадратичне відхилення висоти нерівностей профілю поверхні покриття; α – коефіцієнт, що залежить від виду розподілу випадкової величини.

Вибір подачі виконується відповідно до загальних розумінь стосовно конкретної операції обробки. Під час чорнового точіння величина подачі вибирається з умови максимальної продуктивності обробки, яка допустима за міцністю різального інструменту. В умовах чистової обробки наплавлених покриттів інструментами із твердих сплавів та PcBN величина подачі $S < 0,2$ мм/об.

Підходи, запропоновані для випадків обробки різанням традиційних конструкційних матеріалів, можуть бути використані і для обробки наплавлених покриттів. При цьому потрібно враховувати специфічні особливості – значні мікронерівності на наплавленій поверхні та відхилення показників механічних властивостей шару покриття на різних ділянках, нестабільність, складність і неоднорідність хімічного складу, наявність у матеріалі твердих включень, раковин, пор. Рівень оптимальних швидкостей різання буде зумовлений обраним критерієм, за яким вона оцінюється, наприклад, якістю обробленої деталі, стійкістю інструменту або іншим.

Розглянемо такий приклад. Процеси різання характеризуються комплексною дією силового й температурного чинників на стан матеріалу покриття, і наслідком цієї дії є зміна, наприклад, відкритої пористості поверхні деталей із покриттями. Під дією сил з боку задньої поверхні інструмента за відносно невисокої швидкості різання (0,25–0,33 м/с) і температурних впливів на оброблюваний матеріал за підвищених швидкостей різання (1,0–3,0 м/с) відбувається зміна величини відкритої пористості щодо її вихідного значення. Вказане пояснюється так: підвищення швидкості різання, спричиняючи зменшення сил різання, веде до зменшення пластичної деформації оброблюваного матеріалу на контактних ділянках та відкрита пористість матеріалу покриття зі зростанням швидкості різання знижується; водночас нагрівання до значної температури призводить до розм'якшення та бічної течії поверхневих шарів матеріалу покриття, що обробляється, тому після досягнення певного значення швидкості різання, а отже, і температури на контактній ділянці деталі зі сторони задньої поверхні інструменту спостерігається закриття пор.

Таким чином, зміна структурного стану матеріалу покриття визначається взаємним проявом дії силового й теплового чинників процесу різання, інтенсивність яких при температурі, що відповідає певній швидкості різання, призводить, наприклад, до зменшення відкритої пористості покриття після обробки відносно її вихідної величини. Варіюванням швидкості різання можна досягти мінімальної зміни пористості від вихідної. Швидкість, що відповідає мінімальній зміні пористості, є оптимальною швидкістю різання за обраного критерію оптимальності – поверхневої пористості покриття після обробки. Наведене відповідає роботі [9], де дані свідчать, що під час оброблення з оптимальною швидкістю різання формується поверхневий шар виробу, що характеризується мінімальним ступенем деформації.

Інший приклад. Величина сили опору контактної взаємодії поверхневого шару покриття з індентором, який під навантаженням переміщується вздовж оброблюваної деталі, та її дисперсія визначає енергетичну спектральну щільність розподілу сили контактної взаємодії S . Величина співвідношення значень S для контактуючих матеріалів дозволяє оцінити їх взаємовплив у парі тертя «різальний інструмент – оброблюване покриття». Зокрема, для випадку точіння покриттів запропоновано залежність [10] – $v_{opt} = c(S_i / S_o)^a e^{-b(S_i/S_o)}$, де v_{opt} – швидкість різання, відповідна мінімальному зносу інструменту; S_i і S_o – максимальна величина енергетичної спектральної щільності сили контактної взаємодії поверхневого шару інструменту і покриття з індентором відповідно; a , b , c – експериментальні коефіцієнти, які залежать від використаних матеріалу інструмента й оброблюваного матеріалу.

Враховуючи наявність кореляційного зв'язку між фрактальними розмірностями структури і властивостей матеріалів, залежність, що зв'язує співвідношення параметрів структури матеріалу інструмента й оброблюваного матеріалу зі швидкістю різання, оптимальною для цієї пари, може бути представлена у вигляді: $v_{opt} = cK(D_{0i} / D_{0o})^a e^{-b(D_{0i}/D_{0o})}$, де v_{opt} – швидкість різання відповідно мінімальному зносу інструменту; D_{0i} та D_{0o} – величини фрактальної розмірності структури або сукупності механічних властивостей інструментального та оброблюваного матеріалів відповідно; K – коефіцієнт, що враховує співвідношення середніх величин механічних показників, наприклад, твердості за Віккерсом, матеріалів.

Підхід, заснований на використанні статистичної інформації про структури та властивості оброблюваних матеріалів, дозволяє мінімізувати необхідні дані, традиційно одержані при проведенні експериментів з різання для оцінки оброблюваності матеріалів. Це також дозволяє коригувати умови обробки для окремої обмеженої партії деталей із матеріалів з гетерогенною структурою, наприклад, із наплавленим покриттям.

Слід зазначити, що ефективність використання різальних інструментів при обробці деталей із наплавленим покриттям проявляється у величині швидкості різання та обумовлена твердістю оброблюваного матеріалу, його хімічним складом і наявністю у структурі абразивних включень (табл. 2 [11]).

Таблиця 2 – Орієнтовні швидкості різання (м/хв) при точінні наплавлених покриттів

Матеріал інструменту		Твердість (HRC) наплавлених матеріалів типу А, В, С, D			
		30–40	40–50	50–60	60–65
Твердий сплав групи	ВК	15–17	11–15	7–11	5–7
	ТК	18–21	14–18	11–14	8–11
	ТТК	21–24	17–21	14–17	12–14
Безвольфрамовий твердий сплав ТН 20		16–18	13–16	11–13	7–11
Мінералокераміка ВОК		30–33	27–30	27	21–24
PcBN	композит 01	72–76	66–72	60–66	54–60
	композит 05	78–84	72–78	66–72	60–66
	композит 09	108–120	96–108	96	90
	композит 10	108–120	96–108	90–96	81–90
	киборит	108–120	96–108	90–96	81–90
	томал 10	96–108	90–96	87–90	78–82

Превентивне визначення геометричних параметрів інструменту для обробки покриттів є складною задачею, за рішенням якої потрібно розглядати значну кількість показників.

Різальний інструмент повинен мати від'ємний передній кут, що дає змогу підвищити його міцність (від'ємний передній кут можна виконувати тільки на фасці завширшки 0,2–0,4 мм, а на решті частини передньої поверхні різця передній кут може бути нульовим); радіус при вершині різця слід приймати досить великим (0,3–1,0 мм) або необхідно виконувати перехідну кромку 0,2–0,4 мм з $\phi_0 = 0^\circ$; головний кут у плані різця має бути $\phi > 30^\circ$ –

35°, оскільки малі кути в плані зумовлюють наявність значної радіальної сили різання, що, поряд із великою шириною різальної кромки, сприяє появі вібрацій і зниженню точності оброблення за недостатньої жорсткості технологічної системи. Величину допоміжного кута різця в плані залежно від його виду рекомендується вибирати в діапазоні 5–20°.

Висока вартість матеріалів покриттів, відносно невелика (особливо для умов обробки по кірці) товщина покриття обумовлюють складності експериментального визначення геометричних показників інструменту. У цьому випадку значний інтерес становить спроба їх орієнтовного теоретичного визначення, наприклад з урахуванням підходів, запропонованих в [12].

Якщо прийняти, що знос інструменту при точінні покриттів відбувається тільки по задній поверхні, а коефіцієнт тертя матеріалу інструменту по наплавленому матеріалу приблизно той самий, як і по сталях, для визначення заднього кута інструменту можна використати залежність $-\sin\alpha = \text{const}/a_{\max}^k$, де a_{\max} – найбільша товщина зрізу; k – показник, який залежить від типу інструменту і матеріалу оброблюваної деталі.

З урахуванням того, що максимальна товщина зрізу під час точіння пов'язана з величиною подачі, отримуємо $-\sin\alpha = \text{const}/S_k \sin^k \varphi_i$, де φ_i – головний кут у плані в точці різальної кромки, що відповідає a_{\max} .

Зміна величини заднього кута в межах 5–12° відносно слабо впливає на стійкість різців, лише його зниження до 2–4° призводить до затирання з боку задньої поверхні, зростанню площі контакту на задній поверхні та підвищенню температури, що негативно позначається на працездатності інструменту. Збільшення заднього кута > 12–15° послаблює різальний клин інструменту.

Значення переднього кута інструменту можна визначити за величиною межі міцності на розтягнення R_m оброблюваного матеріалу: $-\gamma = 0,22 \cdot 10^{-11} R_m^{5,7}$.

Припускаючи, що для наплавлених покриттів справедливо $-R_m = 0,38 \text{ НВ}$, величина переднього кута визначається за виразом: $-\gamma = 0,89 \cdot 10^{-11} \text{ НВ}^{5,7}$.

Як видно, зі збільшенням твердості покриття негативне значення переднього кута інструменту зростає, що підтверджується практикою.

Аналізуючи експериментальні дані з досліджень геометричних параметрів інструменту під час оброблення наплавлених покриттів, можна дійти висновку, що застосування інструменту з від'ємним значенням переднього кута $-(5-10)^\circ$ призводить до зниження стійкості інструменту, збільшення сколів та викришувань через ослаблення різального клину, а це особливо помітно під час оброблення по кірці. Збільшення ж від'ємного значення переднього кута до величини $-(20-25)^\circ$ погіршує стружкоутворення, збільшує ризик появи вібрації і навантаження на інструмент, що зумовлює зменшення його працездатності.

Зміцнення різальної кромки інструменту може бути здійснено шляхом створення фаски на передній поверхні шириною $(1,5-2,0)S$, при цьому на фасці виконується негативний передній кут $\gamma_f = \gamma - \gamma_d$, де γ_d – передній кут, виконаний на державці інструменту.

Наведені вище залежності дають дещо завищені значення геометричних параметрів інструменту і в першому наближенні можуть розглядатися як максимальні.

Висновки. Визначені основні елементи технологічної підготовки механічної обробки деталей із наплавленим поверхневим шаром. Наведені вихідні передумови розробки технології механічної обробки наплавлених деталей: розрахунок припусків та граничних розмірів виробу відповідно до технологічних переходів і товщини наплавленого покриття; загальні рекомендації з вибору матеріалу робочої частини різального інструменту для умов обробки безпосередньо по дефектному поверхневому шару та чистовій обробці покриттів; розглянуто підходи до визначення швидкості різання, які базуються на вимо-

гах забезпечення стійкості різального інструменту та якості шару наплавленого покриття; розглянуто підходи до визначення геометричних параметрів інструменту з урахуванням властивостей оброблюваного матеріалу.

Список використаних джерел

1. Тарельник В. Б. Галузеве машинобудування : підручник / В. Б. Тарельник, С. В. Коноплянченко, В. М. Зубко. – Київ : Олді+, 2023. – 468 с.
2. Analysis of Multi-Objective Optimization of Machining Allowance Distribution and Parameters for Energy Saving Strategy / K. He, H. Hong, R. Tang, J. Wei // *Sustainability*. – 2020. – № 12. – С. 638-370.
3. Газотермические покрытия из порошковых материалов : справочник / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко, Е. Н. Ардатовская. – Киев : Наук. думка, 1987. – 543 с.
4. Формирование газотермических покрытий при производстве деталей / С. А. Клименко, Л. Г. Полонский, М. Ю. Харламов, Ю. А. Харламов, П. А. Витязь, В. С. Ивашко, М. Л. Хейфец, С. А. Чижик. – Минск : Беларуская навука, 2020. – 415 с.
5. Колев, К. С. Точность обработки и режимы резания / К. С. Колев, Л. М. Горчаков. – Москва : Машиностроение, 1976. – 144 с.
6. Обработка и упрочнение поверхностей при изготовлении и восстановлении деталей / В. И. Бородавко, В. С. Ивашко, С. А. Клименко, М. Л. Хейфец. – Минск : Беларуская навука, 2013. – 464 с.
7. Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин : зб. наук. праць / ред. Б. Є. Патон; ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. – Київ, 2015. – 820 с.
8. Feder J. *Fractals* / J. Feder. – New York : Springer, 1988.
9. Обеспечение качества изделий в технологических комплексах / под ред. М. Л. Хейфец. – Минск : Беларуская навука, 2019. – 247 с.
10. Обработка материалов лезвийным инструментом / ред. С. А. Клименко. – Киев : ИСМ им. В. Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2006. – 316 с.
11. Оптимизация процесса обработки неоднородных наплавленных материалов деталей тракторов / В. В. Коломиец, Р. В. Антощенко, Р. В. Ридный, С. А. Богданович, И. А. Фабричникова // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. – 2019. – № 1. – С. 52-59.
12. Ларин М. Н. Оптимальные геометрические параметры режущей части инструмента / М. Н. Ларин. – Москва : Оборонгиз, 1953. – 146 с.

References

1. Tarelnik, V.B., Konoplyanchenko, Ye.V., & Zubko, V.M. (2023). *Galuzeve mashinobuduvannia [Industrial engineering]*. Oldi+.
2. Keyan, He, Huajie, Hong, Renzhong, Tang, Junyu, Wei. (2020). Analysis of Multi-Objective Optimization of Machining Allowance Distribution and Parameters for Energy Saving Strategy. *Sustainability*, (12), 638–370.
3. Borisov, Yu.S., Kharlamov, Yu.A., Sidorenko, S.L., Ardatovskaia, Ye.N. (1987). *Gazotermicheskie pokrytiia iz poroshkovykh materialov: spravochnik [Gas-thermal coatings from powder materials: reference book]*. Nauk. dumka.
4. Klimenko, S.A., Polonskiy, L.G., Kharlamov, M.Yu., Kharlamov, Yu.A., Vityaz, P.A., Ivashko, V.S., Kheyfets, M.L., & Chizhik, S.A. (2020). *Formirovaniie gazotermicheskikh pokrytii pri proizvodstve detalei [Formation of gas-thermal coatings in the production of parts]*. Belaruskaiia navuka.
5. Kolev, K.S., & Gorchakov, L.M. (1976). *Tochnost obrabotki i rezhimy rezaniia [Machining accuracy and cutting conditions]*. Mashinostroyeniye.
6. Borodavko, V.I., Ivashko, V.S., Klimenko, S.A., & Kheyfets, M.L. (2013). *Obrabotka i uprochneniye poverkhnostey pri izgotovlenii i vosstanovlenii detalei [Treatment and hardening of surfaces in the manufacture and restoration of parts]*. Belaruskaiia navuka.
7. Paton, B.Ie. (Ed.). (2015). *Problemi resursu i bezpeki yekspluatatsiï konstruktsiï, sporud ta mashin [Problems of the resource and safety of operation of structures, buildings and machines]*. ІЕЗ ім. Іе.О. Патона NAN Ukrainy.
8. Feder, J. (1988). *Fractals*. Springer New York.
9. Kheyfets, M.L. (Ed.). (2019). *Obespecheniie kachestva izdeliy v tekhnologicheskikh kompleksakh [Ensuring the quality of products in technological complexes]*. Belaruskaiia navuka.
10. Klimenko, S.A. (Ed.). (2006). *Obrabotka materialov lezviynym instrumentom [Processing of materials with a blade tool]*. ISM im. V. N. Bakulya, IPTS «ALKON» NAN Ukrainy.

11. Kolomiyets, V.V., Antoshchenkov, R.V., Ridnyy, R.V., Bogdanovich, S.A., & Fabrichnikova, I.A. (2019). Optimizatsiia protsessa obrabotki neodnorodnykh naplavlennykh materialov detaley traktorov [Optimization of the processing process of non-homogeneous welded materials of tractor parts]. *Fiziko-khimichna mekhanika materialiv – Physico-chemical mechanics of materials*, (1), 52–59.

12. Larin, M.N. (1953). *Optimalnye geometricheskie parametry rezhushchei chasti instrumenta [Optimal geometric parameters of the cutting part of the tool]*. Oborongiz.

Отримано 25.04.23

UDC 621.9416:621.9.025.7

**Sergiy Klymenko¹, Serhiy Klymenko², Maryna Kopieikina³,
Andriy Manohkin⁴, Leonid Polonsky⁵**

¹Doctor of Technical Science, Professor, Corresponding Member of NAS of Ukraine, Deputy Director of Science
V. N. Bakul Institute for Superhard Materials of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: atmu@meta.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1464-3771>. Researcher ID: [Q-8928-2019](https://orcid.org/0000-0003-1464-3771)

SCOPUS Author ID: [57221904325](https://orcid.org/0000-0003-1464-3771)

²PhD in Technical Sciences,

Senior Researcher of the Department «Technological Control of the Quality of Machining Tools with SHM»

V. N. Bakul Institute for Superhard Materials of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: alcon1202@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7913-5519>. Researcher ID: [FFQ-3675-2022](https://orcid.org/0000-0002-7913-5519)

SCOPUS Author ID: [57197629303](https://orcid.org/0000-0002-7913-5519)

³PhD in Technical Sciences, Senior Researcher,

Senior Researcher of the Department «Technological Control of the Quality of Machining Tools with SHM»

V.N. Bakul Institute for Superhard Materials of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: atmul@meta.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5956-5503>. Researcher ID: [FZY-5450-2022](https://orcid.org/0000-0002-5956-5503)

SCOPUS Author ID: [3633766140](https://orcid.org/0000-0002-5956-5503)

⁴PhD in Technical Sciences, Senior Researcher,

Senior Researcher of the Department «Technological Control of the Quality of Machining Tools with SHM»

V.N. Bakul Institute for Superhard Materials of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: the.manohkin@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1479-8482>. Researcher ID: [DGN-4506-2022](https://orcid.org/0000-0003-1479-8482)

SCOPUS Author ID: [37059129600](https://orcid.org/0000-0003-1479-8482)

⁵ Doctor of Technical Science, Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering

State University “Zhytomyr Polytechnic” (Zhytomyr, Ukraine)

E-mail: pol@ztu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4347-9088>. SCOPUS Author ID: [57221220964](https://orcid.org/0000-0002-4347-9088)

INITIAL PREREQUISITES FOR THE DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR TURNING WELDED PARTS

The initial prerequisites for the development of technology for turning welded parts are determined, which include the calculation of allowances and boundary dimensions of the product in accordance with technological transitions and the thickness of the welded coating. An approach to setting the depth of cut is proposed, which ensures that the coating layer on the machined part has the best and most stable properties, which gives the product better performance, in particular, greater wear resistance. In general, the average depth of cut can be determined using the curve of the relative bearing surface of the coating profile, and, taking into account the Hirst method, the variable part of the depth of cut during coating processing can be determined through the fractal dimension of the surface profile. Some approaches to determining the cutting speed based on the requirements for ensuring the quality of the deposited coating layer and the stability of the cutting tool, as well as the geometric parameters of the tool, taking into account the properties of the material being processed, are considered.

Keywords: deposited part; machining allowance; cutting mode parameters; geometric parameters of tool.

Table: 2. Fig.: 2. References: 12.

Володимир Лебедєв¹, Сергій Лой²

¹доктор технічних наук, професор, головний конструктор
Державне підприємство «Дослідне конструкторсько-технологічне бюро
інституту електрозварювання ім. С. О. Патона НАН України» (м. Київ, Україна)
E-mail: lebedevvladimir@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0391-6113>

²старший викладач кафедри зварювання
Херсонський навчально-науковий інститут
Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (м. Херсон, Україна)
E-mail: loys@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1936-6390>

**КОЛИВАЧ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ АПАРАТА ПІДВОДНОГО
ЗВАРЮВАННЯ МОКРИМ СПОСОБОМ**

У статті розглянуто конструкцію механізму подачі порошкового дроту в автоматі для зварювання під водою мокрим способом з оригінальним пристроєм для коливання електродного дроту для забезпечення суцільного шва за наявності негарантованих по ширині зазорів в умовах просторового обмеження. Розроблена методика розрахунку такого коливача на основі структурних кінематичних схем його дії. Представлена реальна конструкція коливача у складі механізму подачі зварювального автомата.

Розроблений коливач відрізняється компактністю та ефективністю і це видно на приведених порівняльних швах та відповідних осцилограмах.

Ключові слова: підводне зварювання; мокрий спосіб; механізми подачі; коливач; пальник; конструкція; розрахунок; зазор; характеристики; контроль.

Рис.: 5. Бібл.: 7.

Актуальність теми дослідження. Якісне виконання електродугового зварювання, яке забезпечує великий термін служби вузлів і деталей більшості виробничих машин у різних галузях, ставить одну з головних проблем матеріалознавства ХХІ століття.

Одним із напрямів у зварюванні та наплавленні є подальша автоматизація електродугових процесів особливо при використанні електродних дротів, які плавляться, як одного з найпоширеніших та важких для автоматичного керування та регулювання.

У зварювальному виробництві та при наплавленні часто використовується обладнання, оснащене механізмами з коливаннями зварювального інструменту, зокрема пальників. Це дозволяє вирішувати різноманітні завдання, пов'язані з реалізацією широкошарового наплавлення, перекриття зазорів та інше в автоматичному режимі.

Особливо важливо забезпечити якісний процес зварювання під водою мокрим способом в автоматичному режимі.

Постановка проблеми. Подальше застосування електродугового зварювання у водному середовищі мокрим способом в автоматичному режимі потребує певних нових техніко-технологічних рішень. Так, останнім часом з'явилося певне коло завдань, де виникає необхідність використання автоматичного дугового зварювання різних об'єктів під водою з використанням мокрого способу та застосуванням спеціальних електродних порошкових дротів. Одне з таких завдань – приварювання спеціальних конструктивів у трубі на глибинах 200 і більше метрів [1]. Крім великої глибини, на якій виконується процес, завдання ускладнюється обмеженими умовами зварювання, наявністю досить великих зазорів між конструктивами, що зварюються, з товщинами порядку 10 мм, неможливістю точного апаратного контролю положення зварювального пальника щодо зварного шва.

Наявність великих зазорів у конструкціях, що зварюються, виникає через технологічну необхідність транспортування приварювального елемента всередині труба на зазначену вище відстань і наявність певних (досить великих) допусків на овальність і внутрішній діаметр труби.

Метою цієї роботи є отримання надійного з'єднання елементів конструкції зі збільшеним зазором при автоматичному зварюванні в умовах обмеженого контролю положення пальника щодо зварного шва та розробка обладнання для вирішення такого досить складного завдання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Слід зауважити, що при техніко-технологічних дослідженнях та створенні обладнання були використані розробки ІЕС ім. О.О. Патона як за самим способом зварювання та зварювальних матеріалів [2], так і по вузлах і конструкціях механізованого обладнання загального та спеціального призначення [3; 4], у тому числі і для підводного зварювання мокрим способом, виконаним на рівні винаходів, реалізованих у вигляді цілого ряду напіваавтоматів, що випускалися у промисловості серійно.

Були випробувані різні способи зварювання на різних режимах, а також різні конструкції забезпечення мінімального зазору постійної величини та пристрої стеження за стиком. Жодне із запропонованих технічних рішень із сукупності вищезазначених причин не призвело до отримання шва з необхідною щільністю та необхідними механічними властивостями. Причина – нерівномірність зазору, складність застосування систем відомих конструкцій, що стежать, характеристики об'єктів, що зварюються (товщина, матеріал, взаємне положення) та ін.

Напрошується рішення, пов'язане зі збільшенням режиму зварювання, яке дозволить захопити велику зону проплавлення, однак, розраховані за результатами роботи [5] величини збільшення погонної енергії, неминуче призведуть до перевитрати як матеріальних, так і енергетичних ресурсів із суттєвим перегрівом металу в зоні зварювання з більш сильними характеристиками процесу. При цьому основна проблема, що виникає при збільшенні тепловкладання в основний метал, зокрема при зварюванні низьковуглецевих і низьколегованих сталей, пов'язана з надмірним зростанням зерен на ділянці перегріву металу навколошовної зони. Крупнозерниста структура металу на цій ділянці перегріву може призвести до зниженої ударної в'язкості та малої стійкості проти переходу в крихкий стан, коли сталь погано витримує динамічні навантаження і непридатна для виробів більш-менш відповідального призначення.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. До цього часу залишаються не до кінця дослідженими питання, пов'язані з можливостями ефективного використання додаткових коливань електродного дроту та функціонування систем для цього процесу в обмеженому просторі при автоматичному зварюванні у водному середовищі мокрим способом.

При цьому дуже важливим є отримання результатів, які можуть бути основою для подальшого ходу досліджень, а також застосування нової конструкції коливача електродного дроту у вищезазначених складних умовах із численними обмеженнями та неможливістю використання вже відомих зразків технічних засобів практичної реалізації зварювального процесу з коливаннями тримача з електродним дротом.

Постановка задачі. На основі комплексних експериментальних досліджень розглянути та проаналізувати основні можливості, які дає зварювання з коливаннями електродного дроту по траскторії, яка не збігається з напрямком шва при виконанні у водному середовищі процесу по зазору, який не має чіткої періодичності та розташований у суттєво обмеженому обсязі. Розробити відповідну конструкцію коливача, методику розрахунку та вибору його елементів та принципи застосування у зварювальному автоматі. Виконати дослідження роботи розробленого коливача електродного дроту.

Виклад основного матеріалу. Під час експериментування зі зварюванням кутового шва із зазором позитивні результати з прийнятними характеристиками зварного з'єднання були отримані при застосуванні коливань певних параметрів зварювального пальника щодо зварного шва перпендикулярно до осі шва, так і під деяким кутом. Останнє виявилось необхідним для забезпечення компактності пристрою у зварювальному апараті загалом.

У результаті комплексу пошукових робіт було запропоновано оригінальну, компактну конструкцію коливача зварювального пальника з приводом безпосередньо від механізму подачі електродного дроту, схема якого у спрощеному вигляді (схематично) представлена на рис. 1.

На нашу думку, спираючись на схему коливача, не важко уявити його роботу. Ефективна передача руху на притискний ролик, який пов'язаний з важелем коливача та зварювальним пальником можлива лише при подачі електродного дроту.

Складність створення такої конструкції коливача полягає у отриманні суцільності шва при обмежених параметрах регулювання частоти коливань пальника. Іншим важливим завданням були обмежені енергетичні ресурси приводного електродвигуна, який повинен витратити певну додаткову потужність на поза осьові переміщення (коливання поперек шва) електродного дроту і ділянки направляючого каналу, яким дріт подається в зону горіння дуги, а також подолання зусилля пружності.

Розглянемо, як вирішувалися ці завдання в розробленій конструкції.

Зазначимо, що в цій конструкції частота коливань зварювального пальника f визначається частотою обертання притискного ролика й залежить від швидкості подачі електродного дроту v_s , та діаметра притискного ролика d_{pr} і відповідає виразу

$$f = \frac{v_s}{\pi d_{pr}} \quad (1)$$

Оскільки в розглянутій конструкції пальника коливання складне з підсумковим синусоїдальним законом руху, то умову суцільності зварного шва за аналогією з [6] та деякими перетвореннями можна записати в такому вигляді

$$v_s = bf \sqrt{\frac{(\sin \tau - 1) \cos \tau}{\frac{3\pi}{2} - \tau}}, \quad (2)$$

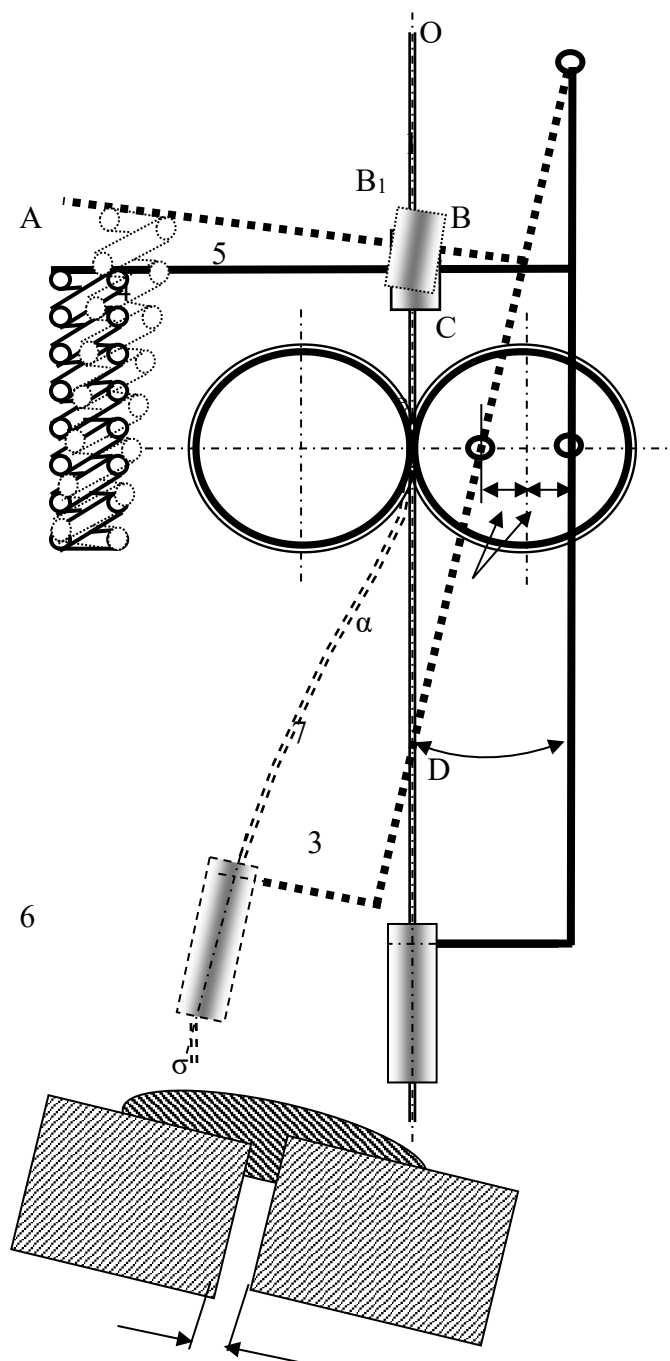


Рис. 1. Схема коливача зварювального пальника:
 1 – важіль; 2 – притискний ролик;
 3 – зварювальний пальник; 4 – пружина стиснення; 5 – подавальний ролик; 6 – елементи конструкції (умовно); 7 – електродний дріт

де b – розмах коливань торця електродного дроту; τ – корінь рівняння

$$\frac{l^2}{b^2} = (\sin t - 1) \left[(\sin t - 1) + \left(\frac{3\pi}{2} - t \right) \cos t \right],$$

Перетворивши і прирівнявши рівняння (1), (2), можна знайти конструктивні параметри b і d_{np} , задавшись одним із них із такого співвідношення

$$\pi d_{np} = b \sqrt{\frac{(\sin \tau - 1) \cos \tau}{\frac{3\pi}{2} - \tau}}. \quad (3)$$

Сила P , що викликає лінійне пружне переміщення каналу з дротом [7], у зоні взаємодії роликів і дроту може бути з припущеннями (пружність, форма, перетин та ін.), але з достатньою для конструктивних рішень точністю знайдене співвідношення

$$P = \frac{3eEJ}{l_k^3} \pm P_{np}, \quad (4)$$

де P_{np} – зусилля пружини, e – величина ексцентриситету притискного ролика; l_k – довжина згинається частини каналу з дротом; E – модуль пружності зв'язки дроту – канал (у нашому випадку враховувався модуль пружності каналу, оскільки дріт, що вільно знаходиться в каналі, практично не згинається); J – момент інерції перерізу згинальної частини каналу з дротом.

При цьому знайдене значення сили має максимальне значення при стисканні пружини та враховується при визначенні моменту на валу електродвигуна механізму подачі.

Переміщення струмопідвідного наконечника, а отже, дуги, у свою чергу, можна встановити виходячи з геометричних співвідношень по рис. 1 в такому вигляді

$$\frac{OC}{OD} = \frac{e}{b}, \quad (5)$$

де OC та OD – розміри елементів важеля.

Враховуючи, що $OC \approx l_k$, рівняння (4) можна записати так

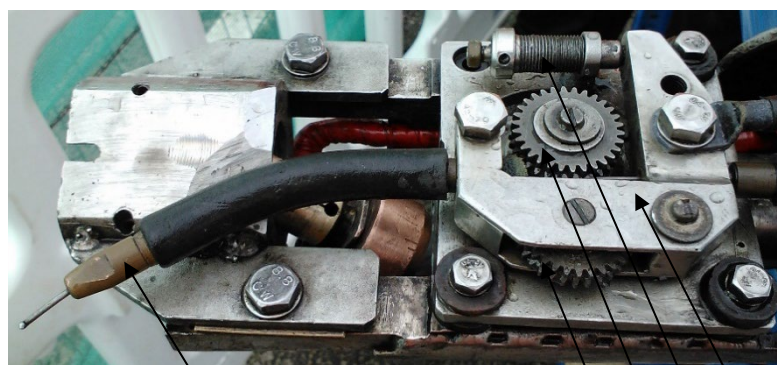


Рис. 2. Конструкція коливача зварювального пальника:

- 1 – важіль; 2 – притискний ролик;
- 3 – пальник зі струмопідвідним наконечником;
- 4 – пружина стиснення; 5 – подавальний ролик

обмежених умовах. Підкреслимо, що коливач у комплекті з механізмом подачі за габаритами вписується в діаметр до 110 мм.

$$P = \frac{3l_k b E J}{O D l_k^2} \pm P_{np}. \quad (6)$$

На підставі виразу (6) проводиться повний розрахунок параметрів роликів і важеля з пальником із вибором розмірів, що мінімізують елементи конструкції коливача електродного дроту та зусилля на валу приводного електродвигуна.

На рис. 2 представлена реальна конструкція коливача електродного дроту для зварювання мокрим способом

Розглянутий механізм у складі автомата випробовувався як у лабораторних умовах при зварюванні на глибині понад 200 м, що імітується в барокамері, і в процесі дослідно-промислової експлуатації на глибинах до 230 м показав надійність роботи і високі техніко-технологічні показники.

На рис. 3 показані порівняльні результати зварювання «в кут» у горизонтальній площині з коливаннями і без коливань струмопідвідного наконечника за наявності зазору до 4 мм у водному середовищі при тиску понад 200 Ат. Середні значення струму зварювання $I_{36} = 230$ А, напруги зварювання $U_{36} = 29,3$ В. Швидкість зварювання 6 ... 7 м/год. При зварюванні без коливань струмопідвідного наконечника, як видно на рис. 3, є провали зварювальної ванни з наступним непроваром конструкції.

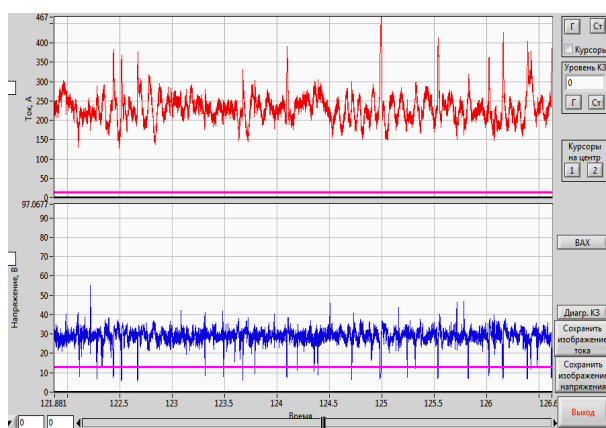


а

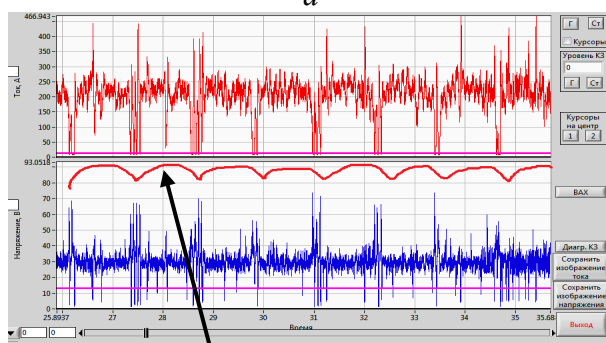
б

Рис. 3. Зварювання елементів конструкції:

а – без коливань; б – з коливаннями струмопідвідного наконечника



а



б

Коливання струмопідводу

Рис. 4. Осцилограма струму та напруги процесу приварювання денця:

а – звичайний процес; б – з коливаннями струмопідвідного наконечника

Осцилографування процесу зварювання, результати якого представлені на рис. 4, показує, що процес з коливаннями більш стабільний з точними позначеннями періоду коливань (частота коливань у межах $f = 1,2$ Гц). Слід зазначити, що за необхідності частота коливань може бути збільшена без зміни параметрів зварювального процесу та зміни кінематичної схеми малогабаритного комплектного пристрою.

Слід зазначити, що при необхідності частота коливань може бути збільшена без зміни параметрів зварювального процесу та зміни кінематичної схеми малогабаритного комплектного пристрою. Збільшення частоти коливань може бути досягнуто при застосуванні коливача з кінематичною схемою, представленою на рис. 5, де у ролі збудника коливань встановлений ексцентрично (з вищеписаним ефектом) додатковий ролик, у разі потреби, з фігурною поверхнею забезпечує велику кількість видів коливань від гармонійних до коливань із зупинками та ін.

Можна зазначити, що робота такого вдосконаленого механізму не потребує додаткових особливих пояснень і цілком зрозуміла з наведеного рис. 5.

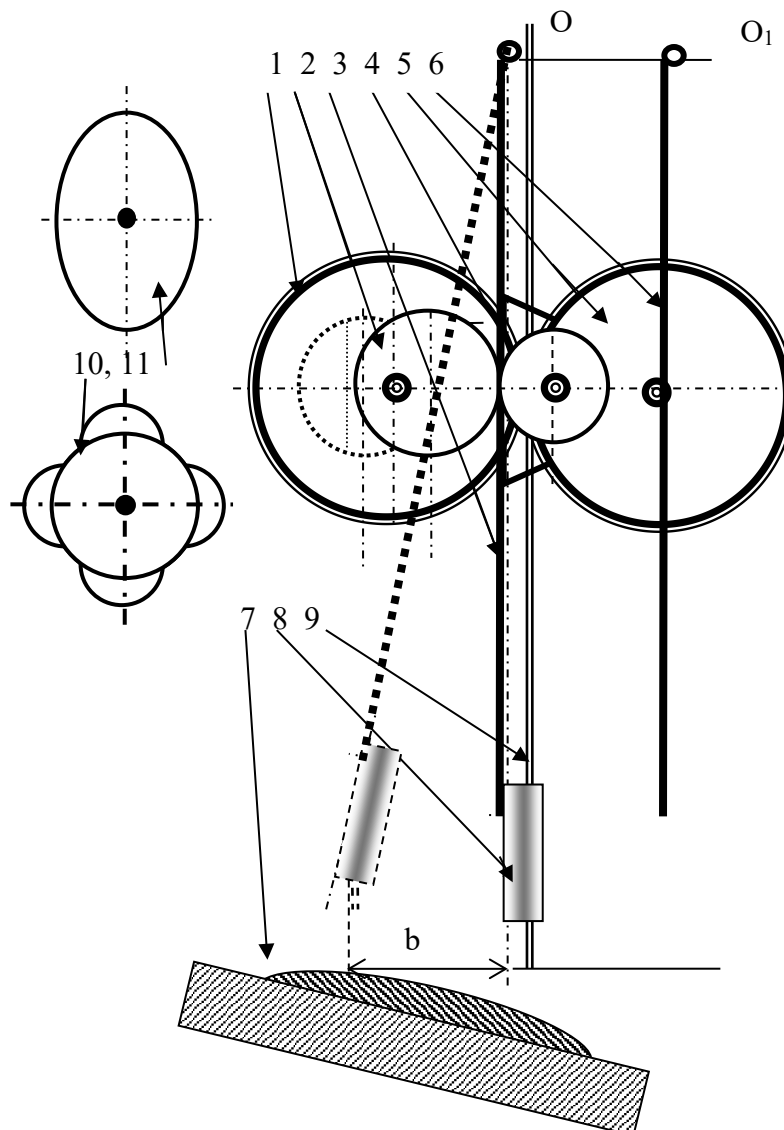


Рис. 5. Варіант конструкції механізму подачі з коливачем від додаткового ролика: 1 – ролик, що подає; 2 – ролик приводу коливача; 3 – важіль коливача; 4 – ролик коливання; 5 – притисний ролик; 6 – притисний важіль; 7 – виріб; 8 – зварювальний пальник; 9 – електродний дріт; 10, 11 - варіанти роликів збудників коливань

Можливості такого механізму суттєво ширші, ніж раніше розглянутого, хоча його конструкція дещо складніша. Методика розрахунку такого механізму практично не відрізняється від вищенаведеної.

Можна вважати, що розглянута конструкція коливача, поєднаного з елементами конструкції та кінематичної схеми механізму подачі, може бути застосована в інших системах автоматизованого зварювального обладнання, також можуть використовуватись у різних сферах зварювального виробництва та при операціях різного характеру з наплавлення.

Додатково зазначимо, що траєкторія руху пальника, яка коливається відбувається по дузі, але радіус кривизни конструктивно вибирається таким, щоби він не дуже відрізнявся від того, який забезпечує еквідистанційне переміщення, що є умовою якісного виконання зварювання, в тому числі і кутового.

Промислове випробовування автомат із таким коливальним пристроєм було вперше здійснено на комплексі теплових насосів на глибині понад 200 м при зварюванні в трубах діаметром 132 мм на території Великої Британії і було успішним.

Висновки.

1. Підводне зварювання мокрим способом отримує дедалі більшого поширення, що пов'язано з розширенням умов її застосування, при цьому вдосконалення може бути здійснено за рахунок створення високоефективних автоматизованих систем для зварювання електродом, що плавиться.

2. Проблема автоматизації процесу зварювання пов'язана з вирішенням завдань зварювання по широкому зазору, як наслідок неможливості точно контролювати точне положення елементів, що зварюються в конструкцію. Запропоноване просте та ефективне техніко-технологічне рішення з коливаннями зварювального пальника дозволяє отримати необхідну якість зварного з'єднання.

3. Запропонована конструкція коливача на основі привода подачі електродного дроту і методика його розрахунку забезпечують надійну роботу пристрою при мінімальних габаритних характеристиках.

Список використаних джерел

1. Уникальный комплекс оборудования для автоматической дуговой сварки на большой глубине в максимально ограниченных условиях / Д. И. Зайнулин, В. А. Лебедев, С. Ю. Максимов, В. Г. Пичак // Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее : сб. тезисов стендовых докладов Междунар. конф. (25-26 ноября 2013). – С. 70-71.

2. Кононенко, В. Я. Опыт мокрой механизированной сварки самозащитными порошковыми проволоками при ремонте под водой газо- и нефтепроводов / В. Я. Кононенко, А. Г. Рыбченков // Автоматическая сварка. – 1994. – № 9-10. – С. 29-32.

3. Максимов, С. Ю. Новое поколение оборудования для мокрой подводной автоматической сварки / С. Ю. Максимов, В. А. Лебедев // Доклады Санкт-Петербургской международной научно-технической конференции (16-18 окт. 2012 г. Санкт-Петербург). – Санкт-Петербург, 2012. – С. 270-278.

4. Lebedev, V. A. New Equipment for Underwater Mechanized and Automatic Flux-Cored Wire Welding and Cutting / V. A. Lebedev, S. Yu. Maksimov // International Congress on Advances in Welding Science and Technology for Construction, Energy and Transportation Systems (AWST - 2011) (24-25 October 2011, Antalya, Turkey). – Antalya, 2011. – Pp. 139-142.

5. Лебедев, В. А. Обеспечение технологической надежности сварочного оборудования / В. А. Лебедев, Д. В. Плющ // Заготовительные производства в машиностроении. – 2013. – № 7. – С. 11-14.

6. Данилов, А. И. Условие сплошности наплавки при движении источника нагрева по синусоидальному закону / А. И. Данилов, А. И. Гартманова, Н. А. Колосова // Сварочное производство. – 1980. – № 2. – С. 26.

7. Сопротивление материалов / Г. С. Писаренко, В. А. Агарев, А. Л. Квитка и др. – Киев : Гостехиздат УССР, 1963. – 792 с.

References

1. Zainulyan, D.Y., Lebedev, V.A., Maksymov, S.Iu., & Pychak, V.H. (2013). Unikalnyi kompleks oborudovaniia dlia avtomaticheskoi duhovoii svarky na bolshoi hlubyne v maksimalno ohranychennykh uslovyiakh [A unique set of equipment for automatic arc welding at great depths under the most limited conditions]. *Sbornyk tezysov stendovykh dokladov Mezhdunarodnoi konferentsyy «Svarka y rodstvennye tekhnolohyy – nastoiashchee y budushchee – Welding and related technologies – present and the future: Sat. abstracts of poster presentations Intern. conf.* (pp. 70-71).

2. Kononenko, V.Ia., & Rybchenkov A.H. (1994). Opyt mokroi mekhanizirovannoi svarki samozashchytnymi poroshkovymi provolokami pri remonte pod vodoi gazo- y nefteprovodov [Experience of wet mechanized welding with self-shielding flux-cored wires during underwater repair of gas and oil pipelines]. *Avtomaticheskaiia svarka – Automatic welding*, (9-10), 29-32.

3. Maksymov, S.Iu., & Lebedev, V.A. (2012). Novoe pokolenie oborudovaniia dlia mokroi podvodnoi avtomaticheskoi svarky [New generation of equipment for wet underwater automatic welding]. *Doklady Sankt-Peterburhskoi mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii – Reports of the St. Petersburg International Scientific and Technical Conference*] (pp. 270-278).

4. Lebedev, V.A., Maksimov, S.Yu. (24-25 October 2011). New Equipment for Underwater Mechanized and Automatic Flux-Cored Wire Welding and Cutting. *International Congress on Advances in Welding Science and Technology for Construction, Energy and Transportation Systems (AWST - 2011)* (pp. 139-142). Antalya, Turkey.

5. Lebedev, V.A., & Pliushch, D.V. (2013). Obespechenie tekhnologicheskoi nadezhnosti svarochnogo oborudovaniia [Provision of technological reliability of welding equipment]. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii – Procurement production in mechanical engineering*, (7), pp. 11-14.

6. Danylov, A.I., Gartmanova, A.I., & Kolosova, N.A. (1980). Uslovie sploshnosti naplavki pri dvizhenii istochnika nagreva po sinusoidalnomu zakonu [The condition of the continuity of the surfacing when the heating source moves according to the sinusoidal law]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, (2), pp. 26.

7. Pisarenko, H.S., Agarev, V.A., Kvitka, A.L. (1963). *Soprotivlenie materialov [Strength of materials]*. Gostekhizdat USSR.

Отримано 08.05.23

UDC 62-503.55

Volodymyr Lebedev¹, Serhii Loi²

¹Doctor of Technical Sciences, Professor, chief designer

State enterprise “Research Design and Technology Bureau

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

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

²Senior Lecturer of the Welding Department

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

E-mail: loys@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1936-6390>

WELDING TOOL OSCILLATOR FOR WET UNDERWATER WELDING APPARATUS

The paper defines the problem of automatic wet welding at a great depth in compressed conditions. A new design of the flux-cored wire feeding mechanism in an automatic wet welding machine with an original device for oscillating the electrode wire to ensure a continuous seam in the presence of non-guaranteed gaps in terms of space limitations is considered. This problem arises when special metal plugs are installed inside pipes of a small internal diameter to isolate or demarcate different environments, for example, coolant in deep pump systems, when plugging pipe outlets of oil and gas wells. Electric arc automatic welding is efficient enough to solve such a problem. Plug welding has certain problems associated with uneven gaps between the plug and the inner wall of the pipe, where the corner joint must be made. The original design of the oscillator of the welding tool is proposed and technically implemented in an automatic machine for the electric arc process, which provides welding of such a joint. Ways for further development of the oscillator design with interesting improvements of capabilities are defined. A method of calculating such an oscillator based on structural kinematic schemes of its action has been developed. Presented on the real design of the oscillator as part of the welding machine feed mechanism. The developed oscillator is compact and efficient, and this can be seen from the given comparative plots and corresponding oscillograms. A successful industrial test of the development of a welding machine with a new feed mechanism took place with further commissioning. The new development can be used on other objects with conditions similar to those specified in the material of the article.

Key words: underwater welding; wet method; feed mechanisms; oscillator; burner; design; calculation; gap; characteristics; control.

Fig.: 5. References: 7.

Олег Пилипенко

доктор технічних наук, професор (Чернігів, Україна)

E-mail: opilip@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0590-0107>. ResearcherID: [G-2533-2016](https://orcid.org/G-2533-2016)

НАЗЕМНО-БОРТОВІ СИСТЕМИ ВИПРОБУВАНЬ ТА ДІАГНОСТИКИ ВЕРТОЛІТНИХ РЕДУКТОРІВ

Стаття є оглядово-інформаційною. Представлені: обґрунтування вібродіагностики зубчастих передач газотурбінних двигунів та редукторів вертольотів, інформаційно-вимірвальні системи контролю відпрацювання втомного ресурсу вертолітних редукторів, система збору й обробки польотної інформації, методика оцінки та апаратно-програмні засоби визначення вібраційних параметрів авіаційних механізмів, бортові комплекси накопичення та обробки діагностичної інформації, робота бортової системи діагностики вертольотів і центру супроводження експлуатації вертольотів за технічним станом.

Ключові слова: бортові й наземні системи вібродіагностики вертольотів; супроводження їх експлуатації за технічним станом.

Рис.: 9. Табл.: 1. Бібл.: 24.

Актуальність теми дослідження. Запобігання техногенних катастроф, що супроводжуються великими людськими, економічними та екологічними втратами, стає одним із головних напрямів постійного моніторингу стану складних технічних систем. Системи моніторингу роблять величезний внесок у забезпечення надійності роботи авіаційної техніки і є одним із ключових елементів її експлуатації за технічним станом. Вага діагностики і прогнозування технічного стану авіаційної техніки є актуальною і з бігом часу невпинно зростає.

Постановка проблеми. Наявний парк вертольотів експлуатується нині згідно з ресурсом, зумовленим їхнім технічним станом. Тому постає гостра проблема оцінки технічного стану як вертольотів загалом, так і зубчастих передач та пов'язаних з ними деталей основного кінематичного ланцюга головних, проміжних і хвостових редукторів, приводів коробки агрегатів газотурбінних двигунів (ГТД).

Аналіз досліджень і публікацій. Бортова система діагностики вертольотів спочатку розроблялася переважно для забезпечення безпеки польотів вертольотів над морем. За британськими нормами з 1995 року, а нині вже і за китайськими нормами, над морем без систем діагностики вертольотам літати неможливо. У нас ця задача вирішувалася з 2004 року.

З метою отримання та подальшої обробки діагностичної і навантажувальної інформації про об'єкти контролю застосовуються зовнішні та вбудовані давачі, прилади неруйнівного контролю, системи зберігання та обробки інформації, алгоритмів і програм для прийняття рішень. Діагностична інформація обмежена за об'ємом і має лише посередній характер через недосконалість апаратури, недбалість оператора або недоступності розташування дефектів [1; 2].

Наявні засоби неруйнівного контролю не дають змоги виявити всі тріщини та інші пошкодження, які надалі можуть призвести до граничних станів. Формування дефектів критичних розмірів і, як наслідок, руйнування конструкції може спричинитися неузгодженістю періодичних оглядів з часовими параметрами зародження і поширення втомних тріщин [2].

Дані щодо навантажень та інших умов взаємодії об'єкта контролю з навколишнім середовищем є цінними з огляду на те, що по них з допомогою розрахункових схем можна ідентифікувати історію навантаження об'єкта контролю і ступінь накопичених ним пошкоджень у процесі експлуатації. Під час порівняння результатів розрахунку пошкодженості з діагностичними даними оцінюються параметри технічного стану об'єкта контролю. Отже, два джерела інформації – діагностичні дані про стан об'єкта й дані про історію його навантаження – виявляються тісно пов'язаними та взаємно залежними [1].

Вирішення проблеми отримання такої інформації, її обробки і прийняття рішень щодо стратегії технічного обслуговування кожного зразка авіаційної техніки, а також прогнозування його залишкового ресурсу повинно реалізовуватись у рамках комплексних інтелектуальних систем моніторингу (KICM) життєвого циклу літального апарату (ЛА) [3]. До різновиду таких систем можна віднести розроблені і впроваджені бортові системи безперервного контролю технічних систем Structural Health Monitoring (SHM).

SHM передбачає безперервний і автономний контроль пошкоджень, навантаженості, взаємодії елементів конструкцій з навколишнім середовищем, екологічних параметрів за допомогою постійно прикріплених або вбудованих систем давачів (сенсорів) [4].

Розробка загальних підходів до створення системи SHM в рамках “філософії інтелектуальної авіаційної конструкції” почалася компанією Airbus у 90-х роках минулого століття [5]. У 2007 році створено SHM-AISC (Aerospace Industry Steering Commitee) – об’єднання, на яке було покладено займатися координацією робіт з розробки і впровадження автоматизованих бортових систем контролю цілісності конструкцій літаків та багаторазових космічних апаратів з використанням системи вбудованих сенсорних давачів. Встановлення різних типів давачів на конструктивні елементи мають на меті визначення фізичних і силових впливів на їх міцність і довговічність [4; 6; 7]. Кінцевою метою цих розробок є створення системи-аналога нервовій системі людини, яка могла б, крім виявлення дефектів та пошкоджень, реагувати адекватно на їх наявність і видавати відповідні рекомендації обслуговуючому персоналу [6; 7].

Зазначимо, що в міжнародний комітет SHM-AISC входять Airbus, Boeing, BAE Systems, Embraer, Honeywell, NASA, Авіаційні Адміністрації США і Європи, наукові лабораторії збройних сил США, провідних університетів [8].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Основна увага буде зосереджена на сучасних ефективних напрямках експлуатаційної діагностики найбільш напружених вузлів вертолітних редукторів.

Мета статті. Дослідження наземно-бортових систем випробувань та діагностики вертолітних редукторів для забезпечення безпеки польотів.

Виклад основного матеріалу. Ефективним напрямком експлуатаційного діагностування найбільш напружених вузлів – зубчастих передач редукторів ГТД є методи аналізу сигналів вібрацій корпусу двигуна. Актуальною задачею є розробка і впровадження ефективних методів експлуатаційного діагностування зубчастих передач, які дають можливість чітко виділити в сигналі вібрацій корпусу двигуна ознаки відхилень характеристик деталей редуктора від штатного стану і доповнити автоматичну систему аналізу технічного стану роторних деталей ГТД п’ятого і шостого поколінь. Своєчасна локалізація і усунення відхилень характеристик деталей дозволять збільшити надійність, зменшити витрати на ремонти і покращити акустичні параметри ГТД [9].

Теоретичне й експериментальне обґрунтування вібродіагностики зубчастих передач ГТД та редукторів вертольотів [9; 10; 11]. У застосуванні до авіаційних редукторів традиційно припускають, що зубці, які перекочуються по евольвенті їхнього профілю, не створюють суттєвих локалізацій контактних навантажень [12]. Тому сигнал $s_z(t)$ зубцевих вібрацій можна описати гармонічною функцією $s_z(t) = A \cos(\omega_z t + \varphi_0)$, де A – амплітуда коливань вібропереміщень, ω_z – кругова зубцева частота, φ_0 – початкова фаза. Роторну частоту приймають постійною $\omega_r = const$, тому буде постійною і зубцева частота $\omega_z = const$. Протягом періоду момент не змінюється з часом $A_z \omega_z = const$, початкова фаза приймається рівною нулю $\varphi_0 = 0$. Доповнено аналіз фізичного процесу передачі крутного моменту парою зубців і параметрів поверхонь з максимальним контактним навантаженням [16] (рис. 1) [9].

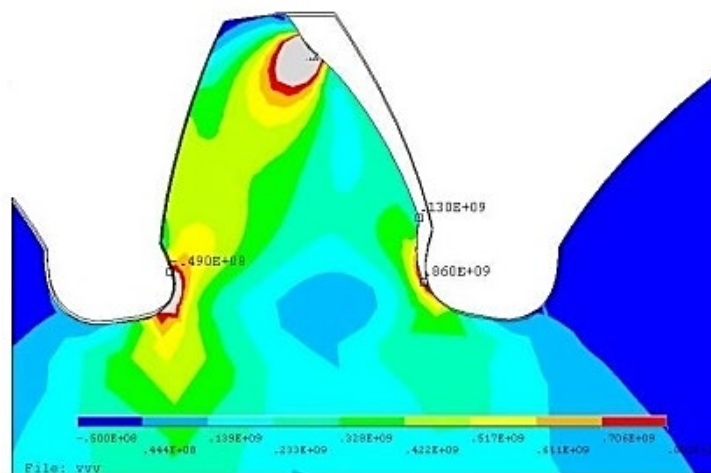


Рис. 1. Динамічні навантаження процесу передачі крутного моменту зубом шестерні. Кольором виділені точки максимального навантаження і питомий тиск, H/m^2 [9]

Впродовж циклу перезачеплення жорсткість пари зубців, що беруть участь у передачі крутного моменту, змінюється декілька разів, при цьому відбувається згинальна деформація зубців у пружній області з відповідною зміною кроків зачеплення. Це, у свою чергу, може призвести до пластичної деформації в зоні двопарного зачеплення (виділений об'єм на вершині зуба рис. 1). Одночасно із зубом деформуються: вал на кручення, шліцеві з'єднання вала й деталі підшипників опор на згин. У процесі деформації протягом часу фронту наростання деформації t_ϕ відбувається зміна миттєвої частоти $\Delta\omega_z(t)$, $t \in t_\phi$, що призводить до зміни кінетичної енергії шестерні $\Delta E_\omega = J\Delta\omega_r^2/2$, де J – приведений момент інерції шестерні, та ініціює момент імпульсу $M = J\Delta\omega_r$. Останній породжує імпульс вібрації $\vec{P} = m\langle\Delta\vec{v}\rangle$ з енергією $\Delta E_v = m\langle\Delta v\rangle^2/2$, де m – активна маса шестерні, $\langle v \rangle$ – усереднена на інтервалі t_ϕ швидкість деформації зуба.

Сигнал $s_z(t) \approx \Delta E_v(t)$, пропорційний енергії переспряження, передається на опору вала й поширюється по корпусних деталях двигуна до чутливого елемента давача вібрацій. У випадку експлуатаційного дефекту зуба – тріщини, викрошування, зміни маси (зношування, зміни геометрії поверхні) – буде змінюватися функція лінійної деформації зуба $\Delta L_z(t)$ у просторі часу, що впливає на енергію вібрацій $\Delta E_v(t)$.

Аналіз динаміки процесу передачі крутного моменту парою зубців на інтервалі часу передачі ними цього моменту дозволяє авторам [9; 10; 11] зробити висновок про негармонічний характер сигналу зубцевої частоти $s_z(t)$, який має як мінімум два максимуми – при вході в зачеплення і виході з нього. Традиційна математична модель у спектральній області являє собою суму сигналів:

$$s_z(t) = \sum_{i=1}^k A_{zi}(t) \sin[\omega_{zi}(t)t + \varphi_{zi}(t)]; t \in [T_a], T_a \in [T_r], \quad (1)$$

де k – кількість спектральних складових сигналу; T_r – період роторної частоти.

На основі теоретичних досліджень фізичної моделі автори [9; 10; 11] роблять висновок, що основною функцією, яка характеризує енергетичну ефективність передачі крутного моменту і є чутливою до зародження дефектів зубців шестерень, можна вважати девіацію параметра першої похідної кутової швидкості переспряження зубців $\Delta\varphi_i(t) = \frac{d\omega_z(t)}{dt}$, $t \in [T_a]$ на інтервалі часу T_a , яка є функцією динамічної кінематичної погрішності в просторі часу.

Для пристосування виразу (1) до параметрів динамічної кінематичної погрішності [12] він може бути представлений у вигляді математичної моделі фазової модуляції $Md_\varphi[*]$ несучого сигналу із зубцевою частотою ω_z , усереднене значення якої на інтервалі часу одного періоду T_r роторної частоти ω_r не змінюється $\omega_r(t) = const, t \in [T_r]$:

$$s_z(t) = Md_\varphi[\varphi_z(t), \Delta L_z(t), \Delta v_z(t)]; t \in [T_a], T_a \in [T_r], \quad (2)$$

а функцію повної фази $\Delta\varphi_z(t)$ як результат фазової демодуляції сигналу $s_z(t)$ (2).

$$\varphi_z(t) = \arg\{Hil[s_z(t)]\}, t \in [T_a], T_a \in [T_r], \quad (3)$$

де $Hil[*]$ – перетворення Гілберта; $\arg\{*\}$ – аргумент функції.

Адекватність моделі (2), (3) перевірялася у процесі аналізу сигналу давача поперечних горизонтальних вібрацій ведучої шестерні заднього редуктора двигуна ТВЗ-117ВМА-СБМ1, який проходив стендові випробування на АТ «Мотор-Сич». Унаслідок нештатної роботи системи управління камерою згоряння двигун мав підвищені вібрації заднього редуктора – понад 100g при максимумі не гірше 80g під час передачі замовнику і статистичній нормі 28g. Підданий аналізу сигнал вібрацій $s(t)$, який містить сигнал зубцевої частоти $s_z(t)$ (файл $s_zr317mp$) інтервалом 1 с, був записаний приблизно в середині режиму двигуна «взльотний», довготривалість якого 5 хв. Можна вважати, що модель (2) була мінімізована в частині погрішності від обмеження $\omega_z(t) = const, t \in [T_r]$.

Давач вібрацій мав лінійну фазову характеристику перетворення до частоти 20 000 Гц і був розташований на відстані близько 100 мм від ведучої шестерні. Сигнал давача фіксувався в цифровому вигляді вимірювальним комплексом МІС300 з такими параметрами аналого-цифрового перетворювача: $f_d = 216\,000$ Гц – частота дискретизації і $n = 2^{16}$ – кількість рівнів квантування амплітуди вібрацій. На цьому етапі досліджень вважали, що інтервал дискретизації Δt_d і величина рівня квантування амплітуди Δx_v аналого-цифрового перетворювача дозволять з інженерною точністю ідентифікувати параметри першої похідної кутової швидкості переспряження зубців $\Delta\varphi_z(t) = \frac{d_{\omega_z}(t)}{dt}, t \in [T_a]$.

Результати експериментальних досліджень моделі аналізу віброкінематометрії зубчатої пари на зубцевій частоті $f_z = 102\,226$ Гц представлені на рис. 2 [11]. На верхньому графіку показаний досліджуваний сигнал вібрацій $s(t)$ на інтервалі аналізу T_a , який відповідає одному періоду роторної частоти $T_a = T_r = \frac{1}{f_r} = 0,0040093$ с ведучої шестерні; функція параметра лінійної деформації зуба $\Delta L_z(t)$ – на середньому графіку; амплітуда зубцевих віброприскорень $A_{vz}(t)$ – на нижньому графіку. Над нижніми графіками наведені параметри, які базуються на гіпотезі випадковості й нормальності розподілу амплітуд сигналу $s_z(t, \Delta t_d)$ і мають визначальне значення в частині прогнозу залишкового ресурсу редуктора ГТД: пік-фактор модуля лінійної деформації $Pf_z = \max|\Delta L_z(t)|$, а також мінімальний набір статистичних моментів – математичне очікування $M[*]$ і дисперсія $D[*]$.

На основі аналізу функції параметра лінійної деформації зуба $\Delta L_z(t)$ можна зробити висновок про її інформаційну ідентичність експериментальним даним лабораторних досліджень [13]. На рис. 2 можна аналізувати подвійний сигнал від кожного зуба шестерні, яких всього було 41. Але на деяких дільницях графіка амплітуду сигналу важко розрізнити, що може свідчити про вузький частотний або динамічний діапазон давача вібрацій.

Амплітуда деформації з її номінальним розрахунковим значенням $\Delta L_{zn} \approx 20 \cdot 10^{-6}$ м при постійному крутному моменті 1190 Н·м і статистичній нормі вібрацій 28g, з врахуванням перенавантажень унаслідок нештатної роботи системи управління, відповідає реальним значенням у межах інженерної точності. Форма огинаючої графіка дозволяє прогнозувати можливий дисбаланс вхідного валу редуктора або свідчити про зміну знаку першої похідної крутного моменту на інтервалі часу $(2 \div 2,5) \cdot 10^{-3}$ с.

Сумісний аналіз функцій амплітуди зубцевих вібрацій $A_{Vz}(t)$ і вхідного сигналу дозволяє зробити висновок про вібраційну якість зубчастої пари й кількісний склад перешкод у вихідному сигналі корпусу двигуна.

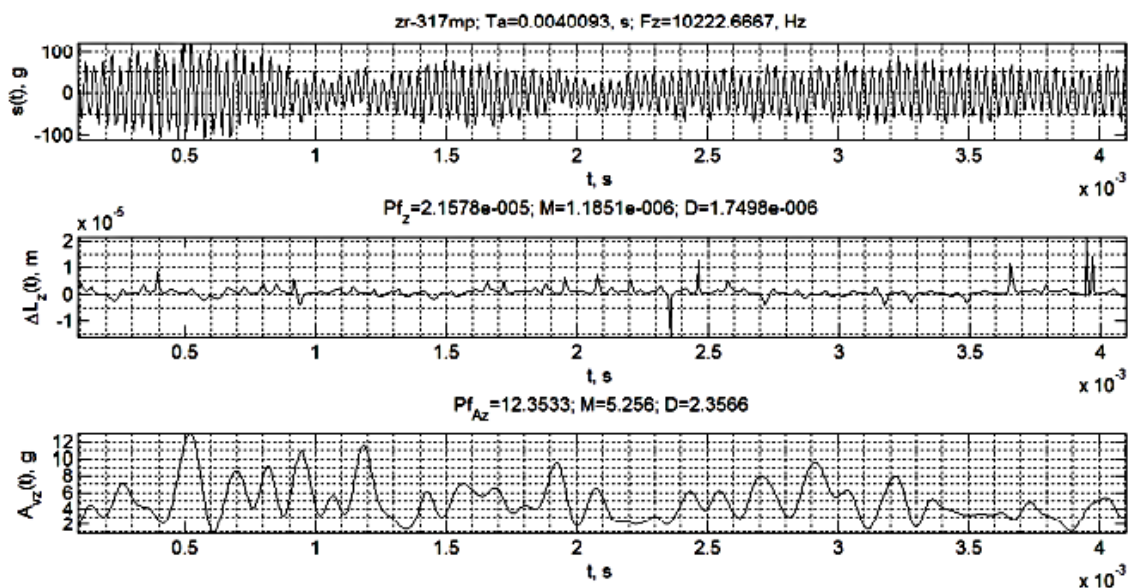


Рис. 2. Результати аналізу параметрів віброкінематометрії зубчастої пари редуктора на зубцевій частоті $f_z = 10222,6$ Гц [11]

Експериментальні дослідження представленої моделі дають можливість прогнозувати її адекватність не гірше 0,9 [11]. Програмне забезпечення, яке реалізує алгоритм розрахунку моделі, працює із сигналом штатного давача вібрацій корпусу ГТД і може доповнювати бортову або стендову автоматичну систему аналізу технічного стану зубчастих передач ГТД п'ятого і шостого поколінь.

Сучасний розвиток мікропроцесорної та обчислювальної техніки дає можливість створювати діагностичні комплекси, які мають забезпечувати ефективний контроль поточного технічного стану складних систем і достатньо обґрунтоване прогнозування «експлуатаційного ресурсу» їх найбільш відповідальних елементів [14]. Проте широке практичне застосування ресурсного прогнозування вимагає розвитку наукових і практичних додатків, зокрема таких, як прогнозування залишкового ресурсу зубчастих коліс за даними періодичного моніторингу динаміки зачеплення під час ресурсних випробувань.

Інформаційно-вимірвальні системи контролю відпрацювання втомного ресурсу вертолітних редукторів. Якість виготовлення і ремонту вертолітних редукторів (ВР) визначає льотні характеристики і надійність вертольота загалом. Тому виникає необхідність здійснення комплексного тестування (моніторингу) ВР на всіх можливих режимах наступної експлуатації. Така перевірка здійснюється на спеціалізованих випробувальних стендах (СВС), які повністю імітують роботу ВР на вертольоті в реальних умовах експлуатації та виконують вимірювання основних параметрів.

Автоматизація СВС [15; 16] дає можливість підвищити точність і достовірність результатів випробувань, виключити неадекватні дії та помилки оператора, спростити навчання персоналу.

Методологія оцінки наявного технічного стану та прогнозування індивідуального залишкового ресурсу ЛА в експлуатації базується на використанні поточної інформації від об'єктів контролю, яка надходить по двох напрямках: це дані поточного (оперативного) пошуку дефектів у процесі експлуатації і дані про навантаження та інші умови взаємодії об'єкта контролю з навколишнім середовищем. При цьому контроль може бути безперервним (моніторинг) або дискретним (наприклад, пристосованим до планових профілактичних оглядів).

Стандарт ДСТУ ISO 8579-2 [17] встановлює методи визначення механічної вібрації зубчастих передач редукторів, методи вимірювання вібрацій корпусу і вала, типи вимірювальної апаратури, методи вимірювання і методики випробування для визначення рівнів вібрації. На жаль, стандартом не передбачено вимірювання крутильних коливань зубчастих приводів. Але рекомендації стандарту треба враховувати під час розробки спеціальних високошвидкісних механічних приводів, до яких належать авіаційні зубчасті передачі ГТД і редукторів.

Актуальною проблемою в наш час є повне використання ресурсів і строків служби сучасних ЛА. Ефективне використання ЛА визначається не тільки рівнем льотно-технічних характеристик, але й суттєво залежить від належного технічного обслуговування і ремонту (ТОР). А для цього існує система збору й обробки польотної інформації (СЗОП). Інформація, яка реєструється цією системою під час виконання польотів, призначена для [14]: систематичного підвищення рівня безпеки польотів; своєчасного контролю якості виконання польотного завдання; своєчасного запобігання порушенням правил льотно-технічної експлуатації авіаційної техніки; розробки і прийняття заходів з попередження авіаційних подій та інцидентів; підвищення професійної підготовки льотних екіпажів; виявлення відмов і пошкоджень авіаційної техніки; контролю повноти технічного обслуговування авіаційної техніки; підвищення ефективності використання авіаційної техніки й економного витрачання палива; прогнозування стану авіаційної техніки; забезпечення необхідною інформацією комісій з розслідування авіаційних подій та інцидентів.

СЗОП поділяється на бортову і наземну частини (рис. 3). До бортової частини відносяться три типи реєстраторів [18,19]: система реєстрації даних; система реєстрації звукової обстановки в кабіні екіпажу (cockpit audio recording systems – CARS) (система реєстрації акустики кабіни – СРАК); система реєстрації візуальної обстановки (БСРВ) і/або система реєстрації лінії передачі даних (СРЛД).

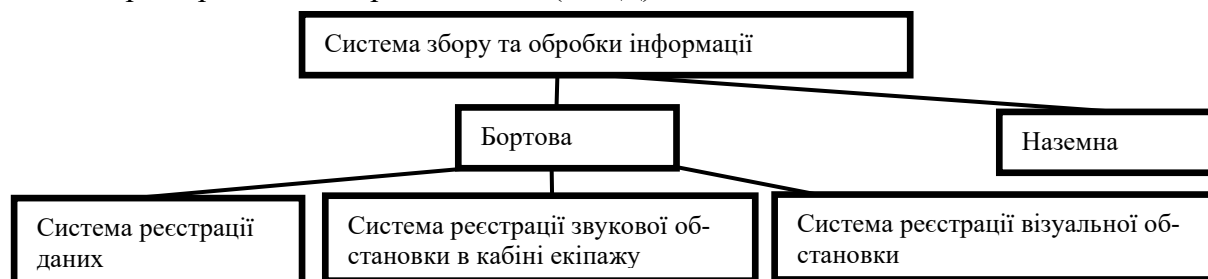


Рис. 3. Система збору й обробки польотної інформації

Параметри, що реєструються бортовою системою реєстрації даних, володіють трьома інформаційними мірами, які визначають якість та кількість інформації: синтаксична, семантична і прагматична [20]. Вибір параметрів, які підлягають реєстрації, визначається нормативними документами та спеціалістами з умов контролепридатності [21].

Система реєстрації звукової обстановки в кабіні екіпажу здійснює реєстрацію по 4 каналах: два канали задіяні для запису переговорів екіпажу з використанням обладнання радіозв'язку; канал для запису звукового поля в кабіні екіпажу; канал для запису поточного часу польоту. Бортова система реєстрації візуальної обстановки повинна забезпечувати реєстрацію приладної дошки екіпажу.

Після польоту здійснюється інтелектуальна обробка польотної інформації, під якою розуміють отримання інформаційних подій з польотної інформації шляхом виконання деяких алгоритмів для виявлення потенційних ризиків. Інтелектуальна обробка є одною з основних операцій, що виконуються над польотною інформацією, і головним засобом збільшення об'єму й різноманітності інформації [20]. Можливість найбільш повної реалізації обраних принципів і вимог щодо забезпечення заданого рівня контролепридатності визначається вибором об'єктів контролю в системі, які мають номенклатуру видів відмов і характеризуються інтенсивністю їх виникнення, наслідками та ступенем критичності (вплив на виконання основних функцій на рівні системи, повітряного судна загалом).

Об'єктом технічного діагностування (контролю технічного стану) є виріб і (або) його складові частини. Визначення об'єктів технічного діагностування в межах системи досягається фізичним і функціональним поділом системи за такими принципами:

1. Компоненти групуються за функціями (кожна функція реалізована в одному замінному блоці), або поділ системи здійснюється за елементним виконанням і групі функцій (наприклад: електронний блок, механічний вузол, гідравлічний елемент конструкції системи і т. ін.).

2. Можливості реалізації алгоритмів локалізації відмов виділених елементів.

3. Складності реалізації конструкції при вибраному фізичному поділі.

4. Можливості оперативної заміни елементів під час експлуатації.

5. Необхідна кількість і вартість запасних елементів заміни (логістична вимога) та інших факторів, які можуть визначатися також вимогами надійності, безпеки, заданим ресурсом, масогабаритними характеристиками і т. ін. Фізичний поділ системи являє собою експлуатаційну структуру системи, яка повинна забезпечити ефективне технічне обслуговування при мінімальних трудовитратах (вартості технічного обслуговування).

В основі концепції систем діагностики авіаційних приводів під час експлуатації лежить поділ системи на підсистеми, які тісно взаємодіють між собою, але вирішують при цьому свої окремі завдання [22].

Бортова підсистема у вигляді апаратно-програмних комплексів забезпечує збір і попередню обробку первинної інформації – сигналів вібрацій, синхронізації, температури тощо. Крім того, бортова підсистема взаємодіє зі штатним обладнанням вертольота для отримання інформації щодо режимів роботи і польоту вертольота. Ця інформація потім використовується для уточнення технічного стану й розрахунку еквівалентного напруження агрегатів.

Наземна підсистема являє собою набір апаратно-програмних засобів, що забезпечують виконання автоматичного експрес-аналізу й розширеного аналізу зареєстрованої на борту інформації, визначення оптимального набору значень регулюючих параметрів для кожної лопаті під час балансування гвинтів вертольота, а також ведення електронних формулярів агрегатів трансмісії. До того ж наземна підсистема, як правило, має зв'язок з базою даних супроводження експлуатації або базою даних виробника ЛА. У цій базі накопичується вся інформація з вертольотів, обладнаних системами діагностики, відбувається аналіз статистики змін діагностичних параметрів і оцінка параметрів надійності як окремого вертольота, так і всього парку ЛА, що знаходяться в експлуатації.

Методика оцінки вібраційних параметрів авіаційних механізмів [22]. У редукторах і коробках приводів основними збудниками вібрацій є зубчасті передачі, шліцеві з'єднання і підшипники кочення. Сигнали вібрацій, що реєструються з давачів, встановлених на корпусі редуктора (рис. 4) [23], містять у собі увесь спектр вимушених коливань, які генеруються цими деталями на своїх характерних частотах.

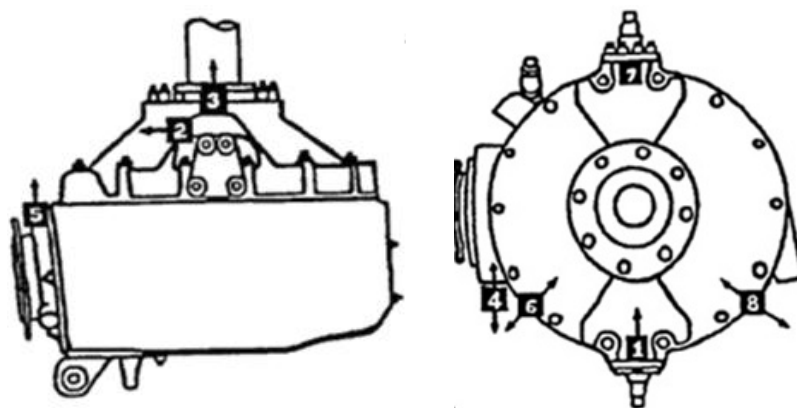


Рис. 4. Розташування акселерометрів під час стендових випробувань головного редуктора ОН-58А: # 1, 2, 3 давачі прикріплені до блоку на правій опорі цапфи; # 4, 6, 7, 8 давачі прикручені до корпусу через сталеві вставки; # 5 давач кріпиться до блоку на вході в корпус [23]

Таким чином, можна розглядати модель вібрацій редуктора як полігармонічну, тобто рівну сумі коливань на цих певних частотах. Значення характерних частот у реальних умовах експлуатації коливаються в деяких межах, що призводить до «розмазування» спектральних компонентів за період, що реєструється. Це змушує розглядати вузькі смуги частот для оцінки амплітуд вібрацій на характерних частотах із застосуванням відслідковуючого аналізу.

У запропонованій методиці [22] за допомогою перетворення Фур'є оцінюються спектральні компоненти вібраційного сигналу з урахуванням коливань частоти обертання. Під час реєстрації сигналів вібрацій паралельно реєструється синхросигнал обертання одного з валів редуктора. Наявність цього сигналу дає можливість визначити частоти вимушених коливань та їх комбінацій у будь-який момент часу під час роботи редуктора (рис. 5).

Рівень вібрацій на частоті переспряження зубців зубчастого колеса (зубцевої частоті) може бути розглянутий таким чином [22]. Хай F – частота дискретизації зареєстрованих сигналів вібрації та синхронізації. Сигнал $s(n)$, $n = 0, \dots, N-1$ являє собою N дискретних значень вібраційного сигналу, взятих за певний проміжок часу $T=N/F$.

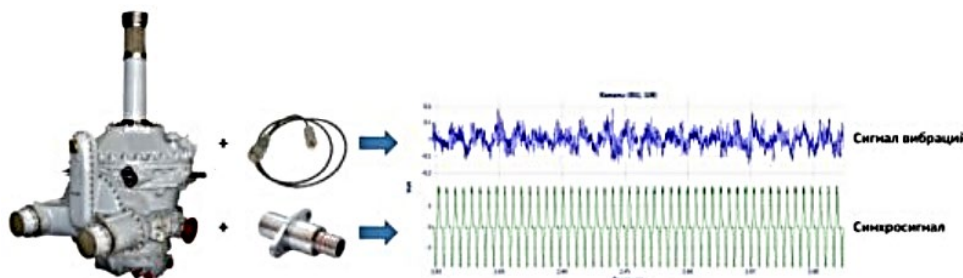


Рис. 5. Схема отримання необхідних сигналів для виконання синхронного аналізу [22]

Пряме перетворення Фур'є дискретного сигналу має вигляд: $S_k = \sum_{n=0}^{N-1} s_n e^{\frac{2\pi i}{N}kn}$, $k = 0, \dots, N-1$. Вихідними даними цього перетворення є комплексні амплітуди S_k на частотах $f_k = kF/N$. Речовинна амплітуда кожної гармоніки дорівнює: $A_k = \frac{2|S_k|}{N}$.

Зубцева частота розраховується за формулою: $f_z = i f_{\text{дав}} z$, де $f_{\text{дав}}$ – частота обертання вала давача частоти обертання (ДЧО), яка визначається за зареєстрованим синхросигналом; i – передатне відношення від вала ДЧО до вала зубчастого колеса; z – кількість зубців.

Частота обертання вала ДЧО за період реєстрації T змінюється від $f_{\min T}$ до $f_{\max T}$. Тоді амплітуда на зубцевій частоті буде дорівнювати: $A_z = \sqrt{\sum_{k=k_1}^{k=k_2} A_k^2}$, де $k_1 = \text{Round}\left(z \frac{\text{if } \min T^N}{F}\right)$, $k_2 = \text{Round}\left(z \frac{\text{if } \max T^N}{F}\right)$. Для кожного зубчастого колеса, шліцевого з'єднання і підшипника кочення по вказаному алгоритму визначаються амплітуди вібрацій на характерних частотах. Ці оцінки застосовуються для діагностики авіаційних приводів та їхніх деталей як найбільш інформативні в просторі ознаки. Тут важливо зазначити, що реєструвати сигнали треба на тому ж самому стаціонарному режимі роботи редуктора.

Апаратно-програмні засоби. Бортова підсистема зазвичай містить у собі давачі вібрацій, давачі частоти обертання та блоки накопичування та попередньої обробки. На основі моделей вібрацій зубчастих передач і редукторів формуються вимоги до апаратних засобів, які встановлюються на борту вертольота. Давачі вібрацій повинні мати надійну конструкцію для використання на борту. Робочий частотний діапазон давачів повинен охоплювати характерні частоти всіх зубчастих передач, шліцевих з'єднань і підшипників кочення. Динамічний діапазон визначається, виходячи з вібраційної активності редуктора й агрегатів у місці установки давачів. За останні декілька років розроблено ряд давачів вібрацій бортового виконання з вбудованим у роз'єм підсилювачем заряду (рис. 6).

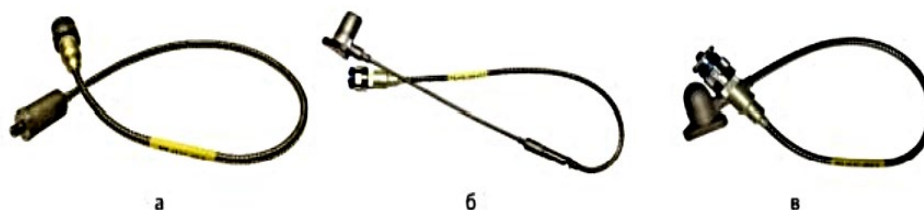


Рис. 6. Давачі вібрацій MB-45 (а), MB-44 (б), MB-46 (в)

Верхня частота робочого діапазону використовуваних давачів складає 10 кГц і вище. Це дозволяє застосовувати їх для діагностики всіх відомих вітчизняних редукторів. До апаратури накопичення та попередньої обробки даних також висуваються певні вимоги. Насамперед це час квантування і розрядність аналого-цифрових перетворювачів (АЦП). Час квантування визначає верхній діапазон частот сигналу, що реєструється. Він повинен бути як мінімум у два рази більше максимального значення характерної частоти деталей редуктора. Розрядність АЦП – це кількість дискретних значень напруги, на які може поділитися робочий діапазон вхідних напруг. В останній час звичайно використовуються 24-розрядні АЦП. При цьому спрощується процес адаптації чутливості первинних перетворювачів і погоджувальних підсилювачів до апаратури реєстрації, знижуються шуми квантування сигналів за рівнем, зберігаються метрологічні характеристики тракту аналого-цифрового перетворення. Наявність в апаратурі процесорів цифрової обробки дозволяє здійснювати оцінку параметрів зареєстрованих сигналів (діагностичних ознак) для їх контролю протягом всього польоту вертольота й уже в процесі наземної обробки виконувати експрес-аналіз технічного стану. На рис. 7 представлені бортові комплекси накопичення та обробки діагностичної інформації попереднього й останнього покоління. Комплекси мають модульну структуру і складаються з блоків обробки і модулів АЦП.



Бортове обладнання реєстрації БУР- 1-2 сер.2

Рис. 7. Бортові комплекси накопичення та обробки діагностичної інформації

За рекомендаціями ІКАО відбувається оснащення вертольотів твердотільними накопичувачами параметричної інформації замість накопичувачів, які записували польотні дані на магнітну стрічку. Система СДК-8 призначена для прийому, реєстрації і зберігання інформації від бортових датчиків і апаратури, а також видачі цієї інформації в наземних умовах. Переваги цієї системи полягають у зниженні трудомісткості та витрат на технічне обслуговування. Система СДК-8 є повністю взаємозамінною із системою САРПП-12Д (1М) і заміна може виконуватись у місці дислокації вертольота організацією по ТО, що має відповідний сертифікат, або на АРЗ (при наявності погодження про авторський нагляд з АТ «Діагностика»).

Робота апаратних засобів бортової частини систем діагностики заснована на: перетворенні за допомогою датчиків вібрацій механічних коливань двигуна і корпусу головного редуктора у широкосмужні електричні сигнали; перетворенні обертального руху валів двигуна, несучого гвинта вертольота в послідовність електричних імпульсів за допомогою датчика частоти обертання; перетворенні в електронному блоці потоків входної аналогової інформації, що надходять із виходів датчиків вібрацій і датчиків частоти обертання, в потоки цифрових даних; попередній обробці сигналів і оцінці як окремих параметрів, так і їх комбінацій; накопиченні в цифровій формі даних на накопичувачі для передачі на наземну підсистему з метою подальшого аналізу й вирішення задач оцінки та прогнозування технічного стану вертольоту.

Робота бортової системи діагностики вертольотів. До системи входить набір датчиків-перетворювачів вібрацій: це високотемпературні датчики для вимірювання вібрацій двигуна, агрегатів трансмісії, трикомпонентні датчики для контролю і балансування гвин-

тів. Давачі мають вбудовані в роз'єми підсилювачі. Для кожного з цих давачів застосовуються різного роду автономні аналого-цифрові перетворювачі. Давачі скомутовані з блоком збору й обробки інформації, у які надходять і сигнали від давачів частот обертання двигунів, несучого і рульового гвинтів.

Оскільки давачі розроблені для редукторів, а у них вимоги за динамічним і частотним діапазонами дуже високі, то вони з успіхом використовуються і на двигунах, вирішуючи задачі діагностики їхніх коробок приводів. Система відстежує вібрації кожного вала кінематичної схеми вертольота, що дає можливість навіть за одним параметром роторної вібрації контролювати стан агрегатів і відвертати катастрофи вертольотів. Система збирає інформацію про вібрації агрегатів вертольота, що неминуче виникають під час польоту й супроводжують їхню роботу. Після польоту ця інформація зчитується на твердотільний накопичувач і переноситься на наземний комплекс.

На наземному комп'ютері висвічується інтерфейс, який являє собою схему вертольота з транспарантами в тих місцях, де встановлені давачі. Колір цих транспарантів – зелений, жовтий або червоний – свідчить про те, чи перевищені параметри вібрацій кожного з валів розгалуженої трансмісії двигуна, головного редуктора, привода гвинтів, коробки приводів агрегатів, чи є дисбаланс гвинтів. Якщо параметри вібрації (по 16 для кожного вала) не перевищують встановлені порогові значення, то всі транспаранти зеленого кольору. Таким чином експлуатант розуміє, що його вертоліт може відправлятися у наступний політ над морем. Крім того, задіяна програма будує прогнозований графік результатів вимірів від польоту до польоту для кожного з цих параметрів. Якщо графік починає круто дертися вгору, то можна робити висновок, що, хоча всі параметри ще у межах норми, відбуваються якісь серйозні зміни. Уся ця інформація зберігається в базі даних в експлуатанта й одночасно передається Інтернетом в ЦІАМ. У міру накопичення даних вони використовуються для уточнення як діагностичних ознак, так і порогових значень параметрів.

Основне завдання, що вирішується системою, – це визначення динамічних станів кожної деталі, які можуть призвести до розвитку втомних тріщин. Наступна задача, що вирішується на основі аналізу вимірюваних параметрів, це перехід до експлуатації вертольотів за технічним станом. Про перспективність такого підходу свідчить накопичений досвід із використанням як розроблених бортових систем, так і їх стендових аналогів.

Нині вже застосовуються методи обслуговування машин за фактичним станом або ідентифікації деталей без їх розборки на основі вібродіагностичних випробувань. Їх використання дозволяє одночасно і знизити вартість налагоджувальних робіт, і підвищити їхню якість, тому що перевіряється не тільки стан деталей виробу, але і як вони зібрані, чи є перекося підшипників або шестерень під час складання.

Коливання в зубчастих передачах нерідко є причиною виникнення вібрацій у вузлах машин, що призводить до зростання деформацій як у самих шестернях, так і у валах, на яких вони встановлені. Збуджуючими причинами коливань у зубчастих передачах є сили, зумовлені входженням у зачеплення шестерень із відхиленнями, пов'язаними як із погіршеннями виготовлення самих шестерень, так і з пружними деформаціями системи «вал-шестерня».

Час для проведення діагностики головного редуктора вертольота становить 20 хвилин при використанні двоканальних систем і менше за 10 хвилин при використанні чотирьохканальних систем. Попередньо перед випробуваннями створюється програма, куди вводяться параметри шестерень, підшипників, встановлюються частотний діапазон для вимірювання вібраційних характеристик і показники, що характеризують динаміку роботи вузлів і деталей вертольота, вибираються опорні точки для установки акселерометрів. Експрес-результат стану готується протягом 20 хвилин. Для складання повної дефектної відомості потрібно 3 години.

За результатами ваїбродіагностичних випробувань оцінюється технічний стан деталей кожного зубчастого зачеплення, підшипника без розборки редуктора.

На основі наявних даних вібродіагностики у [24] представлено схему фактичного стану головного редуктора вертольота (рис. 8).

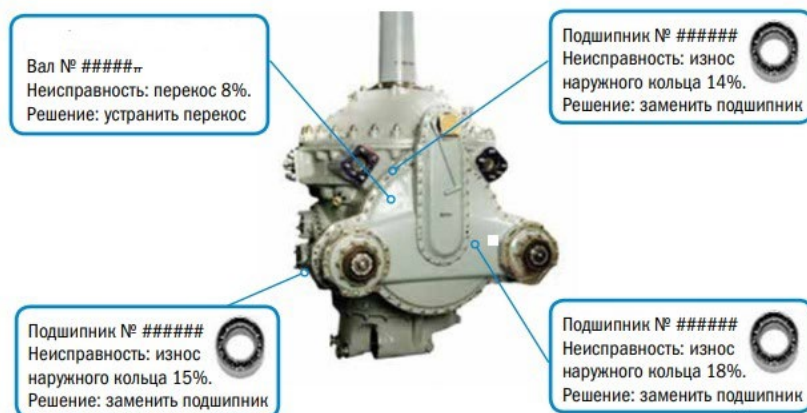


Рис. 8. Схема стану деталей головного редуктора вертольота [24]

За результатами проведених випробувань можливе представлення підсумкових результатів або у вигляді таблиці дефектів кожної деталі, або в графічному вигляді, згідно зі схемою стану деталей вертольота. Як критерій на основі статистичних даних, випробуваних на відповідних підприємствах, прийнята допустима величина зносу 10 %. Деталі, що мають знос більше ніж 10 %, підлягають заміні; деталі, які мають менший знос, допускаються до роботи. Величини зносу встановлюються для кожної галузі на основі статистичних даних.

Треба зазначити, що при безрозбірній вібродіагностиці вирішується не тільки питання щодо зношування деталей, але і які складові будуть визначати це зношування. Наприклад, у випадку підшипників головного редуктора вертольота виявився знос зовнішніх і внутрішніх кілець, а також сепараторів. Це важливо, тому що дозволяє визначити не тільки дефекти деталей, але і якість вузлів, у тому числі й перекося кілець підшипників, і дисбаланс тощо. Перелік виявлених дефектів механічних вузлів при існуючому методі та інноваційному наведений у табл. 1 [24].

Таблиця 1 – Діагностичні параметри, що визначаються за допомогою вібродіагностичних методів

Наявний метод	Інноваційний метод
Дефект вала	Дисбаланс валів, шестерень
Дефект зубчастого зачеплення	Биття валів
	Дефект ведучої шестерні
	Дефект веденої шестерні
	Дефект зачеплення ведучої шестерні
	Дефект зачеплення веденої шестерні
	Знос зовнішнього кільця підшипника
	Знос внутрішнього кільця підшипника
	Знос кульок або роликів підшипника
	Знос сепаратора
	Перекіс зовнішнього кільця підшипника
	Нерівномірний радіальний натяг у підшипнику
	Раковини, тріщини на зовнішньому кільці підшипника
	Раковини, тріщини на внутрішньому кільці підшипника
	Раковини, сколи на тілах кочення підшипника
Кількість виявлених показників для головного редуктора	
42	750

Слід звернути увагу, що в наявному методі визначаються дефекти вала й дефекти зубчастого зачеплення, а в інноваційному – додатково визначаються дефекти складання, причому ідентифікуються дефекти, пов'язані з неправильною установкою зовнішнього кільця підшипника або його внутрішнього кільця, що значно спрощує складання і регулювання. Визначаються також для кожного підшипника дефекти зношування зовнішнього або внутрішнього кільця, тіл кочення, задири й раковини на деталях підшипника, ідентифікується стан сепаратора підшипника, вплив якого на загальний рівень вібрації не дуже великий, але надзвичайно важливий, тому що вихід з ладу сепаратора призводить до руйнування підшипника і заклинювання механізму загалом.

Необхідно зазначити, що в переважній більшості випадків поломка механізму відбувається через найбільш слабкий елемент, яким виявляється підшипник. Інноваційний метод дозволяє упродовж 10 хвилин проконтролювати стан семисот п'ятдесяти показників головного редуктора, тобто фактично здійснити тотальний контроль за станом кожного елемента деталей і вузлів.

Завдяки використанню наявної бази даних по елементах машин, що містить десятки тисяч підшипників як вітчизняного виробництва, так і імпортованих, а також апробованим програмам для діагностики машин, які вже відпрацьовані під час заводських випробувань, значно скорочується час випробувань і спрощується робота заводських служб. Так, наприклад, розроблена й перевірена програма управління для діагностики трансмісії на одному із заводів при наявності аналогічного механізму на другому підприємстві пересилається через Інтернет. На підприємстві проводяться вимірювання, які відсилаються в ситуаційний центр. У ситуаційному центрі залишається тільки провести аналіз отриманих даних і направити на підприємство повний звіт про стан деталей і вузлів вертольота.

Переваги наведеної вище схеми в тому, що на підприємстві не треба мати ні кваліфікованих інженерів-діагностів, ні програмне забезпечення, а необхідний лише вимірювальний прилад. Крім того, розроблені й уже апробовані програми для діагностики вертольотів на декількох підприємствах дають, безперечно, більш високу точність і достовірність результатів.

Недоліком при впровадженні робіт є те, що більшість інженерно-технічного персоналу, дуже добре розбираючись в кінематиці машин, але в динаміці машин їх знань, як правило, недостатньо. Тому в процесі навчання у ЗВО необхідно більше часу приділяти вивченню та засвоєнню таких тем, як «Теорія коливань», «Динаміка машин» і «Вібродіагностика діючого обладнання».

Отже, під час впровадження сучасних методів обслуговування вертолітного парку отримуємо суттєвий економічний ефект, найважливішими складовими якого є: вилучення необхідності розборки працездатних вузлів і деталей; усунення дефектів на початковому етапі їх виникнення; попередження аварійних виходів машин з ладу; оптимізація реальних термінів проведення ремонтних робіт; планування обсягів робіт з виявленими дефектами; скорочення замовлень запасних частин і зниження обсягів механічної обробки; замовлення необхідних комплектуючих до початку проведення ремонтних робіт; зменшення часу для проведення робіт; підвищення якості обслуговування машин; зниження вартості обслуговування машин на 40-50 %.

Центр супроводження експлуатації вертольотів за технічним станом. Наземну підсистему системи діагностики можна поділити на локальну і центральну (центр супроводження). Локальна частина являє собою програмне забезпечення обробки накопиченої в польоті інформації і базу даних, які розташовані в організації, яка експлуатує вертольоти. Головне в центрі супроводження – це сервер зі спеціальним програмним забезпеченням і базою даних, де зберігаються всі накопичені дані, результати оцінок діагностичних ознак, а також вібропаспорти агрегатів підконтрольних об'єктів.

Основні задачі центру: накопичення результатів автоматичного розрахунку в базі даних шляхом синхронізації через Інтернет з організаціями-експлуатантами; зберігання історії технічного стану окремих агрегатів вертольота, отримання цієї інформації за необхідний період (вібропаспорт); контроль працездатності систем, що встановлені на вертольоті замовника; уточнення наявних і дослідження нових діагностичних ознак для підвищення достовірності оцінки технічного стану; консультації з використання системи діагностики.

Організація робіт під час використання систем діагностики представлена схематично на рис. 9 [22].

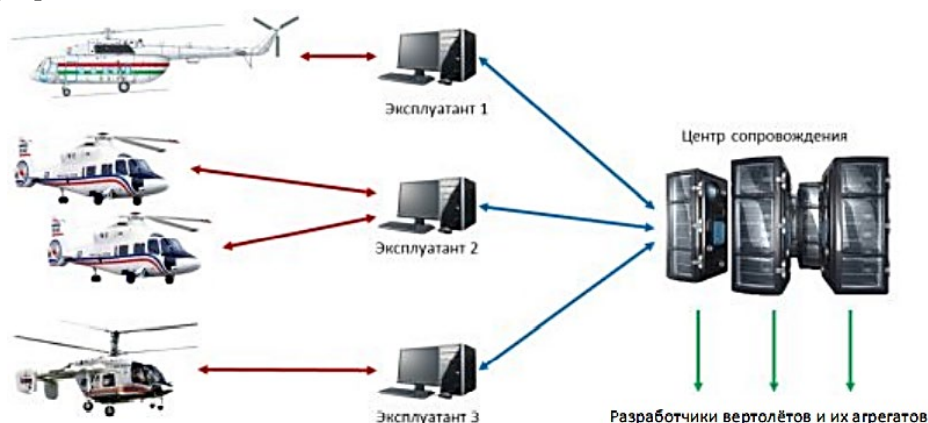


Рис. 9. Схема організації робіт під час експлуатації систем діагностики [22]

Після польоту накопичені дані переносяться на наземну підсистему організації-експлуатанта, де відбувається післяполітний аналіз, видача результатів обробки і зберігання отриманих результатів у локальну базу даних. Далі результати обробки синхронізуються з базою даних центру супроводження для представлення інформації про технічний стан розробникам вертольотів та їхніх агрегатів, а також організаціям-експлуатантам.

Висновки. Вібраційний контроль з початку 1990-х років і до цього часу є найбільш досконалим контролем, засоби і методи якого добре відпрацьовані в авіапромисловості.

Ефективним напрямом експлуатаційного діагностування найбільш напружених вузлів – зубчастих передач редукторів ГТД – є методи аналізу сигналів вібрацій корпусу двигуна.

Теоретичне й експериментальне обґрунтування вібродіагностики зубчастих передач ГТД та редукторів вертольотів засвідчує, що основною функцією, яка характеризує енергетичну ефективність передачі крутного моменту і є чутливою до зародження дефектів зубців шестерень, можна вважати девіацію параметра першої похідної кутової швидкості переспряження зубців.

Широке практичне застосування ресурсного прогнозування вимагає розвитку ряду наукових і практичних додатків, зокрема таких, як прогнозування залишкового ресурсу зубчастих коліс за даними періодичного моніторингу динаміки зачеплення під час ресурсних випробувань.

Впровадження ефективних методів експлуатаційного діагностування зубчастих передач дають можливість чітко виділити в сигналі вібрацій корпусу двигуна ознаки відхилень характеристик деталей редуктора від штатного стану й доповнити автоматичну систему аналізу технічного стану роторних деталей ГТД.

Система збору і обробки польотної інформації поділяється на бортову і наземну частини. Бортова підсистема у вигляді апаратно-програмних комплексів забезпечує збір і попередню обробку первинної інформації – сигналів вібрацій, синхронізації, температури і т. ін. Вона взаємодіє зі штатним обладнанням вертольота для отримання інформації щодо режимів роботи і польоту вертольота. Бортова підсистема, як правило, містить у собі давачі вібрацій, давачі частоти обертання та блоки накопичування та попередньої обробки.

Наземна підсистема являє собою набір апаратно-програмних засобів, що забезпечують виконання автоматичного експрес-аналізу й розширеного аналізу зареєстрованої на борту інформації. Наземну підсистему системи діагностики можна розділити на локальну і центральну (центр супроводження). Локальна частина являє собою програмне забезпечення обробки накопиченої в польоті інформації і базу даних, які розташовані в організації, яка експлуатує вертольоти.

Нині вже застосовуються методи обслуговування машин за фактичним станом або ідентифікації деталей без їх розборки на основі вібродіагностичних випробувань. Їх використання дозволяє одночасно і знизити вартість налагоджувальних робіт, і підвищити їхню якість, тому що перевіряється не тільки стан деталей виробу, але і як вони зібрані, чи є перекося підшипників або шестерень під час складання. Діагностика головного редуктора вертольота виконується протягом 20 хвилин. За результатами вібродіагностичних випробувань оцінюється технічний стан деталей кожного зубчастого зачеплення, підшипника без розборки редуктора.

Інноваційний метод дозволяє упродовж 10 хвилин проконтролювати стан семисот п'ятдесяти показників головного редуктора, тобто фактично здійснити тотальний контроль за станом кожного елемента деталей і вузлів.

Після польоту накопичені дані переносяться на наземну підсистему організації-експлуатанта, де відбувається післяполітний аналіз, видача результатів обробки та зберігання отриманих результатів у локальну базу даних. Далі результати обробки синхронізуються з базою даних центру супроводження для представлення інформації про технічний стан робітникам вертольотів та їхніх агрегатів, а також організаціям-експлуатантам.

Список використаних джерел

1. Болотин В. В. Ресурс машин и конструкций / В. В. Болотин. – Москва : Машиностроение, 1990. – 448 с.
2. Whittingham R. V. The blame machine: why human error causes accidents / R. V. Whittingham. – Burlington : Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. – 288 p.
3. Бурау Н. И. Мониторинг жизненного цикла авиационной техники: проблема и основные пути ее решения / Н. И. Бурау, В. В. Аврутов // Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики : материалы 14 ежегодной междунар. конф. (Ялта, 13-18 октяб. 2006 г.). – Ялта : УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2006. – С. 18-19.
4. Chang F.-K. Structural health monitoring: advancements and challenges for implementation / F.-K. Chang. – Pennsylvania : DEStech Publications, Inc., 2005. – 1886 p.
5. Speckmann H. Structural Health Monitoring: a contribution to the intelligent aircraft structure [Electronic resource] / H. Speckmann, H. Roesner // Proc. 9th European NDT Confer. (ECNDT) (25-29 Sept., 2006, Berlin, Germany). – Access mode: <http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Tu.1.1.1.pdf>.
6. Bartelds G. Aircraft structural health monitoring, prospects for smart solutions from a European viewpoint / G. Bartelds // NLR TP 97489: National Aerospace Laboratory NLR. – Amsterdam, 1997. – 13 p.
7. Boller C. Fatigue in aerostructures – where structural health monitoring can contribute to a complex subject [Electronic resource] / C. Boller, M. Buderath // Philos. Transact. Royal Soc. – Access mode: <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/365/1851/561.full>.
8. Airbus and Boeing back structural monitoring [Electronic resource] / Flightglobal. Aircraft. – Access mode: <http://www.flightglobal.com/articles/2007/02/20/212184/airbus-and-boeingback-structural-monitoring.html>.
9. Папчѐнков А. В. Эффективность спектральных методов диагностического контроля технического состояния зубчатых передач ГТД / А. В. Папчѐнков // Вестник двигателестроения. – 2015. – № 2. – С. 125-132.
10. Журавлѐв, В.Н. Математическая модель эксплуатационной кинематометрии зубчатых передач газотурбинных двигателей / В. Н. Журавлѐв, А. Б. Единолич, А. В. Папчѐнков // Системные технологии. – 2014. – № 5 (94). – С. 37-46.

11. Виброкинематометрия зубчатых передач / В. Н. Журавлёв, А. Б. Единович, А. В. Папчёнков, А. В. Корнейчук // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Проблеми механічного приводу». – 2015. – № 35 (1144). – С. 56-60.
12. Авиационные зубчатые передачи и редукторы : справочник / под ред. Э. Б. Вулгакова. – Москва : Машиностроение, 1981. – 375 с.
13. Экспериментальные и теоретические результаты исследования авиационных зубчатых передач для двигателей пятого и шестого поколений / И. Ф. Кравченко, А. Б. Единович, В. А. Яковлев, В. Л. Дорофеев // Авиационно-космическая техника и технология. – Харьков, 2008. – № 8. – С. 129-134.
14. Перспективы использования бортовых автоматизированных систем контроля выработки усталостного ресурса авиационных конструкций / С. Игнатович, М. Карускевич, Н. Бурау, В. Краснопольский // Вісник ТНТУ. Серія: Механіка та матеріалознавство. – 2011. – Спецвипуск, Ч. 2. – С.136-143.
15. Баринов Ю. Г. Методы, модели и алгоритмы вибродиагностики авиационных зубчатых приводов : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ю. Г. Баринов. – Рига, 1992.
16. Андреев С. В. Информационно-измерительные системы испытательных стендов вертолетных редукторов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / С. В. Андреев. – Санкт-Петербург, 2002.
17. ДСТУ ISO 8579-2 Правила приймання зубчастих передач. – Ч. 2: Визначення механічних вібрацій редукторів під час приймальних випробувань.
18. Попов Ю. В. Система средств эксплуатационного контроля воздушного судна / Ю. В. Попов, И. Б. Спиридонов // Научный Вестник ГосНИИ ГА. – 2020. – № 30. – С. 20-29.
19. Decker H. J. Crack Detection for Aerospace Quality Spur Gears / Harry J. Decker // NASA/TM—2002-211492 : Prepared for the International 58th Annual Forum and Technology Display sponsored by the American Helicopter Society / U.S. Army Research Laboratory Glenn Research Center, Cleveland, Ohio/National Aeronautics and Space Administration (Montreal, Quebec, Canada, June 11-13, 2002). – Montreal, 2002.
20. Попов Ю. В. Об одном подходе к определению информативности регистрируемых параметров бортовых устройств регистрации / Ю. В. Попов // Проблемы безопасности полетов. – 2013. – № 11. – С. 3-27.
21. ОСТ 100774-98. Система сбора и обработки полетной информации самолетов (вертолетов). – Москва : НИИСУ, 1998. – 21 с.
22. Методы и средства диагностики авиационных приводов при их эксплуатации по техническому состоянию / В. В. Голованов, В. Г. Василенко, А. А. Земсков, С. С. Панов, А. А. Емельянова // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2015. – Т. 14, № 3, Ч. 1. – С. 213-221.
23. Vinay B. J. NASA Technical Memorandum 107408 : Army Research Laboratory Technical Report ARL-TR-1285 / B. J. Vinay, K. Danai, D. G. Lewicki. // Improving the Performance of the Structure-Based Connectionist Network for Diagnosis of Helicopter Gearboxes. (Philadelphia, Pennsylvania, November 25-26, 1996.).
24. Савинов Ю. Метод глубокой вибродиагностики для оценки и управления жизненным циклом механизмов вертолета [Электронный ресурс] / Юрий Савинов // Prostoev.NET. – 2016. – № 2(7). – Режим доступа: <https://prostoev.net/metod-glubokoj-vibrodiagnostiki-dlya-oczenki-i-upravleniya-zhiznennym-cziklom-mehanizmov-vertoleta>.

References

1. Bolotin, V.V. (1990). *Resurs mashin i konstruksii [Resource of machines and structures]*. Mashynostroenie.
2. Whittingham, R.B. (2004). *The blame machine: why human error causes accidents*. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann.
3. Burau, N.I., & Avrutov, V.V. (2006). Monitoring giznennogo tsykla aviatsionnoy tehniky: problema i osnovnye puti ee reshenija [Monitoring the life cycle of aviation equipment: the problem and the main ways to solve it]. *Sovremennye metody i sredstva nerazrushayushchego kontrolya i mehnicheskoy diagnostiki: 14 egegodnaia mezhdunar. konf. – Modern methods and means of non-destructive testing and technical diagnostics: 14th annual international conf.* (pp. 18–19). UIC «Nauka. Tehnika. Tehnologii».

4. Chang, F.-K. (2005). *Structural health monitoring: advancements and challenges for implementation*. Pennsylvania: DEStech Publications, Inc.

5. Speckmann, H., & Roesner, H. (25-29 September, 2006). Structural Health Monitoring: a contribution to the intelligent aircraft structure. Proc. 9th European NDT Confer. (ECNDT). Berlin, Germany. <http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Tu.1.1.1.pdf>.

6. Bartelds, G. (1997). Aircraft structural health monitoring, prospects for smart solutions from a European viewpoint. *NLR TP 97489: National Aerospace Laboratory NLR*. Amsterdam.

7. Boller, C., & Buderath M. (13 December 2006). Fatigue in aerostructures – where structural health monitoring can contribute to a complex subject. *Philos. Transact. Royal Soc.* <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/365/1851/561.full>.

8. Flightglobal. Aircraft. (2007). *Airbus and Boeing back structural monitoring*. <http://www.flightglobal.com/articles/2007/02/20/212184/airbus-and-boeingback-structural-monitoring.html>.

9. Papchenkov, A.V. (2015). Ephektivnost spektralnyh metodov diagnosticheskogo kontrolya tehničeskogo sostojanija zubchatyh peredach GTD [Efficiency of Spectral Methods for Diagnostic Monitoring of the Technical Condition of GTE Gears]. *Vestnik dvigatelestroenia – Vestnik dvigatelestroeniya*, (2), 125-132.

10. Zhuravlev, V.N., Edinovich, A.B., & Papchenkov, A.V. (2014). Matematicheskaja model ekspluatatsionnoj kinematometrii zubchatyh peredach gazoturbinyh dvigateley [Mathematical model of operational kinematometry of gear drives of gas turbine engines]. *Sistemnye tehnologii – System technologies*, (5(94)), 37-46.

11. Zhuravlev, V.N., Edinovich, A.B., Papchenkov, A.V., & Korneychuk, A.V. (2015). Vibrokinematometriia zubchatyh peredach [Vibrokinematometry of gears]. *Visnik Natsionalnoho tekhnichnoho universitetu «KHPI». Seriya: «Problemi mekhanichnoho privodu» – Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: “Problems of mechanical drive”*, (35(1144)), 56-60.

12. Vulgakov, E. B. (Ed.) (1981). *Aviazionnye zubchatye peredachi i reduktory: Spravochnik [Aviation gearing and reducers: a reference book]*. Mashinostroenie.

13. Kravchenko, I.Ph., Edinovich, A.B., Jakovlev, V.A., & Doropheev, V.L. (2008). Eksperimentalnye i teoreticheskie rezultaty issledovania aviatsionnyh zubchatyh peredach dla dvigateley pjatogo i shestogo pokoleniy [Experimental and theoretical results of the study of aircraft gears for engines of the fifth and sixth generations]. *Aviazionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija – Aerospace Technique and Technology*, (8), 129-134.

14. Ignatovich, S., Karuskevich, M., Burau, N., Krasnopolsky, V. (2011). Perspektivy ispolzovania bortovyh avtomatizirovannyh sistem kontrolja vyrabotki ustalostnogo resursa aviatsionnyh konstruktsiy [Prospects for the use of on-board automated systems for monitoring the fatigue life of aircraft structures]. *Visnyk TNTU. Mehanika ta materialoznavstvo – Bulletin of TNTU. Series: Mechanics and materials science*, 2, 136-143.

15. Barinov, Ju.G. (1992). *Metody, modeli i algoritmy vibrodiagnostiki aviatsionnyh zubchatyh privodov [Methods, models and algorithms for vibration diagnostics of aircraft gear drives]* [Abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences].

16. Andreev, S.V. (2002). *Informatsionno-izmeritelnye sistemy ispytatelnyh stendov vertoletnyh reduktorov [Information-measuring systems of test benches for helicopter gearboxes]* [Abstract of the dissertation of the doctor of technical sciences].

17. DSTU ISO 8579-2 Pravyla pryjmannia zubchastyh peredach. Chastyna 2. Vyznachennia mehanichnyh vibratsiy reduktoriv pid chas pryjmalnyh vyprobuvan [Rules for acceptance of gears. Part 2. Determination of mechanical vibrations of gearboxes during acceptance tests].

18. Popov, Iu.V., & Spiridonov I.B. (2020). Sistema sredstv ekspluatatsionnogo kontrolja vozdušnogo sudna [Aircraft operational control system]. *Nauchnyi Vestnik GosNII GA – Scientific Bulletin of the State Research Institute of Civil Aviation*, (30), 20-29.

19. Harry, J. Decker. (2002). Crack Detection for Aerospace Quality Spur Gears /Harry J. Decker U.S. Army Research Laboratory Glenn Research Center, Cleveland, Ohio/National Aeronautics and Space Administration. NASA/TM—2002-211492. Prepared for the International 58th Annual Forum and Technology Display sponsored by the American Helicopter Society. Montreal, Quebec, Canada, June 11-13.

20. Popov, Iu.V. (2013). Ob odnom podhode k opredeleniu inphormativnosti registriruemih parametrov bortovyh ustrojstv registratsii [On one approach to determining the information content of the recorded parameters of on-board recording devices]. *Problemy bezopasnosti poliotov – Flight safety problems*, (11), 3-27.

21. OST 100774-98. Sistema sbora i obrabotki poliotnoy inphormatsii samoliotov (vertoliotov). [Aircraft (helicopter) flight information collection and processing system]. (1998). NIISU.

22. Golovanov, V.V., Vasilenko V.G., Zemskov A.A., Panov S.S., & Emelianova A.A. (2015). Merody i sredstva diagnostiki aviatsionnyh privodov pri ih ekspluatatsii po tehničeskomu sostojaniju [Methods and tools for diagnosing aircraft drives during their operation according to their technical condition]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta – Bulletin of the Samara State Aerospace university*, 14(3), 1, 213-221.

23. NASA (November 25-26. 1996). Technical Memorandum 107408. Army Research Laboratory Technical Report ARL-TR-1285. Vinay B. Jammu and Kourosh Danai, David G. Lewicki. Improving the Performance of the Structure-Based Connectionist Network for Diagnosis of Helicopter Gearboxes. Philadelphia, Pennsylvania.

24. Savinov, Yu. (2016). Metod glubokoy vibrodiagnostiki dlya otsenki i upravleniya zhiznennym tsiklom mekhanizmov vertoleta [A method of deep vibration diagnostics for assessing and managing the life cycle of helicopter mechanisms]. *Prostoev.NET*, 2(7). <https://prostoev.net/metod-glubokoj-vibrodiagnostiki-dlya-oczenki-i-upravleniya-zhiznennym-cziklom-mehanizmov-vertoleta>.

Отримано 22.05.23

UDC 629.735.45

Oleg Pilipenko

Doctor of Technical Sciences, Professor (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: opilip@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0590-0107>. ResearcherID: [G-2533-2016](https://orcid.org/0000-0003-0590-0107)

GROUND-ON-BOARD SYSTEMS FOR TESTING AND DIAGNOSTICS OF HELICOPTER GEARBOXES

The article is an overview and information. An effective direction of operational diagnostics of the most stressed units - gear drives of GTE gearboxes are methods for analyzing vibration signals of the engine casing.

The theoretical and experimental substantiation of vibration diagnostics of GTE gears and helicopter gearboxes indicates that the main function that characterizes the energy efficiency of torque transmission and is sensitive to the initiation of defects in gear teeth can be considered the deviation of the parameter of the first derivative of the angular velocity of re-coupling of the teeth.

The system for collecting and processing flight information is divided into onboard and ground parts. The onboard subsystem in the form of hardware and software systems provides for the collection and preliminary processing of primary information - vibration signals, synchronization, temperature, etc. It interacts with the standard equipment of the helicopter to obtain information regarding the modes of operation and flight of the helicopter. The on-board subsystem, as a rule, contains vibration sensors, speed sensors and accumulation and pre-processing blocks.

The ground subsystem is a set of hardware and software tools that provide automatic express analysis and extended analysis of information recorded on board. The ground subsystem of the diagnostic system can be divided into local and central (support center). The local part is the software for processing the information accumulated during the flight and the database, which are hosted by the organization operating the helicopters.

At present, methods are already being used for servicing machines according to the actual state or identifying parts without disassembling them based on vibration diagnostic tests. Their use allows to simultaneously reduce the cost of adjustment work and improve their quality, since not only the condition of the parts of the product is checked, but also how they are assembled, whether there are misalignments of bearings or gears during assembly.

After the flight, the accumulated data is transferred to the ground subsystem of the operating organization, where post-flight analysis is carried out, processing results are issued and the results are stored in a local database. Further, the processing results are synchronized with the database of the support center to provide information on the technical condition to the developers of helicopters and their units, as well as to operating organizations.

Key words: onboard and ground systems for vibration diagnostics of helicopters; maintenance of their operation according to their technical condition.

Fig.: 9. Table: 1. References: 24.

Borys Sereda¹, Iryna Kruglyak², Dmytro Sereda³

¹Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department Of Automobiles and Automobile Industry
Dnipro State Technical University (Kamyanske, Ukraine)

E-mail: seredabp@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9518-381X>

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

E-mail: kruglyak1964@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8872-6778>

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

E-mail: etohardcore@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4353-1365>

INCREASING THE RELIABILITY OF MECHANISMS OF METALLURGICAL EQUIPMENT THAT USES SHS RESOURCE-SAVING TECHNOLOGY

In the course of the study, the use of advanced resource-saving technologies in the field of mechanical engineering, focused on the optimization of metallurgical production, was analyzed in detail. The main emphasis was placed on the study of complex saturating media, proposed as a means to improve the reliability of the operation of mechanical equipment. Representing an innovative approach, the study proposes the appropriate application of methods for surface hardening of machine parts using modern technologies under dynamically changing temperature conditions typical for metallurgical processes. Statistical data and experimental results confirm the effectiveness of the proposed technological solutions, and also make it possible to identify the optimal parameters and conditions for their application. Based on the conducted studies, it can be argued that the use of resource-saving technologies in the metallurgical industry contributes to a significant reduction in energy costs and a reduction in the time of production processes. This is of fundamental importance for improving the efficiency and competitiveness of industrial enterprises, contributing to the overall stability and sustainability of the industry, as well as to environmental protection. In addition to optimizing production processes, resource-saving technologies also make a significant contribution to improving the economic efficiency of enterprises. Reducing energy costs and improving equipment reliability can reduce operating costs and improve overall business profitability.

Keywords: industry engineering; resource-saving technologies; strengthening; complex saturating media; energy costs; production process.

Fig.: 4. References: 12.

Relevance of the topic of research. In connection to the accelerated development of mechanical engineering for metallurgy, the issues of increasing the reliability and durability of machine parts, and, consequently, the issues of saving metals, energy costs, combating corrosion and wear of machine parts, have become extremely relevant. To reduce energy costs, it is necessary to use resource-saving technologies, especially for the manufacture of parts for metallurgy. The solution of these problems is associated with the hardening of the surface layers of parts for mechanical engineering [1]. Among the methods of surface hardening, siliconized coatings obtained by various methods are widely used. The technologies based on the phenomenon of self-propagating high-temperature synthesis using composite saturating charges are the least energy-intensive and also short-term effects on the surface of parts.

Problem statement. To improve the reliability of metallurgical equipment, it is necessary to strengthen the surface of machine parts. This is especially important in the working mechanisms of rolling conditions, namely, the details of the pressure mechanism. The objective of the study is to determine energy-efficient methods of surface strengthening, which can significantly reduce energy costs.

Analysis of recent research and publications. An analysis of literature sources [2–5] indicates that at present there are many methods for diffusion saturation of a steel surface with silicon. Common to them is the implementation of the saturation process at high temperatures, when the free energy of the system is large enough for diffusion to occur in the solid phase.

To obtain coatings based on silicon, the following methods are used: in a medium of molten electrolytes, in the gas phase, using powder masses in a neutral or reducing atmosphere [6–10].

Gas siliconizing is carried out in different ways: by continuously passing chlorine through the reaction space with parts and ferrosilicon; using hydrogen chloride instead of chlorine; in a mixture H_2+SiCl_4 or $N_2+H_2+SiCl_4$; in a mixture $Ar+SiCl_4$ or N_2+SiCl_4 ; in a mixture H_2+SiH_4 (monosilane), NH_3+SiH_4 . Gas siliconizing of steels is carried out in hermetically sealed retorts, in which parts are placed, and they are covered with powder of ferrosilicon, carborundum, pure silicon or other

substances containing silicon. Silicon containing gas SiCl_4 , is formed as a result of the interaction of these substances with chlorine, which is fed into the retort in its pure form, mixed with hydrogen, or introduced in another way. When gaseous silicon chloride comes into contact with iron, free silicon is released, which diffuses into the workpiece [11]. The chemistry of the process lies in the fact that during the processing of samples SiCl_4 silicon enters the samples as a result of the exchange reaction, as well as the reduction of silicon tetrachloride with atomic hydrogen dissolved in iron.

Highlighting unexplored parts of a general problem. The preliminary studies of the technological processes of hardening of parts of metallurgical equipment indicate that they are characterized by a fairly long hardening time of 6–8 hours at temperatures of 900–1100 °C. This leads to significant energy costs, both electrical and thermal energy.

Formulation of the problem. The purpose of the work is a study of the use of resource-saving technology of surface hardening of equipment parts for industrial engineering in metallurgy.

Presentation of the main material. The formation of multicomponent siliconized coatings occurs under conditions of thermal self-ignition or combustion of powder media containing gas transport additives. The time-varying temperature, first due to external heating, and then due to ignition, leads to the fact that neither thermal nor chemical equilibrium is possible until the process is completed and the products cool. The rates of chemical processes are determined by kinetic laws that depend on both temperature and diffusion factors. However, assuming, at least at the heating stage, that the inhibition of the diffusion processes of the gas phase is small, and the rate of temperature change is small compared to the rate of gas-phase chemical reactions, we can assume that each temperature value corresponds to the equilibrium composition of the products.

Then, having calculated the equilibrium composition of the reaction products for a number of specific temperatures from the range of its change, one can follow the chemical picture of the development of the process.

The calculation of the equilibrium composition of the products was carried out for the initial mixture, consisting of M substances containing l - chemical elements. At fixed values of volume (V) and temperature (T), as a result of chemical reactions, m_k can be formed from these elements - substances present in $k = 0, 1 \dots q$ different phases.

The existence of limiting temperatures, up to which the propagation of the combustion front is possible, introduces certain restrictions on the use of the combustion mode as a technological one. On the contrary, the regime of thermal self-ignition is free from these restrictions. By diluting the initial powder mixture with an inert substance, up to 85-90% wt., it is possible to reduce the maximum process temperature to the technologically required temperatures.

The main compounds in the gas phase in the temperature range 400–1600 K are: SiCl , SiCl_2 , SiCl_3 , SiCl_4 , SiI_2 , SiI_3 , AlI , AlI_2 , AlCl , AlCl_2 , CrCl_2 , CrF , CrF_2 , CrF_4 , BF_3 , TiCl_2 , TiCl_3 , TiCl_4 , WCl_2 , WCl_3 , WCl_4 , and others, as well as iodine in atomic and molecular form (Fig. 1-2).

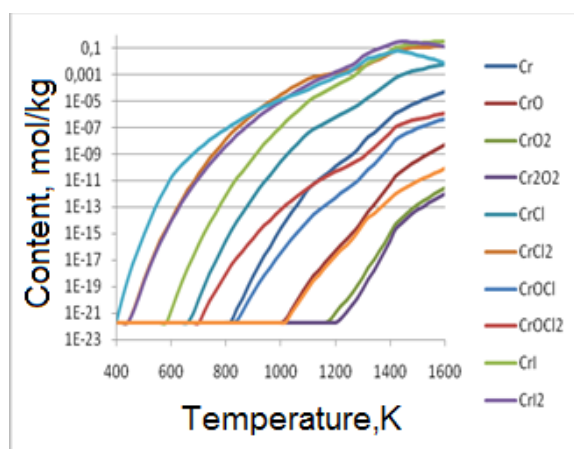


Fig. 1. Content of gaseous chromium compounds in SHS charge

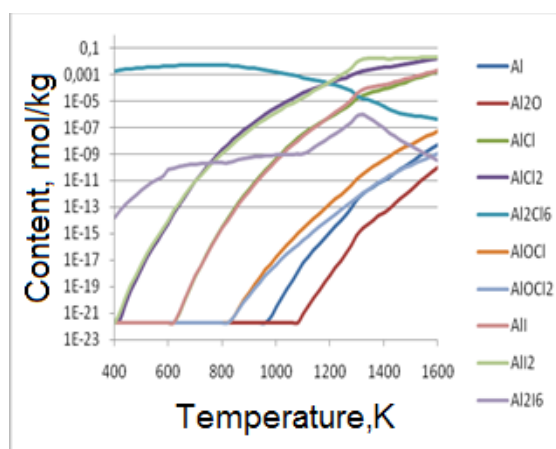


Fig. 2. Content of gaseous aluminum compounds in SVS charge

With increasing temperature, the amount of products in the gaseous phase increases and condensed products are released. Characteristically, in the temperature range of 400–1600 K, the proportion of the condensed phase decreases, which is associated with the evaporation of the carriers used. Simultaneously, starting from a temperature of 800 K, the reaction products decompose, which confirms the appearance of decomposition products and a sharp increase in the number of gas moles. Gaseous products interact with the elements of the powder system (Al, Si, B, Ti, W, Cr) and transfer them into the gas phase (appear SiCl , SiCl_2 , SiCl_3 , SiCl_4 , SiI_2 , SiI_3 , AlCl , AlCl_2 , AlCl_3 , BF_3 , CrF , CrF_2 , CrF_4 , TiCl_2 , TiCl_3 , TiCl_4 , WCl_3 , WCl_4 , AlI and etc.). At temperatures above 800 K, the proportion of the condensed phase remains virtually unchanged. This fact suggests that in the temperature range of 800–1600 K, reactions occur with the release of a condensed phase, but without a change in the number of moles, which is typical for reactions of decomposition, disproportionation, or exchange with the substrate, i.e. in essence, chemical transport of elements takes place. As a result of the thermodynamic calculation of the equilibrium composition of the reaction products, we can assume the following kinetic scheme of chemical transformations in the systems under study.

The microhardness of siliconized coatings doped with Cr and Al on the sample surface is $H_{50} = 6400\text{--}7100$ MPa; alloyed Cr, Al, B: $H_{50} = 13200\text{--}15400$ MPa; alloyed Cr, Al, Ti: $H_{50} = 9500\text{--}9800$ MPa and alloyed Cr, Al, W: $H_{50} = 11600\text{--}12800$ MPa. After carrying out the combustion process and obtaining protective coatings, a standard heat treatment was carried out, consisting in hardening and low tempering, to prevent the layers from “punching”. With an increase in the carbon content in the sublayer, the microhardness increased.

On the siliconized layer doped with chromium and aluminum, a uniform layer is formed, under which there is a pearlite layer and the next carbon-depleted zone. As a result of X-ray diffraction analysis, it was found that on the surface of technical iron and steel 20, a layer of an ordered solid solution is formed $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{Al})_3\text{Si}$. Below is an α -solid solution of chromium, aluminum and silicon in iron. On steel 45 and U8A, a layer is formed consisting of a solid solution of chromium, aluminum, and silicon in α -iron with inclusions of carbides (Fig. 3, 4).

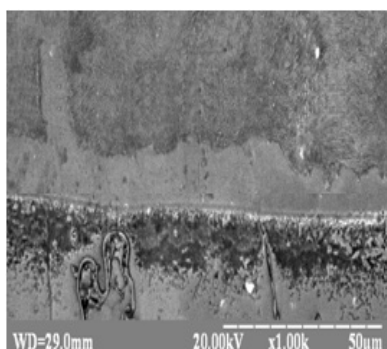


Fig. 3. Steel 45 with a protective coating

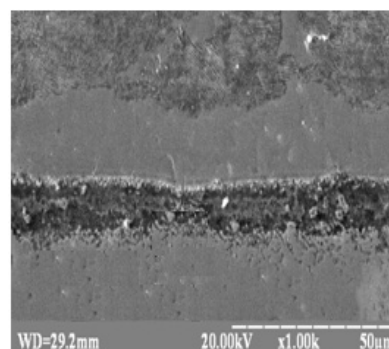


Fig. 4. Steel U8A with a protective coating

Corrosion tests (gravimetric method) were carried out in 3% aqueous NaCl solution, 10 % aqueous solution H_2SO_4 , HNO_3 and 30% aqueous solution of HCl . The most effective protection, when tested in the media under consideration, was shown by siliconized coatings doped with Cr-Al-Ti, Cr-Al-W. Thus, in comparison with the base coating obtained by cold treatment under isothermal conditions, the corrosion resistance increases by 2.1–3 times.

As a result of X-ray microanalysis, it was found that the concentration of aluminum, chromium, and silicon on the surface of steel 20 is 9.8% Al, 8.2% Cr, and 4.6% Si. Accordingly, on U8A steel: 10.2% Al, 8.9% Cr and 5.1% Si. With an increase in the silicon content in the SHS powder mixture, the thickness and columnarity of the layer change; the highest columnarity is observed at 15% Si content.

The outer zone is enriched with chromium, aluminum and silicon. Based on the data on the distribution of elements, one can make an assumption about the features of the kinetics of the formation of siliconized layers doped with chromium and aluminum. It is known that silicon increases the thermodynamic activity of carbon [12]. Therefore, when saturated with silicon, carbon is displaced from the surface layers to deeper ones.

Wear resistance of protective coatings increased by 2.1 - 4.2 times. The best indicators of wear resistance (test on the SMT-1 friction machine) were shown by siliconized coatings alloyed with chromium, aluminum and boron. When tested on an MT-5 friction machine, siliconized layers alloyed with chromium, aluminum and tungsten have the best wear resistance.

Conclusions. Multicomponent siliconized layers were obtained in the combustion mode for hardening the pressure mechanism of a rolling mill. This mode allows you to quickly form a coating, without a significant change in the microstructure of metals. The combustion process lasts for 5-10 minutes and allows to achieve an increase in operational properties by 2-2.7 times on the gears of the blooming pressure mechanisms 1300. The consumption of electrical and thermal energy is reduced by 8-10 times due to the fact that the mixture is heated by a combustion wave during chemical treatment using composite saturating charges under SHS conditions.

References

1. Bialik, O.M., Chernenko, V.S., Pysarenko, V.M., & Moskalenko, Y.N. (2002). *Metallurgy: Textbook. 2nd ed. processing and additional. VC "Politekhnika Publishing House"*.
2. Sereda, B.P., Kruglyak, I.V., Baskevich, O.S., Belokon, Y.O., Kruglyak, D.O., & Sereda, D.B. (2022). *Surface strengthening of structural materials using composite saturating charges: monograph Kamianske. DDTU.*
3. Sereda, B.P., Kruglyak, I.V., Belokon, Yu.A., & Zherebtsov, A.A. (2009). *Processing of metals by pressure under non-stationary temperature conditions. ZGIA.*
4. Firstov, S.O. (2020). *Uspikhy materialoznavstva [Successes in materials science]. IPM im. I.M. Frantsevycha NAN Ukrainy, 1, 3–7.*
5. Siaoiciu, D., Hrechaniuk, M.I., Kucherenko, P.P., Melnyk, A.H., Hrechaniuk, I.M., & Bahliuk, H.A. (2019). *Promyslove elektronno-promeneve obladnannia dlia nanesennia zakhysnykh pokryttiv (ohliad). Poroshkova metalurhiia [Industrial electron beam equipment for applying protective coatings (review). Powder metallurgy]. IPM im. I.M. Frantsevycha NAN Ukrainy, 01/02, 140–154.*
6. Sereda, B., Baskevich, O., Sobolev, V., & Sereda, D. (2021). Modeling of conditions of phase transformations in micro-areas of metal materials with extreme. *Mathematical modeling, 1(45), 91–102.*
7. Bilous, O.I., Tantsura, G.I., & Belmas, O.L. (2015). *Hnuchki tiahovi orhany v mashynobuduvanni. Diahnostuvannia ushkodzhen [Flexible traction bodies in mechanical engineering. Diagnosis of injuries]. DDTU.*
8. Fedirko, V.M., Pogrelyuk, I.M., Lukyanenko, O.G., & Trush, V.S. (2020). *Chemical and thermal treatment of titanium alloys. Surface solid solution modification. Scientific idea.*
9. Sereda, B., Kryglyak, I., Sereda, D., & Kryglyak, D. (2023). Modification of the surface of copper alloys with aluminum in the conditions of self-propagating high-temperature synthesis. *Problems of Atomic Science and Technology, 2(144), 130–133.*
10. Tikhontsov, O.M., Solod, V.Iu., & Chernyshov, O.V. (2017). *Ekspluatatsiia ta remont tekhnolohichnoho obladnannia mekhanichnykh tsekhiv Kamianske: DDTU MON Ukrainy [Operation and repair of technological equipment of mechanical shops Kamianske: DDTU MES of Ukraine].*
11. Harnets, V.M., Kovalenko, V.M. (2007). *Construction materials science. Lybid.*
12. Chumak, M.H. (2000). *Materialy ta tekhnolohiia mashynobuduvannia [Materials and technology of mechanical engineering]. Lybid.*

Список використаних джерел

1. *Metallurgy: Textbook / O. M. Bialik, V. S. Chernenko, V. M. Pysarenko, Y. N. Moskalenko. – 2nd ed. processing and additional. – VC "Politekhnika Publishing House", 2002. – P. 384.*
2. *Surface strengthening of structural materials using composite saturating charges / monograph B.P. Sereda, I.V. Kruglyak, O.S. Baskevich, Y.O. Belokon, D.O. Kruglyak, D.B. Sereda. – Kamianske: DDTU, 2022. – 245 p.*
3. *Processing of metals by pressure under non-stationary temperature conditions: monograph / B.P. Sereda, I.V. Kruglyak, Yu.A. Belokon, A.A. Zherebtsov. – Zaporozhye: ZGIA, 2009. – 252 s.*
4. *Фірстов С. О. Успіхи матеріалознавства / С. О. Фірстов. – Київ : ПІМ ім. І. М. Францевича НАН України, 2020. – № 1. – С. 3–7.*
5. *Промислове електронно-променеве обладнання для нанесення захисних покриттів (огляд) / Д. Сяосю, М. І. Гречанюк, П. П. Кучеренко, А. Г. Мельник, І. М. Гречанюк, Г. А. Баглюк // Порошкова металургія. Київ: ПІМ ім. І. М. Францевича НАН України. – 2019. – № 01/02. – С.140–154.*

6. Modeling of conditions of phase transformations in micro-areas of metal materials with extreme / B. Sereda, O. Baskevich, V. Sobolev, D. Sereda // Mathematical modeling. – Kamianske: DDTU. – 2021. – Issue 1(45). – Pp. 91–102.

7. Білоус О. І. Гнучкі тягові органи в машинобудуванні. Діагностування ушкоджень / О. І. Білоус, Г. І. Танцура, О. Л. Бельмас. – Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2015. – 120 с.

8. Chemical and thermal treatment of titanium alloys. Surface solid solution modification / V. M. Fedirko, I. M. Pogrelyuk, O. G. Lukyanenko, V. S. Trush ; NAS of Ukraine, Institute of Physics and Mechanics named after H.V. Karpenko. – Kyiv : Scientific idea, 2020. – 183 p.

9. Modification of the surface of copper alloys with aluminum in the conditions of self-propagating high-temperature synthesis / B. Sereda, I. Kryglyak, D. Sereda, D. Kryglyak // Problems of Atomic Science and Technology. – 2023. – Vol. 2(144). – Pp. 130–133.

10. Тіхонцов О. М. Експлуатація та ремонт технологічного обладнання механічних цехів / О. М. Тіхонцов, В. Ю. Солад, О. В. Чернишов. – Кам'янське : ДДТУ МОН України, 2017.

11. Harnets, V. M. Construction materials science / V. M. Harnets, V. M. Kovalenko. – K. : Lybid, 2007. – 384 с.

12. Чумак М. Г. Матеріали та технологія машинобудування / М. Г. Чумак. – Київ: Либідь, 2000. – 368 с.

Отримано 06.06.23

УДК 621.7

Борис Середя¹, Ірина Кругляк², Дмитро Середя³

¹доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автомобілі та автомобільне господарство Дніпровського державного технічного університету (Кам'янське, Україна)
E-mail: seredabp@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9518-381X>

²доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри галузевого машинобудування Дніпровського державного технічного університету (Кам'янське, Україна)
E-mail: kruglyak1964@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8872-6778>

³кандидат технічних наук, доцент кафедри галузевого машинобудування Дніпровського державного технічного університету (Кам'янське, Україна)
E-mail: etohardcore@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4353-1365>

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ МЕХАНІЗМІВ МЕТАЛУРГІЧНОГО УСТАТКУВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯ РЕСУРСЗБЕРІГАЮЧОЇ ТЕХНОЛОГІЇ СВС

Під час проведеного дослідження було детально проаналізовано застосування передових ресурсозберігаючих технологій у галузі машинобудування, сфокусованих на оптимізації металургійного виробництва. Основний акцент було зроблено на дослідження комплексних насичувальних середовищ, запропонованих як засіб для підвищення надійності функціонування механічного обладнання. Представляючи інноваційний підхід, дослідження пропонує доцільне застосування методів поверхневого зміцнення деталей машин з використанням сучасних технологій за температурних умов, що динамічно змінюються, характерних для металургійних процесів. Статистичні дані та результати експериментів підтверджують ефективність запропонованих технологічних рішень, а також дозволяють виявити оптимальні параметри та умови їх застосування. Ґрунтуючись на проведених дослідженнях, можна стверджувати, що використання ресурсозберігаючих технологій у металургійній галузі сприяє істотному зниженню енергетичних витрат і скороченню часу виробничих процесів. Крім оптимізації виробничих процесів, ресурсозберігаючі технології також роблять істотний внесок у поліпшення економічної ефективності підприємств. Скорочення витрат на енергію і підвищення надійності обладнання дає змогу знижувати експлуатаційні витрати і покращувати загальну рентабельність діяльності. Багатокомпонентні силіційовані шари були отримані в режимі горіння для зміцнення натискного механізму прокатного стану. Цей режим дозволяє швидко сформувати покриття, без істотної зміни мікроструктури металів. Процес випалювання триває 5-10 хвилин і дозволяє досягти підвищення експлуатаційних властивостей в 2-2,7 рази на шестернях обтискних механізмів блюмінгів стану 1300. Витрата електричної і теплової енергії знижується в 8-10 рази за рахунок того, що суміш нагрівається хвилиною горіння при хіміко-термічній обробці з використанням комплексних насичувальних середовищ в умовах СВС.

Ключові слова: галузеве машинобудування; ресурсозберігаючі технології; зміцнення; комплексні насичувальні середовища; енергетичні витрати; виробничий процес.

Рис.: 4. Бібл.: 12.

Анастасія Беляєва

кандидат технічних наук

Національний технічний університет України

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

E-mail: an_bell1212@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1696-8687>

ПЕРЕДУМОВИ СТВОРЕННЯ МЕХАНІЗОВАНИХ ПІДЙОМНИКІВ ДЛЯ ОБСЛУГОВУВАННЯ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Стаття є оглядовою і представлена інформація має оглядовий характер. Ця робота присвячена дуже важливій темі в наш час, а саме передумовам для створення механізованих підйомників для обслуговування повітряних ліній електропередач. Метою є створення передумов для синтезу нових конструкцій індивідуальних механізованих підйомників з використанням методу диференціально-морфологічного аналізу. Визначено основні конструктивні та експлуатаційні вимоги до підйомників. Розглянуто класифікацію опор ліній електропередач та підйомників для обслуговування повітряних ліній електропередач. Розглянуто недоліки підйомників, існуючих в Україні та запропоновано найбільшчий аналог конструкції підйомника для розробки та обґрунтований такий вибір.

Ключові слова: опора; ЛЕП; диференційно-морфологічний аналіз; морфологічна матриця; підйомник.

Табл.: 2. Рис.: 4. Бібл.: 6.

Актуальність теми дослідження. Для обслуговування повітряних ліній електропередач пропонується не дуже багато підйомників, що виконують різні функції та, зокрема, використовуються для того, щоб робітники ДЕТЕК мали можливість відремонтувати лінії повітряних електропередач. Це, в основному, великі вантажні машини з підйомним краном, які потребують достатньо великий спектр затрат як матеріальних так і паливних. В статті розглянемо класифікацію опор ліній електропередач та безпосередньо класифікацію підйомників, що пропонується на ринках нашої держави.

Мета статті. Метою роботи є створення передумов для синтезу нових конструкцій індивідуальних механізованих підйомників із використанням методу диференціально-морфологічного аналізу. Конструкція підйомників повинна забезпечувати експлуатацію на низьковольтних повітряних лініях електропередач з опорами різного поперечного перерізу.

Виклад основного матеріалу. Передусім слід визначити основні конструктивні та експлуатаційні вимоги до підйомників:

1. Підйомник має бути універсальним для використовуваних опор ЛЕП або бути швидко переналаджуваним в польових умовах та без застосування спеціального інструменту.

2. Підйомник повинен мати надійну фіксацію в робочому положенні на опорі ЛЕП, яка запобігає мимовільному сповзанню або падінню підйомника, а також не залежить від стану силового агрегату, живлення тощо.

3. Підйомник повинен використовувати для свого руху лише наявні конструктивні елементи опори лінії електропередач. Не допускається оснащення опор додатковими елементами типу висячих тросів, напрямних тощо.

4. Підйомник не повинен завдавати шкоди конструктивним елементам опор, які використовуються для його переміщення. Тобто не повинне бути пошкодження фарби, антикорозійного покриття на металевих опорах, утворення вм'ятин та інших ушкоджень на бетонних та дерев'яних опорах. Це особливо важливо в кліматичних умовах, у яких перебуває Україна, оскільки такі ушкодження стають осередками корозії та руйнування конструкції опори.

5. Підйомник повинен мати масогабаритні характеристики, що дозволяють перевозити його у вантажних або вантажопасажирських транспортних засобах категорії «В» і вище, а також на причепах (напівпричепах) до них.

При застосуванні методу диференційно-морфологічного аналізу матриці опор ЛЕП та механізованих підйомників слід складати окремо (табл. 1).

Таблиця 1 – Класифікація опор повітряних ліній електропередач

1. За матеріалом	2. За формою поперечного перерізу	3. За поздовжньою формою	4. За виконанням	5. За способом встановлення
1.1. Дерев'яні 1.2. Металеві 1.3. Залізобетонні	2.1. Круглі 2.2. Полігональні 2.3. Трапецієвидні 2.4. Прямокутні	3.1. Постійного розміру 3.2. Ступінчасті 3.3. Змінного розміру	4.1. Суцільні 4.2. Фермові	5.1. Вільностоячі 5.2. З підкосом

Існуючі підйомники можуть бути класифіковані (табл. 2).

Таблиця 2 – Класифікація підйомників для обслуговування повітряних ліній електропередач

1. За конструкцією	2. За опорною базою	3. За типом двигуна	4. За типом привода	5. За мобільністю	6. За характеристиками
1.1. Колінчаті 1.2. Телескопічні 1.3. Роботи-підйомники	2.1. Наземні 2.2. Підвісні (люлька) 2.3. Сама опора	3.1. Дизельні 3.2. Електричні	4.1. Гідравлічні 4.2. Електричні 4.3. Механічні	5.1. Самохідні 5.2. Пересувні 5.3. Причіпні	6.1. Висота підйому 6.2. Вантажопідйомність 6.3. Виліт стрілки 6.4. Зона обслуговування 6.5. Стійкість 6.6. Вітрове навантаження 6.7. Тип робочої платформи 6.8. Швидкість руху (для самохідних установок) 6.9. Дистанційне керування 6.10. Робота в умовах обмеженого простору

Уперше механізовані машини та обладнання почали використовувати комунальні служби, і підприємства, що співпрацюють з ними, підрядники. Багато в чому завдяки цим організаціям виробники почали розвивати такий напрямок, як випуск легкових автомобілів-вишок, призначених для ремонту та обслуговування підвісних проводів трамвайних ліній, а також щогл вуличного освітлення. Згодом таку техніку почали застосовувати і в інших сферах: обслуговування телефонних кабелів та передаючих антен, а також високовольтних ліній електропередач тощо [1].

Розглянемо деякі з них. Підйомник монтажний спеціальний ОПТ-9195, що призначений для обслуговування повітряних ліній електропередач і теплотрас, виконання ремонтних, будівельно-монтажних і інших робіт на висоті до 11 м [1].



Рис. 1. Підйомник монтажний спеціальний ОПТ-9195 [1]

Наступний представник – важільно-телескопічна автовежа-пантограф Р280 [3], зображений на рис. 5, має три секції, максимальний виліт стріли 15 м та вантажопідйомність кошика 230 кг.



Рис. 2. Важільно-телескопічна автовежа-пантограф Р280 [3]

І останній підйомник – автогідропідйомники (автовишка) SOCAGE DA324 на шасі IVECO Daily35-120 призначений для підйому на висоту до 24,0 метрів для виконання різних видів робіт [4].



Рис. 3. Автогідропідйомник (автовишка) SOCAGE DA324 на шасі IVECO Daily35-120 [4]

Аналізуючи підйомники, зображені на рис. 1, 2 та 3 зазначити сказати, що вони є достатньо прохідними, важкими, з різним вильотом стріли, багатофункціональні, але вважаю їх недостатньо стійкими та їхні габарити не дають їм можливості під'їхати до опори, що знаходиться в умовах обмеженого простору. Також дуже багато залежить від людського фактору.

Причипний підйомник Dino 180XT, який є одним із найпопулярніших моделей серед споживачів, представлений на рис. 4 [2].



Рис. 4. Причипний підйомник Dino 180XT [2]

Підйомник, представлений на рис. 4 є причіпним підйомником Dino 180XT [2], у нього досить великий виліт стрілки, він важкий для своєї конструкції, але у порівнянні з попередніми підйомниками він має достатньо не велику вантажопідйомність. З приводу його стійкості на нетвердій поверхні типу ґрунт теж є питання.

Проаналізувавши все вищесказане, був обраний робот-підйомник, найближчий аналог якого представлений у патенті US20110100734 [6]. Передбачається, що конструкція буде зі змінами. Для виготовлення конструкції буде використовуватися сталь. Буде зроблений всебічний розрахунок, створена 3D модель за допомогою спеціальної програми, з мінімально можливими витратами матеріалів. Також конструкція буде розбірною з можливістю транспортування вантажопасажирським автобусом категорії В. І людина зможе перенести цю конструкцію без проблем від машини до опори ЛЕП у розібраному вигляді, зібравши її на місці. Підйомник буде відповідати всім експлуатаційним вимогам.

Перевагою такого типу підйомника є те, що він не залежить від стану ґрунту, може працювати в умовах обмеженого простору навколо опори, а тому не буде непередбачених випадків, коли складно буде тримати рівновагу, а також витрат на обслуговування буде набагато менше.

Висновки. У статті були розглянуті класифікації опор ліній повітряних електропередач та класифікація підйомників, розглянуті та проаналізовані конструкції підйомників, що дозволило створити передумови для синтезу нових конструкцій підйомників з використанням методу диференціально-морфологічного аналізу. Конструкція підйомника, що пропонується, буде забезпечувати експлуатацію на низьковольтних повітряних лініях електропередач з опорами різного поперечного перерізу.

Список використаних джерел

1. Підйомник монтажний спеціальний ОПТ 9195 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://uaz-upi.com/tovarnyi-katalog/spetstekhnika/podemnik_montajnyu_opt-9195.
2. Причипний підйомник Dino 180XT II [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dinolift.com.ua/Ukr/catalog/prod-19>.
3. Автогідропідйомники, вишки, автовишки від 17 до 50 метрів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://0442332290.kiev.ua/ua/p9495522-avtovyshki-metrov-kievskaya.html>.
4. Автогідропідйомник (автовишка) SOCAGE DA324 на шасі DAYUN CGC1100 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://alfateks.com.ua/katalog-texniki/dayun-uk/avtogidropidjomniki/avtogidropidjomnik-socage-da324-na-shasi-dayun-cgc1100>.
5. 3 Pole Climbing Lego Robots [Electronic resource]. – Access mode: https://www.youtube.com/watch?v=MzmbooQJ9ko&ab_channel=BrickExperimentChannel.

6. Panther [Electronic resource]. – Access mode: https://store.husarion.com/products/panther?gclid=CjwKCAjwzJmlBhBBEiwAEJyLuwINtHtXPZqYXAYraXYwoCUZ-rdQ55D2XKL6j6MY3o7gH6itVOsmOXhoCVUQQA_vD_Bw.

References

1. Pidiomnyk montazhnyi spetsialnyi OPT 9195 [Lift assembly special OPT 9195]. (n.d.). http://uaz-upi.com/tovarnyi-katalog/spetstekhnika/podemnik_montajnyy_opt-9195.
2. Prychipyi pidiomnyk Dino 180XT II [Trailer lift Dino 180XT II]. (n.d.). <https://dinolift.com.ua/Ukr/catalog/prod-19>.
3. Avtohidropidiomnyky, vyshky, avtovyshky vid 17 do 50 metriv [Car hydraulic lifts, towers, car towers from 17 to 50 meters]. (n.d.). <https://0442332290.kiev.ua/ua/p9495522-avtovyshki-metrov-kievskaya.html>.
4. Avtohidropidiomnyk (avtovyshka) SOCAGE DA324 na shasi DAYUN CGC1100 [SOCAGE DA324 car hydraulic lift (car lift) on the DAYUN CGC1100 chassis]. <https://alfateks.com.ua/katalog-texniki/dayun-uk/avtogidropidjomniki/avtogidropidjomnik-socage-da324-na-shasi-dayun-cgc1100>.
5. 3 Pole Climbing Lego Robots. (n.d.). https://www.youtube.com/watch?v=MzmbooQJ9ko&ab_channel=BrickExperimentChannel.
6. Robot for Climbing Posts: patent US 20110100734 United States: B62D 57/024. No. 12/935, 159; applied on 27.03.2009; published on 01.12.2010, Bulletin no. PCT/EP09/53663. <https://www.free-patentsonline.com/20110100734.pdf>.

Отримано 19.05.23

UDC 621.876.11

Anastasia Bieliaieva

PhD in Technical Sciences of the Department of “Machine Design”
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)
E-mail: an_bell12@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1696-8687>

PREREQUISITES FOR THE CREATION OF MECHANISED LIFTS FOR MAINTENANCE OF OVERHEAD POWER LINES

The article is an overview and the information presented is of an overview nature and is devoted to a very important topic in our time, namely the prerequisites for the creation of mechanized lifts for the maintenance of overhead power lines. The purpose of the work is to create prerequisites for the synthesis of new designs of individual mechanized lifts using the method of differential morphological analysis. The design of the lifts should ensure operation on low-voltage overhead power lines with supports of different cross-sections. The main design and operational requirements for lifts were defined, namely: the lifter must be universal for the power line supports used or be quickly reconfigured in the field and without the use of special tools; the hoist must have a reliable fixation in the working position on the power line support, LEP, which prevents involuntary sliding or falling of the lift, and also does not depend on the state of the power unit, power supply, etc.; the lift must use only the existing structural elements of the power line support for its movement; it is not allowed to equip the supports with additional elements such as hanging cables, guides, etc.; the lift should not damage the structural elements of the supports used for its movement, that is, there should be no damage to the paint, anti-corrosion coating on metal supports, formation of dents and other damage on concrete and wooden supports, this is especially important in climatic conditions, in which Ukraine is located, since such damages become foci of corrosion and destruction of the support structure; the lift must have mass and dimensional characteristics that allow it to be transported in cargo or cargo-passenger vehicles of category "B" and above, as well as on trailers (semi-trailers) to them. We considered the classification of the supports of power lines themselves, the classification of lifts for maintenance of power lines. The classification of elevators in Ukraine was also considered, the shortcomings of existing elevators were determined, and based on the analysis of existing elevators, the closest analogue of the structure of the elevator planned to be developed was proposed.

Key words: support; power lines; differential morphological analysis; morphological matrix; hoist.

Table: 2. Fig.: 4. References: 6.

Ольга Бондар¹, Олександр Пузирьов²

¹кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри інформаційних технологій
Економіко-технологічний інститут ім. Р. Ельворті (Кропивницький, Україна)
E-mail: bondarkla@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5877-5667>

²кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри прикладної механіки
Економіко-технологічний інститут ім. Р. Ельворті (Кропивницький, Україна)
E-mail: olexandreti@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2158-3714>

ПРО ТОЧНІ РОЗВ'ЯЗКИ РІВНЯНЬ ОСІ Й КУТА ПОВОРОТУ ПЕРЕРІЗУ ПРУЖНОЇ БАЛКИ

На основі принципів та підходів функціонального аналізу інженерних методів розрахунку машинобудівних конструкцій на жорсткість у статті представлено отримані точні розв'язки рівнянь осі і кута повороту перерізу пружної балки. Визначено характер складності знаходження розв'язків і спосіб аналітичної оцінки точності розв'язків основного диференціального рівняння пружної лінії та рівняння кута повороту перерізу балки. Продемонстровано їх прикладне застосування на прикладі розрахунку стріли прогину й максимального кута повороту перерізу балки із заданим навантаженням.

Ключові слова: пружна балка; вісь балки; прогин осі; рівняння осі бруса; кут повороту перерізу балки; стріла прогину.

Рис.: 1. Табл.: 1. Бібл.: 5.

Актуальність теми дослідження. Розрахунок будівельних конструкцій на міцність і жорсткість відіграє важливу роль у забезпеченні їх надійності в експлуатації. Необхідність розрахунків викликана деформаціями конструкцій під дією зовнішніх сил або температури. Опір матеріалів, теоретична механіка й вища математика є теоретичним підґрунтям для таких розрахунків.

Об'єктами розрахунків слугують тіла основних форм, до яких, зокрема, належать стрижні або бруси – тіла, у яких довжина значно перевищує два інші розміри. Точний розв'язок рівнянь, що описують стан стрижня при його деформації, є запорукою точності розрахунку конструкцій, елементом яких є стрижень. Уміння оцінити точність результатів розрахунків є важливим аспектом їх практичного застосування, зокрема, для перевірки й уточнення норм границь переміщень точок пружної балки.

Постановка проблеми. У багатьох випадках розрахунку гнучких деталей необхідно вміння розраховувати їх на міцність і жорсткість. При дослідженні пружної балки при її плоскому вигині розраховується, зокрема, деформація її пружної осі та зміна кута повороту перерізу балки відносно свого початкового стану.

Основою цих розрахунків є точне рівняння зігнутої осі балки (бруса) – диференціальне рівняння, інтегрування якого упускається у класичних навчальних курсах опору матеріалів і теоретичної механіки через певну його складність. Натомість там розглядається основне диференціальне рівняння пружної лінії, яке є наближеним до точного рівняння зігнутої осі балки завдяки спрощенню, що впливає з практичних та експериментальних результатів. Унаслідок цього розв'язки спрощеного рівняння зазвичай є наближеними.

Проте загально прийнято, що при застосуванні наближених методів розрахунків потрібно вміння оцінювати їхню точність, тобто ступінь наближення до точного результату.

Отже, задачею нашого дослідження є отримання точних аналітичних розв'язків точних рівнянь зігнутої осі балки і кута повороту перерізу балки, і як наслідок, отримання аналітичного способу визначення точності розв'язків основного диференціального рівняння пружної лінії, включаючи рівняння кута повороту перерізу балки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Стан багатьох технічних конструкцій можна описати залежністю положень їх точок у певному просторі, тобто функціями. Функції, що визначають локально стійкий стан конструкції, при збільшенні навантаження на конструкцію змінюються [1]. Оскільки зміни функцій описують відповідними рівняннями, то розв'язок рівнянь, що описують ту чи іншу конструкцію, називають її розрахунком [4].

Практичним розрахункам деталей, що працюють на згинання, присвячено достатньо наукової і навчально-методичної літератури. Виокремлюючи з них оцінку пружної піддатливості балки під дією прикладених сил, автори [3] зазначають, що «Для виконання такого розрахунку треба навчитись обчислювати переміщення точок балки під дією будь-яких зовнішніх навантажень».

Ми розглядаємо плоске згинання осі балки, тобто її деформацію в одній площині (xOy) із силами, що діють на балку.

У курсах опору матеріалів і технічної механіки (див., наприклад, [2], [3], [5]) наводиться **точне рівняння зігнутої осі балки** (бруса)

$$\frac{\frac{d^2 w}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dw}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} = \frac{M(x)}{EJ(x)}, \quad (1)$$

де Ox – пряма вісь балки, $w(x)$ – прогин балки, $M(x)$ – згинальний момент, $EJ(x)$ – жорсткість бруса при згині.

Воно є нелінійним диференціальним рівнянням другого порядку, «інтегрувати яке, як відомо, досить важко» ([2; 3]) або «інтегрування представляє складнощі» [5]. Тому це рівняння при практичних розрахунках спрощується за рахунок того, що приймається наближення

$$\left(\frac{dw}{dx}\right)^2 = \operatorname{tg}^2 \theta \approx 0,$$

«оскільки більшість балок, які застосовуються в будівництві, є досить жорсткими, а їх прогини дуже малі в порівнянні до їх довжини» ([2; 3]).

У результаті точне рівняння замінюють наближеним – рівнянням для малих переміщень:

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{M(x)}{EJ(x)},$$

яке називають **основним диференціальним рівнянням пружної лінії балки** (для малих деформацій). Зазначено [3], що за його допомогою можна обчислювати лінійні та кутові переміщення в балках за будь-яких умов навантаження.

Оскільки внаслідок малості деформації балок має місце $\operatorname{tg} \theta \approx \theta$, то рівняння кута повороту перерізу балки

$$\theta(x) = \frac{dw}{dx}$$

є також спрощеним.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз джерел інформації показав, що джерела інформації, безпосередньо призначені для підготовки фахівців машинобудівної галузі, містять неповний матеріал стосовно точних розв'язків диференціальних рівнянь, які описують деформації пружних конструкцій. Про вищезгадані наближені рівняння там зазначено, що вони мають достатній ступінь точності для більшості балок у будівництві. Таким чином, недослідженою частиною описаної проблеми є аналітичне визначення точності розв'язків для будь-яких пружних балок при їх плоскому згинанні.

Метою статті є отримання точних розв'язків диференціальних рівнянь – точного рівняння пружної осі балки і точного рівняння кута повороту її перерізу. Визначити характер складності знаходження розв'язків і спосіб аналітичної оцінки точності розв'язків

основного диференціального рівняння пружної лінії і рівняння кута повороту перерізу балки. Це має допомогти більш точно описати механічний стан пружної конструкції і, зокрема, для уникнення її критичних деформацій.

Виклад основного матеріалу. Точне рівняння (1) зігнутої осі балки є звичайним нелінійним диференціальним рівнянням другого порядку, яке допускає пониження порядку.

Для пониження порядку згадаємо, що

$$\frac{dw}{dx} = tg\theta, \text{ звідки } \frac{d^2w}{dx^2} = \frac{1}{\cos^2\theta} \cdot \frac{d\theta}{dx}.$$

З урахуванням того, що

$$\left[1 + \left(\frac{dw}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}} = \left[1 + tg^2(\theta)\right]^{\frac{3}{2}} = \frac{1}{\cos^3\theta},$$

після підстановки зазначених виразів у рівняння (1) отримуємо рівняння

$$\cos\theta \cdot \frac{d\theta}{dx} = \frac{M(x)}{EJ(x)}, \quad (2)$$

яке природно ми назвали **точним рівнянням кута повороту перерізу осі балки**.

Це рівняння з відокремленими змінними. Інтегруючи його

$$\int \cos\theta \, d\theta = \int \frac{M(x)}{EJ(x)} dx,$$

отримаємо розв'язок диференціального рівняння (2) у неявному виді

$$\sin\theta = \int \frac{M(x)}{EJ(x)} dx + C_1.$$

Отже, **розв'язок точного рівняння кута повороту перерізу** має явний вид:

$$\theta(x) = \arcsin \varphi(x), \quad (3)$$

де $\varphi(x) = \int \frac{M(x)}{EJ(x)} dx + C_1.$

Якщо інтеграл у цій формулі виражається через елементарні функції, то його арксинус може виявитися елементарною функцією. У випадку її відсутності розв'язок $\theta(x)$ можна подати нескінченним степеневим рядом

$$\theta(x) = \arcsin \varphi = \varphi + \frac{\varphi^3}{2 \cdot 3} + \frac{1 \cdot 3 \cdot \varphi^5}{2 \cdot 4 \cdot 5} + \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot \varphi^7}{2 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 7} + \dots,$$

зі значенням C_1 , яке задовольняє початковим умовам. Ряд є збіжним при всіх значеннях φ , менших по модулю за одиницю.

При практичному застосуванні цього ряду наближене значення $\theta(x)$ береться як сума перших доданків ряду, кількість яких забезпечує задану точність обчислень.

Якщо інтеграл у формулі (3) не виражається через елементарні функції або первісна функція надто складна, то розв'язок, наближений до $\theta(x)$, можна отримати при безпосередньому застосуванні до диференціального рівняння (2) методу Ейлера або інших, більш точних, методів розв'язку диференціальних рівнянь.

Для отримання розв'язку $w(x)$ точного рівняння зігнутої осі балки згадаємо, що

$$\frac{dw}{dx} = tg\theta.$$

Звідси маємо

$$\frac{dw}{dx} = \frac{\sin \theta}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta}} = \frac{\varphi(x)}{\sqrt{1 - (\varphi(x))^2}}$$

є диференціальним рівнянням з відокремленими змінними.

Отже, розв'язок точного рівняння зігнутої осі балки має вид:

$$w(x) = \int \frac{\varphi(x)}{\sqrt{1 - (\varphi(x))^2}} dx + C_2. \tag{4}$$

Якщо інтеграл в цій формулі не виражається через елементарні функції, то аналогічно пошуку кута $\theta(x)$, розв'язок $w(x)$ можна подати нескінченним степеневим рядом:

$$w(x) = \int \left(\varphi(x) + \frac{1}{2} \varphi(x)^3 + \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4} \varphi(x)^5 + \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6} \varphi(x)^7 + \dots \right) dx + C_2$$

зі значенням C_2 , яке задовольняє початковим умовам.

Перевага точного розв'язку в тому, що: 1) найбільше значення прогину й кута повороту перерізу балки можна отримати безпосередньо із властивостей функцій, які входять у розв'язок; 2) наближений розв'язок можна отримати із заздалегідь заданою точністю. Покажемо це на прикладі.

Приклад. Запишемо точні рівняння зігнутої осі консолі і кута повороту постійного поперечного її перерізу, якщо ця балка навантажена силою P , зосередженою на її вільному кінці (див. рис. 1). Визначимо також θ_{\max} і w_{\max} . Згинальний момент у перерізі x будемо обчислювати як наслідок дії зовнішніх сил ліворуч від перерізу

$$M(x) = -Px.$$

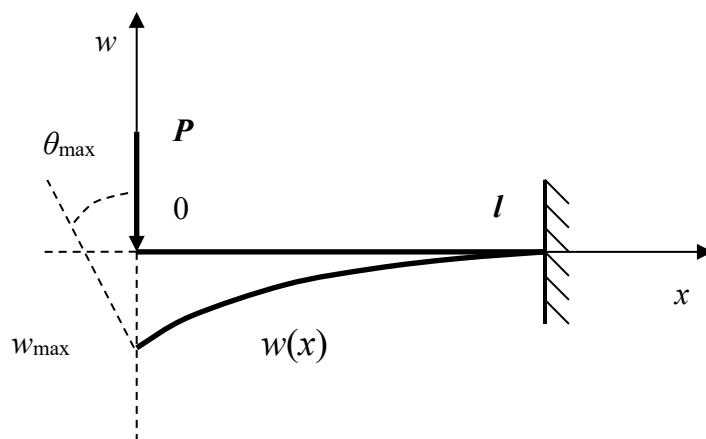


Рис. 1. Вісь консолі, навантажена силою P

Підставивши цей вираз у рівняння (1), маємо точне рівняння зігнутої осі балки

$$\frac{\frac{d^2 w}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} = \frac{-Px}{EJ}.$$

Підстановка $M(x)$ у рівняння (2) дасть точне рівняння кута повороту її перерізу

$$\cos \theta \cdot \frac{d\theta}{dx} = \frac{-Px}{EJ}.$$

Його інтегрування дасть рівняння

$$\sin \theta = \varphi(x),$$

у якому

$$\varphi(x) = \int \frac{-Px}{EJ} dx + C_1 = -\frac{Px^2}{2EJ} + C_1,$$

і саме рівняння набуде вигляду

$$\sin \theta = -\frac{Px^2}{2EJ} + C_1.$$

За початкової умови $\theta = 0$ при $x = l$ отримаємо значення константи C_1

$$C_1 = \frac{Pl^2}{2EJ}.$$

Отже, маємо в неявному вигляді розв'язок точного рівняння кута повороту осі цієї консолі

$$\sin \theta = \varphi(x) = \frac{P}{2EJ}(l^2 - x^2),$$

з якого випливає явний вид розв'язку:

$$\theta(x) = \arcsin \varphi(x) = \arcsin \left(\frac{P}{2EJ}(l^2 - x^2) \right).$$

Найбільше значення θ_{\max} кута повороту отримаємо, застосовуючи властивості функції арксинус. А саме, строго зростаюча функція приймає найбільше значення при найбільшому значенні аргументу:

$$\max_{0 \leq x \leq l} \left(\frac{P}{2EJ}(l^2 - x^2) \right) = \frac{P}{2EJ}l^2 \quad \text{при } x = 0.$$

Таким чином,

$$\theta_{\max} = \theta(0) = \arcsin \left(\frac{P}{2EJ}l^2 \right).$$

Обчислення цього значення за допомогою сучасної комп'ютерної техніки можна виконати з будь-якою наперед заданою точністю. Ми ж для прикладу обмежимося двома першими членами розкладу:

$$\theta_{\max} = \arcsin \varphi(0) \approx \varphi(0) + \frac{\varphi^3(0)}{2 \cdot 3} = \frac{P}{2EJ}l^2 + \frac{1}{6} \left(\frac{P}{2EJ}l^2 \right)^3 = \frac{P}{2EJ}l^2 + \frac{P^3}{48E^3J^3}l^6.$$

Розв'язок $w(x)$ точного рівняння зігнутої осі балки подамо нескінченним степеневим рядом:

$$w(x) = \int \left(\varphi(x) + \frac{1}{2} \varphi(x)^3 + \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4} \varphi(x)^5 + \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6} \varphi(x)^7 + \dots \right) dx + C_2,$$

оскільки інтеграл у формулі (4) не виражається через елементарні функції. Для прикладу розглянемо інтеграл від суми тільки двох перших членів ряду, отримавши наближене значення

$$w(x) \approx \int \left(\varphi(x) + \frac{1}{2} \varphi(x)^3 \right) dx + C_2 = \int \left(\frac{P}{2EJ}(l^2 - x^2) + \frac{1}{2} \left(\frac{P}{2EJ}(l^2 - x^2) \right)^3 \right) dx + C_2,$$

у якому константу C_2 розраховують із початкової умови $w = 0$ при $x = l$.

Обмежившись членами ряду степеня не вище третього, з урахуванням константи C_2 отримаємо

$$w(x) \approx \frac{Pl^2}{2EJ}(x-l) - \frac{P}{6EJ}(x^3 - l^3) + \frac{P^3l^6}{16E^3J^3}(x-l) - \frac{P^3l^4}{16E^3J^3}(x^3 - l^3).$$

Максимальний прогин w_{\max} осі консолі, вочевидь, досягається на її кінці $x = 0$:

$$w_{\max} = w(0) \approx -\frac{Pl^3}{2EJ} + \frac{Pl^3}{6EJ} - \frac{P^3l^7}{16E^3J^3} + \frac{P^3l^7}{16E^3J^3} = -\frac{Pl^3}{3EJ},$$

що збігається з відповідними класичними значеннями, розглядуваними в підручниках. Проте, на відміну від них, можна отримати більш точне значення, розглянувши стільки членів ряду, скільки необхідно для забезпечення заданої точності.

Аналогічно, отримані нами значення кута θ_{\max} є несуттєво (на перший погляд) більшими за класичні. Чи впливатиме така різниця на прогин консолі при інших окремих її деформаціях, мають показати заплановані нами дослідження.

Висновки. У роботі подано отримані нами точні розв’язки диференціальних рівнянь – точного рівняння пружної осі балки й точного рівняння кута повороту її перерізу. Порівняння отриманих результатів з відповідними класичними відображено в таблиці.

Таблиця – Порівняльна таблиця рівнянь і їх розв’язків

Ознака	Рівняння і їх розв’язки в класичних навчальних курсах	Досліджувані рівняння і їх аналітичні розв’язки
Рівняння, що описує вісь балки	Основне диференціальне рівняння пружної лінії балки $\frac{d^2w}{dx^2} = \frac{M(x)}{EJ(x)},$ наближене.	Точне рівняння зігнутої осі балки (бруса) $\frac{d^2w}{dx^2} = \frac{M(x)}{EJ(x)}$ $\left[1 + \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} = \frac{M(x)}{EJ(x)}$
Розв’язок рівняння, що описує вісь балки	$w(x) = \int dx \int \frac{M(x)}{EJ(x)} dx + C_1x + C_2,$ наближений.	$w(x) = \int \frac{\varphi(x)}{\sqrt{1 - (\varphi(x))^2}} dx + C_2,$ $\varphi(x) = \int \frac{M(x)}{EJ(x)} dx + C_1,$ отриманий, точний.
Рівняння кута повороту перерізу балки	$\theta(x) = \frac{dw}{dx},$ наближене.	$\cos \theta \cdot \frac{d\theta}{dx} = \frac{M(x)}{EJ(x)},$ отримане, точне.
Розв’язок рівняння кута повороту перерізу балки	$\theta(x) = \int \frac{M(x)}{EJ(x)} dx + C_1,$ наближений.	$\theta(x) = \arcsin \left(\int \frac{M(x)}{EJ(x)} dx + C_1 \right),$ отриманий, точний.
Оцінка наближення	Впливає з діапазону максимального прогину осі при практичних розрахунках конструкцій	Вказано аналітичний метод оцінки точності наближеного розв’язку.

Визначено характер складності знаходження розв’язків і спосіб аналітичної оцінки точності розв’язків основного диференціального рівняння пружної лінії і рівняння кута повороту перерізу балки. Це має допомогти більш точно описати механічний стан пружної конструкції, зокрема, для уникнення її критичних деформацій.

Практичне значення даного дослідження полягає в економії ресурсів (матеріальних, людських, часових) для забезпечення надійності експлуатації механізмів, що містять пружні балки, оскільки чим більше точних розрахунків покладено в теоретичну модель конструкції, тим надійнішою є її практичне втілення.

Список використаних джерел

1. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф / Р. Гилмор ; пер. с англ. – Кн. 2. – Москва : Мир, 1984. – 285 с.
2. Опір матеріалів : конспект лекцій для здобувачів вищ. освіти першого (бакалаврського) рівня зі спеціальностей: 131 «Прикладна механіка»; 133 «Галузеве машинобудування»; 274 «Автомобільний транспорт» / уклад.: Л. П. Теліпко. – Кам'янське : ДДТУ, 2019. – 132 с.
3. Писаренко Г. С. Опір матеріалів : підручник / Г. С. Писаренко, О. Л. Квітка, Е. С. Уманський / ред. Г. С. Писаренко. – 2-ге вид., допов. і перероб. – Київ : Вища школа, 2004. – 655 с.
4. Постон Т. Теория катастроф и ее приложение / Т. Постон, И. Стюарт. – Москва : Мир, 1980. – 540 с.
5. Сурін В. М. Технічна механіка : навч. посіб. / В. М. Сурін. – Минск : БДУІР, 2004. – 292 с.

References

1. Gilmore, R. (1984). *Prykladnaia teoriia katastrof [Applied theory of catastrophes]*. Mir.
2. Telipko, L.P. (2019). *Opir materialiv [Resistance of materials]*. Kamianske.
3. Pisarenko, G.S., Kvitka, O. L., & Umanskyi, E.S. (2004). *Opir materialiv [Strength of Materials]*. Vyshcha shkola.
4. Poston, T., & Stewart, I. (1980). *Teoriia katastrof i ee prilozheniie [Theory of catastrophes and its application]*. Mir.
5. Surin, V.M. (2004). *Tekhnichna mekhanika [Technical mechanics]*. BDUIR.

Отримано 03.04.23

UDC 539.3

Olha Bondar¹, Olexandr Puzyrov²

¹PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Information Technology
Robert Elvorti Economics and Technology Institute (Kropyvnytskyi, Ukraine)
E-mail: bondarkla@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5877-5667>

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Applied mechanics Department
Robert Elvorti Economics and Technology Institute (Kropyvnytskyi, Ukraine)
E-mail: olexandreti@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2158-3714>

ON EXACT SOLUTIONS OF THE EQUATIONS OF THE AXIS AND ANGLE OF CROSS SECTION OF AN ELASTIC BEAM

Calculation of elastic structures for strength and stiffness is important for their safe operation. The need for calculations is caused by structural deformations under the influence of external forces or temperature.

The objects of our research are the equation of the axis of an elastic beam during its flat bending, as well as the equation of the angle of rotation of the beam section. These equations are differential. A certain complexity of their solution led to the simplification of equations in classical sources of information. Approximate solutions of these equations are considered there.

But when using approximate calculation methods, you need to be able to assess their accuracy, that is, the degree of approximation to the exact result.

The goal of our research was to obtain exact solutions. The exact solution of the beam equations is important to avoid its critical deformations.

The article presents the exact analytical solutions we obtained for the exact equations of the bent axis of the beam and the angle of rotation of the beam section. The advantage of the exact solution was revealed, in particular, in the fact that the largest value of the deflection and angle of rotation of the beam section can be obtained directly from the properties of the functions that describe the solution.

Another advantage of the exact solution was the possibility of obtaining an approximate solution with a predetermined accuracy. In the mentioned classical sources of information, the assessment of accuracy was derived from the range of the maximum deflection of the axis during practical calculations of structures.

We have obtained a method of analytical assessment of the accuracy of the obtained solutions. The ability to assess the accuracy of calculation results is an important aspect of their practical application. This is important, in particular, for checking and clarifying the safe range of movements of beam points during its operation.

An example of calculating the deflection and angle of rotation of the beam cross-section with a given load on the axis of the beam is shown.

Keywords: elastic beam; beam axis; axis deflection; beam axis equation; angle of rotation of the beam section; deflection arrow.
Fig.: 1. Table: 1. References: 5.

**Геннадій Пасов¹, Володимир Венжега², Ярослав Кужельний, Антоніна Кологойда⁴,
Олександр Карпенко⁵**

¹кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна).

E-mail: genapasov@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7248-9085>

Researcher ID: H-4455-2014 Scopus Author ID: 57220212743

²кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна).

E-mail: vjvenzhega@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8857-349X>

Researcher ID: H-3560-2014. Scopus Author ID: 16510833000

³кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна).

E-mail: k.y.v.immortal@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5269-8557>

Researcher ID: J-1127-2016

⁴кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна).

E-mail: kolohoida@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1742-2686>

Researcher ID: I-1118-2014. Scopus Author ID: 57222329484

⁵здобувач вищої освіти, гр. ММБ-221, Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна).

E-mail: kaparek321@gmail.com.

ВИВЧЕННЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ В ЗОНІ РІЗАННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ АНІМАЦІЙНОГО СИМУЛЯТОРА

Програмний продукт призначений для імітаційного виконання лабораторної роботи з курсу «Теорія різання». Користувачі мають можливість самостійно, без реального обладнання імітувати вимірювання температури в зоні різання. При цьому можуть бути встановлені різні режими різання (швидкість різання, подача, глибина різання). На основі отриманих даних здобувачі можуть будувати графіки залежностей та аналізувати їх. Наочна візуалізація разом з інтерактивністю сприяє ефективному засвоєнню навчального матеріалу.

Стаття є публікацією науково-методичного характеру.

Ключові слова: навчальний процес; температура; режими різання; моделювання; симулятор.

Рис.: 14. Табл.: 1. Бібл.: 9.

Актуальність теми дослідження. Один із найголовніших факторів, які супроводжують процес різання, є теплота, що утворюється в результаті роботи різання. Закони теплоутворення пояснюють ті явища, які пов'язані з навантаженням різця, його стійкістю, якістю обробленої поверхні. Щоб правильно використовувати різальний інструмент, необхідно знати ці закони. Навчальна дисципліна, яка саме вивчає ці закони, є «Теорія різання». Однією зі складових цієї дисципліни є вивчення та дослідження сил різання та температури в зоні різання. Температура, яка виникає в зоні різання, суттєво впливає на знос та стійкість інструменту, на якість поверхні деталі та точність обробки. Тому вивчення теплових явищ – це важливе завдання.

Одним з інструментів при проведенні досліджень є дуже поширене використання комп'ютерної техніки. Проте ще потрібно мати й відповідне програмне забезпечення. Використання в навчальному процесі спеціального програмного забезпечення, наприклад, імітаційні моделі з можливістю анімації досліджуваних явищ, дозволяє застосовувати їх при виконанні лабораторних робіт із різних навчальних дисциплін. Наприклад, досліджувати різноманітні процеси в гідравліці, теорії різання, при складанні керуючих програм для верстатів із числовим програмним керуванням та інше.

Постановка проблеми. Освіта є основою будь-якого суспільства. При вивченні навчальних предметів використовуються різноманітні джерела інформації: підручники, навчальні посібники, збірники статей, інтернет-ресурси тощо. У теперішній час актуальним є використання спеціального імітаційного, анімаційного програмного продукту для вивчення різноманітних навчальних дисциплін [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Здобувачі вищої освіти технічних та будь-яких інших спеціальностей повинні бути присутніми на різнопланових структурних навчальних елементах: лекціях, лабораторних та практичних заняттях. На цих заняттях часто використовують двовимірні та тривимірні зображення: рисунки різноманітних машин, конструкцій, процесів та інше [2-5]. Для кращого розуміння процесу роботи різноманітних явищ використовують комп'ютери та відповідні програмні продукти, що надають навчальному процесу більш інтенсивного та інтерактивного змісту [6-9].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Здобувачі вищої освіти напрямів навчання «Галузеве машинобудування» та «Технологія машинобудування» вивчають дисципліну «Теорію різання». Крім теорії, їм необхідно отримати ще й практичні навички, які здобувачі одержують на лабораторних заняттях.

При виконанні лабораторної роботи «Вимірювання температури в зоні різання Вплив режимів різання на температуру» здобувачам вищої освіти пропонується використовувати передові інформаційні технології, а саме анімаційний симулятор досліджуваного процесу.

Метою статті є аналіз способів вимірювання температури в зоні різання та пропозиція використання в навчальному процесі симулятора, який імітує процес вимірювання.

Виклад основного матеріалу. На кафедрі автомобільного транспорту та галузевого машинобудування Національного університету «Чернігівська політехніка» при вивченні навчальної дисципліни «Теорія різання» здобувачам різних напрямів навчання, зокрема «Галузеве машинобудування» та «Технологія машинобудування», запропоновано використовувати навчальний симулятор для вивчення температури в зоні різання SunSpire Art group [10].

Програмний продукт призначений для імітаційного виконання лабораторних робіт із дисципліни «Теорії різання». Запропонована методика виконання лабораторної роботи в оболонці комп'ютерної програми передбачає вивчення теплових явищ при різанні металів і методів вимірювання температури різання, а також дослідження впливу елементів режиму різання на температуру різання.

Для ефективного засвоєння матеріалу, який вивчається, застосовується наочна об'ємна візуалізація в сукупності з максимальною інтерактивністю. Симулятор є комп'ютерним віртуальним тренажером, який призначений для проведення лабораторної роботи «Вимірювання температури в процесі різання. Вплив режимів різання на температуру». До комп'ютера, на якому буде використовуватись програма, ставляться певні системні вимоги [10].

Мета роботи симулятора полягає у вивченні теплових явищ при обробці (різанні) металів і методів вимірювання температури різання, а також дослідження впливу елементів режиму різання (швидкості, подачі та глибини різання) на температуру різання.

Теплові явища в процесі різання відіграють виключно важливу роль. Саме вони визначають температуру в зоні різання, яка впливає на характер утворення стружки, наріст, усадку стружки, величину сил різання і мікроструктуру поверхневого шару. Ще більш істотний вплив має температура різання на інтенсивність затуплення інструмента і його стійкість, а отже, продуктивність процесу різання. Розглянемо, як утворюється та розподіляється тепло.

Дослідженнями встановлено, що понад 99,5 % механічної роботи різання переходить у тепло й лише невелика частина її перетворюється в потенційну енергію перекрученої кристалічної ґратки. Тому вважають, що в теплоту переходить практично вся робота різання, тобто кількість тепла Q , що виділяється, еквівалентно механічній роботі A . Оскільки робота в одиницю часу $A = Pz V$, то кількість тепла, що виникає за одиницю часу, дорівнює:

$$Q = Pz V, \quad (1)$$

де Pz – складова сили різання, яка діє в напрямку головного руху, Н;

V – швидкість різання, м/с.

Джерелами утворення тепла при різанні (рис. 1) є:

Q_d – тепло, яке виділяється внаслідок пластичної деформації в зоні стружкоутворення;

Q_{TP} – тепло від тертя на передній поверхні інструмента;

Q_{TZ} – тепло від тертя на задній поверхні.

Теплота кожного з цих трьох джерел у результаті теплообміну в зоні різання передається стружці – Q_C , оброблюваній деталі – $Q_{ДЕТ}$, інструменту – Q_I і навколишньому середовищу – $Q_{СР}$ (рис. 1). Таким чином, рівняння теплового балансу при різанні має вид:

$$Q = Q_D + Q_{ТП} + Q_{ТЗ} = Q_C + Q_{ДЕТ} + Q_I + Q_{СР}. \quad (2)$$

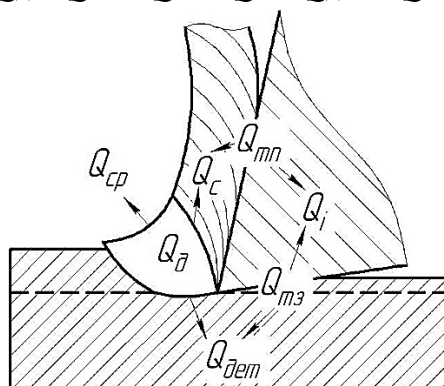


Рис. 1. Схема утворення та розподілу тепла

Кількість тепла, яке утворюється в процесі різання, і співвідношення доданків у рівнянні (2) залежить від фізико-механічних властивостей оброблюваного та інструментального матеріалів, геометрії різального інструменту та режимів різання.

Експерименти показують, що при роботі різцями з невеликою швидкістю різання ($V < 40$ м/хв) відносна частка теплоти становить:

$$Q_C = 60-70 \%, \quad Q_{ДЕТ} = 30-40 \%, \quad Q_I = 3 \%, \quad Q_{СР} = 1-2 \%$$

На розподіл тепла між стружкою, деталлю та інструментом істотно впливає збільшення швидкості різання: при цьому Q_C зростає, а Q_I та $Q_{ДЕТ}$ зменшуються. Крім того, чим нижче теплопровідність оброблюваного матеріалу, тим більше тепла йде до інструменту. Як видно, Q_I дуже маленьке і при різанні будь-яких матеріалів з будь-яким режимом обробки набагато менше, ніж Q_C та $Q_{ДЕТ}$. Основною причиною низької інтенсивності тепловіддачі до інструменту є більш низька теплопровідність інструментального матеріалу в порівнянні з оброблюваним.

Розглянемо, які є методи вимірювання температури в зоні різання. На рис. 2 наведено зміни температури вздовж площадки контакту на передній поверхні інструмента. Максимальна температура виникає приблизно на половині ширини площадки контакту. До леза і до кінця площадки температура зменшується. По площадці контакту задньої поверхні інструмента з поверхнею різання температура розподіляється також нерівномірно. Тому в загальному випадку під температурою різання розуміють середню температуру на поверхні контакту інструмента зі стружкою та поверхнею різання.

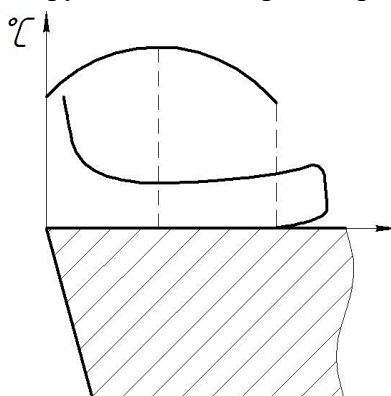


Рис. 2. Розподіл температури вздовж площадки контакту стружки з різцем

Слід зазначити, що поняття «температура різання» також тісно пов'язано зі способами її вимірювання. Розрізняють непрямі та безпосередні способи вимірювання температури різання. До непрямих способів належать: калориметричний, спостереження за кольорами мінливості, термокрасок, мікроструктурного аналізу; оптичний і радіаційний. Але ці способи не точні й тому використовуються рідко.

Велику зацікавленість становить безпосередній вимір температур у зоні різання, оскільки дає змогу одержати результат, близький до дійсного. З цією метою застосовують спосіб термопар, уперше запропонований Я. Г. Усачовим. Розрізняють такі різновиди способу термопар: штучна; напівштучна; природна; метод двох різців і біжучої термопари.

На рис. 3, а представлено вимірювання температури штучною термопарою. До корпусу різця притиснута різальна пластинка 1. У корпусі зроблено отвір, у який вставлена ізоляційна трубка 2. Стандартна термопара 3 (мідь – константан, хромель – алюмель та ін.) з гальванометром 4, підключеним до її кінців, вставлена в трубку 2 так, що її спай торкається нижньої площини пластинки 1. Спай термопари реєструє температуру опорної площини пластинки. Розташовуючи отвір у різних точках опорної площини, можна вивчити розподіл температури по передній поверхні різця.

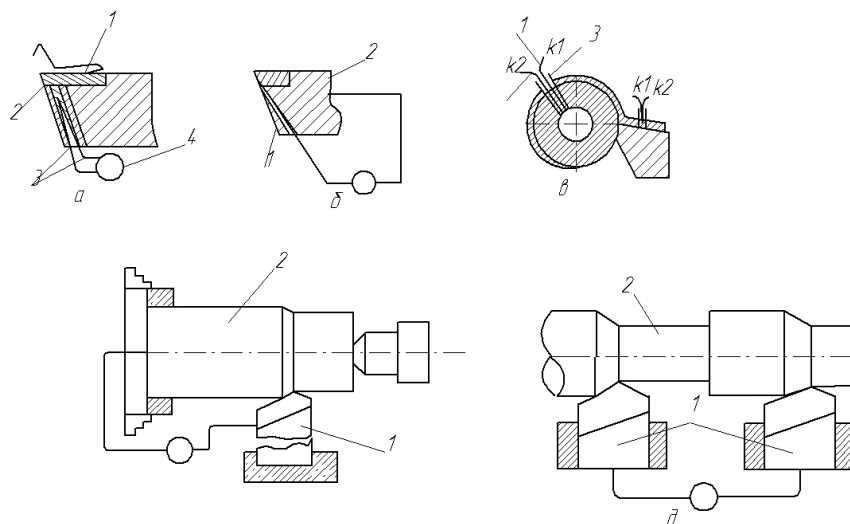


Рис. 3. Вимірювання температури термопарами:
а – штучною; б – напівштучною; в – біжучою;
г – природною; д – методом двох різців

Перевагою методу є можливість використання стандартної термопари, а тому немає потреби у спеціальному її тарюванні. Проте вимірювана термопарою температура нижче за температуру на контактних поверхнях інструмента й різниця температур залежить від відстані спаю термопари до зазначених поверхонь, зростаючи зі збільшенням товщини різальної пластинки. Практично не вдається мати товщину пластинки менше ніж 1,5-2 мм, а тому через великий градієнт температур вимірювана температура на 50-80 °С нижче за дійсну.

Напівштучна термопара (рис. 3, б) складна у виготовленні, допускає малу кількість переточувань інструмента та вимагає спеціального тарювання в порівнянні зі штучною, а тому набула обмеженого застосування.

Простішим є метод природно утвореної термопари (рис. 3, г). Елементами природної термопари є різець 1 та оброблювана деталь 2, спаям термопари служить поверхня контакту різця зі стружкою і деталлю. Якщо деталь та різець включити в замкнутий електричний ланцюг, то величина термоелектрорушійної сили (т.е.р.с.), яка виникає в термоелементі, буде пропорційна температурі ковзного спаю утвореної термопари. Цим

методом вимірюють не максимальну, а деяку середню контактну температуру на передній і задній поверхнях різця. Перевагою методу є те, що його легко здійснити при будь-якому виді обробки (точінні, свердлінні, струганні, фрезеруванні, протягуванні та ін.). Для перекладу показань гальванометра в градуси Цельсія ця термопара попередньо повинна бути протарирована. Відзначимо, що тарировання термопар є трудомістким процесом. При використанні ж методу природної термопари необхідно робити кожен раз нове тарировання при зміні матеріалів різця або деталі, що є недоліком методу.

Вплив матеріалу оброблюваної деталі на вид тарировального графіка можна виключити, застосовуючи дворізцевий метод (рис. 3, д). При цьому методі точіння деталі 2 здійснюють двома однаковими різцями 1, які виготовлені з різних інструментальних матеріалів та підключені до гальванометра. Елементами природно утвореної термопари є матеріали різців, величина т.е.р.с. залежить від їхніх властивостей і температури нагрівання контактних поверхонь різців. Оброблюваний матеріал тут служить тільки електричним провідником і на показання гальванометра не впливає. Якщо один раз такий прилад протарировати, то можна оцінювати температуру різання при обробці різних металів. За точністю метод поступається однорізцевому, тому що припускає тільки однакові температури контактних поверхонь обох різців. Однак унаслідок різних сил різання і різної теплопровідності матеріалів двох різців температури на контактних поверхнях різців не можуть бути однаковими.

Найбільш точним є методи, які використовують термопари, що біжать або зрізаються (рис. 3, в, з). Штучна незамкнена термопара (рис. 3, в), розташована в захисній трубці 3, вставляється в отвір діаметром 0,5-0,7 мм у деталі. Трубка 3 виготовляється з матеріалу деталі. Елементами 1 та 2 термопари є тонкі дротики діаметром 0,1 мм із міді й константану, ізольовані емаллю. Кінці термопар К1 та К2, К3 та К4 через струмознімачі підключені до осцилографа. При перерізанні різцем захисної трубки і незамкнутої штучної термопари елементи останньої замикаються на контактній поверхні стружки й поверхні різання. Таким чином утворюється дві термопари: одна з них, рухаючись зі швидкістю стружки, через контакти К1 та К2 фіксує на осцилографі температуру вздовж контактної площадки на передній поверхні різця, а інша, рухаючись зі швидкістю різання, через контакти К3 та К4 фіксує температуру вздовж контактної площадки на задній поверхні різця.

Метод біжучих термопар відрізняється складністю і великою трудомісткістю, проте є найбільш точним та дозволяє вивчити закон розподілу температур на контактних поверхнях інструмента (рис. 2).

Розглянемо, як впливають різні фактори на температуру різання. На температуру різання θ впливають ті ж фактори, що і на зміну балансу тепла (властивості інструментального й оброблюваного матеріалів, елементи режиму різання, геометрія інструмента та ін.).

Фізико-механічні властивості інструментального й оброблюваного матеріалів впливають на температуру різання θ так же як і на усадку стружки чи сили різання, тобто мається тенденція до збільшення θ з підвищенням міцності, жорсткості і пластичності оброблюваного матеріалу. Крім того, на θ дуже впливає теплопровідність оброблюваного та інструментального матеріалів: чим вище теплопровідність цих матеріалів, тим нижче θ , тому що відвід тепла від місця його виділення в стружку, деталь і в інструмент більш інтенсивний.

З елементів режиму різання найбільш впливає на θ швидкість різання V , менше – подача S та найменш – глибина різання t , причому з їх збільшенням температура різання підвищується. Це підвищення θ не пропорційне збільшенню V , S та t . Тобто зростання температури різання відстає від зростання V , S та t . Це відставання особливо підсилюється в зоні високих V , S та t .

Вплив V , S та t на температуру різання пояснюється такими факторами:

1) зі збільшенням V росте робота різання ($A = Pz V$) і, отже, кількість виділеної теплоти, але безпосередньо в різець і деталь доля відведеної теплоти знижується, а основна кількість її забирається стружкою, тому хоча зі збільшенням V температура різання росте, це зростання увесь час сповільнюється; крім того, припущення про те, що $A = Pz V$ змінюється пропорційно V , не зовсім вірне, тому що в міру збільшення V сила різання Pz зменшується;

2) зі збільшенням S збільшується сила Pz , а отже, збільшується робота різання і кількість виділеної теплоти; одночасно зростає площа контакту стружки з передньою поверхнею різця; це поліпшує умови відводу теплоти, тому збільшення θ відстає від зростання S ;

3) зі збільшенням t прямо пропорційно зростає Pz , робота різання і кількість виділеного тепла, але в стільки ж раз збільшується і площа контакту стружки з передньою і задньою поверхнями різця, а отже, поліпшується відвід теплоти; тому зі збільшенням t температура різання незначно змінюється.

Оскільки площа контакту стружки з передньою і задньою поверхнями інструмента збільшується з підвищенням S в значно меншій мірою, ніж із підвищенням t , то відвід тепла зі збільшенням t поліпшується більше, ніж зі збільшенням S . Тому S більшою мірою впливає на температуру різання, ніж t .

Неоднаковий вплив t і S на температуру різання дозволяє зробити важливий висновок: для зниження θ при заданій площі перерізу зрізаного шару необхідно працювати з можливо більшим відношенням t/S тобто із широкими й тонкими стружками.

З геометричних параметрів інструмента найбільш впливає на θ передній кут γ та головний кут у плані φ .

При вимірюванні температури різання у склад лабораторного обладнання входять такі прилади, інструменти та приналежності:

1. Токарно-гвинторізний верстат моделі 16К20.
2. Експериментальна заготовка.
3. Токарний прохідний різець.
4. Штангенциркуль.
5. Струмознімач.
6. Мілівольтметр.
7. Комплект ключів.
8. Набір з'єднувальних проводів.

Лабораторний стенд (рис. 4) дозволяє вимірювати температуру різання методом природної термопари. Стенд змонтовано на базі верстата 16К20 та складається з: експериментальної заготовки 1 та різця 3, струмознімача 7, сполучних проводів та мілівольтметра 5. На заготовці 1 з метою ізоляції її від верстата насаджені текстолітові втулка і пробка 2. Різець 3 також ізолюють від верстата текстолітовими прокладками 4. Струмознімач 7 являє собою металеву пластинку, що притиснута під дією власної ваги до токопровідної шпильки, яка виготовлена з матеріалу деталі. Вільний кінець шпильки 6 ізолювано від корпусних деталей верстата за допомогою текстолітової втулки 8. Мілівольтметр 5 сполучними проводами підключається одним кінцем до ртутного струмознімача через накопичувач, а іншим – до різця.

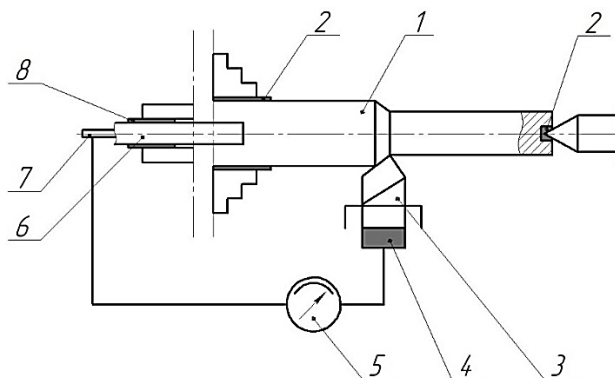


Рис. 4. Схема лабораторного стенда:

1 – заготовка, 2 – пробка, 3 – різець, 4 – прокладка, 5 – мілівольтметр,
6 – шпилька, 7 – струмознімач, 8 – втулка

У процесі різання утворюється замкнутий електричний ланцюг: «заготовка – струмомознімач – мілівольтметр – різець – заготовка». Як бачимо, всі елементи цього ланцюга ізольовані від верстата. Останнє пов’язано з усуненням впливу на показання мілівольтметра різних паразитних термопар, що можуть виникнути між елементами електричного ланцюга і верстатом.

При визначеному режимі різання виконується обробка заготовки. При цьому т.е.р.с., що виникає в природній термопарі деталь – різець, фіксується мілівольтметром. Чим більше температура різання θ , тим більше виникаюча т.е.р.с., тим більше відхилення стрілки мілівольтметра.

Для переведення показань мілівольтметра в градуси Цельсію необхідно провести спеціальне тарирування природної термопары “матеріал заготовки – матеріал різця”. У навчальних цілях при проведенні лабораторної роботи можна користуватися графіками тарирування термопар для сталі 40 та різних твердих сплавів (рис. 5).

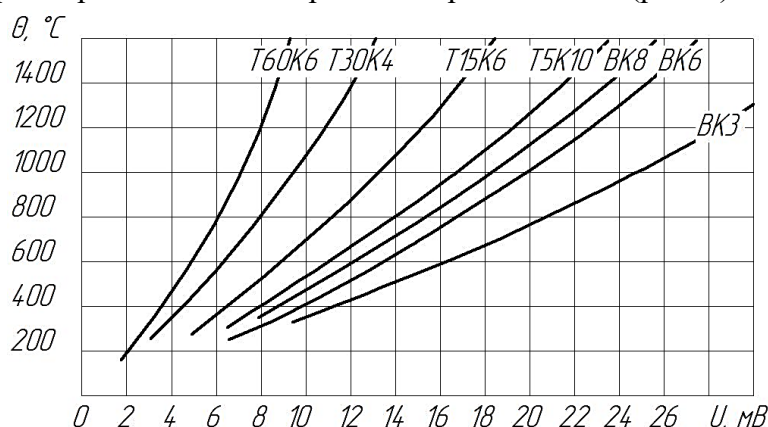


Рис. 5. Криві тарирування термопар сталь 40 – твердий сплав

Лабораторна робота виконується в такій послідовності:

1. На лабораторній установці виконується (відповідно до отриманого завдання) дослідження впливу елементів режиму різання (наприклад, глибини різання) на температуру різання за методикою, описаною вище. Дані дослідження заносяться до протоколу (таблиця 1).

Таблиця 1 – Дані, що отримані при виконанні лабораторної роботи

Порядок експериментів	Частота обертання n , об/хв.	Діаметр оброблюваної заготовки d , мм	Швидкість різання V , м/хв.	Подача S , мм/об	Глибина різання t , мм	Показання гальванометра, мВ	Температура, °C
1	200	65	40	0,15	2	3,8	530
2	200	65	40	0,15	1,5	3,65	520
3	200	65	40	0,15	1	3,5	500
4	200	65	40	0,15	0,5	2,85	460

3. Показання мілівольтметра переводяться за допомогою тарирувального графіка в градуси Цельсія і заносяться до протоколу лабораторної роботи.

4. Аналогічно досліджують вплив на температуру різання інших складових (швидкості різання та подачі).

5. За даними протоколу будуються графіки залежностей температури різання від елементів режиму різання. Наприклад, для глибини різання $\theta = f(t)$ (рис. 6) та інші $\theta = f(V)$, $\theta = f(S)$.

6. Використовуючи отримані залежності робляться висновки про вплив V , S і t на температуру різання з поясненням фізичної сутності цього явища.

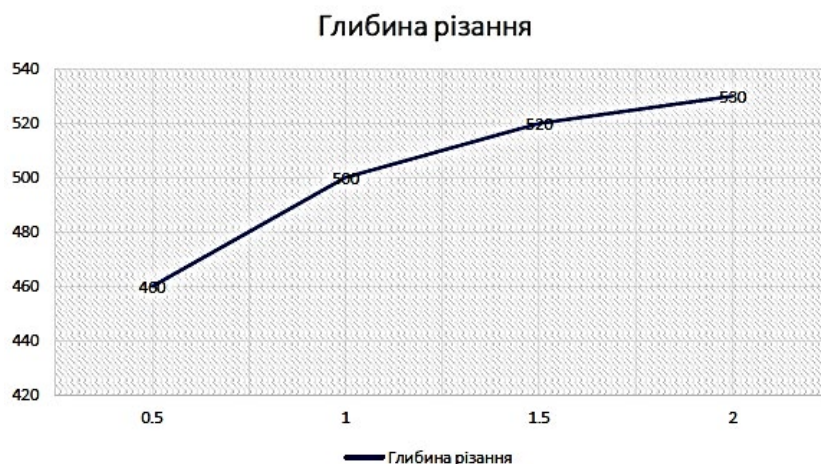


Рис. 6. Приклад впливу на температуру різання глибини

Усі вищенаведені дії виконуються на реальному лабораторному стенді. Проте в сучасних умовах, коли дистанційна форма навчання набуває значного поширення, у багатьох відсутній доступ до лабораторій. Саме в цьому випадку і приходять на допомогу інформаційні технології, які дозволяють, наприклад, виконувати цю лабораторну роботу безпосередньо на комп'ютері з використанням анімаційного симулятора цієї лабораторної роботи.

Для початку роботи зі симулятором потрібно запустити файл «SimulatorTEMPERATURA.exe». Після запуску програми на екрані з'являється «Меню», з якого користувач може вибрати ті дії, які йому необхідні в певний момент: «Мета роботи», «Теоретична частина» (пояснюються основні положення про температуру різання та її вимірювання), «Лабораторне обладнання» та інше.

На рис. 7 представлено зовнішній вигляд лабораторного стенда для вимірювання температури в зоні різання на базі токарного верстата 1К62.

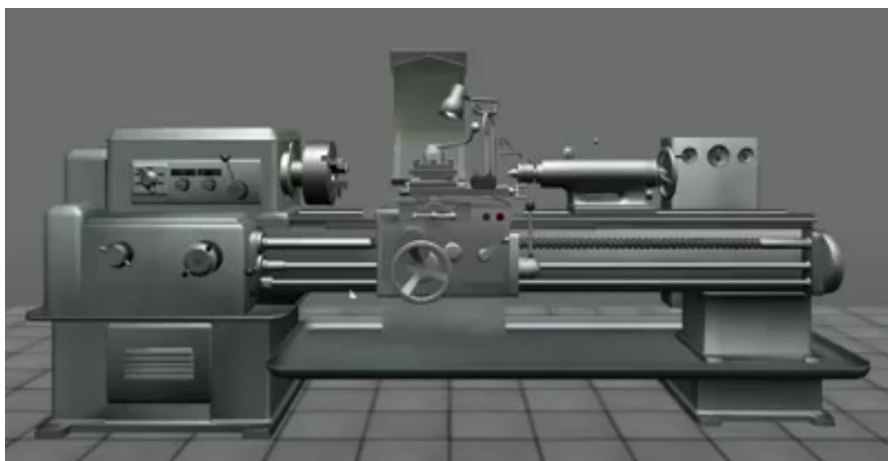


Рис. 7. Зовнішній вигляд лабораторного стенда на базі токарного верстата 1К62

Після того, як здобувач вищої освіти ознайомився з основними частинами верстата та елементами його керування, він приступає до безпосереднього налагодження лабораторного стенда на задані режими різання: частоту обертання шпинделя (рис. 8), діапазон вибору обертів (рис. 9), подачу (рис. 10), глибину різання (рис. 11).



Рис. 8. Налаштування частоти обертання шпинделя



Рис. 9. Налаштування діапазону частоти обертання шпинделя



Рис. 10. Налаштування подачі

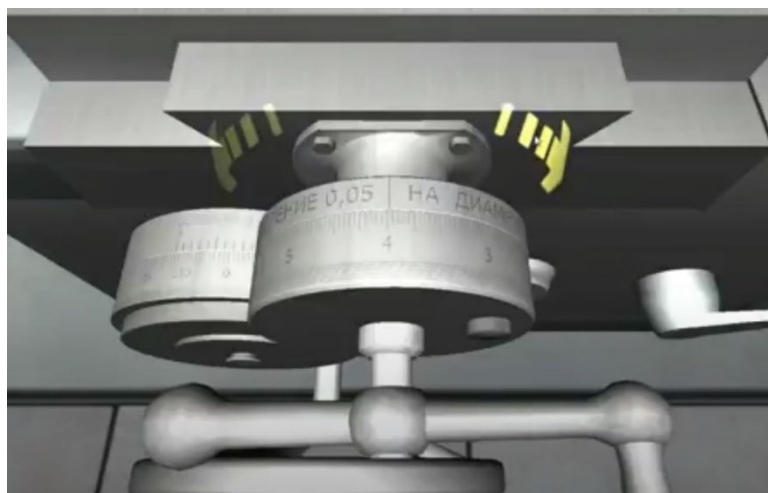


Рис. 11. Налаштування глибини різання

На рис. 12 наведено зовнішній вигляд вимірювального приладу (мілівольтметра) на лабораторному стенді.

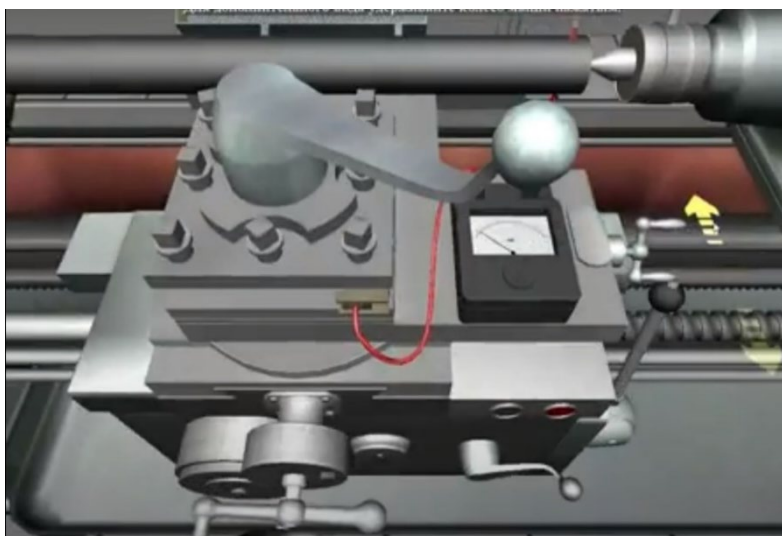


Рис. 12. Зовнішній вигляд вимірювального приладу на стенді

Після всього вищезазначеного починаються вимірювання. У процесі імітації обробки (рис. 13) здійснюються зняття показників з мілівольтметра (рис. 14). Отримані результати заносяться до протоколу лабораторної роботи. Наприклад, як у таблиці 1.

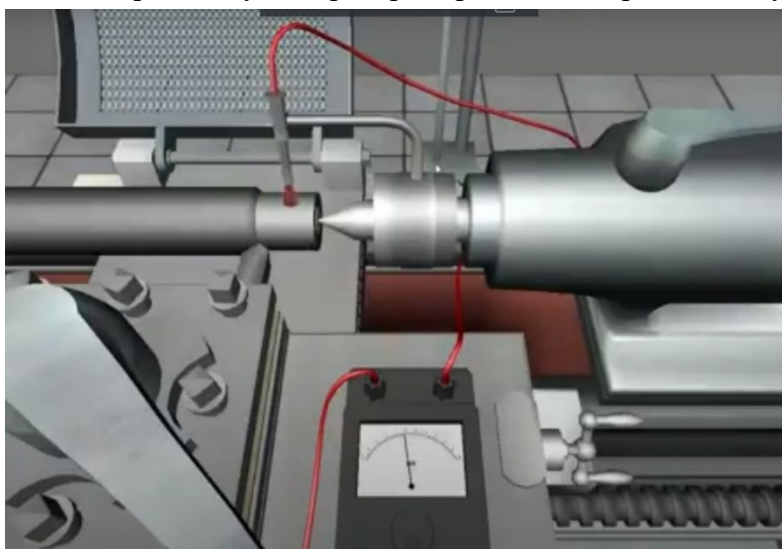


Рис. 13. Зняття показників з мілівольтметра при заданому режимі обробки

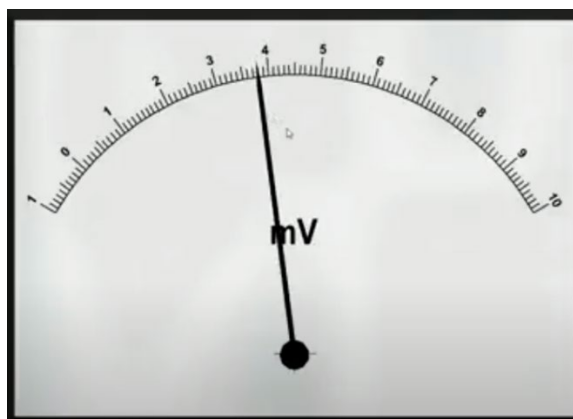


Рис. 14. Значення показника з мілівольтметра при заданому режимі обробки

Після чого за тарировальним графіком знаходимо величину температури в зоні різання при заданому режимі обробки.

Надалі здійснюються дії для налагодження верстата на інші режими обробки (інші показники швидкості різання (частоти обертання заготовки), подачі та глибини різання). Після чого знімаються нові покази та будуються необхідні залежності зміни температури різання від параметрів обробки.

Після закінчення всіх експериментів здобувачі мають можливість обробити результат та зробити необхідні висновки.

Висновки. Навчальний симулятор, який запропонований при виконанні лабораторної роботи з вивчення температури в зоні різання, дозволить краще зрозуміти процес, а також є більш наочним. Однак у цій програмі не можна використовувати різноманітні матеріали, які оброблюються (різні марки сталі, чавуну, кольорових сплавів та інше). Було б доцільним додати функцію вибору матеріалу, який досліджується в наступній версії цієї програми.

Список використаних джерел

1. Бочков В. М. Обладнання автоматизованого виробництва : навчальний посібник / В. М. Бочков, Р. І. Сілін. – Львів : Видавництво Державного університету «Львівська політехніка», 2000. – 380 с.
2. Грабченко А. И. 3D моделирование алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования : учеб. пособ. / А. И. Грабченко, В. Л. Доброскок, В. А. Федорович. – Харків : НТУ «ХПИ», 2006. – 364 с.
3. Маров М. Н. Энциклопедия 3ds max 8 (+CD) / М. Н. Маров. – Санкт-Петербург : Питер, 2010. – 1388 с.
4. Горелик А. Г. Основы моделирования и визуализации в 3ds max (в упражнениях) / А. Г. Горелик. – Санкт-Петербург : Питер, 2011. – 398 с.
5. Сахно Ю. О. Гідравліка і гідропневмоавтоматика : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / Ю.О. Сахно; Чернігівський держ. технологічний ун-т. – Чернігів : ЧДТУ, 2004. – 148 с.
6. Аббасов И. Б. Компьютерное моделирование в промышленном дизайне / И. Б. Аббасов. – Санкт-Петербург : Питер, 2013. – 92 с.
7. Михальченко Д. О. Анімаційне моделювання храпових механізмів для створення обертового переривчастого руху / Д. О. Михальченко // Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі : Всеук. наук.-практ. конф. студ., аспір. та молод. учених. – Чернігів : ЧНТУ, 2017. – С. 22-23.
8. Пасов Г. В. Анімаційне моделювання механізмів для створення реверсивного, обертового руху / Г. В. Пасов, В. І. Венжега, А. В. Рудик // Технічні науки та технології. – 2016. – № 1(3). – С. 60-65.
9. Пасов Г. В. Анімаційне моделювання гідроциліндрів та пневмокамер для створення прямолінійного поступального руху / Г. В. Пасов, В. І. Венжега // Технічні науки та технології: – 2018. – № 4(14). – С. 34-40.

References

1. Bochkov, V.M., & Silin, R.I. (2000). *Obladnannia avtomatyzovanoho vyrobnytstva [Equipment for automated production]*. Lviv Polytechnic.
2. Hrabchenko, A.I., Dobroskok, V.L., & Fedorovych, V.A. (2006). *3D modelirovaniealmazno-abrazivnykh instrumentov i protcessov shlifovaniia [3D modeling of diamond-abrasive tools and grinding processes]*. NTU «KhPI».
3. Marov, M.N. (2010). *Entsiklopediia 3ds max 8 (+CD) [Encyclopedia 3ds max 8 (+ CD)]*. Piter.
4. Horelyk, A.H. (2011). *Osnovy modelirovaniia i vizualizatscii v 3ds max (v uprazhneniiah) [Basics of modeling and rendering in 3ds max (in exercises)]*. Piter.
5. Sakhno, Yu.O. (2004). *Hidravluka i hidropnevmoavtomatyka [Hydraulics and hydropneumatic automation]*. Chernihiv State Technological University.
6. Abbasov, I.B. (2013). *Kompiuternoe modelirovanie v promyshlennom dizaine [Computer modeling in industrial design]*. Piter.

7. Mykhalchenko, D.O. (2017). Animatsiine modeliuвання khrapovykh mekhanizmiv dlia stvorenia obertalnoho pereryvchastoho rukhu [Animation modeling of ratchet mechanisms to create a rotating intermittent motion]. *Vseukrainska naukovo-praktychna konferentsiia studentiv, aspirantiv ta molodykh uchennykh "Novitni tekhnologii u naukovi diialnosti i navchalnomu protsesi"* [All-Ukrainian scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists "Latest technologies in scientific activity and educational process"] (pp. 22-23). Chernihivskiy natsionalnyi tekhnolohichnyi universytet.

8. Pasov, H.V., Venzheha, V.I., & Rudyk, A.V. (2016). Animatsiine modeliuвання mekhanizmiv dlia stvorenia reversyvnogo, obertalnoho rukhu [Animation simulation of reverse mechanism for creating rotary motion]. *Tekhnichni nauky ta tekhnologii – Technical sciences and technologies*, (1(3)), 60-65.

9. Pasov, H. V., & Venzheha V. I. (2018). Animatsiine modeliuвання hidrotsylindriv ta pnevmokamer dlia stvorenia priamoliniinoho postupalnoho rukhu [Animated modeling of hydraulic cylinders and pneumatic chambers to create a rectilinear translational motion]. *Tekhnichni nauky ta tekhnologii – Technical sciences and technologies*, (4(14)), 34–40.

Отримано 26.04.23

UDC 621.22:004.94

**Hennadii Pasov¹, Volodymyr Venzheha², Yaroslav Kuzhelnyi³, Antonina Kolohoida⁴,
Oleksandr Karpenko⁵**

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automobile Transport and Industrial Mechanical Engineering Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: genapasov@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7248-9085>

Researcher ID: [H-4455-2014](https://orcid.org/0000-0001-7248-9085). Scopus Author ID: [57220212743](https://orcid.org/0000-0001-7248-9085)

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automobile Transport and Industrial Mechanical Engineering Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: vivenzhega@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8857-349X>

Researcher ID: [H-3560-2014](https://orcid.org/0000-0002-8857-349X). Scopus Author ID: [16510833000](https://orcid.org/0000-0002-8857-349X)

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automobile Transport and Industrial Mechanical Engineering Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: k.y.v.immortal@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5269-8557>

Researcher ID: [J-1127-2016](https://orcid.org/0000-0002-5269-8557)

⁴PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automobile Transport and Industrial Mechanical Engineering Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: kolohoida@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1742-2686>

Researcher ID: [I-1118-2014](https://orcid.org/0000-0002-1742-2686). Scopus Author ID: [5722329484](https://orcid.org/0000-0002-1742-2686)

⁵student of higher education, gr. MMB-221

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine).

E-mail: kaparek321@gmail.com.

STUDY OF TEMPERATURE MEASUREMENT IN THE CUTTING ZONE USING AN ANIMATED SIMULATOR

The temperature that occurs in the cutting zone significantly affects the wear and stability of the tool, the quality of the surface of the part and the accuracy of processing. Therefore, the study of thermal phenomena is an important task.

Nowadays, the use of a simulation software product in the study of various academic disciplines is relevant.

For a better understanding of the work process of various phenomena, computers and software products are used, which give the educational process a more intensive and interactive content.

When performing laboratory work "Measurement of temperature in the cutting zone" it is suggested to use advanced information technologies, namely an animation simulator.

The purpose of the article is to propose the use of a simulator for measuring the temperature in the cutting zone in the educational process.

The "SimulatorTEMPERATURE.exe" file is launched. "Menu" appears on the screen. After getting acquainted with the main parts of the machine, they begin to set up the laboratory bench for the specified cutting modes: spindle speed, feed, cutting depth. In the process of simulating processing, indicators are removed from the device. The results are recorded in the work protocol. According to the calibration schedule, the value of the temperature at the specified processing mode is found. In the future, the machine is adjusted for other processing modes. After the end of all experiments, the results are processed and the necessary conclusions are drawn.

The educational simulator, which is proposed when performing laboratory work on the study of the temperature in the cutting zone, will allow a better understanding of the process, and is also more visual.

The article is a scientific and methodological publication.

Keywords: educational process; temperature; cutting modes; modeling; simulator.

Fig.: 18. **References:** 9.

Пасов Г., Венжега В., Кузьмич Я., Кологойда А. Вивчення вимірювання температури в зоні різання із застосуванням анімаційного симулятора. *Технічні науки та технології*. 2023. № 2(32). С. 95-106.