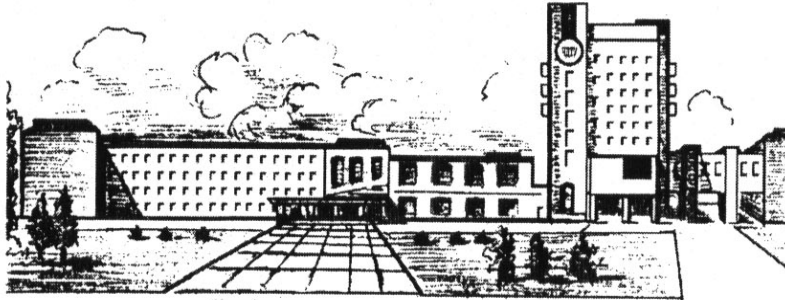


ISSN 2411-5363 (print)  
ISSN 2519-4569 (online)

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЧЕРНІГІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**



# ***ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ***

***НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ***

***№ 1 (19)***



Чернігів 2020

Друкується за рішенням вченої ради Чернігівського національного технологічного університету (протокол № 3 від 27.04.2020 р.). Науковий журнал «Технічні науки та технології» внесено до переліку наукових фахових видань України, затвердженого Наказом Міністерства освіти і науки України від 11.07.2019 р. № 975, відповідно до якого журналу надано категорію «Б».

Т38 **Технічні науки та технології** : науковий журнал / Чернігів. нац. технол. ун-т. – Чернігів : ЧНТУ, 2020. – № 1 (19). – 346 с.

У цьому випуску журналу «Технічні науки та технології» вміщено статті, присвячені теоретичним та експериментальним дослідженням у науковому напрямі «Технічні науки» за спеціальностями: прикладна механіка, матеріалознавство, машинобудування, інформаційно-комп'ютерні технології, енергетика, 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, Чернігівський національний технологічний університет.

**Заступник головного редактора:**

Сапон С. П., кандидат технічних наук, доцент, Чернігівський національний технологічний університет.

**Члени редакційної колегії:**

Прикладна механіка, матеріалознавство та машинобудування

Бойко С. В., кандидат технічних наук, доцент, Чернігівський національний технологічний університет;

Болотов Г. П., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет;

Дубенець В. Г., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет;

Єрошенко А. М., кандидат технічних наук, доцент, Чернігівський національний технологічний університет;

Кальченко В. І., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет;

Кальченко В. В., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет;

Новомлинець О. О., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет;

Пилипенко О. І., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет.

Інформаційно-комп'ютерні технології

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

Вархола Міхал, доктор технічних наук, професор, Технічний університет в Кошице (Словаччина);

Джон Н. Девис, доктор технічних наук, професор, університет Глиндор, Рексем, Великобританія;

Зайцев С. В., доктор технічних наук, доцент, Чернігівський національний технологічний університет;

Литвинов В. В., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет.

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, Чернігівський національний технологічний університет;

Денисов Ю. О., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет;

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

Скоробогатова В. І., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет.

Хімічні та харчові технології

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

Сиза О. І., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет;

Цибуля С. Д., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет;

Челябієва В. М., кандидат технічних наук, доцент, Чернігівський національний технологічний університет.

Будівництво та геодезія

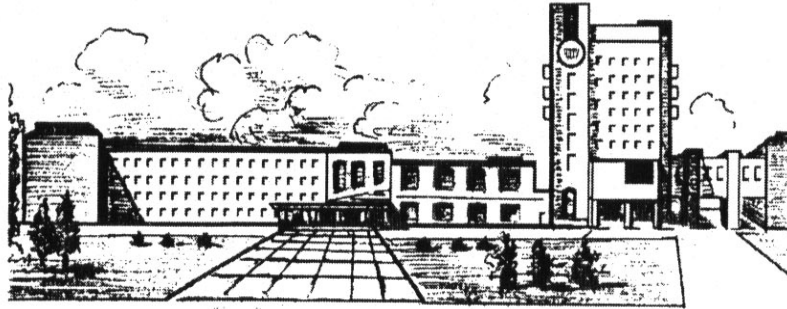
Вінніков Ю. Л., доктор технічних наук, професор, Полтавський національний технічний університет;

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



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

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



# ***TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES***

***SCIENTIFIC JOURNAL***

***ISSUE № 1 (19)***

Chernihiv 2020

UDC 62:67.05  
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)

Published by the decision of the Academic Council of the Chernihiv National University of Technology (protocol № 3 dated 27.24.2020). Scientific journal “Technical sciences and technologies” is included into the list of scientific specialized editions of Ukraine, approved by the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine dated July 11, 2019 № 975, according to which magazine is assigned a category «B».

**Technical sciences and technologies:** scientific journal / Chernihiv National University of Technology. – Chernihiv : Chernihiv National University of Technology, 2020. – № 1 (19). – 346 p.

This issue of the journal “Technical sciences and technologies” 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, 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 National University of Technology (ChNUT).

**Deputy Editor in chief:**

Sapon S. P., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; ChNUT.

**Members of the Editorial Board:**

Applied mechanics, materials science and machine building

Boyko S. V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; ChNUT;

Bolotov H. P., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT;

Dubenets V. H., Doctor of Technical Sciences, Professor, ChNUT;

Yeroshenko A. M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; ChNUT.

Kalchenko V. I., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT;

Kalchenko V. V., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT;

Novomlynets O. O., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT;

Pilipenko O. I., Doctor of Technical Sciences, Professor, ChNUT.

Information and computer technologies

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

Varchola Michal, Professor, President of the Academic society of Michal Baludansky, Slovakia;

John N. Davies, Professor, Department of Computer Science, Glyndwr University, Wrexham, U.K.;

Zaitsev S. V., Doctor of Technical Sciences, ChNUT;

Lytvynov V. V., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT.

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; ChNUT;

Denysov Yu. A., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT;

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

Skorobohatova V. I., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT.

Chemical and food technologies

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

Syza O. I., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT;

Tsybulia S. D., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT;

Cheliabiieva V. M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, ChNUT.

Construction and geodesy

Vynnykov Y. L., Doctor of Technical Sciences, Professor, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University;

Shults R. V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv national university of construction and architecture.



## ЗМІСТ

РОЗДІЛ I. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО  
ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

<i>Болотов М., Болотов Г.</i> Визначення меж енергетичної стабільності тліючого розряду в умовах зварювального нагріву .....	9
<i>Пилипенко О., Колесник Д., Березняк А.</i> Точність та погрешності зубчастих передач вертольотних редукторів .....	18
<i>Лебедев В., Дубовий О., Лой С.</i> Особливості формування (структурування) та властивості теплозахисних покриттів при плазмовому напиленні .....	32
<i>Мурашковська В., Подзолкіна А., Скляр В., Сиводід О.</i> Аналіз тенденцій розвитку міського громадського транспортного середовища .....	42
<i>Борак К.</i> Прогнозування зміни абразивних властивостей ґрунтів для забезпечення надійної експлуатації робочих органів .....	53
<i>Захарова І., Роянов В.</i> Обґрунтування конструктивних особливостей пульсатора для забезпечення пульсуючого розпилюючого потоку повітря при дуговій металізації .....	65
<i>Кальченко В., Кальченко В., Венжега В., Винник В.</i> Модернізація універсально-заточувального верстата з ЧПК ВЗ208ФЗ для високошвидкісного фрезерування поверхонь обертання .....	72
<i>Литвин О., Паньков С.</i> Роботизовані маніпулятори особливого призначення .....	81
<i>Стельмах Н., Сапон С., Рижук Я.</i> Вибір оптимального технологічного процесу на базі автоматизованої оцінки його техніко-економічних параметрів .....	89

## РОЗДІЛ II. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Стеценко І., Савчук В.</i> Метод автоматизації тестування на проникнення вебатак .....	98
<i>Смірнова Т.В.</i> Формалізація та реалізація структури технологічного процесу електродугового напилення для оптимізаційної експертної системи .....	104
<i>Хорошко В., Шелест М., Ткач Ю.</i> Багатокритеріальна оцінка ефективності проєктів із забезпечення кібербезпеки .....	114
<i>Лытвынов В., Dorosh M., Bilous I., Voitsekhovska M., Nekhai V.</i> Development of the automated information system for organization's information security culture level assessment .....	124
<i>Дубягін О., Гур'єв В., Фірсова І.</i> Ефективність керуючого впливу на структурований об'єкт як числова характеристика міжрівневого балансу .....	133
<i>Корнієнко С., Корнієнко І., Дмитрієв В., Павленко А., Камак Д.</i> Формування кількісних характеристик випробувань для одержання точкових оцінок заданої якості .....	140

## РОЗДІЛ III. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

<i>Сатюков А., Приступа А., Мошель М.</i> Результати експериментальних досліджень впливу вологості дерев'яних матеріалів на проходження сигналів НВЧ діапазону .....	156
<i>Сінчук О., Бойко С., Городній О., Некрасов А., Онищенко А., Ножнова М.</i> Аспекти впровадження сонячних електростанцій в умовах гірничорудних підприємств .....	168
<i>Єршов Р., Войтенко В.</i> Частотно-імпульсний модулятор з адаптивною корекцією тривалості імпульсу .....	177
<i>Sobianin I., Skonechnyi V., Yarova I.</i> Portable electrocardiograph with GSM module for telemedicine .....	191
<i>Abdulhamid M., Peter D.</i> Remote health monitoring: fall detection .....	199
<i>Губаревич О., Гулак С., Горобченко О., Скляренко І.</i> Уточнений підхід до розрахунку втрат тягового двигуна пульсуючого струму .....	206

## РОЗДІЛ IV. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Миколенко С., Захаренко А.</i> Дослідження впливу амарантового та льняного борошна на якість печива .....	228
--	-----

<i>Процан Н., Ткаченко Л.</i> Активація ферментів під час розварювання житніх замісів підвищеної концентрації .....	241
<i>Trembus I., Semenenko N.</i> Oxidative-organosolvent delegification of wheat straw .....	250
<i>Ищенко О.</i> Плівки медичного призначення на основі полісахаридів.....	257
<i>Фролова Л., Бутиріна Т.</i> Дослідження колірних та антикорозійних властивостей пігментів в системі Fe-Al-Mg-O .....	264
<i>Скиба М., Воробйова В.</i> Дослідження титану (IV) оксиду модифікованого наночастинками срібла для очищення стічних вод текстильних виробництв.....	272
<i>Челябієва В., Щерба Л., Оляченко Т.</i> Використання житньої закваски в технології кисломолочних продуктів .....	280
<i>Лялик А., Покотило О., Кухтин М., Бейко Л.</i> Органолептичний і сенсорний аналіз сиркової пасти з лляною олією.....	287

#### РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

<i>Антонова Д.</i> Определение прогибов обычных и поврежденных железобетонных балок, усиленных углепластиком.....	296
<i>Крячок С.</i> Сучасний стан геодезичного моніторингу аеродромних покриттів в Україні.....	305
<i>Дубельт Т.</i> Дослідження впливу організаційно-технологічних факторів на тривалість реконструкції житлових будинків .....	315
<i>Бідаков А., Пустовойтова О., Расповов Є., Страшко Б.</i> Порівняльний аналіз експериментальних досліджень та чисельних розрахунків міцності вклеєних стержнів у CLT панелях.....	321
<i>Іванишин В., Бугай М., Корзаченко М.</i> Вивчення інженерно-геологічних умов ділянки під будівництво двоповерхової будівлі магазину квітів на пальовому фундаменті на вулиці Незалежності .....	329
<i>Менейлюк І., Руссий В.</i> Багатокритеріальний аналіз для вибору рішення укріплення схилу .....	337

<b>ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ НАУКОВИХ СТАТЕЙ</b> .....	345
---	-----

## CONTENT

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

<i>Bolotov M., Bolotov G.</i> Criteria determination of the borders of glow discharge energy stability in the welding heating conditions.....	9
<i>Pilipenko O., Kolesnik D., Berezniak A.</i> Exactness and errors of gearing of helicopter reducing gears .....	18
<i>Lebediev V., Dubovyi O., Loi S.</i> Formation (structuring) features and properties of heat protective coatings for plasma spraying.....	32
<i>Murashkovska V., Podzolkina A., Sklyar V., Syvodid O.</i> Analysis of the development trends of city public transport environment.....	42
<i>Borak K.</i> The prognostication of the change in soils abrasive properties to ensure the reliable operation of working bodies.....	53
<i>Zakharova I., Royanov V.</i> Objective reasoning of pulsator design features for the provision of pulsating spraying air flow during arc metallization .....	65
<i>Kalchenko V., Kalchenko V., Venzhega V., Vinnik V.</i> Modernization of the universal-binding machine with chpc VZ208F3 with the purpose of extension of technological possibilities for high-speed fresh machine .....	72
<i>Litvin O., Pankov S.</i> Robotic manipulators special purpose .....	81
<i>Stelmakh N., Sapon S., Ryzhuk Ya.</i> Selection of optimal technological process on the basis of automated assessment of its technical and economic parameters.....	89

## SECTION II. INFORMATION AND COMPUTER TECHNOLOGIES

<i>Stetsenko I., Savchuk V.</i> Automating web attack penetration testing method .....	98
<i>Smirnova T.</i> Formalization and implementation of the structure of the technological process of electric ARC spraying for the optimization experts system.....	104
<i>Khoroshko V., Shelest M., Tkach Yu.</i> Multi-criteria assessment of the project efficiency of cyber security provisions .....	114
<i>Lytvynov V., Dorosh M., Bilous I., Voitsekhovska M., Nekhai V.</i> Development of the automated information system for organization's information security culture level assessment .....	124
<i>Dubyagin A., Guryev V., Firsova I.</i> Efficiency of managing impact on a structured object as a numerical characteristic of inter-level balance .....	133
<i>Korniienko S., Korniienko I., Dmytriiev V., Pavlenko A., Kamak D.</i> Formation of tests quantitative characteristics to obtain point quality assessments.....	140

## SECTION III. POWER ENGINEERING, ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTROMECHANICAL ENGINEERING

<i>Satukov A., Prystupa A., Moshel M.</i> Results of experimental research on the influence of wood material moisture on the transmission of UHF band signals .....	156
<i>Sinchuk O., Boiko S., Gorodny O., Nekrasov A., Onishchenko A., Nozhnova M.</i> Aspects of implementation of solar power plants in the conditions of mining enterprises.....	168
<i>Yershov R., Voytenko V.</i> Pulse-frequency modulator with adaptive pulse duration correction .....	177
<i>Sobianin I., Skonechnyi V., Yarova I.</i> Portable electrocardiograph with GSM module for telemedicine.....	191
<i>Abdulhamid M., Peter D.</i> Remote health monitoring: fall detection .....	199
<i>Gubarevych O., Goolak S., Gorobchenko O., Skliarenko I.</i> Refined approach to the losses calculation of pulsating current traction engine.....	206

## SECTION IV. CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGIES

<i>Mykolenko S., Zaharenko A.</i> Effect of amaranth and flaxseed flour on cookies quality .....	228
<i>Protsan N., Tkachenko L.</i> Activating of enzymes while tenderizing of rye batches of high concentration while while tenderizing of rye batches of rye batches .....	241

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES	
<i>Trembus I., Semenenko N.</i> Oxidative-organosolvent delegification of wheat straw .....	250
<i>Ishchenko O.</i> Medical purpose films based on polysaccharides.....	257
<i>Frolova L., Butyrina T.</i> Research of color and anti-corrosion properties of pigments in the Fe-Al-Mg-O-H system .....	264
<i>Skiba M., Vorobyova V.</i> Investigation titanium (IV) oxide modified by silver nanoparticles for textile wastewater treatment.....	272
<i>Cheliabieva V., Shcherba L., Oliachenko T.</i> Use of rye flour sourdough in the technology of dairy products.....	280
<i>Lialyk A., Pokotulo O., Kukhtyn M., Beyko L.</i> Organoleptic and sensory analysis of flaxseed cheese paste .....	287
<b>SECTION V. CONSTRUCTION AND GEODESY</b>	
<i>Antonova D.</i> Determination of deflections of conventional and damaged reinforced concrete beams reinforced with carbon fiber .....	296
<i>Kryachok S.</i> Current status of aerodrome coatings geodetic monitoring in Ukraine .....	305
<i>Dubelt T.</i> The study of impact of technological and organizational factors on the durability of the reconstruction of the dwellings.....	315
<i>Bidakov A., Pustovoitova O., Raspopov Ie., Strashko B.</i> Comparative analysis of experimental research and numerical calculations of glued-in steel rods strength in clt panels .....	321
<i>Ivanyshyn V., Buhay V., Korzachenko M.</i> Study of the engineering and geological conditions of the site for the construction of a two-story building of a flower shop on pile foundations on nezalezhnosti street .....	329
<i>Meneiliuk I., Russyi V.</i> Multi-criteria analysis for the selection of the decision for strengthening the slope .....	337
<b>BASIC REQUIREMENTS FOR EXECUTION AND SUBMISSION OF MANUSCRIPTS OF SCIENTIFIC ARTICLES .....</b>	
	345



# РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.791.4:539.378.3

DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-9-17

Максим Болотов, Геннадій Болотов

## ВИЗНАЧЕННЯ МЕЖ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СТАБІЛЬНОСТІ ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ В УМОВАХ ЗВАРЮВАЛЬНОГО НАГРІВУ

**Актуальність теми дослідження.** Для отримання зварних з'єднань із високолегованих сталей, тугоплавких та активних металів, твердих та надтвердих сплавів ефективно застосовують способи зварювання тиском, зокрема, дифузійне зварювання, яке має суттєві переваги поряд з іншими видами зварювання та дозволяє отримувати зварні конструкції складної форми з мінімальними деформаціями.

**Постановка проблеми.** Серед джерел енергії, що застосовують для дифузійного зварювання, найбільш перспективним є нагрів тліючим розрядом, що горить у середовищі інертних або активних газів при їх тиску нижче за атмосферний і який забезпечує можливість регулювати в широких межах інтенсивність і локальність нагріву. Однак суттєвим недоліком тліючого розряду є його недостатня стабільність і здатність переходити в дугову форму, що може призводити до оплавлення і руйнування деталей.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Широка номенклатура зварних виробів визначає необхідність регулювання енергетичних характеристик розряду в значних межах. У цих умовах проблема керуваності тліючого розряду стає безпосередньо пов'язаною із проблемою забезпечення його стабільності. Питанням підвищення стійкості тліючого розряду присвячена значна кількість досліджень, однак у своїй більшості вони відносяться до процесів хіміко-термічної або лазерної обробки матеріалів і не відповідають режимам горіння тліючого розряду, що застосовуються в умовах зварювання.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** До теперішнього часу, всі спроби забезпечити стабільне існування потужнострумового тліючого розряду в межах обраної форми в різних технологічних процесах не є вельми ефективними, оскільки не беруть до уваги мультифакторність проблеми, головним чином зосереджуючись лише на енергетичних аспектах.

**Постановка завдання.** Метою роботи є вдосконалення методів керування і стабілізації потужнострумового тліючого розряду в процесах дифузійного зварювання.

**Виклад основного матеріалу.** Для забезпечення стабільності тліючого розряду в роботі запропоновано використовувати певний критерій, який поєднує параметри режиму горіння розряду з умовами переходу його в електричну дугу. Таким критерієм у роботі обрано співвідношення середньої напруги на розрядному проміжку, що визначається частотою виникнення дугових пробіїв, до напруги горіння стабільного тліючого розряду. За відсутності дугових пробіїв значення критерію наближається до максимального  $K = 1$ , зі збільшенням частоти імпульсів дуги величина  $K$  поступово знижується.

Оскільки стійкість тліючого розряду суттєво залежить від основних параметрів режиму, у роботі визначено інтегральний показник, який поєднаний із критерієм стійкості. У ролі такого показника застосовано добуток струму розряду та тиску газу. Встановлено аналітичну залежність критерію стійкості від обраного показника. Розроблено схему автоматичного пристрою переривання процесу нагрівання за умови, якщо фактичне значення коефіцієнта стійкості опуститься нижче його заданого значення.

**Висновки відповідно до статті.** Оптимальне регулювання тліючого розряду в процесах дифузійного зварювання за умов забезпечення його стабільності може ефективно здійснюватися на основі критерію стійкості, що визначається як співвідношення середнього значення напруги на розрядному проміжку до напруги горіння стабільного тліючого розряду, і величина якого при оптимальному процесі становить  $0,5 \dots 1$ .

**Ключові слова:** дифузійне зварювання; тліючий розряд; стійкість розряду.

Рис.: 4. Табл.: 1. Бібл.: 14.

**Актуальність теми дослідження.** У багатьох галузях промисловості створення нових конструкцій і машин супроводжується дедалі більш широким застосуванням металів і сплавів, що володіють високими механічними властивостями при різних температурах та навантаженнях, корозійною та ерозійною стійкістю в різних середовищах. До таких матеріалів належать високолеговані корозійностійкі та жароміцні сталі та сплави, тугоплавкі й активні метали, тверді та надтверді сплави. Більшість з цих матеріалів є вартісними, малопластичними, мають високу температуру плавлення і твердість. З'єднання цих матеріалів здебільшого пов'язане з певними труднощами.

Для отримання зварних з'єднань таких матеріалів у однорідних та різнорідних сполученнях ефективно застосовують способи зварювання тиском, зокрема дифузійне зварювання. У порівнянні з іншими видами зварювання воно має суттєві переваги: відносно низьку температуру нагрівання виробів, обмежене зусилля стискання в процесі зварювання, що дає можливість отримувати зварні конструкції складної форми з мінімальними деформаціями.

**Постановка проблеми.** Для дифузійного зварювання застосовують різні види джерел нагріву, що відрізняються способом перетворення електричної енергії в теплову, інтенсивністю і локальністю нагріву. Широка номенклатура зварних з'єднань висуває до джерел енергії комплекс специфічних вимог, що стосуються їх прийнятності до будь-яких матеріалів, точності регулювання як повної, так і питомої потужності та температури нагріву.

Серед джерел енергії, що використовують для дифузійного зварювання, найбільш повно вказаним вимогам відповідає нагрівання тліючим розрядом, що горить у середовищі інертних або активних газів при їх тиску нижче за атмосферний і який забезпечує можливість регулювання в широких межах інтенсивності й локальності нагріву та розподіл теплової енергії у виробі [1].

Однак у виробничих умовах можуть скластися різні поєднання умов на поверхні виробу, який водночас є одним з електродів розряду – заземленим катодом, які можуть негативно впливати на стабільність горіння розряду й викликати його перехід у електричну дугу. Нагрівання із розподіленого стає концентрованим, що може призводити до оплавлення і руйнування зварюваного виробу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Подальший розвиток і розширення промислового застосування тліючого розряду як джерела енергії для процесів дифузійного зварювання вимагають вирішення проблем, пов'язаних із вдосконаленням способів керування технологічними параметрами розряду. Насамперед це викликано необхідністю автоматизації процесів нагріву металу (зварюваних деталей). Широкий діапазон зварних виробів – масою від одиниць грамів до десятків кілограмів визначає необхідність регулювання потужності розряду в значних межах. У цих умовах проблема керованості тліючого розряду стає безпосередньо пов'язаною з проблемою забезпечення стабільності його горіння. Основним завданням при цьому є визначення припустимих меж регулювання основних енергетичних характеристик тліючого розряду, що забезпечують високу продуктивність процесу при стійкому горінні розряду.

У роботі [2] оптимізація процесу дифузійного зварювання в тліючому розряді здійснюється на основі розробленої детермінованої динамічної моделі іонного нагріву, що дозволяє визначати значення основних параметрів режиму залежно від характеристик зварюваних деталей, але без їх зв'язку з умовами стабільності існування тліючого розряду. У роботах [3; 4; 5] здійснена спроба поєднати стабільність тліючого розряду з його енергетичними характеристиками, однак як параметри регулювання обрані лише один – струм розряду, і не береться до уваги, що процес іонного нагріву є багатофакторним. У роботі [4] сформульовані основні вимоги до керування параметрами нагріву тліючим розрядом та забезпечення стабільності його існування, але без практичних рекомендацій для їх реалізації. У роботах [6; 7] наведені результати застосування технічних засобів для стабілізації та керування тліючим розрядом для конкретних технологічних умов, що не дає змоги їх узагальнення.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Таким чином, до теперішнього часу, всі спроби забезпечити стабільне існування потужнострумового тліючого розряду в межах обраної форми в різних технологічних процесах, включаючи зварювання, паяння та поверхневу обробку матеріалів, не є вельми ефективними, оскільки вони не беруть до уваги мультифакторність проблеми, головним чином зосереджуючись лише на енергетичних аспектах. Це потребує подальших, більш ретельних досліджень цього питання.

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

**Метою роботи** є вдосконалення методів керування і стабілізації горіння потужнострумового тліючого розряду в процесах дифузійного зварювання.

**Виклад основного матеріалу.** Зварювання здійснюється в режимі нормального тліючого розряду при підвищених тисках газу 2...15 кПа і струмах розряду 1...20 А. У цьому режимі величина катодного падіння потенціалу залежить лише від роду газу та зварюваного матеріалу, а густина струму на катоді (зварюваних деталях), при достатньо значній площі катода, залежить від роду газу і прямо пропорційна квадрату тиску газу (закон Гея). При збільшенні струму розряду площа катодної плями (площа тліючого світіння) на поверхні зварюваних деталей зростає пропорційно струму до заповнення всієї площі поверхні катода, після чого починається збільшення катодного падіння потенціалу (режим аномального тліючого розряду). При деякому повному струмі цей режим стає нестабільним, а на поверхні катода утворюється катодна пляма дуги, тобто режим горіння розряду з тліючого переходить у дуговий [8].

Аналогічне явище спостерігається і при підвищенні тиску газу, яке супроводжується збільшенням густини струму в катодній плямі нормального тліючого розряду. Зі збільшенням тиску газу зростає чутливість розряду до стану поверхні катода. У цих умовах на стабільність горіння тліючого розряду суттєво впливає емісійна неоднорідність поверхні катода, тобто його здатність емітувати електрони в результаті бомбардування іонами, обумовлена наявністю на поверхні зварюваних деталей забруднень різного роду, що мають меншу, ніж у металі, роботу виходу електронів [9]. На стабільність горіння тліючого розряду впливає також мікрорельєф поверхні катода, оскільки із підвищенням тиску газу висота шорсткості стає порівняною з протяжністю області катодного падіння потенціалу, що викликає найбільш суттєве викривлення електричного поля в поверхні катода. Це супроводжується виникненням мікродугових розрядів на вершинах мікронерівностей [10].

Підвищення тиску газу поряд зі збільшенням густини струму на катоді, призводить також до зростання питомої об'ємної потужності в позитивному стовпі розряду  $jE$ , де  $j$  – густина струму в перерізі позитивного стовпа, а  $E$  – поздовжня напруженість електричного поля в стовпі. Збільшення  $jE$  обмежене можливістю контракції (стискання) тліючого розряду й переходу його у шнурову форму. У шнуровому режимі напруга горіння розряду знижується, а зі зростанням струму або тиску газу шнур перетворюється в дуговий розряд [11].

При відносно незначних струмах і тисках газу переходить тліючого розряду у дуговий здійснюються епізодично і тривають обмежений час – 1...2 напівперіоди (рис. 1, б), після чого самовільно загасають. Частота таких дугових пробоїв визначається як характеристиками поверхні катода, так і режимом горіння розряду. Із підвищенням питомих енергетичних характеристик розряду частота таких пробоїв зростає (табл. 1) [12], і після досягнення певних значень струму і тиску газу тліючий розряд переходить у дугову форму (рис. 1, в).

Таблиця 1

Порівняльна характеристика джерел живлення тліючого розряду

Вид тліючого розряду	Кількість дуг за 1 хв при струмі розряду, А								
	1	1,5	2	2,35	2,5	2,8	3	4	5
З ІСП*	0,1		0,2		0,23		0,25	2	4,75
з R <sub>b</sub> **	0,1	0,25		1,25		5		11	18

\* – джерело живлення на основі індуктивно-емісійного перетворювача (зовнішня характеристика наближається до вертикальної);

\*\* – джерело живлення із стабілізуючим активним опором у колі розряду (зовнішня характеристика круто спадаюча).

У зв'язку з цим при зварюванні в тліючому розряді, особливо при автоматичному керуванні процесом, дуже важливим стає визначення меж зміни енергетичних параметрів тліючого розряду, що забезпечують високу продуктивність нагріву і водночас за-

хист виробів від оплавлення концентрованими дуговими розрядами. Для цього необхідно виділити будь-який показник (критерій), який дозволить би поєднати параметри горіння тліючого розряду з імовірністю переходу його в електричну дугу.

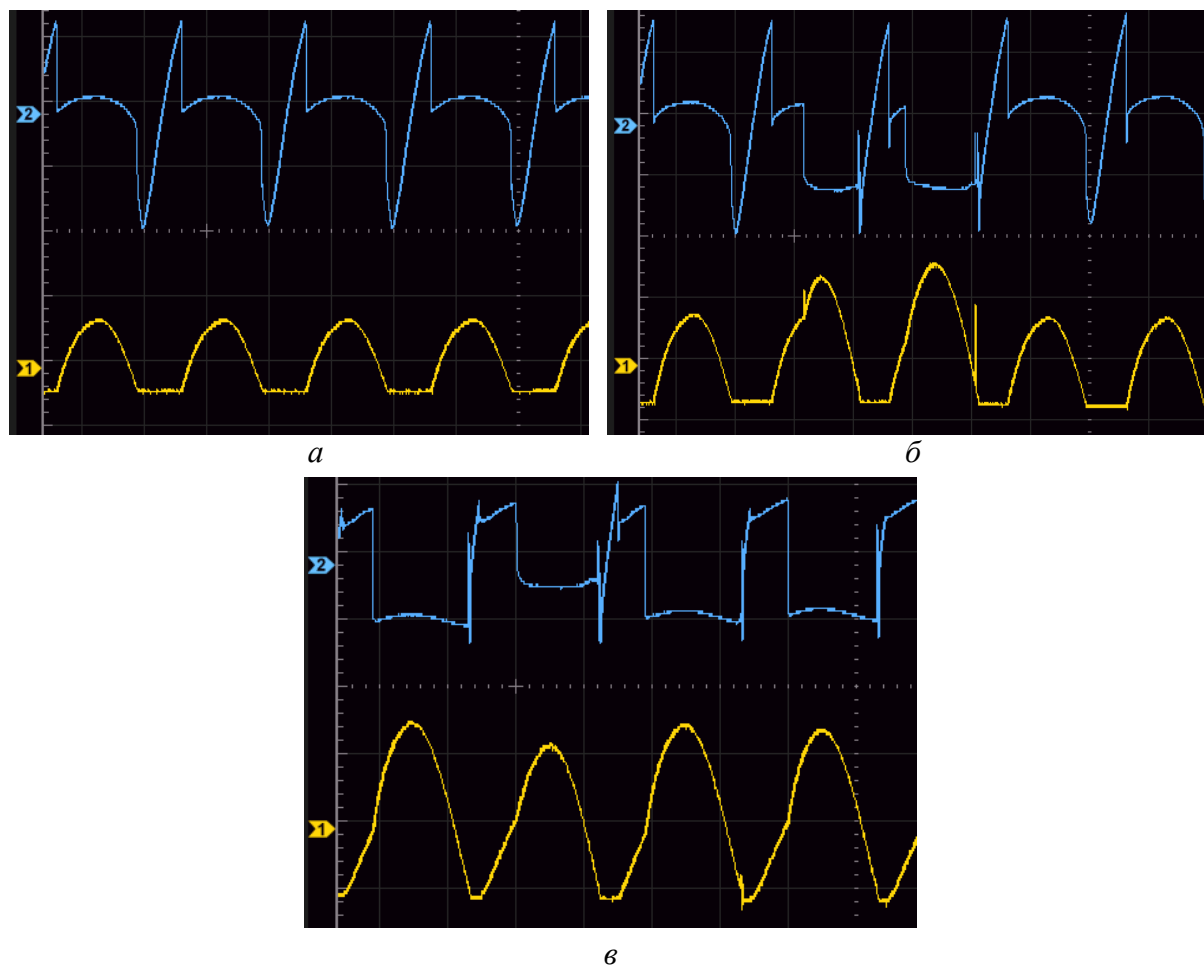


Рис. 1. Осцилограми напруги (зверху) та струму тліючого розряду при стабільному (а) та перехідних (б, в) режимах горіння

Найбільш характерною і однозначною ознакою переходу тліючого розряду в дугувий є значне зниження падіння напруги на розрядному проміжку. Це викликано насамперед, що падіння потенціалу в катодній області тліючого розряду (150...400 В) значно перевищує аналогічне значення в електричній дузі (10...30 В).

У цьому випадку як критерій стійкості горіння тліючого розряду можливо прийняти відношення:

$$K = \frac{U_{p.c.p.}}{U_{p.o.}}, \quad (1)$$

де  $U_{p.c.p.}$  – середнє значення напруги на розрядному проміжку за контрольний період, що визначається частотою виникнення дугових пробоїв;

$U_{p.o.}$  – напруга стабільного горіння тліючого розряду при заданих параметрах режиму.

У свою чергу, співвідношення (1) буде пропорційним такому співвідношенню:

$$\frac{U_{p.c.p.}}{U_{p.o.}} \sim \frac{\tau_p}{\tau_p + \tau_d}, \quad (2)$$

де  $\tau_p$  – тривалість горіння тліючого розряду за контрольний проміжок часу;

$\tau_d$  – тривалість дугових пробоїв, що виникають у міжелектродному проміжку за той самий період.

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

За відсутності дугових пробоїв, коли нагрів здійснюється стабільним тліючим розрядом, тобто  $\tau_0 = 0$ , а середня напруга на розряді  $U_{p,cp}$  дорівнює  $U_{p,o}$ , критерій стійкості наближається до максимального значення  $K = 1$ . Зі збільшенням частоти імпульсів дуги або їх тривалості величина  $K$  поступово знижується.

Як свідчать результати осцилографування перехідних процесів у тліючому розряді (рис. 1), формування електричної дуги в напівперіодах струму здійснюється через стабільний тліючий розряд, тому середнє значення напруги на розрядному проміжку буде становити орієнтовно:

$$U_{p,cp} \approx \frac{U_{p,o} + U_d}{2}. \quad (3)$$

Зі збільшенням потужності тліючого розряду момент формування електричної дуги зміщується ближче до початку напівперіоду і при певних струмах розряду дугові пробої починають займати більшу його частину. У цих умовах критерій стійкості прагне до деякого мінімального значення  $U_d/U_{p,o}$  (де  $U_d$  – падіння напруги на розрядному проміжку при дугових пробоях), тобто  $K \rightarrow \min$ .

Беручи до уваги різні наслідки для зварюваних деталей від дії дугових розрядів різної потужності та частоти виникнення, величину критерія стійкості можна варіювати в деяких межах. Електричні дуги, що виникають при горінні тліючого розряду малої потужності (малоамперного розряду), також будуть малопотужними і не забезпечать критичного впливу на зварювані деталі, тому можна прийняти  $K < 1$ . Зі збільшенням потужності виникаючих дугових розрядів та/або їх частоти критерій стійкості необхідно підвищувати  $K \rightarrow 1$ .

Оскільки стійкість тліючого розряду, як вказано вище, великою мірою залежить від основних параметрів режиму його горіння – струму та тиску газу, доцільно визначити деякий інтегральний показник, що характеризує режим горіння тліючого розряду, і пов'язати його з критерієм стійкості  $K$ .

У роботі [13] у ролі такого показника прийнято струм розряду. Оскільки стійкість тліючого розряду визначається не тільки абсолютними значеннями його потужності, а й питомими енергетичними характеристиками в плямі нагріву та об'ємі розряду, які визначаються тиском газу, такий показник не можна вважати адекватним. У роботі [14] як інтегральний показник стійкості приймається критична величина добутку струму розряду і тиску газу  $(I \cdot P)_{кр}$ . Однак у цій роботі розглядається стійкість протяжного циліндричного та малоамперного тліючого розряду (струм менше 1 А) у трубках обмеженого діаметра. При цьому, як впливає з наведеного критерію, між струмом і тиском газу обраний лінійний зв'язок.

При зварюванні тліючий розряд не обмежується стінками і при зміні струму розряду і тиску газу може природним чином змінювати свої поперечні розміри. У таких умовах залежність між струмом і тиском газу, що характеризує стійкість розряду, має більш складний характер. На рис. 2 наведено отримані експериментально значення параметрів режиму, що відповідають початку появи дугових пробоїв (початку нестабільності розряду)  $P_{нн}$ , та стабільного переходу тліючого розряду в дуговий  $P_{кр}$  для декількох газових середовищ – гелію, аргону, азоту.

Обробка кривих, наведених на рис. 2, свідчить, що в цьому випадку (для вільного тліючого розряду) інтегральний показник, що поєднує граничні значення струму розряду і тиску газу може бути представлений у вигляді добутку  $(I^{1/2} \cdot P)_{кр}$ . При цьому, згідно з рис. 2, гранична величина цього добутку становить для гелію – 82, аргону – 39, азоту –  $26,6 \text{ A}^{1/2} \cdot \text{kPa}$ .

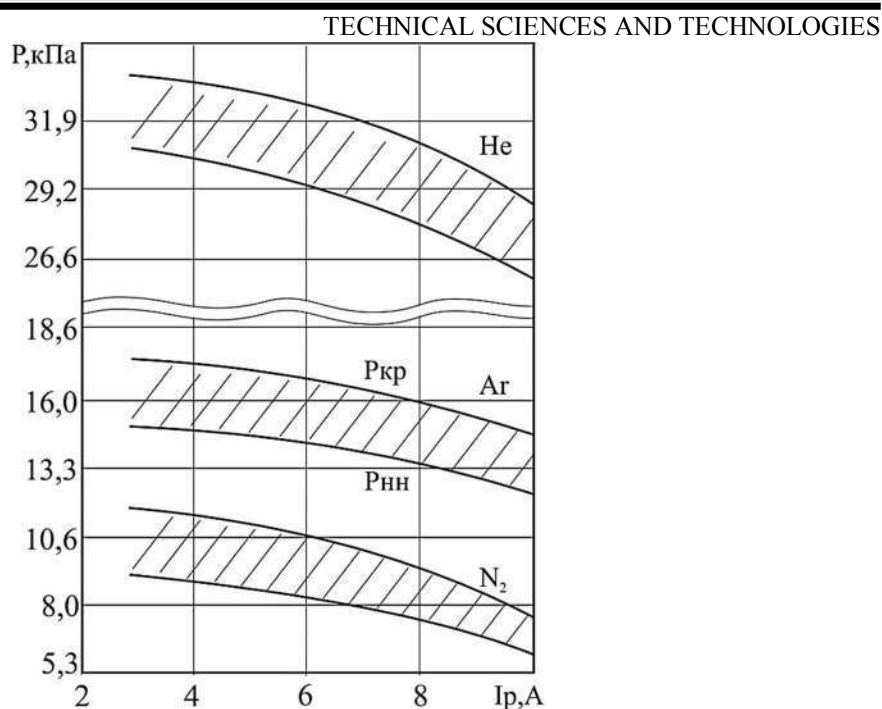


Рис. 2. Експериментальні залежності граничних значень тиску газу (аргону, азоту та гелію) у робочій камері від струму тліючого розряду  $I_p$ . ( $P_{нн}$  – тиск газу, що відповідає початку появи нестабільностей тліючого розряду,  $R_{кр}$  – критичні значення тиску газу, при яких спостерігається перехід тліючого розряду у дуговий)

Граничну величину критерію стійкості процесу нагріву, як було вказано, можливо задавати попередньо, зважаючи на конструктивні особливості зварюваних деталей – маси, товщини, форми перерізу. На рис. 3 наведена орієнтовна залежність граничних значень цього критерію від параметра  $(I^{1/2} \cdot p)$  при зварюванні в середовищі азоту. При зварюванні на режимах, що суттєво нижче критичних  $(I^{1/2} \cdot p) \ll (I^{1/2} \cdot p)_{кр}$ , можливо помітно знизити значення критерію стійкості (до 0,5...0,6).

Водночас підвищення продуктивності нагріву вимагає проведення процесу на режимах, коли значення параметра  $(I^{1/2} \cdot p)$  наближається до критичних, тобто нагрів здійснюється на значних струмах розряду.

У цих умовах навіть короточасний вплив потужних дуг на виріб здатний призвести до його оплавлення, тому вимоги до критерію стійкості зростають, що проявляється в підвищенні його значення до 0,9...0,95.

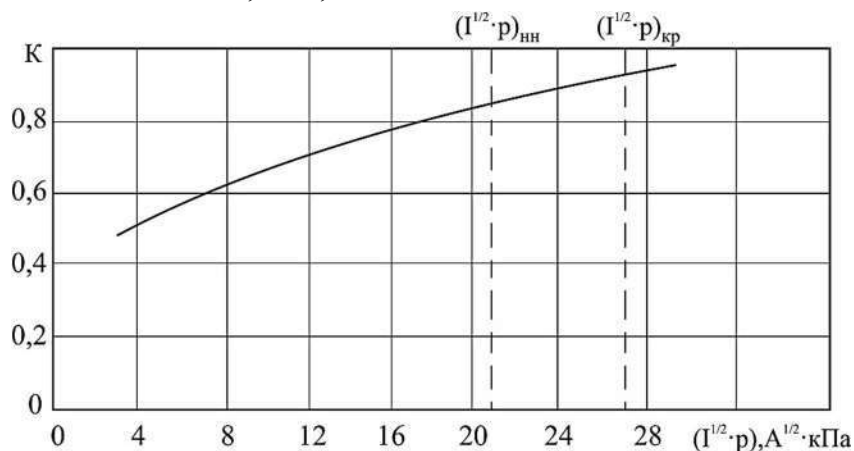


Рис. 3. Залежність граничних значень критерію стійкості тліючого розряду  $K$  від інтегрального параметра  $(I^{1/2} \cdot p)$

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Якщо в процесі зварювання фактична величина  $K$  опуститься нижче заданого рівня, процес нагріву повинен бути перерваним для попередження руйнування деталей, або при незмінному тиску газу здійснено зниження струму розряду до значень, коли  $(I^{1/2} \cdot p) < (I^{1/2} \cdot p)_{кр}$ .

Ця операція може бути здійснена як оператором, так і автоматично. На рис. 4 наведено структурну схему автоматичного виконання цієї операції.

На один із входів порівняльного елемента 1 подається задана напруга  $K \cdot U_{p,0}$ , яка дорівнює припустимому для цього процесу значенню середньої напруги на розряді  $U_{p,сп}$ , визначеному з урахуванням заданої величини критерію стійкості (рис. 3). На другий вхід цього елемента через датчик напруги 5 та інтегратор 6 поступає фактичне значення  $U_{p,сп}$ . Інтегратор забезпечує реєстрацію не миттєвих значень напруги на розрядному проміжку  $U_p$ , а деякого середнього значення з урахуванням короточасних перехідних процесів, що супроводжуються стрибками напруги.

Величина напруги горіння тліючого розряду  $U_{p,0}$  може бути визначена попередньо, оскільки вона залежить переважно від роду й тиску газу  $p$  та міжелектродної відстані  $l$  і меншою мірою від струму розряду. Для визначення орієнтовної величини цієї напруги можна скористатись залежністю  $U_{p,0} = A p_{mln}^n$ , де  $A$ ,  $m$ ,  $n$  – емпіричні коефіцієнти, значення яких становлять для аргону 531; 0,12 та 0,11, а для азоту – 812; 0,19 та 0,15 відповідно.

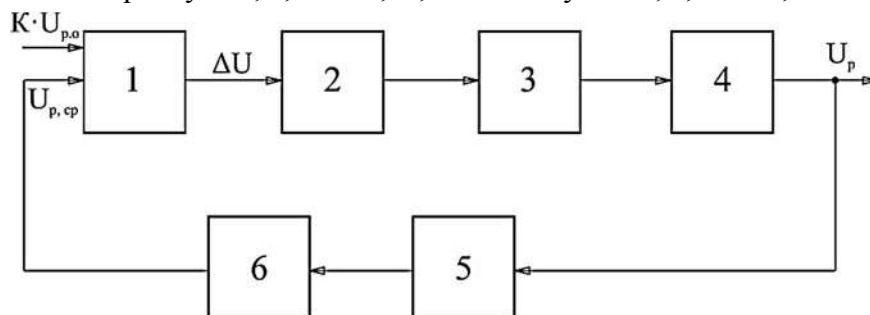


Рис. 4. Структурна схема автоматичної стабілізації тліючого розряду на основі критеріальної оцінки межі стійкості горіння

Якщо в процесі зварювання фактичне значення середньої напруги опуститься нижче заданого значення, пороговий елемент 2 відключить тиристорний випрямляч 3 живлення тліючого розряду 4, або за допомогою фазорегулятора на його вході змінить кут відхилення тиристорів у бік зменшення струму розряду.

**Висновки відповідно до статті.** Оптимальне регулювання тліючого розряду в процесах дифузійного зварювання за умов забезпечення його стабільності може ефективно здійснюватися на основі критерія стійкості, що визначається як співвідношення середнього значення напруги на розрядному проміжку до напруги горіння стабільного тліючого розряду, і величина якого при оптимальному процесі становить 0,5...1.

#### Список використаних джерел

1. Котельников Д. И. Сварка давлением в тлеющем разряде. Москва: Металлургия, 1981. 116 с.
2. Болотов М. Г. Анализ основных нестабильностей тлеющего разряда средних давлений в условиях обработки материалов. *Технічні науки та технології*. 2018. № 2 (12). С. 103–116.
3. Сиваков А. Л. Управление процессом диффузионной сварки. *Обмен опытом в радиопромышленности*. 1987. № 5. С. 58–62.
4. Котельников Д. И. Технологические особенности применения тлеющего разряда при сварке. *Технология и организация производства*. 1976. № 7. С. 57–59.
5. Напартович А. Л., Старостин А. Н. Механизмы неустойчивости тлеющего разряда повышенного давления. *Химия плазмы*. 1979. Вып. 6. С. 153.

6. Bolotov G. P., Bolotov M. G. Determination of external stabilizing resistor value in the glow discharge power supply while welding. *IEEE 37th International Conference «Electronics and Nanotechnology ELNANO'2017»*. April 2017. P. 365–369.
7. Bolotov G. P., Bolotov M. G., Yushchenko S. M. Stabilization of high-current glow discharge under the welding conditions. *IEEE 38th International Conference «Electronics and Nanotechnology ELNANO'2018»*. April 2018. P. 521–525
8. Абильсиитов Г. А., Велихов Е. П., Голубев В. С., Лебедев Ф. В. Мощные газоразрядные СО<sub>2</sub>-лазеры. Москва: Наука, 1984. 106 с.
9. Елецкий А. В., Рахимов А. Т. Неустойчивости в плазме газового разряда. *Химия плазмы*. 1974. Вып. 4. С. 123.
10. Котельников Д. И. Применение оборудования для сварки и пайки в тлеющем разряде. Чернигов: Облсовет НТО, 1980. 56 с.
11. Недоспасов А. В., Хайт В. Д. Колебания и неустойчивости низкотемпературной плазмы. Москва: Наука. 1979. 189 с.
12. Гайсин Ф. М., Саттаров Р. К., Халиков Р. А. Исследование перехода тлеющего разряда в электрическую дугу при высоких температурах. Казань: КАИ, 1975. 12 с.
13. Ульянов К. Н. Теория нормального тлеющего разряда при среднем давлении. *Теплофизика высоких температур*. 1972. Т. 10, № 5. С. 931.
14. Ecker, G., Kroll W., Zoller O. Thermal Instability of the plasma column. *Phys. Fluids*. 1964. V. 7, № 12. P. 2001.

### References

1. Kotelnikov D. I. (1981) *Svarka davleniem v tleyuschem razryade [Glow discharge welding]*. Moscow: Metallurgiiia [in Russian].
2. Bolotov, M. G. (2018). Analiz osnovnih nestabilnostei tliuchoho rozriada serednikh tiskiv v umovakh obrobki materialiv [Analysis of the main instabilities of medium pressure glow discharge in the conditions of materials treatment]. *Tekhnichni nauki ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, 2 (12), 103–116 [in Ukrainian].
3. Sivakov, A. L. (1987). Upravlenie protsessom diffuzionnoi svarki [Diffusion welding process control]. *Obmen opytom v radiopromyshlennosti – Exchange of experience in the radio industry*, 5, 58–62 [in Russian].
4. Kotelnikov, D. I. (1976). Tekhnologicheskie osobennosti primenenisa tlesushcheho razriada pri svarke [Technological peculiarities of application of glow discharge during welding]. *Tekhnologiya i organizatsiya proizvodstva – Technology and organization of production*, 7, 57–59 [in Russian].
5. Napartovich, A. L., Starostin, A. N. (1979). Mekhanizmy neustoichivosti tleiushchego razriada povyshennogo davleniia [Mechanisms of instability of glow discharge of high pressure]. *Khimiia plazmy – Chemistry of plasma*, 6, 153 [in Russian].
6. Bolotov, G. P., Bolotov M. G. (2017). Determination of external stabilizing resistor value in the glow discharge power supply while welding. *IEEE 37th International Conference «Electronics and Nanotechnology ELNANO'2017»* (pp. 365–369). Kyiv [in Ukrainian].
7. Bolotov, G. P., Bolotov M. G., Yushchenko, S. M. (2018). Stabilization of high-current glow discharge under the welding conditions. *IEEE 38th International Conference «Electronics and Nanotechnology ELNANO'2018»* (pp. 521–525). Kyiv [in Ukrainian].
8. Abilsiitov, H. A., Velikhov, E. P., Golubev, V. S., Lebedev, F. V. (1984). *Moschnyie gazorazryadnyie SO2-lazeryi [Powerful CO2 discharge lasers]*. Moscow: Nauka [in Russian].
9. Elets'kii, A. V., Rakhimov, A. T. (1974). Neustoichivosti v plazme gazovogo razriada [Instabilities in plasma gas discharge]. *Khimiia plazmy – Chemistry of plasma*, 4, 123 [in Russian].
10. Kotelnikov, D. I. (1980). *Primenenie oborudovaniya dlya svarki i payki v tleyuschem razryade [The use of equipment for welding and soldering in a glow discharge]*. Chernigov: Oblsovnet NTO [in Russian].
11. Nedospasov, A. V., Khait V. D. (1979). *Kolebaniia i neustoichivosti nizkotemperaturnoi plazmy [Oscillations and instability of low-temperature plasma]*. Moscow: Nauka [in Russian].
12. Gaysin, F. M., Sattarov, R. K., Khalikov, R. A (1975). *Issledovanie perekhoda tleiushchego razriada v elektricheskuiu dugu pri vysokikh temperaturakh [Investigation of the transition of a glow discharge into an electric arc at high temperatures]*. Kazan: KAI [in Russian].



## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

13. Ulianov, K. N. (1972). Teoriia normalnogo tleiushchego razriada pri srednem davlenii [The theory of normal glow discharge at average pressure] // Teplofizika vysokikh temperatur – Thermophysics of high temperatures, 10 (5), 931 [in Russian].

14. Ecker, G., Kroll W., Zoller O. (1964). *Thermal Instability of the plasma column. Phys. Fluids*, 7 (12), 2001.

UDC 621.791.4:539.378.3

Maksym Bolotov, Gennady Bolotov

## CRITERIA DETERMINATION OF THE BORDERS OF GLOW DISCHARGE ENERGY STABILITY IN THE WELDING HEATING CONDITIONS

**Introduction.** To obtain welded joints from high-alloy steels, refractory and active metals, hard and superhard alloys, pressure welding methods, in particular, diffusion welding, which has significant advantages along with other types of welding and allows to obtain complex-shaped welded structures with minimal deformations, are effectively used.

**Problem statement.** Among the energy sources used for diffusion welding, the most promising is the heating by a glow discharge, which burns in an environment of inert or active gases at their pressure below atmospheric, and which makes it possible to regulate the intensity and locality of heating over wide limits. However, a significant drawback of a glow discharge is its lack of stability and the ability to transform into an arc shape, which can lead to the melting and destruction of parts.

**Actual scientific researches and issues analysis.** A wide range of welded products determines the need to regulate the energy characteristics of the discharge in considerable limits. Under these conditions, the problem of controllability of a glow discharge becomes directly related to the problem of ensuring its stability. A significant amount of research is devoted to the issue of increasing the stability of a glow discharge, but most of them are related to the processes of chemical-thermal or laser processing of materials and do not correspond to the burning discharge glow regimes used under welding conditions.

**The research objective.** The aim of the work is to improve the management and stabilization of a high-current glow discharge in the processes of diffusion welding.

**The statement of basic materials.** To ensure the stability of a glow discharge in the work, it was proposed to use a certain criterion that combines the parameters of the discharge mode with the conditions for its transition into an electric arc. The ratio of the average voltage across the discharge gap, which is determined by the frequency of occurrence of arc breakdowns, to the burning voltage of a stable glow discharge, is chosen as such a criterion. In the absence of arc breakdowns, the criterion value approaches the maximum  $K = 1$ , with an increase in the frequency of arc pulses, the  $K$  value gradually decreases.

Since the stability of a glow discharge significantly depends on the basic parameters of the mode, an integral index is defined in the work, which is connected to the stability criterion. As such an indicator, the product of discharge current and gas pressure was used. The analytical dependence of the stability criterion on the selected indicator is established. A scheme has been developed for an automatic device for interrupting the heating process, provided that the actual value of the stability coefficient drops below its specified value.

**Conclusions.** Optimal regulation of a glow discharge in diffusion welding processes, provided that it is stable, can be effectively carried out on the basis of the stability criterion, defined as the ratio of the average value of the voltage across the discharge gap to the burning voltage of a stable glow discharge, and its value at the optimal process is 0.5 ... 1.

**Keywords:** diffuse welding; glow discharge; discharge stability.

**Fig.:** 4. **Table:** 1. **References:** 9.

**Болотов Максим Геннадійович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Bolotov Maksym** – PhD in Technical Sciences, Senior Lecturer of Department of Welding Technology and CAD/CAM/CAE Systems of Building Structures, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** bolotovmg@gmail.com

**Scopus:** 57190377278

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-0915-4132>

**Болотов Геннадій Павлович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Bolotov Gennady** – Doctor in Technical Sciences, Doctor, Doctor of Department of welding technology and CAD/CAM/CAE systems of building structures, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** bolotovgp@mail.ua

**ResearcherID:** H-5304-2014

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

УДК 629.735.45

DOI: 10.25140/2411-5363-20209-1(19)-18-31

Олег Пилипенко, Денис Колесник, Анатолій Березняк

**ТОЧНІСТЬ ТА ПОГРІШНОСТІ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ  
ВЕРТОЛЬОТНИХ РЕДУКТОРІВ**

**Актуальність теми дослідження.** Якість робочих поверхонь зубчастих коліс формується під впливом конструктивних факторів (модуля, числа зубців і матеріалу коліс, твердості матеріалу заготовок та їх фізико-механічних властивостей) і технологічних факторів (швидкості та глибини різання, подачі, ступеня зношуваності інструменту). Зубчасту передачу можна виконати тільки з деяким наближенням до функціонально точної, оскільки елементи зубчастої передачі не можуть бути виготовлені без відхилень. Рівень цих відхилень визначається не тільки технічною, але й економічною доцільністю, а також можливостями виробництва.

**Постановка проблеми.** Виявлення можливості збільшення ресурсів зубчастих передач, зокрема головного, проміжного і хвостового редукторів вертольотів Ми-8 та їх модифікацій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** З аналізу літературних джерел можна зробити висновок, що основними факторами, що формують якість робочих поверхонь зубчастих коліс, є конструктивні та технологічні. Сучасні досягнення у сфері конструювання та виробництва сприяють підвищенню точності та зменшенню погрішностей зубчастих передач вертольотних редукторів.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Виявити основні причини виникнення погрішностей зубчастих передач вертольотних редукторів, взаємозв'язок факторів виробництва й параметрів точності зубчастих коліс та можливості керування точністю поверхонь зубців ще на стадії проектування.

**Мета статті.** Розглянути точність та погрішності зубчастих передач вертольотних редукторів.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянуті показники точності зубчастих коліс за нормами кінематичної точності, плавності, контакту зубців та бокового зазору, вплив технології виробництва на якість зубчастих коліс. Функціональна точність забезпечується двома шляхами – конструктивним і технологічним. Приведені основні причини виникнення погрішності операції зубофрезерування, можливості керування точністю та якістю поверхонь зубців ще на стадії проектування, взаємозв'язок факторів виробництва й параметрів точності зубчастих коліс.

Наведені приклади кінематограм показують неприйнятність кінематичного принципу нормування і контролю точності напружених зубчастих передач та передач з модифікованими поверхнями зубців. Тому нормування та оцінювання точності авіаційних зубчастих коліс здійснюють виключно за елементними показниками точності.

Показано, що колеса необхідно контролювати по накопиченій погрішності кроку, а не по биттю. Розглянуто контроль за допомогою плям контакту для конічних передач із прямими і круговими зубцями.

**Висновок відповідно до статті.** Збільшення ресурсу передач здійснюється, поза іншими способами, підвищенням точності виготовлення зубчастих коліс, яка у високоресурсних і високонапружених передачах досягає 4-го ступеня точності за нормами плавності та контакту.

У багатьох випадках подальше підвищення точності при збільшенні ресурсу не є доцільним, оскільки висока навантаженість коліс на всіх режимах роботи забезпечує статичний розподіл навантаження між спряженими зубцями, що призводить до зменшення динамічного зусилля. Тут прослідковується основний принцип призначення точності авіаційних передач: точність призначається з урахуванням фактичної навантаженості та жорсткості спряжених зубців і всієї пружної системи загалом.

**Ключові слова:** зубчасті передачі та колеса вертольотних редукторів; показники точності; погрішності.

Рис.: 11. Табл.: 1. Бібл.: 10.

**Актуальність теми дослідження.** Якість робочих поверхонь зубчастих коліс формується під впливом конструктивних факторів (модуля, числа зубців і матеріалу коліс, твердості матеріалу заготовок та їх фізико-механічних властивостей) і технологічних факторів (швидкості та глибини різання, подачі, ступеня зношуваності інструменту).

Зубчасту передачу можна виконати тільки з деяким наближенням до функціонально точної, оскільки елементи зубчастої передачі не можуть бути виготовлені без відхилень. Рівень цих відхилень визначається не тільки технічною, але й економічною доцільністю, а також можливостями виробництва.

Зубчасті колеса передач повинні володіти достатньо високою міцністю, зносостійкістю і поверхневою твердістю, щоб забезпечити надійну роботу зубчастої передачі при найменших габаритах і масі.

**Постановка проблеми.** Виявлення можливості збільшення ресурсів зубчастих передач, зокрема головного, проміжного і хвостового редукторів вертольотів Ми-8 та їх модифікацій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** З аналізу літературних джерел можна зробити висновок, що основними факторами, що формують якість робочих поверхонь зубчастих коліс, є конструктивні та технологічні. Сучасні досягнення у сфері конструювання та виробництва сприяють підвищенню точності та зменшенню погрішностей зубчастих передач вертольотних редукторів.

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Виявити основні причини виникнення погрішностей зубчастих передач вертольотних редукторів, взаємозв'язок факторів виробництва й параметрів точності зубчастих коліс та можливості керування точністю поверхонь зубців ще на стадії проектування.

**Мета статті.** Розглянути точність та погрішності зубчастих передач вертольотних редукторів.

**Виклад основного матеріалу. Показники точності.** За ГОСТ 1643-81 регламентується контроль 34 параметрів, які характеризуються 42 відхиленнями: кінематична точність, плавність роботи, контакт зубців, бічний зазор (таблиця) [1].

Таблиця

Показники точності циліндричних зубчастих коліс (ГОСТ 1643-81)

Показники	Позначення	Ступінь точності	Об'єкт	
			Шестерня і колесо	Зубчаста пара
<b>За нормами кінематичної точності</b>				
Найбільша кінематична погрішність зубчастого колеса	$F'_{ir}$	3 ... 8	*	
Накопичена погрішність кроку зубчастого колеса	$F_{pr}$	3 ... 8	*	
Накопичення погрішності до $k$ кроків	$F_{pkr}$	3 ... 8	*	
Погрішність обкату	$F_{cr}$	3 ... 8	*	*
Радіальне биття зубчастого вінця	$F_{rr}$	3 ... 12	*	
Коливання довжини загальної нормалі	$F_{Uwr}$	5 ... 8		*
Коливання вимірювальної міжосьової відстані за оберт колеса	$F''_{ir}$	5 ... 12		*
<b>За нормами плавності</b>				
Місцева кінематична погрішність	$f'_{ir}$	3 ... 8		
Циклічна погрішність зубцевої частоти	$f_{zzr}$	3 ... 8	*	*
Відхилення кроку зубчастого колеса	$f_{pb}$	3 ... 12	*	
Відхилення кроку зачеплення	$f_{ptr}$	3 ... 12	*	*
Погрішність профілю зуба	$f_{fr}$	3 ... 8	*	
Коливання вимірювальної міжосьової відстані на одному зубі	$f''_{ir}$	5 ... 12		*
<b>За нормами контакту зубців</b>				
Погрішність напрямку зуба	$F_{\beta r}$	3 ... 12	*	*
Сумарна погрішність контактної лінії колеса	$F_{kr}$	3 ... 12		*
Відхилення відносних розмірів сумарної зони дотику	$F'_{shr}$	4 ... 12		*
Відхилення відносних розмірів сумарної плями контакту передачі	$F_{shr}$	3 ... 11		*
<b>За нормами бічного зазору</b>				
Гарантований бічний зазор	$J_{n, min}$	Усі види спряжень		*
Найменше додаткове зміщення початкового контуру і допуск	$E_{Hs}, T_H$			*
Найменше відхилення середньої довжини загальної нормалі і допуск	$E_{Wms}, T_{Wm}$			*
Найменше відхилення довжини загальної нормалі і допуск	$E_{Ws}, T_W$			*
Найменше відхилення товщини загальної нормалі і допуск	$E_{cs}, T_c$			*
Граничне відхилення вимірювальної міжосьової відстані	$E''_{as}, E''_{ai}$			*
Найменше відхилення розміру по роликах і допуск	$E_{Ms}, T_M$		*	
Відхилення міжосьової відстані	$f_{ar}$			*

Для прикладу виконання авіаційного зубчастого колеса на рис. 1 показане креслення з характеристиками точності за матеріалами швейцарської фірми «Рейсхауер» [2].

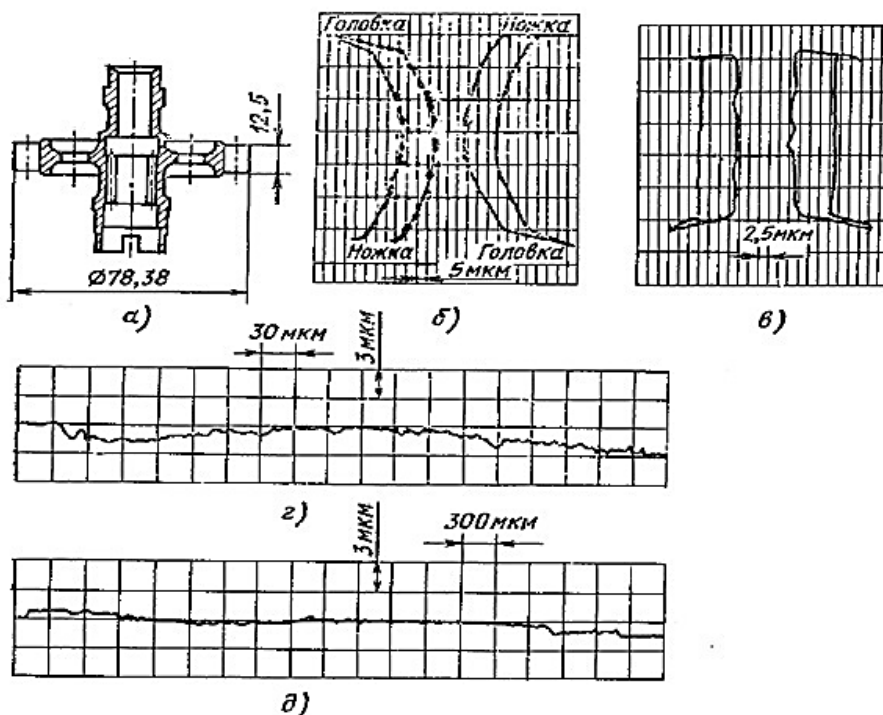


Рис. 1. Зубчасте колесо з модифікованим профілем ( $t = 3,06$  мм,  $z = 23$ ,  $\alpha = 20^\circ$ ,  $\beta = 0^\circ$ ) та його параметри якості:

а – креслення колеса; б – діаграма профілю зубців; в – діаграма напрямку зубців;  
г – діаграма шорсткості по профілю; д – діаграма шорсткості по напрямку

Як видно з рис. 1, профіль такого колеса не являє собою евольвенту, тобто він підданий повній модифікації, що під час зачеплення не забезпечує кінематично точного обертання, але добре компенсує шкідливий вплив деформацій, які виникають під експлуатаційним навантаженням.

Всі зубчасті колеса із заданою якістю виготовлення, незалежно від розміру зуба і модуля зачеплення, мають приблизно однаковий розмір погрешностей передачі, що робить порівняння відносно простим (зазвичай близько 5 мікрометрів) [3]. Похибка передачі переважно приймається як незалежна від розміру зубчастої передачі, що робить діаметр зубчастої передачі несуттєвою змінною, яку можна за необхідності відрегулювати. Щоб мати уявлення про діапазон значень ПЗ (Похибка зачеплення передачі), очікуваних від зубчастої пари, з літературних джерел [3; 4] можна резюмувати, що значення погрешності передачі від піку до піку (ПППЗ) вище 10 мікрометрів вважаються типовими для грубих і дуже погано спроектованих передач. На другому кінці спектра для високоточної зубчастої пари ПППЗ в 1 мікрометр було б дуже добре, але в дійсності рідко досягається [3]. Середні та дрібні зубчасті колеса здебільшого будуть цілком задовільними: при ПППЗ менше 3–4 мікрометрів на 1 зуб, і цей рівень досягається за допомогою якісних зубчастих коліс. Похибка передачі – це різниця між теоретичним вихідним кутовим обертанням і фактичним, і може бути записана алгебраїчно, з погляду кутового обертання, як  $ПЗ(\mu\text{м}) = r_1 p \omega_1 - r_2 p \frac{z_2}{z_1} \omega_2$  [3]. Похибка відсутня, коли  $r_1 \omega_1 = r_2 \omega_2$ .

На рис. 2, 3, 4, 5 показані графіки залежності статичної похибки зачеплення від частоти обертання, передаточного числа, вплив частоти обертання на динамічну похибку зачеплення, а також залежність кутової швидкості від кута повороту.

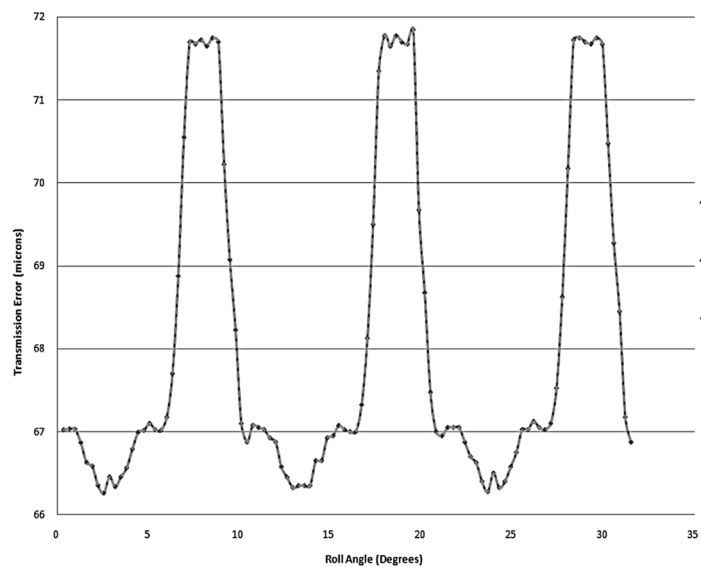


Рис. 2. Статична похибка зачеплення при частоті обертання  $1000 \text{ хв}^{-1}$

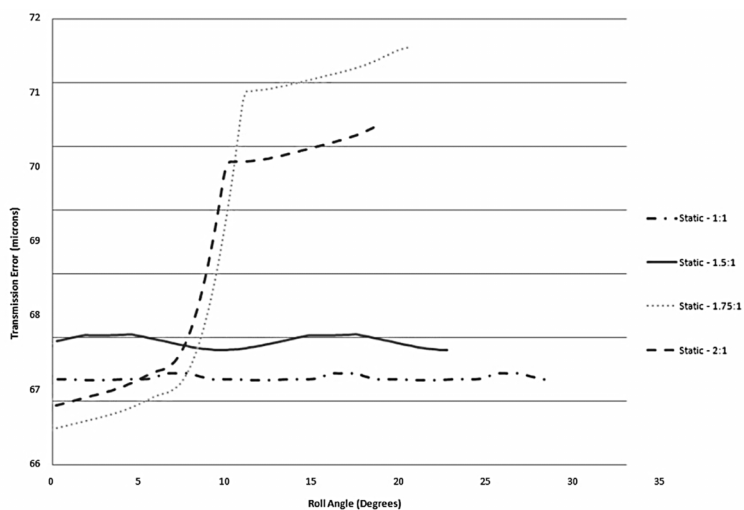


Рис. 3. Залежність статичної похибки зачеплення від передаточного числа

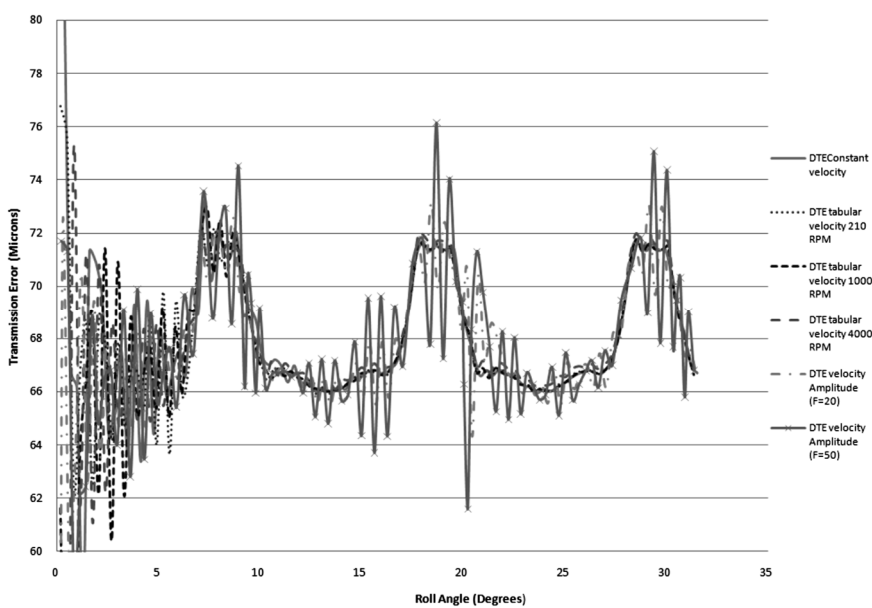


Рис. 4. Вплив швидкості на динамічну похибку зачеплення

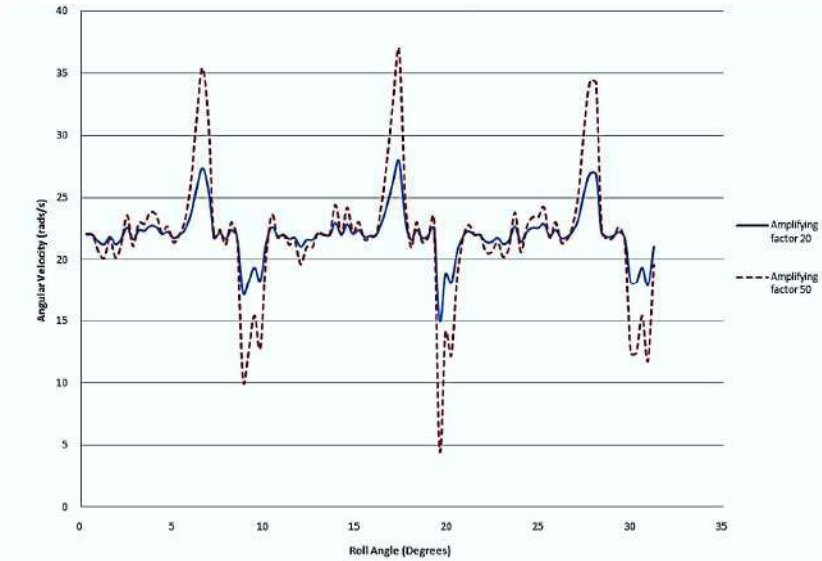


Рис. 5. Кутова швидкість в залежності від кута повороту

Загальною тенденцією є підвищення якості робочих поверхонь і підвищення вимог до точності формоутворення (рис. 6).

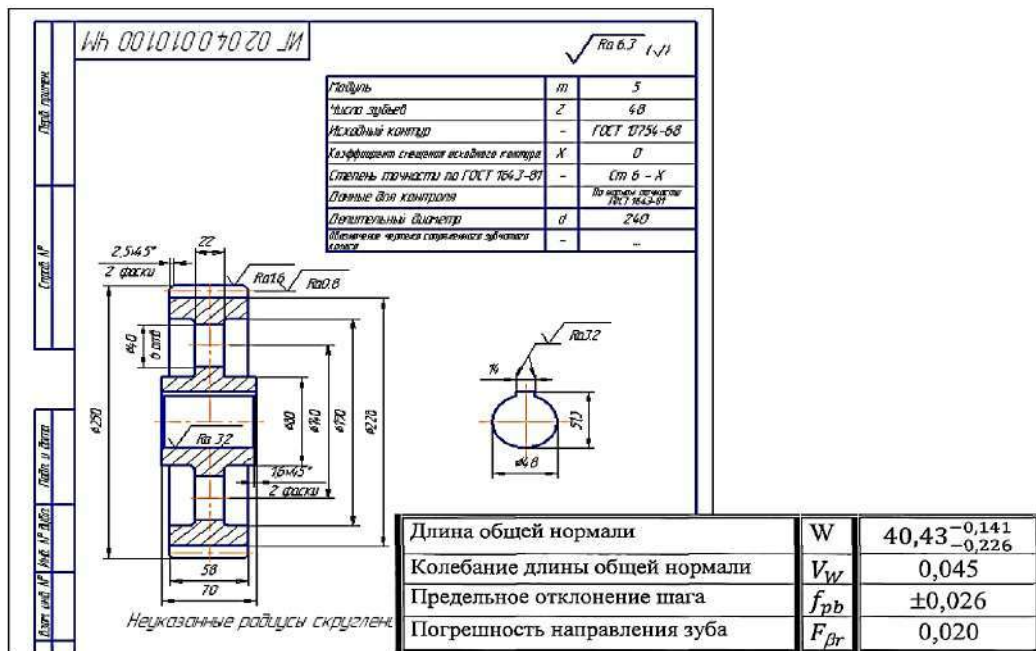


Рис. 6. Креслення зубчастого колеса з параметрами контролю

Кінематична точність зубчастого колеса – величина повної погрішності його повороту за один оберт, виникає в результаті непостійності радіального положення осей заготовки та інструменту, а також у результаті погрішностей обкату зубооброблювального верстату [5].

Плавність роботи передачі визначається похибками профілю і кроку зубців, що залежать від точності зуборізного інструменту і зубооброблювального обладнання.

Бічний зазор зубчастої передачі – відстань між бічними поверхнями зубців зубчастих коліс, яка визначає вільний поворот одного з зубчастих коліс при нерухомому парному зубчастому колесі. Залежить від точності багатьох параметрів зубчастих коліс (кроку зачеплення, профілю робочої поверхні зуба, ексцентриситету діляльного кола та ін.), а також від неточності монтажу передачі і температури в зоні контакту [5].

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

**Вплив технології виробництва.** Важливими показниками якості виготовлення зубчастих коліс також є фізико-механічні властивості матеріалів (твердість робочої поверхні, хімічний склад, глибина цементації, мікро- і макроструктура), вимоги до геометричної точності деталі та якості поверхні – шорсткість поверхні, величини наклепу, залишкових напружень.

Таким чином, точність і якість робочих поверхонь зубчастих коліс формуються протягом всього технологічного процесу обробки, тобто залежать від окремих характеристик якості, придбаних на різних операціях обробки. Великий вплив на точність зубчастих коліс спричиняє технологічна система, тобто стан зубооброблювального устаткування, призначення режимів обробки, вибір оснащення і різального інструменту [6]:

- зношування зуборізного інструменту, збільшує погіршеність профілю зуба і висоту мікронерівностей;

- не оптимальні режими різання впливають на висоту нерівностей оброблюваного матеріалу;

- нерівномірною схемою різання (наприклад, при роботі стандартною черв'ячно-модульною фрезою, у якій одночасно працюють дві або три різальні крайки, які зрізають шари різної товщини) породжує різне зношування різальних крайок;

- велика подача різального інструменту сприяє виникненню на оброблюваній поверхні хвилястості і гребінців – виникає відхилення евольвентного профілю зуба по висоті;

- при великій товщині зрізаного шару збільшуються інтенсивність зношування різального інструменту, сили різання і нарост;

- точність елементів технологічної системи операцій зубообробки впливає на: радіальні погіршеності, що залежать від розташування заготовки та інструменту; тангенціальні погіршеності, що залежать від порушення обкату інструменту і заготовки або від неточності ділення; осьові погіршеності, що залежать від порушення точності переміщення інструменту вздовж осі заготовки, від погіршеності робочої поверхні різального інструменту (похибки його проектування, виготовлення і заточки) та ін. [6].

Функціональна точність забезпечується двома шляхами: конструктивним і технологічним, які слід застосовувати одночасно. Конструктивне рішення, що забезпечує функціональну точність, – це модифікація поверхонь зубців. Модифікація полягає в умисних відхиленнях поверхні зуба від евольвентної поверхні, дозволяє покращити експлуатаційні характеристики передачі за рахунок компенсації впливу погіршеностей виготовлення і деформації зубців під навантаженням. Нині модифікацію профілів зубців застосовують у високошвидкісних, важконавантажених зубчастих передачах, якими є зубчасті передачі авіаційних редукторів.

Технологічні рішення – раціональна побудова технології на базі високоточного обладнання та інструменту, широке застосування зубошліфування, зубохонінгування, що забезпечують точність виконання форми і розмірів деталей. Наприклад, за допомогою даних про погіршеності профілю зуба (рис. 7) [7] можна визначити наступні основні причини виникнення погіршеності операції зубофрезерування:

- радіальні погіршеності, що характеризуються зміною радіальної відстані між заготовкою та інструментом: биття фрези на оправці (може бути викликано дефектами різального інструменту, дефектами оправки);

- погіршеності робочої поверхні різального інструменту – похибки проектування, виготовлення, неправильна заточка фрези (може бути викликана установкою фрези на оправку з перекосом або неправильною установкою оправки в заточний верстат);

- тангенціальні погіршеності, що характеризуються неточністю ділення або порушенням обкатування інструменту та виробу;

- осьові погіршеності, що характеризуються порушенням точності переміщення інструменту вздовж осі виробу (великий люфт шпинделя фрези зубофрезерного верстату);

- погрішності розташування базового торця деталі, погрішності центрування деталі, погрішності вивірки пристосування – дефекти оправки (слабе закріплення оправки у верстаті або знос оправки), погрішності стола верстату (великий люфт стола зубофрезерного верстата).

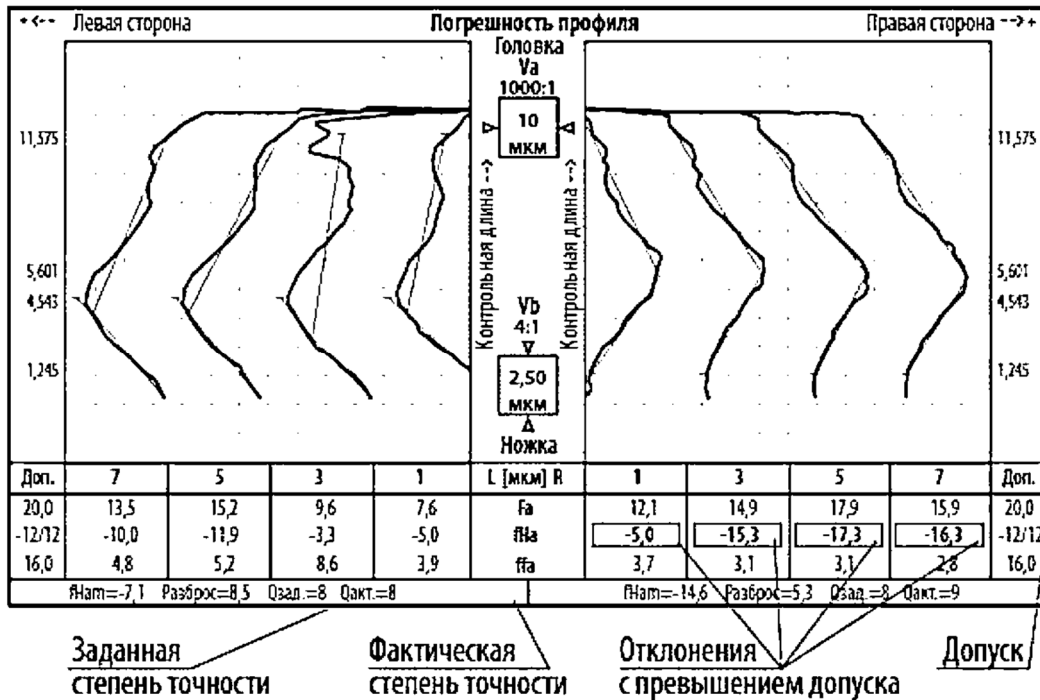


Рис. 7. Приклад протоколу вимірювання погрішності зуба

Результати досліджень показали [7], що ще на стадії проектування зубчастих коліс можна керувати їх точністю та якістю поверхневого шару. Для цього в кожному конкретному випадку за допомогою моделювання технології виготовлення треба знаходити найбільш прийнятний варіант зменшення розмаху погрішностей (кінематичної погрішності – допуск на коливання довжини загальної нормалі  $F_{Uwr}$  і плавності роботи – граничне відхилення кроку  $f_{pb}$ ) [8], а також забезпечити необхідний параметр шорсткості робочих поверхонь  $R_a$ , глибини дефектного шару  $X_M$ , оскільки шорсткість робочих поверхонь зубців має великий вплив на стійкість проти заїдання.

При цьому необхідно прогнозувати параметри точності та якості поверхневого шару при різних методах обробки, призначати режими механічної обробки, що забезпечуватимуть отримання заданих параметрів, причому з найбільшою продуктивністю (рис. 8) [7].

На рис. 8  $f_{pb}$  – відхилення зубчастого колеса;  $f_f$  – допуск на погрішність профілю зуба;  $f_{pt}$  – граничне відхилення кроку;  $F_\beta$  – допуск на погрішність напрямку зуба;  $F_r$  – допуск на радіальне биття зубчастого вінця;  $H$  – бічний зазор;  $F_i$  – допуск на коливання вимірювальної міжосьової відстані за оберт зубчастого колеса;  $f_i$  – допуск на коливання вимірювальної міжосьової відстані на одному зубі.

За останні 30 років суттєво змінилася технологія обробки зубчастих коліс, яка дозволяє реалізувати більш високі вимоги до точності коліс і суттєво збільшити продуктивність. Застосування цифрових систем управління дозволяє напряму використати результати виміру: при виготовленні на верстатах з ЧПУ вводяться коректори значення погрішності обробленої деталі та при обробці наступної деталі погрішності вже будуть скомпенсовані. Відмінною особливістю цих верстатів є комп'ютерне управління, вбудована вимірювальна система і гнучка система управління геометрією зубчастих коліс.



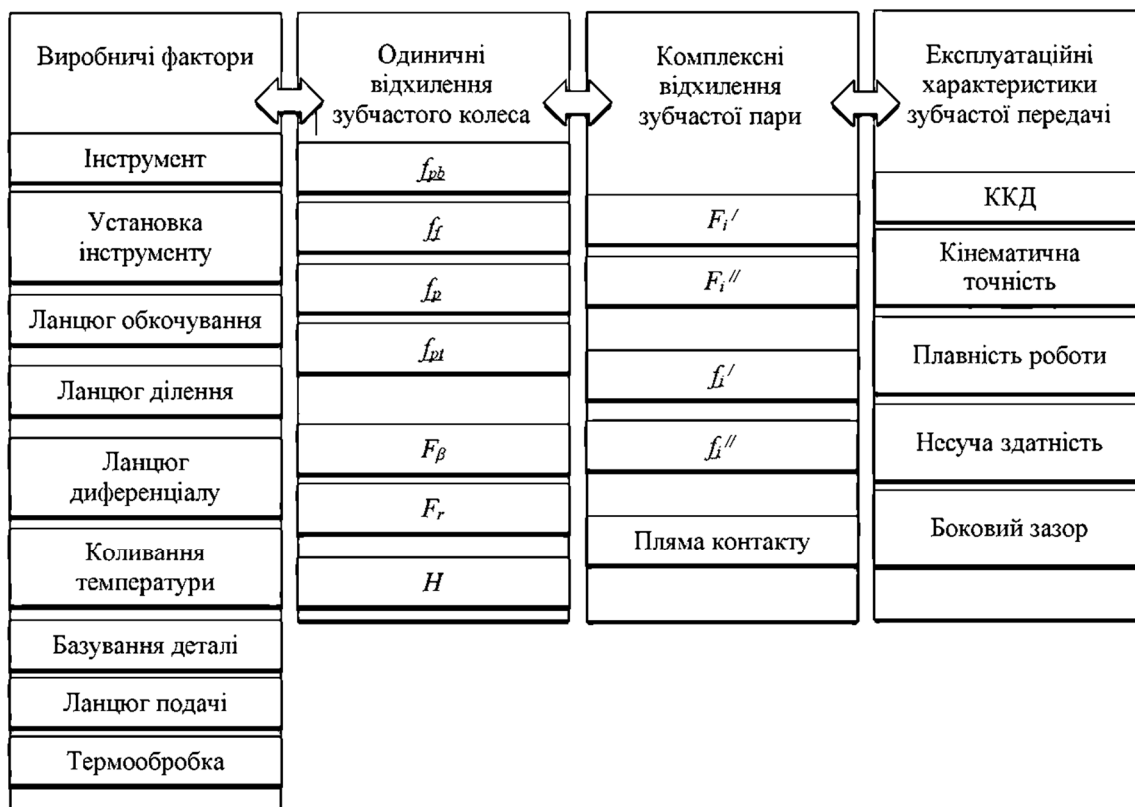


Рис. 8. Взаємозв'язок факторів виробництва і параметрів точності зубчастих коліс

Виробничий процес організовується так, щоб можливо було отримувати не тільки готові зубчасті колеса, але і інформацію про зміну погрішностей, на основі якої можна було б вводити в процес механічної обробки відповідне коректування і приймати оптимальні технологічні рішення. При цьому, паралельно з розрахунком геометричних параметрів зубчастих коліс пари, здійснюється розрахунок базових налагоджувальних установок верстатів для зубонарізання та зубошліфування і розрахунок математичного еталону для контрольно-виміральної машини. Застосування зубовимірвальних машин, які є засобами аналітичного контролю відхилень зубчастого вінця, дозволяє отримати інформацію про причини виникнення погрішностей і дає можливість також швидко здійснити коректування технології виготовлення, внести корективи в налагоджувальні установки верстату.

У [7] показано, що в процесі зубофрезерування черв'ячною фрезою відхилення радіусів евольвент по висоті профілю зуба  $V_{pfr}$  залежать від: погрішностей інструменту, геометричного ексцентриситету різальних граней фрези, торцевого ексцентриситету фрези, коливання величини радіальних і тангенціальних відтиснень.

Технологічний процес зубообробки містить в своєму складі багатократну зміну технологічних баз, що призводить до виникнення великих погрішностей зубчастого вінця. Базовими поверхнями (в залежності від конструктивних особливостей зубчастих коліс) при обробці заготовок циліндричних зубчастих коліс можуть бути: для коліс з маточиною – отвір (подвійна напрямна база) і базовий торець (опорна база); для плоских зубчастих коліс – базовий торець (установочна база) і отвір (подвійна опорна база).

Конструкція колеса (вінці, з маточиною або колеса-вали) суттєво впливає на послідовність обробки і підбір необхідного обладнання. Технологічні процеси виготовлення зубчастих коліс (шевінгування, обкочування, зубохонінгування), що використовують метод вільного обкату відрізняються особливою нестабільністю вихідних параметрів точності внаслідок складних механізмів утворення, спадкування і перерозподілу погрішностей.

Для забезпечення і підвищення точності технологічних систем зубообробки необхідно виявити фактори, що суттєво впливають на величину погрішності при обробці, встановити механізми формування погрішностей, виявити технологічні джерела їх утворення, застосовуючи метод технологічного наслідування. Такий аналіз призводить, як правило, до вирішення багатоваріантної технологічної задачі й до багатократною зміни раніше прийнятих рішень.

Задача забезпечення необхідної точності зубчастих коліс в процесі їх виготовлення є найбільш складною задачею, що впливає на надійність зубчастої передачі, водночас необхідна точність коліс впливає на технологію їх обробки (головним чином на технологію обробних операцій, що визначають можливі погрішності виготовлення робочих поверхонь).

**Кінематограми і кінематична точність.** Звичайно точною за кінематикою і плавністю вважається та передача, кінематична погрішність якої являє собою пряму, яка співпадає з віссю абсцис. Такий графік показаний в довіднику [2] на рис. 10.2, *а*, тобто під час контролю така передача повинна обертатись ідеально плавно, забезпечуючи заданий закон руху без відхилень.

В авіаційній передачі під час роботи завдяки деформаціям зубців відбувається порушення ідеального закону руху, передача буде працювати не плавно, будуть мати місце шкідливі крайкові удари та контакти. Кінематограма, яка показана в довіднику [2] на рис. 10.2, *б*, віддзеркалює ці явища. Таким чином, передача, яка оцінена за ГОСТ 1643-72 та іншими державними стандартами під час контролю як точна, у роботі буде проявляти себе як неточна.

Обернена картина спостерігається на рис. 10.3 [2]. Якщо прийняти конструктивні заходи, що компенсують деформації зубців під час роботи, наприклад, різноконтурність (умисна різниця кроків зачеплення), то під час контролю у відповідності, наприклад, з ГОСТ 1643-72 і СТ СЭВ 186-75 передача буде оцінена як неточна (рис. 10.3, *а*) [2], але під час роботи виявить себе як ідеально точна (рис. 10.3, *б*). Передачі з повністю модифікованими поверхнями зубців (наприклад, кіничне зачеплення) завжди будуть оцінюватися як неточні.

Наведені приклади показують неприйнятність кінематичного принципу нормування і контролю точності напружених зубчастих передач та передач з модифікованими поверхнями зубців. Цей принцип прийнятний для оцінки й нормування точності малонапружених зубчастих передач, наприклад, для передач загального машинобудування з робочими поверхнями зубців невеликої твердості.

Тому нормування і оцінку точності авіаційних зубчастих коліс здійснюють виключно за елементними показниками точності. Розвитком поелементної системи точності та контролю є введення поняття про перервну кінематичну погрішність (рис. 10.4, 10.5 [2]).

Для евольвентного прямозубого колеса – це евольвентограми однойменних профілів зубців, розташовані послідовно згідно з їх дійсним положенням на колесі. За графіком перервної кінематичної погрішності можна прослідкувати всі складові та їх взаємодію, по якому можна судити найбільш повно про ступінь точності виконання зубчастого колеса або пари зубчастих коліс з будь-якими формами профілів і ліній зубців на всій їх активній довжині:

$f_{ir}$  – погрішність профілю на всій активній довжині; для пари зубчастих коліс сумарна погрішність профілів двох зубців, що знаходяться у зачепленні, віддзеркалює показник  $f_{ior}$ .

Для косозубих коліс з  $\varepsilon_{\beta} > 1,25$  (які досить рідко застосовуються в авіатехніці) функцію передачі руху здійснюють в основному лінії зубців внаслідок «Ефекту косозубості» [6], тому введені показники  $f_{br}$  ( $f_{bor}$ ) – кінематична погрішність лінії зуба (пари зубців). Взаємодія зубців у зонах переспряження (плавність, робота крайок)

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

відображається показниками  $f_{ir}(f_{iOr})$ . Широко застосовуваний показник точності, який на додаток є основним критерієм точності під час міцнісних розрахунків, це відхилення кроку зачеплення –  $f_{pbr}(f_{pbOr})$ .

Кінематична точність зубчастих коліс і пар за перервною кінематичною погрішністю оцінюється показниками  $F_{pkr}(F_{pkOr})$  і  $F_{pr}(F_{pOr})$ . Перший показник дозволяє судити про погрішність повороту колеса (пари) на частині оберту. Це дуже важливо для високошвидкісних зубчастих передач, якими і є в більшості випадків авіаційні передачі.

Відмінною особливістю коліс (пар), що мають повністю модифіковані профілі (для прямозубих зачеплень), або лінії зубців для конічних пар з круговими зубцями, в яких  $\varepsilon_{\beta} > 1,5$ , є криволінійна форма поля допуску на профіль (лінію зуба). Це вирішує проблему зв'язку свідомого спотворення профілів (ліній) зубців з метою підвищення експлуатаційних властивостей передачі з технологічною точністю, тобто відкривається можливість будь-яких конструктивних рішень без ускладнення задач технології по забезпеченню певної точності виготовлення [2]. Яку форму не приймав би профіль, технолог має одні й ті ж границі, в яких допускаються погрішності. Державні стандарти такої можливості не дають. Допуски на показники точності є в галузевих стандартах.

Особливого підходу вимагає для оцінки точності використання елементних показників – биття зубчастого вінця  $F_{rr}$  і коливання довжини загальної нормалі  $F_{vWr}$  [5]. Під час шліфування зубчастих коліс на зубошліфувальних верстатах фірми «Мааг» у більшості випадків застосовується так званий «нульовий» метод, тобто шліфувальні круги встановлюються під нульовим кутом профілю оброблюваної рейки на відстані, що дорівнює довжині загальної нормалі (рис. 9).

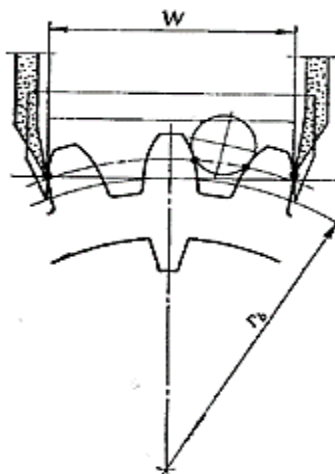


Рис. 9. Схема обробки і вимірювання зубчастих коліс, шліфованих нульовим методом

Під час шліфування нульовим методом коливання довжини загальної нормалі відсутні, оскільки відстань між шліфувальними кругами незмінна.

Протилежна картина в цьому випадку спостерігається з биттям. Ролик, що закладається у западини під час контролю, займає положення (виявляє биття) в залежності не тільки від геометричного ексцентриситету зубчастого вінця, як це має місце при цьому виді контролю, але і від погрішностей ділального механізму верстату, тому що профілі, на які опирається ролик, оброблялися в різних положеннях (на різних пазах) ділального диску. Накладання погрішностей двох джерел робить оцінку точності хибною. У такому випадку можуть бути забраковані придатні деталі та пропущені непридатні.

Такий самий результат може бути при виборі биття зубчастого вінця ( $F_{rr}$ ) як показника для конічних зубчастих коліс з круговими зубцями, оброблених однобічним методом, здебільшого на різних верстатах і відповідно при різних

установках. Звідси, коли кулька під час контролю биття лягає на бокові різноіменні поверхні зубців, то результат складається з чотирьох складових: погрішностей двох верстатів і двох установок на верстаті, які складаються випадковим чином і по фазах, і по амплітудах погрішностей. Тому такі колеса необхідно контролювати по накопиченій погрішності кроку, а не по биттю [2].

Контроль по перервній кінематичній погрішності прямозубих і вузьких косозубих циліндричних коліс полягає у послідовному запису погрішностей евольвентних профілів.

**Плями контакту зубців.** Особливе питання стосується нормування плями контакту. В СТ СЭВ 186-75 і ГОСТ 1643-72 вона нормується відносними розмірами плями контакту у відсотках. Це вірно тільки для косозубих коліс, але для прямозубих коліс це невірно.

Під час контролю плями контакту пари зубчастих коліс на зубці ведучого або вимірювального колеса наноситься фарба, а потім при обкочуванні з парним колесом виходять відбитки на його зубцях, по яких судять про якість контакту. Під час контролю контакт пари зубців продовжується не більше, ніж на довжині кроку зачеплення. У той же час у будь-якій передачі конструктивно забезпечується перекриття профілів значно більше одиниці. Звідси випливає, що під час контролю профілі контактують один з одним тільки на обмежених ділянках, тобто по голівках зубців колеса або по ніжках. Причому візуально можна переконатися, що пляма на ніжці суттєво менше, ніж на голівці. І це при однакових погрішностях кроку зачеплення, тобто при однаковому рівні точності. Для  $z = 20$  різниця в розмірах досягає 40 %, а величина плями на ніжці дорівнює 36 %, тоді як, наприклад, по ГОСТ 1643-72 для 6-го ступеня точності оговорюється мінімум в 45 %. У той же час при ймовірному іншому поєднанні кроків зачеплення пляма розташовується на голівках зубців колеса і її величина буде дорівнювати 76%, тобто при будь-яких, навіть грубих погрішностях, пляма контакту буде відповідати самим високим рівням точності, зокрема, 3-му ступеню точності по ГОСТ 1643-72 [2].

Самим суттєвим є те, що для більшості випадків (окрім прецизійних передач порядку 3-4-го ступеня точності) розміри плями контакту по висоті зуба практично не залежать від точності виготовлення зубчастих коліс, а залежать від геометричних параметрів зачеплення і від поєднання погрішностей. Так, в прямозубих зачепленнях критерієм якості контакту повинна бути тільки довжина відбитку фарби. В такій же мірі це відноситься до модифікованих зачеплень, де висота плями контакту ще залежить і від розмірів модифікації. Тому норми на пляму контакту слід встановлювати в залежності від конкретних геометричних і конструктивних параметрів зубчастих коліс, а також повинні враховуватись конструкція і умови експлуатації зубчастої передачі. Це пов'язано з тим, що, наприклад, кінчні колеса під навантаженням деформуються і переміщуються один відносно другого по причині нежорсткості корпусів, температурних деформацій і т. ін. На рис. 10 показано типове нормування плями контакту в прямозубому кінчному зачепленні, а на рис. 11 – з круговими зубцями при осьовому перекритті з  $\varepsilon_{\beta} < 1,5$  [2].

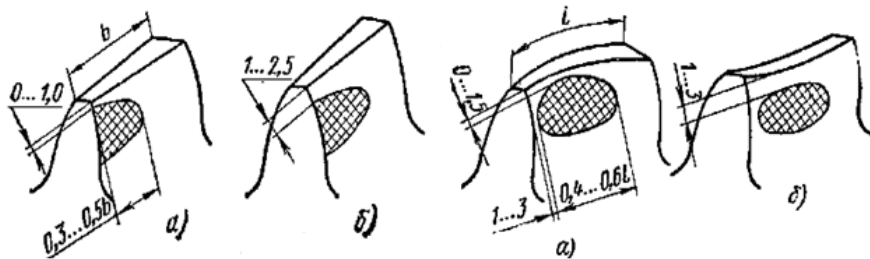


Рис. 10. Пляма контакту в прямозубих кінчних коліс:  
а – ведуче колесо; б – ведене

Рис. 11. Пляма контакту у кінчних коліс з круговими зубцями:  
а – ведуче колесо; б – ведене

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Виключна увага при нормуванні плями контакту в конічних передачах приділяється величині відривів плями від вершини зуба, тому що ці відриви характеризують контакт в момент переспряження зубців. При виконанні правила – відриви на веденому колесі повинні бути рівними або більше відривів на ведучому – здійснюється варіант, коли розвантажується кромка на вході в зачеплення, створюється запас різності кроків для компенсації деформацій та переміщень конічних коліс.

Часто в літературі та в практиці пов'язують пляму контакту з плавністю роботи передачі. Такий зв'язок можна прослідкувати тільки в особливих випадках. В загальному випадку пляма не віддзеркалює плавність роботи ні в прямозубій конічній передачі, ні в передачі з круговими зубцями.

Збільшення ресурсу передач здійснюється, поза іншими способами, підвищенням точності виготовлення зубчастих коліс, яка у високоресурсних і високонапружених передачах досягає 4-го ступеня точності за нормами плавності та контакту. Наприклад, у разі підвищення ресурсу редуктора турбовентиляторного двигуна з 1000 до 4000 годин похибки основного кроку зменшилися більше, ніж у три рази. В цьому випадку параметр  $\psi$  навантаженості передачі [9; 10] зменшується у три-п'ять разів [2].

В цілому ряді випадків подальше підвищення точності при збільшенні ресурсу не є доцільним, оскільки висока навантаженість коліс на всіх режимах роботи забезпечує статичний розподіл навантаження між спряженими зубцями, що призводить до зменшення динамічного зусилля. Тут прослідковується основний принцип призначення точності авіаційних передач: точність призначається з врахуванням фактичної навантаженості та жорсткості спряжених зубців і всієї пружної системи в цілому. Зубчасті передачі середньої навантаженості виготовляються з точністю 6-5-5В або навіть 7-6-6В згідно ГОСТ 1643-72 [2].

**Висновки відповідно до статті.** Збільшення ресурсу передач здійснюється, поза іншими способами, підвищенням точності виготовлення зубчастих коліс, яка у високоресурсних і високонапружених передачах досягає 4-ого ступеня точності за нормами плавності та контакту.

У багатьох випадках подальше підвищення точності при збільшенні ресурсу не є доцільним, оскільки висока навантаженість коліс на всіх режимах роботи забезпечує статичний розподіл навантаження між спряженими зубцями, що призводить до зменшення динамічного зусилля. Тут прослідковується основний принцип призначення точності авіаційних передач: точність призначається з врахуванням фактичної навантаженості та жорсткості спряжених зубців і всієї пружної системи загалом.

#### Список використаних джерел

1. ГОСТ 1643-81 Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. Москва: Изд-во стандартов, 1981. 45 с.
2. Авиационные зубчатые передачи и редукторы: справочник / под ред. Э. Б. Вулгакова. Москва: Машиностроение, 1982. 375 с.
3. Transmission Error in Spur Gears: Static and Dynamic Finite-Element Modeling and Design Optimization by Raul Tharmakulasingam. Unated Kingdom. October 2009.
4. Smith J. D. Gear Noise and Vibration. 2<sup>nd</sup> Edition, *Marcel Dekker Inc.*, New York, 2003.
5. Нежурин И. П. Кинематическая точность зубчатых колёс и её контроль. *Стандартизация*. 1963. № 6. С. 8-14.
6. Калашников Н. А. Точность в машиностроении и её законы. Москва: Машгиз, 1950. Ч. 2. 147 с.
7. Жукова С. И. Разработка метода технологического обеспечения противозадирной стойкости в кромочной зоне контактирования эвольвентных цилиндрических зубчатых колёс редукторов газотурбинных двигателей: дис. ... канд. техн. наук / Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьёва. Рыбинск, 2018. 166 с.

8. Шаповалов О., Колесник Д., Пилипенко О. Застосовуваність і залежність параметрів зубчастих передач авіаційних редукторів від технологічних процесів їх виготовлення. *Технічні науки та технології*. 2019. № 3(17). С. 37–48.

9. Айрапетов Э. Л., Айрапетов С. Э., Евсикова Н. А., Мельникова Т. И., Шоломов Н. М. Влияние погрешностей изготовления и монтажа передачи на динамическую нагруженность зубьев колёс. *Колебания и виброакустическая активность машин и конструкций*. Москва: Наука, 1986. С. 169–173.

10. Шаповалов О., Колесник Д., Пилипенко О. Навантаженість зубчастих передач вертольотних редукторів та їх напружено-деформований стан. *Технічні науки та технології*. 2018. № 4(14). С. 41–54.

### References

1. GOST 1643-81. *Osnovnye normy vzaimozamenjajemosti. Peredachi zubchatye zilindricheskie. Dopuski* [Basic norms of interchangeability. Transmissions toothed cylindrical. Admittances]. Moscow: Izd-vo standartov [in Russian].

2. Vulgakov, A. B. (Ed.) (1982). *Aviazionnye zubchatye peredachi i reduktory* [Aviation gearing and reducers]. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].

3. Transmission Error in Spur Gears: Static and Dynamic Finite-Element Modeling and Design Optimization by Raul Tharmakulasingam. Unated Kingdom. October 2009 [in English].

4. Smith, J. D. (2003). Gear Noise and Vibration. 2<sup>nd</sup> Edition, *Marcel Dekker Inc.*, New York [in English].

5. Niezhurin, I. P. (1963). Kinematicheskaja tochnost zubchatyh koljos i ee control [Kinematics exactness of gear-wheels and her control]. *Standartizatsiia – Standardization*, 6, 8-14 [in Russian].

6. Kalashnikov, N. A. (1950). *Tochnost v mashinostroenii i ee zakony* [Exactness in an engineering and her laws] (Vol. 2). Moscow: Mashgiz [in Russian].

7. Gukova, S. I. (2018). *Razrabotka metoda technologicheskogo obespechenia protivozadirnoj stojkosti v kromochnoj zone kontaktirovania evolventnyh zilindricheskih zubchatyh koles reduktorov gazoturbinnih dvigatelej* [Development of method of the technological providing of antiscuff firmness is in the edge area of contact of involute cylindrical gear-wheels of reducing gears of turbo-engines] (Candidate's thesis). Rybinskii gosudarstvennyi aviazionnyi tehnikeskii universitet imeni P. A. Solovieva, Rybinsk [in Russian].

8. Shapovalov, O., Kolesnik, D., Pilipenko, O. (2019). Zastosovuvanist i zalezhnist parametriv zubchastyh peredach aviazijnyh reduktoriv vid tehnologichnyh prozesiv jih vygotovlennja [Applied and dependence of parameters of gearing of aviation reducing gears from technological processes their making]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, 3 (17), 37–48 [in Ukrainian].

9. Irapetov, E. L., Irapetov, S. E., Evsikova, N. A., Melnikova, T. I., Sholomov, N. M. (1986). Vliianie pogreshnostei izgotovleniia imontazha peredachina dinamicheskuiu nagruzhennost zubiev koles [Influence of errors of making and editing of transmission on dynamic loading of teeth of wheels]. In *Kolebaniia i vibroakusticheskaia aktivnost mashin i konstruksii – Vibrations and vibroacoustic activity of machines and constructions*. Moscow: Nauka [in Russian].

10. Shapovalov, O., Kolesnik, D., Pilipenko, O. (2018). Navantagenist zubchastyh peredach vertoletnyh reduktoriv ta jih napruzhenodephormovanyj stan [Load capacity of gearing of helicopter reducers and their stress-strained state]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, 4(14), 41–54 [in Ukrainian].

UDC 629.735.45

*Oleg Pilipenko, Denis Kolesnik, Anatoli Berezniak*

## EXACTNESS AND ERRORS OF GEARING OF HELICOPTER REDUCING GEARS

**Urgency of the research.** Quality of working surfaces of gear-wheels is formed under act of structural factors (module, numbers of teeth and material of wheels, hardness of material of purveyances and them phisico-mechanical properties) and technological factors (speeds and depths of cutting, serve, degree of worn down of instrument). Gearing can be executed only with some approaching to functionally exact, as elements of gearing can not be made without rejections. The level of these rejections is determined by not only technical but also economic expediency, and also manufacturabilities.

**Target setting.** Exposure of possibility of increase of resource of gearing main, intermediate and tail reducing gears of helicopters of Mu-8 and their modifications.

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

**Actual scientific researches and issues analysis.** From the analysis of literary sources it is possible to make conclusion that by basic factors, pilchard quality of working surfaces of gear-wheels, there are structural and technological, Modern achievements in the field of designing and production assist the increase of exactness and reduction of errors of gearing of helicopter reducing gears.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** To educe principal reasons of origin of errors of gearing of helicopter reducing gears, intercommunication of factors of production and parameters of exactness of gear-wheels and management possibility by exactness of surfaces of points yet on the stage of projecting.

**The research objective.** To consider exactness and errors of gearing of helicopter reducing gears.

**The statement of basic materials.** The indexes of exactness of gear-wheels on the norms of kinematics exactness, smoothness, contact of teeth and sidelash, influence of technology of production on quality of gear-wheels are considered. Functional exactness is provided in two ways - structural and technological. Principal reasons over of origin of error of operation of the gear milling are brought, management possibilities by exactness and quality of surfaces of teeth yet on the stage of projecting, intercommunication of factors of production and parameters of exactness of gear-wheels.

Made examples of kinematograms show the unacceptability of kinematics principle of setting of norms and control of exactness of the tense gearing and transmissions with the modified surfaces of teeth. Therefore setting of norms and estimation of exactness of aviation gear-wheels is carried out exceptionally on the element indexes of exactness

It is shown that wheels must be controlled on the accumulated error of step, but not on beating. Control is considered by means of spots of contact for conical transmissions with lines and circular teeth.

**Conclusion in accordance with the article.** The increase of resource of transmissions comes true, except another ways, by the increase of exactness of making of gear-wheels, that at high-resource and high-tension transmissions arrives at the 4-th degree of exactness on the norms of smoothness and contact.

In a number of cases further increase of exactness at the increase of resource beside the purpose, because high loading of wheels on all office hours provides static allocation of loading between the attended teeth, that results in decreasing dynamic effort. Basic principle of setting of exactness of aviation transmissions is here traced: exactness is appointed taking into account actual loading and inflexibility of the attended tbeeth and all resilient system on the whole.

**Keywords:** gearing and wheels of helicopter reducing gears; indexes of exactness; error.

Fig.: 11. Table: 1. References: 10.

**Пилипенко Олег Іванович** – доктор технічних наук, професор, керівник секції основ конструювання машин кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна), провідний науковий співробітник, Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки (вул. Стрілецька, 1, м. Чернігів, 14033, Україна).

**Pilipenko Oleg** – Doctor of Technical Sciences, Professor, leader of the Fundamental Machine Design section, the Welding Technology and Automatized Projecting of Building Structures Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine), leading scientific coworker, State Research Institute of Tests and Certification of Armament and Military Technique (1 Striletska Str., 14033 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** opilip@ukr.net

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-0590-0107>

**Scopus Author ID:** 16510833000

**ResearcherID:** G-2533-2016

**Колесник Денис Миколайович** – начальник науково-дослідної лабораторії, Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки (вул. Стрілецька, 1, м. Чернігів, 14033, Україна).

**Kolesnik Denis** – Chief of research laboratory, State Research Institute of Tests and Certification of Armament and Military Technique (1 Striletska Str., 14033 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** denis1971@ukr.net

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-8833-570X>

**Березняк Анатолій Миколайович** – старший науковий співробітник, Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки (вул. Стрілецька, 1, м. Чернігів, 14033, Україна).

**Berezniak Anatoli** – Senior Science Specialist, State Research Institute of Tests and Certification of Armament and Military Technique (1 Striletska Str., 14033 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** berezniak80@ukr.net

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-4081-9152>