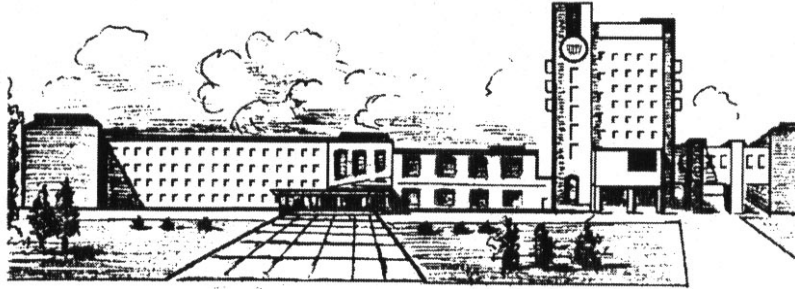


ISSN 2411-5363 (print)
ISSN 2519-4569 (online)

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



ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

№ 4 (10)

Чернігів 2017

УДК 62:67.05

T38

Друкується за рішенням вченої ради Чернігівського національного технологічного університету (протокол № 11 від 27.11.2017 р.). Науковий журнал «Технічні науки та технології» внесено до переліку наукових фахових видань України, затвердженого Наказом Міністерства освіти і науки України від 13.07.2015 р. № 747.

T38 **Технічні науки та технології** : науковий журнал / Черніг. нац. технол. ун-т. – Чернігів : ЧНТУ, 2017. – № 4 (10). – 278 с.

У цьому випуску журналу «Технічні науки та технології» вміщено статті, присвячені теоретичним та експериментальним дослідженням у галузях технічних наук: технологій машинобудування та автотранспорту, зварювання та матеріалознавства, інформаційно-комп'ютерних технологій, енергетики, електротехніки та електроніки, технологій харчової та легкої промисловості, технологій будівництва та природокористування. Статті написані науковцями, аспірантами, магістрантами та студентами і прорецензовані провідними вченими вищих технічних навчальних закладів та закладів НАН України.

Журнал «Технічні науки та технології» буде корисним для науковців різних галузей технічних наук, науково-технічних працівників, аспірантів, магістрантів та студентів вищих технічних навчальних закладів.

УДК 62:67.05

Головний редактор:

Казимир В. В., доктор технічних наук, професор, проректор з наукової роботи.

Заступник головного редактора:

Пилипенко О. І., доктор технічних наук, професор.

Члени редакційної колегії:

Болотов Г. П., доктор технічних наук, професор;

Вархола Міхал, професор, Президент Академічного співтовариства Михайла Балудянського, Словаччина;

Волков І. В., доктор технічних наук, професор;

Денисов Ю. О., доктор технічних наук, професор;

Дубенець В. Г., доктор технічних наук, професор;

Дудла І. О., доктор технічних наук, доцент;

Іванишин В. А., доктор геологічних наук, професор;

Кальченко В. І., доктор технічних наук, професор;

Кальченко В. В., доктор технічних наук, професор;

Литвинов В. В., доктор технічних наук, професор;

Сенько В. І., доктор технічних наук, професор;

Сиза О. І., доктор технічних наук, професор;

Скоробогатова В. І., доктор технічних наук, професор;

Харченко Г. К., доктор технічних наук, професор;

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

Enrique Romero-Cadaval, Doctor of Science, Professor, Main Researcher in Power Electrical & Electronic Systems R&D Group, University of Extremadura, Badajoz, Spain;

Ilya Galkin, Doctor of Science, Professor, Editor in-Chief of the Scientific Journal "Electrical, Control and Communication Engineering", Riga Technical University, Riga, Latvia;

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

Zheleznyak Mark, Professor, Institute of Environmental Radioactivity, Fukushima University, Japan.



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 № 4 (10)

Chernihiv 2017

UDC 62:67.05

Published by the decision of the Academic Council of the Chernihiv National University of Technology (protocol № 11 dated 27.11.2017). 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 13, 2015 № 747.

Technical sciences and technologies : scientific journal / Chernihiv National University of Technology. – Chernihiv : Chernihiv National University of Technology, 2017. – № 4 (10). – 278 p.

This issue of the journal “Technical sciences and technologies” contains articles devoted to theoretical and experimental research in the field of technical sciences: engineering and vehicle technology, welding and materials science, information and computer technologies, energy, electrical engineering and electronics, food technologies and light industry, construction technologies and nature management. The articles are written by scientists, graduate students, undergraduates and students and are reviewed by leading scientists of higher technical educational institutions and institutions of the National Academy of Sciences of Ukraine.

Journal “Technical sciences and technologies” will be useful for the scientists in different fields of technical sciences, scientific and technical workers, postgraduates, master students and students of higher technical educational establishment.

UDC 62:67.05

Editor in chief:

Kazymyr V.V., Vice-rector for scientific work, Doctor of Technical Sciences, Professor.

Deputy Editor in chief:

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

Members of the Editorial Board:

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

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

Volkov I.V., Doctor of Technical Sciences, Professor;

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

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

Dudla I.O., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor;

Ivanyshyn V.A., Doctor of Geological Sciences, Professor

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

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

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

Senko V.I., Doctor of Technical Sciences, Professor;

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

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

Kharchenko H.K., Doctor of Technical Sciences, Professor;

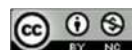
Dmitri Vinnikov, Doctor of Science, Senior Researcher, Head of Power Electronics R&D Group, Tallinn University of Technology, Tallinn, Estonia;

Enrique Romero-Cadaval, Doctor of Science, Professor, Main Researcher in Power Electrical & Electronic Systems R&D Group, University of Extremadura, Badajoz, Spain;

Ilya Galkin, Doctor of Science, Professor, Editor in-Chief of the Scientific Journal “Electrical, Control and Communication Engineering”, Riga Technical University, Riga, Latvia;

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

Zheleznyak Mark, Professor, Institute of Environmental Radioactivity, Fukushima University, Japan.



ЗМІСТ

РОЗДІЛ І. ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ ТА АВТОТРАНСПОРТУ

<i>Ковалевський С., Ковалевська О.</i> Про неперіодичні коливання при динамічних навантаженнях виконавчого механізму мобільних верстатів з паралельною кінематикою.....	9
<i>Тонконогий В., Якимов А., Бовнегра Л., Безнос С., Добровольський В.</i> Снижение теплового фактора при плоском абразивном шлифовании.....	16
<i>Пасов Г., Следнікова О., Кологойда А.</i> Анімаційне моделювання рейкових та черв'ячно-рейкових передач для створення прямолінійного поступального руху.....	27
<i>Рудик А., Рудик В.</i> Ефективне формоутворення поверхонь обертання торцем круга.....	33
<i>Кальченко Д.</i> Теоретичне та експериментальне дослідження процесу двостороннього шліфування торців зі схрещеними осями циліндричних деталей та кругів з калібруючими ділянками.....	44

РОЗДІЛ ІІ. ЗВАРЮВАННЯ ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

<i>Фальченко Ю., Новомлинець О., Петрушинець Л., Нагорна І.</i> Основи використання поверхневих фізико-хімічних процесів для прецизійного зварювання тиском.....	54
<i>Новомлинець О., Олексієнко С., Ющенко С., Половецький Є.</i> Прецизійне зварювання тиском алюмінієвих сплавів.....	67
<i>Болотов Г., Болотов М.</i> Особливості з'єднання композиційних матеріалів у вузлах машин та будівельних конструкцій.....	77
<i>Клименко А., Анісімов В., Ситар В.</i> Вплив твердих шаруватих наповнювачів на фізико-механічні властивості композиційних покриттів на основі фенілону.....	86

РОЗДІЛ ІІІ. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Казимир В., Юрченко Д.</i> Метод детектування руху для нестатичних камер або для камер з функцією PTZ.....	94
<i>Zarovsky R., Radchenko A.</i> Architecture of software for video surveillance systems with different types of cameras.....	101
<i>Fomenko V., Loutskii H., Rehida P., Volokyta A.</i> Thematic texts generation issues based on recurrent neural networks and word2vec.....	110

РОЗДІЛ ІV. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОНІКА

<i>Денисов Ю., Ревко А., Середа О., Дымерец А.</i> Исследование путей повышения энергоеффективности системы электропривода беспилотного летательного аппарата.....	116
<i>Шмелев Ю., Бойко С., Городний А., Чернихова Е., Владов С.</i> Электротехнический комплекс контроля состояния авиационных аккумуляторных батарей.....	123
<i>Шевченко В., Пахалюк Б., Гусев О.</i> Обзор основных технологий бездротовой зарядки накопителей энергии для маломощных систем.....	133
<i>Krasnozhon O., Shevchenko R., Khomenko O., Veligorskyi O.</i> Review of high step-up dc-ac power electronics solutions without galvanic isolation.....	147

РОЗДІЛ V. ТЕХНОЛОГІЇ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

<i>Гомеля М., Іванова В., Трус І.</i> Ефективність вилучення іонів важких металів з розведених розчинів іонообмінним методом.....	154
<i>Індутний В., Мерезко Н., Калуга Ю.</i> Товарознавча оцінка антикварних монет на ринку України.....	163
<i>Сиза О., Савченко О., Журок І., Дорожжінська М.</i> Порошок з вичавків ягід калини в технології виробництва пшеничного хліба.....	176
<i>Заморська І.</i> Вміст токсичних елементів в ягодах суниці садової та продуктах переробки з них....	189
<i>Крамаренко Д., Дуб В.</i> Дослідження впливу добавок гідробіонтів на властивості клейковини пшеничного борошна.....	195

<i>Мотузка Ю., Романенко О., Казаченко С.</i> Розчинність продуктів для ентєрального харчування.....	203
<i>Пилипенко Т., Рябчун Ю., Єфімова В.</i> Дослідження якості косметичних кремів для рук	210
<i>Федорова Д.</i> Дослідження технологічних властивостей сухих рибо-рослинних напівфабрикатів та їх використання в харчових технологіях	217
<i>Данилюк І.</i> Технологія прісного тіста із порошком <i>ATHERINA PONTICA</i> та борошном пророщеного зерна пшениці	228
<i>Protsan N., Oliynichuk S., Verbytskyi S.</i> Effect of alkylresorcinols derivatives on the activity of enzyme preparations.....	235

РОЗДІЛ VI. ТЕХНОЛОГІЇ БУДІВНИЦТВА ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

<i>Ігнатенко П., Ігнатенко О.</i> Вплив сушіння деревини на її міцність	241
<i>Квартенко О., Присяжнюк І.</i> Моделювання процесу кінетики видалення сполук заліза в біореакторі.....	247
<i>Корнієнко І., Терещук О., Корнієнко С., Кошма А.</i> Коригування статистичних показників погодних умов для зимового періоду чищення вулично-дорожньої мережі з використанням даних веб-ресурсу	255
<i>Крячок С., Мамонтова Л., Гайструк Г.</i> Визначення сталої віддалеміра електронного тахеометра з використанням нового пристрою для прив'язки до стінних знаків.....	266

ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ НАУКОВИХ СТАТЕЙ	277
---	-----

CONTENT

SECTION I. MECHANICAL AND AUTOMOBILE ENGINEERING TECHNOLOGY

<i>Kovalevskyy S., Kovalevska O.</i> About nonperiodic oscillations at dynamic loads of executive mechanism of mobile machines with parallel kinematics	9
<i>Tonkonogyi V., Yakimov O., Bovnegra L., Beznos S., Dobrovolskyi V.</i> Reducing the thermal factor in flat abrasive grinding	16
<i>Pasov H., Sliednikova O., Kolohoida A.</i> Animation modeling of river and wrench-recharge transmissions for establishing a primary linear motion.....	27
<i>Rudik A., Rudik V.</i> Effective shape formation of rotation surfaces with the butt end of wheel.....	33
<i>Kalchenko D.</i> Theoretical and experimental investigations of the process of double-sided grinding the end faces with skew axes of cylindrical parts, and circles with calibrated parts.....	44

SECTION II. WELDING AND MATERIALS SCIENCE

<i>Falchenko Iu., Novomlynets O., Petrushynets L., Nahorna I.</i> Basic usage of surface physical-chemical processes for precision pressure welding.....	54
<i>Novomlynets O., Oleksiienko S., Yushchenko S., Polovetskiy E.</i> Precision pressure welding of aluminium alloys.....	67
<i>Bolotov G., Bolotov M.</i> Features of connection of compozite materials in machine units and building structures	77
<i>Klimenko A., Anisimov V., Sytar V.</i> Impact of solid spherical fillers on physical and mechanical properties of composite coatings based on phenilone	86

SECTION III. INFORMATION AND COMPUTER TECHNOLOGIES

<i>Kazymyr V., Yurchenko D.</i> The method of motion detection for non static cameras or for cameras with PTZ function	94
<i>Zarovsky R., Radchenko A.</i> Architecture of software for video surveillance systems with different types of cameras	101
<i>Fomenko V., Loutskii H., Rehida P., Volokyta A.</i> Thematic texts generation issues based on recurrent neural networks and word2vec	110

SECTION IV. POWER ENGINEERING, ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTRONICS

<i>Denisov Yu., Revko A., Sereda O., Dymyrets A.</i> Research of ways of increasing the energy efficiency of the system of the electric device of the unmanned aerial vehicle	116
<i>Shmelyov Yu., Boiko S., Gorodny O., Chernikhova O., Vladov S.</i> Electrical engineering complex for status of aviation batteries	123
<i>Shevchenko V., Pakhaliuk B., Husev O.</i> Review the main technologies of the wireless charging of energy accumulators for small-purchasing systems.....	133
<i>Krasnozhon O., Shevchenko R., Khomenko O., Veligorskyi O.</i> Review of high step-up dc-ac power electronics solutions without galvanic isolation.....	147

SECTION V. TECHNOLOGIES OF FOOD AND LIGHT INDUSTRY

<i>Gomelya N., Ivanova V., Trus I.</i> Efficiency of extraction heavy metal ions from diluted solutions by ion-exchange methods.....	154
<i>Indutny V., Merezhko N., Kaluga N.</i> Commodity assessment of antique coins in the market of Ukraine	163
<i>Sizaya O., Savchenko O., Zhurok I., Dorozhynska M.</i> Powder from the schrot of berries of kalina in the technology of production of wheat bread.....	176
<i>Zamorska I.</i> Content of toxic elements in strawberries and their processed products.....	189
<i>Kramarenko D., Dub V.</i> Research of the hydrobiont adjuncts effect on the wheat flour gluten properties	195

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

<i>Motuzka Iu., Romanenko E., Kazachenko S.</i> The solubility of products for enteral nutrition	203
<i>Pylypenko T., Riabchun Yu., Efimova V.</i> Investigation of the quality of hand creams.....	210
<i>Fedorova D.</i> The research of technological properties of dry fish&plant semi-products and their using in food technologies.....	217
<i>Danylyuk I.</i> Technology of unleavened dough from <i>ATHERINA PONTICA</i> powder and flour of which seed wheat grain	228
<i>Protsan N., Oliynichuk S., Verbytskyi S.</i> Effect of alkylresorcinols derivatives on the activity of enzyme preparations.....	235

**SECTION VI. CONSTRUCTION AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT
TECHNOLOGY**

<i>Ignatenko P., Ignatenko E.</i> The effect of wood drying on its strength.....	241
<i>Kvartenko A., Prysiazhniuk I.</i> Modelling the kinetics of ferrum compounds removal in a bioreactor	247
<i>Korniienko I., Tereshchuk O., Korniienko S., Koshma A.</i> Correction of statistical indicators for weather conditions for the winter period of clearing the high-road network using web-resources data	255
<i>Kryachok S., Mamontova L., Haistruk R.</i> Determination of a constant correction of rangefinder of electronic total station with using a new device for removal of coordinates from wall marks.....	266

BASIC REQUIREMENTS FOR EXECUTION AND SUBMISSION OF MANUSCRIPTS OF SCIENTIFIC ARTICLES	277
--	-----

РОЗДІЛ І. ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ ТА АВТОТРАНСПОРТУ

УДК 621.913

DOI: 10.25140/2411-5363-2017-4(10)-9-15

Сергій Ковалевський, Олена Ковалевська

ПРО НЕПЕРІОДИЧНІ КОЛИВАННЯ ПРИ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ ВИКОНАВЧОГО МЕХАНІЗМУ МОБІЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ

Актуальність теми дослідження. Особливе місце у розвитку механоскладального виробництва посідає обладнання, засноване на механізмах з паралельною кінематикою. Їх переваги проявляються в їх малій металоемності, енергоємності, динамічності, а також у кінематичних можливостях. Однак однією з важливих задач при конструюванні таких верстатів є динамічний аналіз виконавчої ланки, тому дослідження в цьому напрямку є актуальним.

Постановка проблеми. При прогнозуванні експлуатаційних характеристик мобільних верстатів-роботів на основі механізмів з паралельною кінематикою динамічний аналіз виконавчої ланки верстатної системи являє собою важливу задачу, рішення якої доцільно виконувати на основі залучення коштів імітаційного моделювання поведінки стрижневих просторових конструкцій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На основі проведеного аналізу останніх досліджень можна зробити висновок, що при конструюванні машин і механізмів вирішальну роль у виборі параметрів майбутнього виробу має обґрунтоване прогнозування його експлуатаційних показників, засноване на силових розрахунках. При цьому показники очікуваної точності виконавчих рухів виробу визначаються виходячи з обраних розрахункових схем, які засновані на припущеннях, що дозволяють звести їх до вирішуваних математичних конструкцій – рівнянням статички і динаміки.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Здебільшого припущення у розрахунках при конструюванні верстатів дозволяють знаходити спільні рішення, які засновані на усталених режимах функціонування виробу, але не беруть до уваги деякі випадки, які становлять практичний інтерес і не є тривіальними. Це стосується, передусім, динамічних процесів, які можуть супроводжувати проектуваний виріб.

Постановка завдання. Провести аналіз виконавчої частини машинної системи на основі залучення засобів симуляційної поведінки просторових структур.

Вклад основного матеріалу. У процесі дослідження було запропоновано схему розрахунку, яка дозволила провести аналіз динаміки конструктивних особливостей і представлятиме просторову систему мас, що підвищується у просторі на гнучких елементах з параметрами жорсткості s_x, s_y, s_z та затуханням h_x, h_y, h_z . Для цієї системи в межах малих амплітуд було зазначено, що частота правильних коливань f_0 може бути розрахована із залежності частоти від маси і жорсткості.

Наведено схему динамічного аналізу виконавчої гілки машини з паралельною кінематикою, що складається з тіла маси m , підвешеного на двох пружинах з жорсткістю s_1 і s_2 . Для цієї схеми враховується математичний опис гармонічного осцилятора, який є виконавчою ланкою мобільної машини, якщо взяти до уваги обурений ефект.

Для вивчення особливостей динаміки навантаженої виконавчої частини мобільної машини в комп'ютерному середовищі Simulink було створено імітаційну модель. При заданих значеннях отримана реакція моделі на примусові гармонічні коливання. Величина амплітуд у такій моделі не перевищує 2 мм, однак заслуговують на увагу коливання квазिवипадкової природи, хоча рівноважний ефект має синусоїдальну форму.

Висновки. Отриманий результат дозволяє припустити, що коливання з широким спектром частот та амплітуди виникають у виконавчій ланці мобільної машини, що може викликати резонанс елементів технологічної системи на широкій діпазоні частот. Такий режим роботи мобільних машин з механізмами паралельної кінематики повинен бути врахований при проектуванні технологічних процесів та технологічної підготовки виробництва для забезпечення продуктивності та точності обладнання протягом усього його терміну служби.

Ключові слова: динамічний аналіз; інтелектуальні верстати-роботи; паралельна кінематика.

Рис.: 6. Бібл.: 12.

Постановка проблеми. При конструюванні машин і механізмів вирішальну роль у виборі параметрів майбутнього виробу має обґрунтоване прогнозування його експлуатаційних показників, засноване на силових розрахунках. При цьому показники очікуваної точності виконавчих рухів виробу визначаються виходячи з обраних розрахункових схем, які засновані на певних припущеннях, що дозволяють звести їх до вирішуваних математичних конструкцій – рівнянням статички і динаміки. Однак здебільшого такі припущення дозволяють знаходити спільні рішення, які стосуються усталених режимів функціонування виробів, але не беруть до уваги деякі випадки, які становлять практичний інтерес і не є тривіальними. Це стосується, насамперед, динамічних процесів, які можуть супроводжувати проектуваний виріб [6; 12].

Аналіз основних досліджень і публікацій. Розвиток механоскладального виробництва також засновано на застосуванні перспективних конструкцій основного технологічного устаткування. Тому знаходять застосування високошвидкісні багатоопераційні металорізальні верстати із системами числового програмного керування, технологічне оснащення гнучких верстатних модулів і виробництв, що роботизовано. Особливе місце в цьому процесі посідає обладнання, засноване на механізмах з паралельною кінематикою. Їх переваги проявляються в їх малій металоємності, енергоємності, динамічності, а також у кінематичних можливостях. Це робить таке обладнання привабливим для створення гнучких автоматизованих виробництв з меншими, в порівнянні з традиційними виробничими рішеннями, первинними витратами, а також витратами на постійне оновлення основних виробничих фондів для підтримки конкурентоспроможності продукції, що випускається за рахунок зниження її собівартості [7; 8; 6; 10; 11; 12].

Таким чином, при прогнозуванні експлуатаційних характеристик мобільних верстатів-роботів на основі механізмів з паралельною кінематикою динамічний аналіз виконавчої ланки верстатної системи являє собою важливу задачу, рішення якої доцільно виконувати на основі залучення коштів імітаційного моделювання поведінки стрижневих просторових конструкцій.

Виклад основного матеріалу. У розробленій Проблемною лабораторією мобільних інтелектуальних технологічних машин Донбаської державної машинобудівної академії конструкції мобільного верстата-робота як вихідна ланка використані механізми типу «трипод» і «тетрапод», який у поєднанні з дельта-механізмом і з пристроєм управління, заснованим на нейрон мережевої еталонної моделі механізму в робочому просторі (рис. 1).



Рис. 1. Конструкція і схема мобільного верстата-робота

Розрахункова схема, що дозволяє провести аналіз особливостей динаміки конструкції, може бути представлена просторовою системою маси m , підвішеної у просторі на гнучких елементах з показниками жорсткості c_x, c_y, c_z і демпфірування h_x, h_y, h_z (рис. 2).

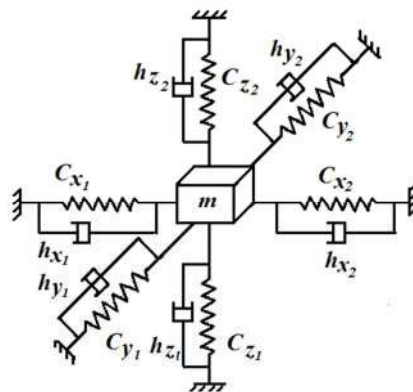


Рис. 2. Розрахункова схема механізму з паралельною кінематикою для імітаційного моделювання

Для цієї системи в межах малих амплітуд буде справедливим твердження про те, що частота власних коливань f_0 маси m може бути розрахована за формулами (1):

$$f_{ox} = \sqrt{\frac{c_{1x} + c_{2x}}{m}}; \quad f_{oy} = \sqrt{\frac{c_{1y} + c_{2y}}{m}}; \quad f_{oz} = \sqrt{\frac{c_{1z} + c_{2z}}{m}}, \quad (1)$$

де f_0 – частота власних коливань, Гц; m – маса, кг; $c_{1x}, c_{2x}, c_{1y}, c_{2y}, c_{1z}, c_{2z}$ – жорсткість Н/м.

Оскільки резонансна частота однакова для будь-якого напрямку осей, а маса матеріальної точки залишається тією ж самою для будь-якого вимірювання простору, то можна прийняти рівність (2):

$$c_{1x} + c_{2x} = c_{1y} + c_{2y} = c_{1z} + c_{2z}. \quad (2)$$

Виходячи з цього виразу можна обмежитися дослідженням особливостей динаміки системи, що складається з тіла масою m , підвішеного на двох пружинах з жорсткістю c_1 і c_2 так, як показано на рис. 3.

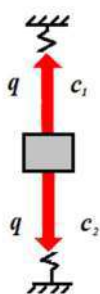


Рис. 3. Схема для динамічного аналізу виконавчої ланки верстата з паралельною кінематикою

Для цієї схеми одержано математичний опис гармонічного осцилятора, яким є виконавча ланка мобільного верстата, якщо взяти до уваги вплив сили, що підкоряється залежності (3):

$$x + \frac{1}{\tau} \dot{x} + \omega_0^2 x = \alpha_0 \cos \omega t. \quad (3)$$

Діючий вплив сили представлений у вигляді виразу (4):

$$\alpha_0 e^{i\omega t} \equiv \alpha_0 (\cos \omega t + i \sin \omega t). \quad (4)$$

Можна прийняти за рішення речову частину X , якщо α_0 у виразі $\alpha_0 \cos \omega t$ це речова величина, то рішення знайдено (5):

$$x = X_0 e^{i\omega t}. \quad (5)$$

Тоді:

$$\left(-\omega^2 + \frac{i\omega}{\tau} + \omega_0^2 \right) X_0 e^{i\omega t} = \alpha_0 e^{i\omega t}. \quad (6)$$

Звідси:

$$X_0 = \frac{\alpha_0}{\omega_0^2 - \omega^2 + i(\omega/\tau)} \cdot \frac{\omega_0^2 - \omega^2 - i(\omega/\tau)}{\omega_0^2 - \omega^2 - i(\omega/\tau)} = \alpha_0 \frac{\omega_0^2 - \omega^2 - i(\omega/\tau)}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\omega/\tau)^2}. \quad (7)$$

А речова і уявна частини знаходяться як:

$$Re(X_0) = \frac{(\omega_0^2 - \omega^2) \alpha_0}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\omega/\tau)^2}; \quad (8)$$

$$\text{Im}(X_0) = \frac{-(\omega/\tau)\alpha_0}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\omega/\tau)^2}. \quad (9)$$

При великих значеннях τ згасання послаблюється і збільшується уявна частина зсуву при резонансі.

Для амплітуди зміщення можна записати (10):

$$\rho = (X_0 X_0^*)^{1/2} = \frac{\alpha_0}{[(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\omega/\tau)^2]^{1/2}}. \quad (10)$$

Тоді сила, що діє у виконавчій ланці, може бути визначена за формулою (11):

$$P = -\frac{1}{2} M \alpha_0 \omega I_m(x_0) = \frac{1}{2} M \alpha_0^2 \frac{\omega^2/\tau}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\frac{\omega}{\tau})^2}. \quad (11)$$

Отриманий вираз повністю узгоджується з висновками, представленими в роботах [9; 1; 2; 3; 4; 5].

Для дослідження особливостей динаміки навантаженого виконавчої ланки мобільного верстата була створена імітаційну модель у комп'ютерному середовищі Simulink (рис. 4).

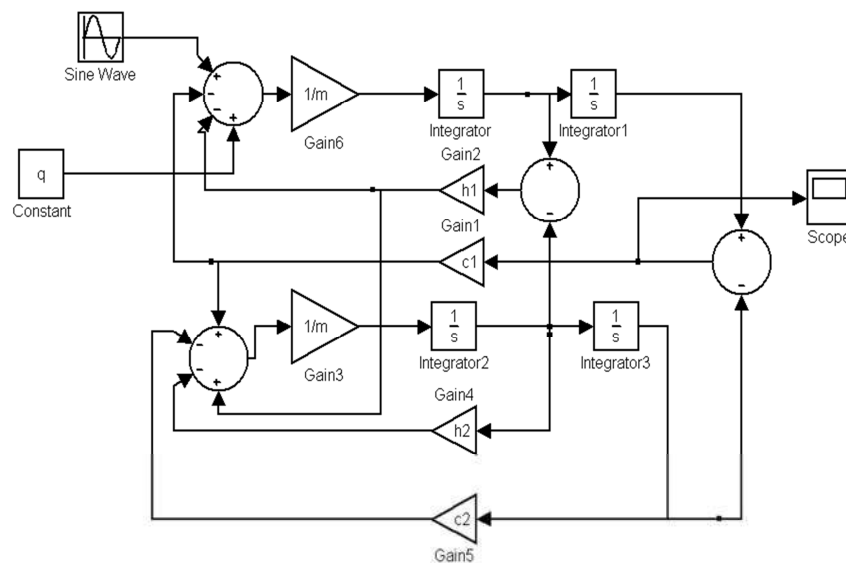


Рис. 4. Імітаційна модель виконавчої ланки мобільного верстата в Simulink

При заданих значеннях $m = 20$; $c_1 = 20$; $h_1 = 0,02$; $c_2 = 30$; $h_2 = 0,03$; $q = 10$; амплітуді вимушених гармонічних коливань $0,2$ мкм, отримана реакція моделі на вимушені гармонійні коливання у вигляді, представленою на рис. 5.



Рис. 5. Тимчасова діаграма коливань виконавчої ланки мобільного верстата при вимушених гармонійних коливаннях

Значення амплітуд у такій моделі не перевищує 2 мкм, однак заслуговує на увагу квазівипадковий характер коливань.

Для випробувань випадковим впливом з характеристиками:

Mean=0; Variance = 1; Seed=0; Sample time = 0,1.

Характер коливань виконавчої ланки аналогічний наведеному вище і по амплітуді також не перевищують 2 мкм (рис. 6):

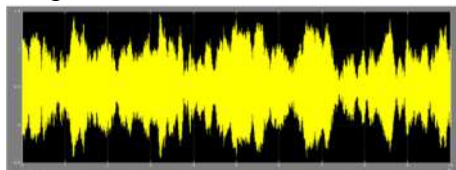


Рис. 6. Тимчасова діаграма коливань виконавчої ланки мобільного верстата при вимушених випадкових впливах

Висновки і пропозиції. Отриманий результат дозволяє припустити, що у виконавчій ланці мобільного верстата виникають коливання з широким частотним і амплітудним спектром, здатні викликати резонанс елементів технологічної системи у широкому діапазоні частот. Такий режим роботи мобільних верстатів з механізмами паралельної кінематики повинен враховуватися при проектуванні технологічних процесів і при технологічній підготовці виробництва з метою забезпечення продуктивності й точності обладнання протягом усього терміну його експлуатації.

Список використаних джерел

1. Aubry S. Breathers in nonlinear lattices: Existence, linear stability and quantization / S. Aubry // *Physica D*. – 1997. – Vol. 103. – Pp. 201–250.
2. Friesecke G. Existence theorem for solitary waves on lattices / G. Friesecke, J. Wattis // *Commun. Math. Phys.* – 1994. – Vol. 161. – Pp. 391–418.
3. Iooss G. Traveling waves in a chain of coupled nonlinear oscillators / G. Iooss, K. Kirschgässner // *Commun. Math. Phys.* – 2000. – Vol. 211. – Pp. 439–464.
4. Kreiner C.-F. Heteroclinic travelling waves for the lattice sine-Gordon equation with linear pair interaction / C.-F. Kreiner, J. Zimmer // *Discrete and continuous dynamical systems*. – 2009. – Vol. 25, Number 3, November. – Pp. 1–17.
5. Smets D. Solitary waves with prescribed speed on infinite lattices / D. Smets, M. Willem // *J. Funct. Anal.* – 1997. – Vol. 149. – Pp. 266–275.
6. Афонин В. Л. Обработывающее оборудование на основе механизмов параллельной структуры / В. Л. Афонин, П. В. Подзоров, В. В. Слепцов ; под общ. ред. В. Л. Афолина. – М. : Изд-во МГТУ Станкин, Янус; К., 2006. – 452 с.
7. Кириченко А. М. Проведення до зони обробки жорсткості та податливості обладнання з механізмами паралельної структури / А. М. Кириченко // *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія «Машинобудування». – 2010. – № 59. – С. 205–210.
8. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою : навчальний посібник для ВНЗ / В. А. Крижанівський, Ю. М. Кузнецов, І. А. Валявський, Р. А. Склярів ; під ред. Ю. М. Кузнецова. – Кіровоград, 2004. – 449 с.
9. Акимов О. О. Дослідження впливу пружності ресорного кріплення тарілок на їх амплітуді вимушених коливань / О. О. Акимов, О. Л. Ігнатенков, Є. К. Платонов // V Міжнародна науково-практична конференція 19–22 травня 2015 року «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем». – Чернігів : ЧНТУ, 2015. – С. 167–170.
10. Смирнов В. А. Кинестатическое моделирование энергоэффективного управления оборудованием с параллельной кинематикой / В. А. Смирнов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. – 2010. – Вып. 16, № 29. – С. 65–70.
11. Смирнов В. А. Повышение производительности обработки на оборудовании с параллельной кинематикой / В. А. Смирнов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. – 2010. – Вып. 15, № 10 (186). – С. 72–76.
12. Струтинський В. Б. Теоретичний аналіз жорсткості шестикоординатного механізму паралельної структури / В. Б. Струтинський, А. М. Кириченко // *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія «Машинобудування». – 2009. – № 57. – С. 198–207.

References

1. Aubry, S., (1997). Breathers in nonlinear lattices: Existence, linear stability and quantization. *Physica D*, no. 103, pp. 201–250.
2. Friesecke, G., Wattis J., (1994). Existence theorem for solitary waves on lattices, *Commun. Math. Phys.*, no. 161, pp. 391–418.
3. Iooss, G., Kirschgässner K., (2000). Traveling waves in a chain of coupled nonlinear oscillators, *Commun. Math. Phys.*, no. 211, pp. 439–464.
4. Kreiner, C.F., Zimmer J., (2009). Heteroclinic travelling waves for the lattice sine-Gordon equation with linear pair interaction. *Discrete and continuous dynamical systems*, no. 25, pp. 1–17.
5. Smets, D., Willem M., (1997). Solitary waves with prescribed speed on infinite lattices. *Funct. Anal.*, no. 149, pp. 266–275.
6. Afonin, V.L., Podzorov, P.V., Sleptsov, V.V. (2006). *Obrabatyvayushcheye oborudovaniye na osnove mekhanizmov parallel'noy struktury [Processing equipment based on the mechanisms of a parallel structure]*. Moscow: MGTU Stankin, Janus (in Russian).
7. Kirichenko, A.M. (2010). Conducting to the zone of processing rigidity and compliance of equipment with mechanisms of parallel structure [Provedennya do zony obrobky zhorstkosti ta podatlyvosti obladnannya z mekhanizmy paralelnoyi struktury]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukraini «Kyivskiy politekhnichnyi instytut». Seriya «Mashynobuduvannya» – Bulletin of the National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”. Series “Machine Building”, no. 59, pp. 205–210 (in Ukrainian).*
8. Kryzhanivsky, V.A., Kuznetsov, Yu.M. (ed.), Valiavsky, I.A., Sklyarov, R.A. (2004). *Tekhnologichne obladnannya z paralelnoiu kinematykoiu [Technological Equipment with Parallel Kinematics]*. Kirovograd (in Ukrainian).
9. Akimov, O., Ignatenkov O.L., (2015). Doslidzhennia vplyvu pruzhnosti resornoho kriplennia tarilok na yikh amplitudi vymushenykh kolyvan [Investigation of the influence of elasticity of spring support of plates on their amplitude of forced oscillations]. Proceeding from *V Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiya «Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnologichnykh protsesiv ta system» – V International Scientific and Practical Conference “Integrated quality assurance of technological processes and systems”* (May 19-22, 2015), pp. 167–170 (in Ukrainian).
10. Smirnov, V.A. (2010). Kinetostateskoe modelirovaniye energoeffektivnogo upravleniia oborudovaniem s paralelnoiu kinematikoi [Kinetostatic modeling of energy-efficient control of equipment with parallel kinematics]. *Vestnik IUUrGU Seriya “Mashinostroeniye” – Bulletin of the YuUrGU. Series “Machine-building”, vol. 16, no. 29, pp. 65–70 (in Russian).*
11. Smirnov, V.A. (2010). Povysheniye proizvoditelnosti obrabotki na oborudovanii s paralelnoiu kinematikoi [Increase of productivity of processing on the equipment with parallel kinematics]. *Vestnik IUUrGU Seriya “Mashinostroeniye” – Bulletin of the YuUrGU. Series “Machine-building”, vol. 15, no. 10 (186), pp. 72–76 (in Russian).*
12. Strutinsky, V.B. (2009). Teoretychniy analiz zhorstkosti shestykoordinatnoho mekhanizmu paralelnoyi struktury [Theoretical analysis of the stiffness of a six-coordinate mechanism of a parallel structure]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukraini «Kyivskiy politekhnichnyi instytut». Seriya «Mashynobuduvannya» – Bulletin of the National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”. Series “Machine Building”, no. 57, pp. 198–207 (in Ukrainian).*

UDC 621.913

Serhiy Kovalevskyy, Olena Kovalevska

**ABOUT NONPERIODIC OSCILLATIONS AT DYNAMIC LOADS
OF EXECUTIVE MECHANISM OF MOBILE MACHINES
WITH PARALLEL KINEMATICS**

Urgency of the research. A special place in the development of mechano-assembly production begins to occupy equipment based on mechanisms with parallel kinematics. Their advantages are manifested in their low metal capacity, energy intensity, dynamism, and also in kinematic possibilities. However, one of the important tasks in constructing such machines is a dynamic analysis of the executive branch; therefore research in this direction is relevant.

Target setting. In forecasting the operational characteristics of mobile robot machines on the basis of mechanisms with parallel kinematics, the dynamic analysis of the executive part of the machine tool system is an important task, the solution of which is expedient to perform on the basis of attracting funds simulation behavior of the spatial structures of the spatial structure.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Actual scientific researches and issues analysis. On the basis of the analysis of recent studies, we can conclude that the design of machines and mechanisms crucial role in choosing the parameters of the future product has a reasonable prediction of its performance indicators, based on strength and strength calculations. At the same time, the indicators of the expected accuracy of the executive motions of the product are determined based on the chosen calculation schemes, which are based on a number of assumptions that allow them to be reduced to solvable mathematical constructions – the equation of statics and dynamics.

Uninvestigated parts of general matters defining. In some cases, assumptions in calculations in the design of machines, allow you to find common solutions that are based on the established modes of operation of the product, but drop some cases that are of practical interest and are not trivial. This applies, first of all, to the dynamic processes that can accompany the projected product.

The research objective. Conduct an analysis of the executive part of the machine system based on the attraction of the simulation behavior of spatial structures.

The statement of basic materials. In the course of the study, a calculation scheme was proposed that allowed an analysis of the dynamics of the design features, and is represented by a spatial mass system m suspended in space on flexible elements with rigidity parameters c_x, c_y, c_z and damping h_x, h_y, h_z . For this system, within the limits of small amplitudes, it has been stated that the frequency of the proper oscillations f_0 can be calculated from the dependence of the frequency on mass and stiffness.

The scheme for dynamic analysis of the executive branch of the machine with parallel kinematics consisting of a body of mass m , suspended on two springs with rigidity c_1 and c_2 , is presented. For this scheme a mathematical description of the harmonic oscillator, which is the executive link of the mobile machine, is taken, if we take into account the perturbing effect.

To study the peculiarities of the dynamics of the loaded executive part of the mobile machine, an imitation model was created in the Simulink computer environment. At given values, the reaction of the model to forced harmonic oscillations is obtained. The magnitude of the amplitudes in such a model does not exceed 2 mm, however, deserves attention to the quasi-random nature of oscillations, although the equilibrium effect has a sinusoidal form.

Conclusions. The obtained result suggests that oscillations with a wide frequency and amplitude spectrum arise in the executive link of the mobile machine, which can cause resonance of the elements of the technological system over a wide range of frequencies. Such a mode of operation of mobile machines with mechanisms of parallel kinematics should be taken into account in the design of technological processes and in the technological preparation of production in order to ensure the productivity and accuracy of equipment throughout its lifetime.

Key words: dynamic analysis; intellectual machines-works; parallel kinematics.

Fig.: 6. Bibl.: 12.

УДК 621.913

Сергей Ковалевский, Елена Ковалевская

О НЕПЕРИОДИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЯХ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА МОБИЛЬНЫХ СТАНКОВ С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИКОЙ

В данной статье рассмотрены вопросы динамического анализа исполнительного звена станочной системы. Проведен анализ расчетной схемы, состоит из пространственной системы, подвешенной в пространстве на гибких элементах. Получено математическое описание гармонического осциллятора, которым является исполнительное звено мобильного станка. Создана имитационная модель в компьютерной среде Simulink для исследования особенностей динамики нагруженной исполнительного звена мобильного станка. Получена реакция модели на вынужденные гармонические колебания, которая имеет квази случайный характер, при синусоидальном воздействии. Полученный результат позволяет предположить, что в исполнительном звене мобильного станка возникают колебания с широким частотным и амплитудным спектром, способные вызвать резонанс элементов технологической системы в широком диапазоне частот.

Ключевые слова: динамический анализ; интеллектуальные станки-работы; параллельная кинематика.

Рис.:6. Библ.: 12.

Ковалевський Сергій Вадимович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології машинобудування Донбаської державної машинобудівної академії (вул. Академічна, 72, м. Краматорськ, 84300, Україна).

Ковалевский Сергей Вадимович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения Донбасской государственной машиностроительной академии (ул. Академическая, 72, г. Краматорск, 84300, Украина).

Kovalevskyy Serhiy – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Manufacturing Engineering Donbas State Engineering Academy (72 Akademicheskaya Str., 84300, Kramatorsk, Ukraine).

E-mail: kovalevskii@dgma.donetsk.ua

Ковалевська Олена Сергіївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування Донбаської державної машинобудівної академії (вул. Академічна, 72, м. Краматорськ, 84300, Україна).

Ковалевская Елена Сергеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения Донбасской государственной машиностроительной академии (ул. Академическая, 72, г. Краматорск, 84300, Украина).

Kovalevska Olena Sergeevna – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Manufacturing Engineering Donbas State Engineering Academy (72 Kramatorsk, Akademicheskaya Str., 84300 Kramatorsk, Ukraine).

E-mail: olenakovalevska@gmail.com

УДК 621.9.06.-229.331

DOI: 10.25140/2411-5363-2017-4(10)-16-26

Владимир Тонконогий, Алексей Якимов, Любовь Бовнегра,
Светлана Безнос, Виталий Добровольский

СНИЖЕНИЕ ТЕПЛООВОГО ФАКТОРА ПРИ ПЛОСКОМ АБРАЗИВНОМ ШЛИФОВАНИИ

Актуальность темы исследования. Шлифование сопровождается выделением тепла, под действием которого в поверхностном слое обрабатываемой детали образуются прижоги и остаточные растягивающие напряжения. Шлифовочные дефекты являются источниками разрушения детали.

Постановка проблемы. Применение кругов с прерывистой рабочей поверхностью позволяет снизить температуру в зоне резания. Абразивная промышленность не выпускает прерывистые круги на керамической связке по причине несовершенства технологии их изготовления.

Анализ последних исследований и публикаций. Широкое применение прерывистых кругов на машиностроительных предприятиях сдерживается противоречивостью методик по расчету длин впадин и режущих выступов.

Выделение не исследованных ранее частей общей проблемы. Проблема снижения теплонапряженности процесса шлифования может быть решена на основе дальнейшего изучения теплофизических и динамических составляющих процесса обработки прерывистыми кругами.

Постановка задания. Целью научного исследования является выявление путей снижения теплонапряженности процесса шлифования.

Изложение основного материала. Проведено моделирование процесса нарастания тепла в фиксированной точке обрабатываемой поверхности по мере многократного воздействия на нее тепловой энергией, выделяемой при срезах металла отдельными выступами прерывистого круга. Проведены исследования по выявлению влияния размеров и количества геометрических элементов рабочей поверхности прерывистого круга на параметрическую устойчивость упругой системы станка.

Выводы к статье. Разработаны рекомендации по расчету протяженностей выступов и впадин прерывистого круга с учетом теплового и динамического факторов. Получены данные, позволившие подтвердить гипотезу, согласно которой прерывистые круги с большим числом прорезей на рабочей поверхности и высокопористые круги могут снизить температуру в зоне резания с одинаковым эффектом.

Ключевые слова: прерывистые круги; высокопористые круги; прижоги; абразивный инструмент.

Рис.: 6. Библ.: 16.

Постановка проблемы. Качество поверхностного слоя деталей машин формируется на стадии финишных операций. Наиболее распространенной финишной операцией является шлифование. В зоне резания при шлифовании действуют высокие температуры, под действием которых в поверхностном слое обрабатываемых деталей могут появляться прижоги, трещины и высокие растягивающие напряжения. Снизить теплонапряженность процесса шлифования можно применением абразивных кругов, рабочая поверхность которых состоит из чередующихся выступов и впадин.

С середины 60-х и до конца 70-х годов XX века прерывистые шлифовальные круги применялись на машиностроительных предприятиях Советского Союза. Широкое использование этих кругов сдерживалось тем обстоятельством, что абразивная промышленность не выпускала прерывистые круги на керамической связке. Машиностроительные заводы были вынуждены сами формировать впадины на обычных абразивных кругах. Для этой цели использовались заточные станки, оснащенные делительными механизмами. В эти же годы прошлого века было опубликовано много научных работ, посвященных расчету геометрических параметров рабочей поверхности прерывистых кругов [1–5]. Несмотря на многолетние и многочисленные исследования процесса прерывистого шлифования и многочисленные методики по расчету геометрических параметров прерывистых кругов, их использование на машиностроительных предприятиях из года в год сокращается. Это объясняется тем, что одна и та же совокупность длин выступов и впадин для одних и тех же условий шлифования может способствовать возникновению двух разнозначных эффектов: требуемому понижению температуры в зоне резания и параметрическому резонансу в упругой системе станка [6].

Возникновение ситуации, когда применение прерывистого круга приводит к появлению эффектов, противоположно влияющих на качество поверхностного слоя обрабатываемой

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

детали, обусловлено противоречивостью подходов при разработке методик для расчета протяженностей выступов и впадин на рабочей поверхности абразивного инструмента. Это предполагает необходимость дальнейшего поиска новых решений в этом направлении.

Анализ последних исследований и публикаций. С 90-х годов XX века интерес к прерывистому шлифованию возобновился и стали появляться научные работы, содержащие методики расчета протяженностей режущих выступов и впадин на рабочих поверхностях кругов [6–8].

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы. В большинстве методик [1–8] рассчитывается только протяженность режущего выступа l_1 . Величину впадины l_2 не рассчитывают, а принимают равной $l_2 = (0,3...0,5) \cdot l_1$ из соображений износостойкости кругов [4].

Цель статьи. Главной целью этой работы является изыскание путей понижения теплонапряженности процесса шлифования с обеспечением микро- и макрогеометрии обработанной поверхности.

Изложение основного материала. Рассмотрим расчетную схему плоского шлифования, в которой снимаемый припуск представлен в виде множества элементарных прямолинейных стержней, расположенных по нормали и обрабатываемой поверхности (рис. 1) [9].

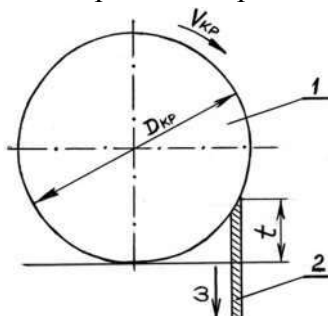


Рис. 1. Расчетная схема удаления припуска при плоском шлифовании:
1 – шлифовальный круг; 2 – стержень, вырезанный на обрабатываемой детали; t – глубина шлифования

В процессе шлифования стержни перерезаются со скоростью $\omega = V_{\text{дет}} \cdot \sqrt{t/D_{\text{кр}}}$, где $V_{\text{дет}}$ – скорость перемещения детали, м/с; t – глубина резания, м; $D_{\text{кр}}$ – диаметр шлифовального круга, м.

Нестационарный тепловой режим прерывистого шлифования, сопровождающийся периодическим прерыванием контакта круга с обрабатываемой деталью, открывает принципиально новые возможности управления теплонапряженностью процесса. Если длительность процесса шлифования за счет изменения протяженности режущих выступов прерывистого круга сделать меньше времени теплового насыщения, то температура в зоне контакта круга с обрабатываемой деталью не будет достигать своих максимальных значений и может быть ограничена.

На рис. 2 представлен характер изменения температуры от времени воздействия теплового источника. За период прохождения режущего выступа τ_1 обрабатываемая поверхность нагревается до температуры Θ_2° , а за время прерывания процесса τ_2 температура поверхности понижается до Θ_1° . Количество тепла Q_1 , необходимое для нагревания поверхности за время τ_1 , можно приравнять к количеству тепла Q_2 , поглощаемому при охлаждении поверхности от Θ_2° до Θ_1° за время τ_2 .

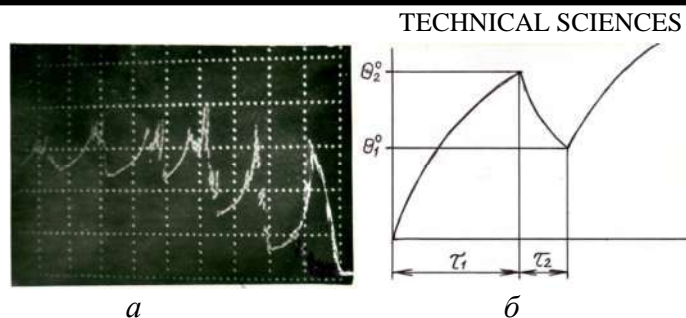


Рис. 2. Характер изменения температуры резания при прерывистом шлифовании: а – осциллограмма; б – расчетная схема

Параметры Q_1 и Q_2 определяются по следующим формулам [9]:

$$Q_1 = q_1 \cdot \tau_1 = \delta \cdot \omega \cdot \tau_1, \quad (1)$$

$$Q_2 = q_2 \cdot \tau_2, \quad (2)$$

где q_1 и q_2 – интенсивности тепловых потоков, Вт/м², $q_2 = \alpha \cdot (\Theta_1^\circ + \Theta_2^\circ)/2$;

α – коэффициент теплоотвода, Вт/(м² · °С);

δ – условное напряжение резания, Н/(м² · °С), $\delta = (F_z \cdot V_{кр})/Qn$;

$V_{кр}$ – окружная скорость шлифовального круга, м/с;

Qn – производительность обработки, м³/с, $Qn = B \cdot V_{кр} \cdot t$;

B – ширина шлифования, м;

F_z – тангенциальная составляющая силы резания, Н.

Тангенциальную составляющую силы резания F_z при плоском шлифовании можно рассчитать по следующей формуле [10]:

$$F_z = \frac{0,382}{V_{кр}^{0,26}} \cdot \left(\frac{Kv \cdot \sigma \cdot A \cdot V_{дет} \cdot l\phi}{R_{кр}} \right)^{0,3} \cdot (\varepsilon \cdot \alpha)^{0,7} \cdot (D_{кр} \cdot t)^{0,347} \cdot S' \cdot n_{уд}, \quad (3)$$

где Kv – температурно-скоростной коэффициент, $Kv = 2,74 \cdot 10^6 \cdot V_{кр}^{0,4}$;

σ – предел прочности при статистических методах исследований, МПа;

$R_{кр}$ – радиус шлифовального круга, м;

$$A = \frac{\cos \gamma' - \mu \cdot \sin \gamma'}{\sin \Theta' (1 - \mu \cdot \mu') \cdot \cos(\gamma' + \Theta') + (\mu + \mu') \cdot \sin(\gamma' + \Theta')},$$

Θ' – угол скалывания, $\Theta' = 45^\circ - (\gamma' + \mu + \mu')/2$;

$$\gamma' - \text{передний угол, } \gamma' = \frac{1}{2} \cdot \left(\pi - \arcsin \frac{3 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{r}} \right);$$

μ , μ' – коэффициент трения зерна о металл и коэффициент внутреннего трения при пластической деформации обрабатываемого материала соответственно;

r – радиус закругления режущего зерна, мкм;

ε – коэффициент тепловой активности металла, $\varepsilon = \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho}$;

ρ , λ , c – плотность (кг/м³), теплопроводность (Дж/(м·с·°С)) и теплоемкость (Дж/(кг·°С)) обрабатываемого материала соответственно;

α – коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала, м²/с, $\alpha = \lambda/(c \cdot \rho)$;

$l\phi$ – фактическое расстояние между режущими зёрнами на рабочей поверхности шлифовального круга, м, $l\phi = 6,48 \cdot V_{кр}^{0,5} \cdot n_{y\phi}^{-0,5}$;

S' – поперечная подача шлифовального круга, мм/дв.ход;

$n_{y\phi}$ – фактическое количество работающих зёрен [11], $n_{y\phi} = 111 \cdot 10^6 \cdot N_3^{-1,3} \cdot N_{стр}^{-0,17}$;

N_3 – номер зернистости круга;

$N_{стр}$ – номер структуры шлифовального круга.

В работе [12] предполагается расчет радиусов закругления режущих зёрен r осуществлять по следующим формулам: для электрокорунда белого $r = 10^{-6} \cdot N_3^{-0,85}$; для карбида кремния зеленого $r = 1,4 \cdot 10^{-6} \cdot N_3^{-0,85}$; для алмаза $r = 0,25 \cdot 10^{-6} \cdot N_3^{-0,85}$.

Время нагрева поверхности τ_1 определяется из следующего выражения [9]:

$$\tau_1 = \frac{\lambda}{2 \cdot c \cdot \rho \cdot \omega^2} \cdot \ln \left[\frac{c \cdot \rho \cdot (\Theta_2^\circ - \Theta_1^\circ)}{\delta} \right]. \quad (4)$$

Время охлаждения определяется из условия $Q_1 = Q_2$ с учетом зависимостей (1) и (2):

$$\tau_2 = \frac{q_1}{q_2} \cdot \tau_1 = \frac{\lambda \cdot \delta}{\alpha \cdot (\Theta_1^\circ + \Theta_2^\circ) \cdot c \cdot \rho \cdot \omega} \cdot \ln \left[\frac{c \cdot \rho \cdot (\Theta_2^\circ - \Theta_1^\circ)}{\delta} \right]. \quad (5)$$

Зная τ_1 и τ_2 , можно оценить производительность обработки Q_u за время одного цикла ($\tau_1 + \tau_2$):

$$Q_u = \frac{s \cdot \omega \cdot \tau_1}{(\tau_1 + \tau_2)} = \frac{s \cdot \omega}{\left(1 + \frac{q_1}{q_2}\right)} = \frac{s \cdot \omega}{\left[1 + \frac{\delta \cdot \omega \cdot 2}{\alpha \cdot (\Theta_1^\circ + \Theta_2^\circ)}\right]} = \frac{s}{\left[\frac{1}{\omega} + \frac{2 \cdot \delta}{\alpha \cdot (\Theta_1^\circ + \Theta_2^\circ)}\right]}, \quad (6)$$

где s – площадь поперечного сечения элементарного прямолинейного стержня, расположенного по нормали к обрабатываемой поверхности, м².

Из анализа выражения (6) видно, что увеличить производительность цикла можно за счет увеличения скорости ω внедрения режущих зёрен в обрабатываемый материал и коэффициента теплоотвода α , а также уменьшения условного напряжения резания δ , т.е. обеспечения высокой режущей способности зёрен. При шлифовании кругом с прерывистой рабочей поверхностью скорость внедрения режущих зёрен в металл возрастает на величину $(1 + l_2/l_1)$, где l_2 – длина режущего выступа круга, l_1 – длина выреза на круге [9]. Следовательно, выражения (4) и (5) для прерывистого шлифования примут вид:

$$\tau'_1 = \frac{\lambda}{2 \cdot c \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot (1 + l_2/l_1)^2} \cdot \ln \left[\frac{c \cdot \rho \cdot (\Theta_2^\circ - \Theta_1^\circ)}{\delta} \right]; \quad (7)$$

$$\tau'_2 = \frac{\lambda \cdot \delta}{\alpha \cdot (\Theta_1^\circ + \Theta_2^\circ) \cdot c \cdot \rho \cdot \omega \cdot (1 + l_2/l_1)} \cdot \ln \left[\frac{c \cdot \rho \cdot (\Theta_2^\circ - \Theta_1^\circ)}{\delta} \right]. \quad (8)$$

Геометрические параметры прерывистого круга определяются из выражений:

$$l'_1 = \frac{\lambda \cdot V_{кр}}{2 \cdot c \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot (1 + l_2/l_1)^2} \cdot \ln \left[\frac{c \cdot \rho \cdot (\Theta_2^\circ - \Theta_1^\circ)}{\delta} \right]; \quad (9)$$

$$l'_2 = \frac{\lambda \cdot \delta \cdot V_{кр}}{\alpha \cdot (\Theta_1^\circ + \Theta_2^\circ) \cdot c \cdot \rho \cdot \omega \cdot (1 + l_2/l_1)} \cdot \ln \left[\frac{c \cdot \rho \cdot (\Theta_2^\circ - \Theta_1^\circ)}{\delta} \right]. \quad (10)$$

Для обеспечения целого четного числа режущих выступов, их количество необходимо рассчитывать по формуле:

$$n = \frac{\pi \cdot D_{кр}}{(l'_1 + l'_2)}. \quad (11)$$

Расчет геометрических параметров прерывистого круга производится в следующей последовательности: по формулам (9) и (10) производится расчет протяженностей выступов l_1 и впадин l_2 без учета увеличения скорости внедрения режущих зерен в обрабатываемый материал, т.е. без учета коэффициента $(1+l_2/l_1)$, а затем осуществляется корректировка расчетных значений: длина режущего выступа l_1 делится на $(1+l_2/l_1)^2$, а длина прорези l_2 делится на $(1+l_2/l_1)$. После этого определяется количество режущих выступов на круге по формуле (11). Из анализа выражений (9) и (10) следует, что при фиксированном значении разности температур $(\Theta_2^\circ - \Theta_1^\circ)$ протяженности выступов l'_1 и впадин l'_2 тем меньше, чем больше величина коэффициента $(1+l_2/l_1)$. Другими словами, для обеспечения заданной разности температур $(\Theta_2^\circ - \Theta_1^\circ)$ с увеличением величины отношения протяженности впадины l_2 к длине выступа l_1 необходимо увеличивать количество прорезей на рабочей поверхности шлифованного круга. Если увеличить (l_2/l_1) и при этом сохранить прежнее количество прорезей n на абразивном инструменте, то разность максимальной Θ_2° и минимальной Θ_1° температур первого цикла прерывистого шлифования возрастет (рис. 2). Из выражений (9) и (10) видно, что для сохранения этой разности на прежнем уровне, необходимо уменьшить длины выступов l'_1 и впадин l'_2 , причем размеры режущих выступов l'_1 должны быть уменьшены в большей степени, чем протяженности прорезей l'_2 . Но это приведет к уменьшению величины отношения (l'_2/l'_1) и увеличению числа прорезей на круге. Таким образом, для сохранения фиксированного значения разности максимальной и минимальной температур в первом цикле прерывистого шлифования необходимо при уменьшении (l'_2/l'_1) увеличивать количество прорезей n на рабочей поверхности абразивного инструмента. Приведенные рассуждения хорошо согласуются с данными по расчету температур при прерывистом шлифовании T_k [13].

На рис. 3 представлена зависимость температуры, возникающей при плоском шлифовании прерывистым абразивным кругом, от количества прорезей на рабочей поверхности инструмента n и от величины отношения $N = (l'_2/l'_1)$ [13].

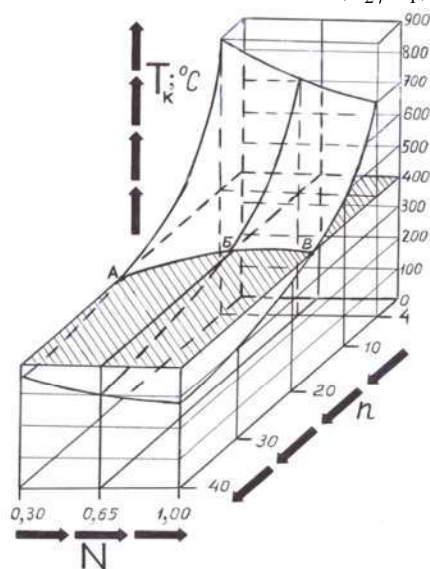


Рис. 3. Зависимость температуры шлифования T_k от числа режущих выступов n на круге и от величины отношения $N = (l'_2/l'_1)$

Приведенная зависимость $T_k = f(N, n)$ рассчитана по формуле:

$$T_k = \frac{2 \cdot \psi \cdot q}{\sqrt{c \cdot \rho \cdot \lambda}} \cdot \sum_{i=1}^k \left[\sqrt{(k-i+1) \cdot \frac{l'_2}{l'_1} + (k-i) \cdot \frac{l'_2}{V_{кр}}} \times \right. \\ \left. \times \operatorname{ierfc} \left(\frac{t - \sum_{i=1}^k t_i}{2 \cdot \sqrt{\alpha} \cdot \sqrt{(k-i+1) \cdot \frac{l'_1}{V_{кр}} + (k-i) \cdot \frac{l'_2}{V_{кр}}}} \right) - \right. \\ \left. - \sqrt{(k-i) \cdot \frac{(l'_1+l'_2)}{V_{кр}}} \cdot \operatorname{ierfc} \left(\frac{t - \sum_{i=1}^k t_i}{2 \cdot \sqrt{\alpha} \cdot \sqrt{(k-i) \cdot \frac{(l'_1+l'_2)}{V_{кр}}}} \right) \right] \quad (12)$$

где ψ – коэффициент, показывающий, какая часть работы переходит в тепло;

k – число режущих выступов, принявших участие в перерезании адиабатического стержня, расположенного по нормали к обрабатываемой поверхности:

$$k = \frac{\sqrt{D_{кр} \cdot t}}{V_{дет}} \cdot \frac{V_{кр}}{(l'_1+l'_2)}; \quad (13)$$

q – интенсивность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$, $q = \frac{P_z \cdot V_{кр}}{\sqrt{D_{кр} \cdot t \cdot B}}$.

На рис. 3 зависимость $T_k = f(N, n)$ выглядит в виде плоскости, наклоненной к плоскости координат (N, n) и изогнутой как по отношению к оси N , так и относительно координатной оси n . По характеру этих изгибов и по углам наклонов к плоскости координат (N, n) видно, что температура прерывистого шлифования уменьшается с увеличением параметров N и n .

Кривая АБВ является линией пересечения двух поверхностей: плоскости, параллельной координатной плоскости (N, n) и находящейся на уровне 400°C , и наклоненной поверхности, изогнутой в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Кривая АБВ является геометрическим множеством точек, каждая из которых является такой совокупностью параметров N и n , при которой температура прерывистого шлифования не превышает 400°C . Анализируя углы наклона кривой АБВ к координатным осям N и n и характер искривления этой линии можно заключить, что температуру прерывистого шлифования T_k можно поддерживать на одном и том же уровне, если при уменьшении величины отношения протяженности впадины l'_2 к длине выступа l'_1 увеличивать количество прорезей на рабочей поверхности абразивного инструмента.

Совокупность параметров N и n во многом определяет не только уровень температуры, формируемой при прерывистом шлифовании, но и параметрическую устойчивость упругой системы шлифовального станка.

На рис. 4 [13] показаны зоны параметрической неустойчивости упругой системы станка в виде пятен, изображенных в плоской системе координат, в которой по осям абсцисс отложены числа режущих выступов, а по осям ординат – величины отношений протяженностей впадин к длинам выступов.

В расположении пятен на плоскости (N, n) прослеживается некоторая закономерность, а именно: пятна сгруппированы в колонны, наклоненные на некоторый угол по отношению к оси абсцисс. По направлению наклона этих колонн к оси абсцисс видно,

что с возрастанием величин отношений протяженностей впадин к длинам выступов области устойчивой работы упругой системы станка (области, заключенные между колоннами) смещаются в сторону уменьшения чисел режущих выступов на шлифовальном круге. Из анализа рис. 4 можно сделать и другой вывод: для обеспечения устойчивой работы упругой системы плоскошлифовального станка необходимо при уменьшении величины отношения размера впадины к размеру выступа увеличивать количество впадин на круге. Этот вывод полностью согласуется с изложенными выше рекомендациями по проектированию режущего макрорельефа рабочей поверхности прерывистого абразивного круга, обеспечивающего требуемую степень понижения температуры.

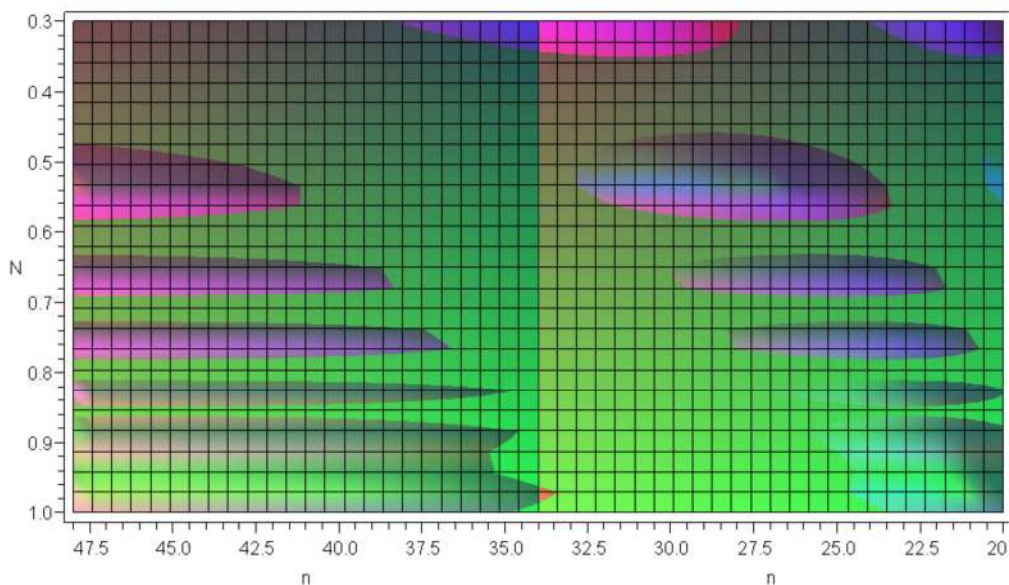


Рис. 4. Зоны параметрической неустойчивости упругой системы плоскошлифовального станка, где $N = l_2/l_1$,
 n – число прорезей на абразивном круге

Установлено [13], что с возрастанием количества прорезей на рабочей поверхности абразивного круга наблюдается увеличение размеров областей устойчивой работы упругой системы плоскошлифовального станка (рис. 5) и снижение температуры на обрабатываемой поверхности (рис. 6).

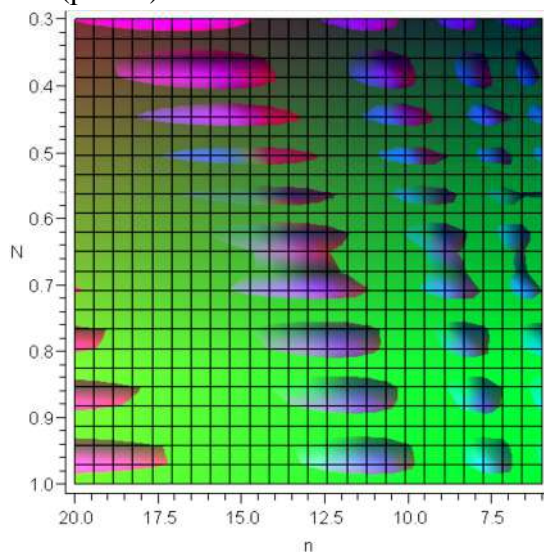


Рис. 5. Увеличение размеров зон устойчивой работы упругой системы станка по мере возрастания числа режущих выступов на круге

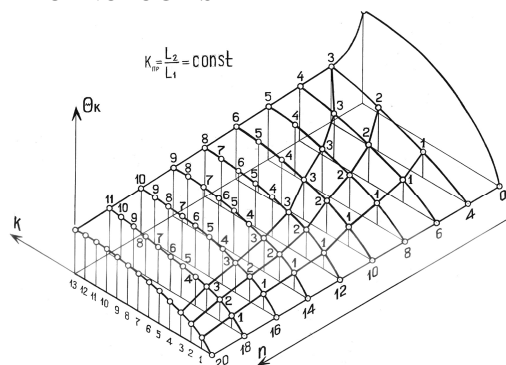


Рис. 6. Снижение температуры прерывистого шлифования по мере возрастания числа режущих выступов на круге

В работе [14] выдвинута и обоснована гипотеза, суть которой состоит в следующем: прерывистый абразивный круг с большим количеством прорезей на рабочей поверхности, протяженность которых соизмерима с расстоянием между двумя соседними режущими зёрнами, может быть заменен высокопористым кругом. Эта гипотеза хорошо согласуется с данными, представленными на рис. 3, 5 и 6 [13].

Высокопористые круги получили широкое применение при шлифовании труднообрабатываемых материалов: жаропрочных, титановых, нержавеющей сталей и сплавов. При шлифовании этих материалов абразивный круг быстро «засаливается», т.е. покрывается тонким слоем спрессованной металлической стружки [15].

Высокопористые круги часто применяют при обработке сложнлегированных сталей, при шлифовании которых, особенно при интенсивных режимах, появляются прижоги – структурные изменения металла, вызванные высоким тепловыделением при шлифовании [16].

Крупные поры выполняют следующие функции:

- создают перед абразивными зёрнами пространство для размещения снимаемой стружки, что уменьшает «засаливание» круга;
- улучшают подачу смазочноохлаждающих жидкостей непосредственно в зону контакта круга с деталью, предотвращая появление прижогов;
- за счет вентиляционного эффекта дополнительно охлаждают зону контакта воздушным потоком;
- уменьшают трение между поверхностями круга и детали [15, 16].

Все эти положительные эффекты, проявляемые при обработке высокопористыми кругами, присущи прерывистому шлифованию.

Кроме того, при прерывистом шлифовании возникают высокочастотные колебания с малой амплитудой, которые облегчают процесс удаления обрабатываемого материала режущими зёрнами круга и продлевают режущую способность абразивного инструмента во времени благодаря его самозаточке. При шлифовании высокопористыми кругами тоже происходит самообразование их режущего микрорельефа, но это происходит не из-за высокочастотных колебаний, а за счет применения принципиально новых абразивных материалов, способных саморазрушаться в процессе резания.

Замена прерывистых кругов на высокопористые снимает две проблемы:

- 1) проблему формирования впадин на круге (технология изготовления прерывистых кругов на керамической связке весьма несовершенна);
- 2) проблему ликвидации возможности возникновения в упругой системе станка параметрических колебаний.

Выводы и предложения. Разработаны рекомендации по проектированию режущего макрорельефа рабочей поверхности прерывистых абразивных кругов, а полученные данные подтверждают гипотезу о возможности замены кругов с прерывистой рабочей поверхностью на высокопористые (высокоструктурные) абразивные круги.

Список использованных источников

1. Сипайлов В. А. Расчет размеров режущих перемычек круга при прерывистом шлифовании / В. А. Сипайлов, А. В. Якимов // Заводская лаб. – Пермь, 1966. – Т. 32, № 7. – С. 847–851.
2. Якимов А. В. Методика расчетов кругов с прерывистой рабочей поверхностью / А. В. Якимов, Н. А. Ярмонов, Ю. А. Напарьин // Вестник машиностроения. – 1973. – № 12. – С. 38–41.
3. Расчет геометрических параметров прерывистых кругов / А. В. Якимов, Ю. А. Напарьин, Н. А. Ярмонов, В. И. Свищёв, Е. В. Грисенко // Информационный листок Западно-Уральского МТЦНТИиП № 259-74. – Пермь, 1974. – 7 с.
4. Якимов А. В. Оптимизация процесса шлифования / А. В. Якимов. – М. : Машиностроение, 1975. – 176 с.
5. Якимов А. В. Расчет, конструирование и эффективность применения прерывистых кругов-вентиляторов / А. В. Якимов, В. В. Якимов, В. Н. Кудашкин // Новые методы абразивной обработки. – К. : Вища школа, 1975. – С. 85–91.
6. Свищёв В. И. К вопросу расчета параметров регулярного макрорельефа на рабочей поверхности абразивного инструмента / В. И. Свищёв // Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей обработки в машиностроении : межвузовский сбор. научн. трудов. – Пермь : ППИ, 1990. – С. 41–48.
7. Теоретические основы резания и шлифования материалов / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков, Б. С. Серов, А. А. Якимов. – Одесса : ОГПУ, 1999. – 450 с.
8. Лукин Л. Л. Расчет прерывистых алмазных кругов при плоском периферийном шлифовании / Л. Л. Лукин, В. Д. Старшев // Вестник Иж.ГТУ. – 2007. – № 1. – С. 30–38.
9. Тепловые и механические процессы при резании металлов : учеб. пособие [для студ. выш. учеб. завед.] / Ф. В. Новиков, А. А. Якимов, Г. В. Новиков, С. Г. Зимин, В. А. Вайсман. – Одесса : ОГПУ, 1997. – 179 с.
10. До питання про знос шліфувальних кругів з переривчастою робочою поверхнею / О. О. Якімов, Н. М. Клименко, Ю. В. Шіхірева, С. Ю. Дмитрієва, С. М. Уминський // Аграрний вісник Причорномор'я. Технічні науки : зб. наук. праць. – Одеса : ОДАУ, 2016. – Вип. 80. – С. 13–23.
11. Маслов Е. Н. Теория шлифования материалов основы резания и шлифования материалов / Е. Н. Маслов – М. : Машиностроение, 1974. – 320 с.
12. Лебедев В. Г. Технологические основы управления качеством поверхностного слоя при шлифовании : дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.02.08 / Лебедев Владимир Георгиевич ; Киевский политехнический институт. – Одесса, 1991. – 478 с.
13. Якімов О. О. Технологічне забезпечення якості поверхневого шару зубів високоточних зубчастих коліс при шліфуванні : дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.02.08 / Якімов Олексій Олександрович. – Одеса, 2015. – 465 с.
14. Лищенко Н. В. Определение температуры при шлифовании прерывистыми и высокопористыми кругами / Н. В. Лищенко, В. П. Ларшин // Наукові нотатки: Міжвузівський збірник (за напрямком «Інженерна механіка»). – Луцьк : ЛДТУ, 2013. – Вип. 40. – С. 150–158.
15. Кремень З. И. Высокопористые круги – эффективное средство повышения производительности шлифования и качества деталей из различных материалов / З. И. Кремень // Инструмент и технологии. – 2001. – № 5-6. – С. 34–37.
16. Маринов Н. А. Применение высокопористых абразивных кругов в современном машиностроении / Н. А. Маринов // Вестник КемГСХИ. – 2009. – № 3. – С. 150–153.

References

1. Sipailov, V.A., Yakimov, A.V. (1966). *Raschet razmerov rezhushchikh peremychek kruga pri preryvistom shlifovanii* [Calculation of the sizes of cutting lintels of a circle with intermittent grinding]. Perm: Zavodskaja lab, vol. 32, no. 7, pp. 847–851 (in Russian).
2. Yakimov, A.V., Iarmonov, N.A., Neparin, Iu.A. (1973). *Metodika raschetov krugov s preryvistoi rabochei poverkhnosti* [Method for calculating circles with a discontinuous working surface]. Moscow: Vestnik mashinostroeniia, no. 12, pp. 38–41 (in Russian).
3. Yakimov, A.V., Neparin, Iu.A., Iarmonov, N.A., Svirshchev, V.I., Grisenko, E.V. (1974). *Raschet geometricheskikh parametrov preryvistykh krugov* [Calculation of geometric parameters of discontinuous circles]. Perm: Informatcionnyi listok Zapadno-Uralskogo MTTcNTiIP, no. 259–74 (in Russian).
4. Yakimov, A.V. (1975). *Optimizatsiia protcessa shlifovaniia* [Optimization of the grinding process] Moscow: Mashinostroenie (in Russian).

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

5. Yakimov, A.V., Yakimov, V.V., Kudashkin, V.N. (1975). Raschet, konstruirovaniye i effektivnost primeneniya preryvistykh krugov – ventilatorov [Calculation, design and efficiency of the use of intermittent circles – fans]. *New methods of abrasive processing – Novye metody abrazivnoi obrabotki*. Kyiv: Vyshcha shkola, pp. 85–91 (in Russian).
6. Svirshchev, V.I. (1990). K voprosu rascheta parametrov reguliarnogo makrorelefa na rabochei poverkhnosti abrazivnogo instrumenta [To the question of calculating the parameters of a regular microrelief on the working surface of an abrasive tool]. *Sovershenstvovanie protsessov abrazivno-almaznoi i uprochniayushchei obrabotki v mashinostroeni – Perfection of processes of abrasive-diamond and strengthening processing in mechanical engineering*. Perm: PPI, pp. 41–48 (in Russian).
7. Yakimov, A.V., Novikov, F.V., Novikov, G.V., Serov, B.S., Yakimov, A.A. (1999). *Teoreticheskie osnovy rezaniya i shlifovaniya materialov [Theoretical bases of cutting and grinding materials]*. Odessa: OGPU (in Russian).
8. Lukin, L.L., Starshev, V.D. (2007). Raschet preryvistykh almaznykh krugov pri ploskom periferiinom shlifovanii [Calculation of discontinuous diamond wheels with flat peripheral grinding]. *Vestnik Izh.GTU – Bulletin Izh.GTU*, no. 1, pp. 30–38 (in Russian).
9. Novikov, F.V., Yakimov, A.A., Novikov, G.V., Zimin, S.G., Vaisman, V.A. (1997). *Teplovye i mekhanicheskie protsessy pri rezanii metallov [Thermal and mechanical processes in cutting metals]*. Odessa: OGPU (in Russian).
10. Yakimov, O.O., Klymenko, N.M., Shikhireva, Yu.V., Dmytriieva, S.Yu., Umyskiy, S.M. (2016). *Do pytannia pro znos shlifovalnykh kruhiv [On the question of wear of grinding wheels]*. *Ahrarnyi visnyk Prychornomia. Tekhnichni nauky – Agrarian Bulletin of the Black Sea Region. Technical sciences*, issue 80, pp. 13–23 (in Ukraine).
11. Maslov, E.N. (1974). *Teoriya shlifovaniya materialov osnovy rezaniya i shlifovaniya materialov [Theory of grinding materials of the basis of cutting and grinding materials]*. Moscow: Mashinostroenie (in Russian).
12. Lebedev, V.G. (1991). Tekhnologicheskie osnovy upravleniya kachestvom poverkhnostnogo sloia pri shlifovanii [Technological fundamentals of surface quality control during grinding]. *Doctors thesis*. Odessa: Kievskii politekhnicheskii institute (in Russian).
13. Yakimov, O.O. (2015) Tekhnologichne zabezpechennia yakosti poverkhnevoho шару zubiv vysokotochnykh zubchastykh kolis pry shlifuvanni [Technological maintenance of the quality of the surface of the teeth layer of high-precision gears when grinding]. *Doctor's thesis*. Odesa (in Ukraine).
14. Lishchenko, N.V., Larshin, V.P. (2013). *Opredelenie temperatury pri shlifovanii preryvistymi i vysokoporistymi krugami [Determination of the temperature during grinding by intermittent and highly porous circles]* Naukovi notatky: Mizhvuzivskiy zbirnyk (za napriamkom “Inzhenerna mekhanika”) – Scientific notes: Interuniversity Collection (in the direction of “Engineering Mechanics”). Lutsk: LDTU, issue 40, pp. 150–158 (in Russian).
15. Kremen, Z.I. (2001). Vysokoporistye krugi – effektivnoe sredstvo povysheniya proizvoditelnosti shlifovaniya i kachestva detalei iz razlichnykh materialov [High-porosity wheels are an effective tool for improving grinding performance and quality of parts from various materials]. *Instrument i tekhnologii – Tools and technologies*, no. 5-6, pp. 34–37 (in Russian).
16. Marinov, N.A. (2009). Primenenie vysokoporistykh abrazivnykh krugov v sovremennom mashinostroeni [Application of highly porous abrasive wheels in modern engineering]. *Vestnik KemGSKhI – Bulletin of KemSGI*, no. 3, pp. 150–153 (in Russian).

UDC 621.9.06.-229.331

*Volodymyr Tonkonogyi, Oleksii Yakimov, Liubov Bovnegra,
Svitlana Beznos, Vitalii Dobrovolskyi*

REDUCING THE THERMAL FACTOR IN FLAT ABRASIVE GRINDING

Urgency of the research. Grinding is accompanied by the release of heat, under the influence of which, burns and residual tensile stresses form in the surface layer of the workpiece. Grinding defects are sources of destruction of the part.

Target setting. The use of circles with a discontinuous working surface makes it possible to lower the temperature in the cutting zone. The abrasive industry does not produce intermittent circles on the ceramic binder due to imperfect manufacturing technology.

Actual scientific researches and issues analysis. The wide application of intermittent circles in machine-building enterprises is hampered by the inconsistency of the methods for calculating the lengths of the depressions and cutting protrusions.

Uninvestigated parts of general matters defining. The problem of reducing the heat stress of the grinding process can be solved on the basis of further study of the thermophysical and dynamic components of the machining process by discontinuous circles.

The research objective. The purpose of scientific research is to identify ways to reduce the heat stress of the grinding process.

The statement of basic materials. The process of heat increase at a fixed point of the treated surface is simulated as it is repeatedly influenced by thermal energy, which is released during metal cuts by individual projections of a discontinuous circle. Investigations have been carried out to reveal the influence of the dimensions and number of geometric elements of the working surface of a discontinuous circle on the parametric stability of the elastic system of the machine tool.

Conclusions. Recommendations are developed for calculating the lengths of protrusions and troughs of a discontinuous circle, taking into account thermal and dynamic factors. Data have been obtained that confirmed the hypothesis that intermittent circles with a large number of slits on the working surface and highly porous circles can reduce the temperature in the cutting zone with the same effect.

Key words: interrupted circles; highly porous circles; burns; abrasive tools.

Fig.: 6. Bibl.: 16.

УДК 621.9.06.-229.331

Володимир Тонконогий, Олексій Якімов, Любов Бовнегра,
Світлана Безнос, Віталій Добровольський

ЗНИЖЕННЯ ТЕПЛООВОГО ФАКТОРУ ПРИ ПЛОСКОМУ АБРАЗИВНОМУ ШЛІФУВАННІ

Розроблено рекомендації щодо розрахунку протяженностей виступів і западин переривчастого кола з урахуванням теплового і динамічного факторів. Розрахунковим шляхом отримані дані, що дозволили підтвердити гіпотезу, згідно з якою переривчасті кола з великим числом прорізів на робочій поверхні і високопористі кола можуть знижувати температуру в зоні різання з однаковим ефектом.

Ключові слова: переривчасті кола; високопористі кола; прижоги; абразивний інструмент.

Рис.: 6. Бібл.: 16.

Тонконогий Владимир Михайлович – доктор технических наук, профессор, директор института промышленных технологий, дизайна и менеджмента, Одесский национальный политехнический университет (просп. Шевченко, 1, г. Одесса, 65044, Украина).

Тонконогий Володимир Михайлович – доктор технічних наук, професор, директор інституту промислових технологій, дизайну та менеджменту, Одеський національний політехнічний університет (просп. Шевченка, 1, м. Одеса, 65044, Україна).

Tonkonogiy Volodymyr – Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of the Institute of Industrial Technologies, Design and Management, Odessa National Polytechnic University (1 Shevchenko Av., 65044, Odessa, Ukraine).

E-mail: vmt47@ukr.net

Якімов Алексей Александрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-технологий проектирования в машиностроении, Одесский национальный политехнический университет (просп. Шевченко, 1, г. Одесса, 65044, Украина).

Якімов Олексій Олександрович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних технологій проектування в машинобудуванні, Одеський національний політехнічний університет (просп. Шевченка, 1, м. Одеса, 65044, Україна).

Yakimov Olekii – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Computer-aided Design Technologies, Odessa National Polytechnic University (1 Shevchenko Av., 65044, Odessa, Ukraine).

E-mail: nikolonpu@gmail.com

Бовнегра Любовь Витальевна – кандидат технических наук, профессор кафедры информационных технологий проектирования в машиностроении, Одесский национальный политехнический университет (просп. Шевченко, 1, г. Одесса, 65044, Украина).

Бовнегра Любов Віталіївна – кандидат технічних наук, професор кафедри інформаційних технологій проектування в машинобудуванні, Одеський національний політехнічний університет (просп. Шевченка, 1, м. Одеса, 65044, Україна).

Bovnegra Liubov – PhD in Technical Sciences, Professor of the Department of Computer-aided Design Technologies, Odessa National Polytechnic University (1 Shevchenko Av., 65044, Odessa, Ukraine).

E-mail: dlv5@ukr.net

Безнос Светлана Владимировна – старший преподаватель кафедры экономика предприятий, Одесский национальный политехнический университет (просп. Шевченко, 1, г. Одесса, 65044, Украина).

Безнос Світлана Володимирівна – старший викладач кафедри економіка підприємств, Одеський національний політехнічний університет (просп. Шевченка, 1, м. Одеса, 65044, Україна).

Beznos Svitlana – lecturer of the Department of Economy Enterprises, Odessa National Polytechnic University (1 Shevchenko Av., 65044, Odessa, Ukraine).

E-mail: s.v.beznos@opu.ua

Добровольський Віталій Владимирович – студент, Одесский национальный политехнический университет (просп. Шевченко, 1, г. Одесса, 65044, Украина).

Добровольський Віталій Володимирович – студент, Одеський національний політехнічний університет (просп. Шевченка, 1, м. Одеса, 65044, Україна).

Dobrovolskyi Vitalii – student, Odessa National Polytechnic University (1 Shevchenko Av., 65044, Odessa, Ukraine).

E-mail: dlv5@ukr.net

Геннадій Пасов, Олена Следнікова, Антоніна Кологойда

АНІМАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЙКОВИХ ТА ЧЕРВ'ЯЧНО-РЕЙКОВИХ ПЕРЕДАЧ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ПРЯМОЛІНІЙНОГО ПОСТУПАЛЬНОГО РУХУ

Актуальність теми дослідження. Сучасна освіта має бути яскравою, чіткою, швидкою і дешевою. Використання анімаційного моделювання і дозволяє досягти цього.

Постановка проблеми. Освіта є основою будь-якого суспільства. В наш час у процесі вивчення різноманітних дисциплін використовується багато джерел різноманітної інформації: підручники, посібники, журнали, збірники, Інтернет. У сучасних умовах широкі можливості відкриває використання електронно-обчислювальних машин (ЕОМ) в навчальному процесі, особливо персональних комп'ютерів (ПК) і високоінтелектуальних програмних продуктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Традиційно при засвоєнні будь-якої навчальної дисципліни студент повинен вивчати її на лекціях, лабораторних та практичних заняттях. Але при цьому як методичний наочний матеріал використовуються, здебільшого, ілюстрації зовнішнього вигляду, будови та конструкції різноманітних механізмів у вигляді двовимірних статичних схем елементів. Саме використання ЕОМ та відповідних програмних продуктів і дозволяє вдосконалити навчальний процес (та освіту загалом), надаючи йому інтенсивності та інтерактивного змісту.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Необхідно для вдосконалення навчання студентів запропонувати анімаційну модель для створення прямолінійного поступального руху за допомогою рейкових та черв'ячно-рейкових механізмів.

Постановка завдання. Метою даної роботи є пропозиція анімаційного моделювання прямолінійного поступального руху за допомогою рейкових та черв'ячно-рейкових механізмів.

Виклад основного матеріалу. В Чернігівському національному технологічному університеті (ЧНТУ) на кафедрі «Автомобільний транспорт та галузеве машинобудування» для вивчення навчальних дисциплін «Підйомно-транспортне обладнання і роботи», «Спеціалізований рухомий склад автотранспортних і вантажно-розвантажувальних машин», «Обладнання та транспорт механоскладальних цехів», «Промислові роботи», «Металообробне обладнання», розроблено навчальний продукт: «Анімація роботи рейкових та черв'ячно-рейкових механізмів для створення прямолінійного поступального руху». Анімація розроблена для лабораторій «Промислові роботи» з реальними роботами: МП-11, М10П, М20П, РМ-01 та «Металообробне обладнання».

Висновки. Запропонований програмний продукт дозволяє зробити процес навчання більш яскравим, наочним та дешевим. Запропонований програмний продукт має деяке обмеження, зокрема відсутність можливості інтерактивного керування цими механізмами. Бажано в наступних версіях цю проблему усунути.

Ключові слова: анімація; моделювання; рейковий механізм; черв'ячно-рейковий механізм; прямолінійний; поступальний рух.

Рис.: 4. Бібл.: 11.

Постановка проблеми. Освіта є основою будь-якого суспільства. У наш час у процесі вивчення різноманітних дисциплін використовується багато джерел різноманітної інформації: підручники, посібники, журнали, збірники, Інтернет. У сучасних умовах широкі можливості відкриває використання електронно-обчислювальних машин (ЕОМ) у навчальному процесі, особливо персональних комп'ютерів (ПК) і високоінтелектуальних програмних продуктів [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Традиційно при засвоєнні будь-якої навчальної дисципліни студент повинен вивчати її на лекціях, лабораторних та практичних заняттях. Але при цьому як методичний наочний матеріал використовуються здебільшого, ілюстрації зовнішнього вигляду, будови та конструкції різноманітних механізмів у вигляді двовимірних статичних схем елементів [2–4]. Саме використання ЕОМ та відповідних програмних продуктів і дозволяє вдосконалити навчальний процес (та освіту загалом), надаючи йому інтенсивності та інтерактивного змісту [5–11].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Необхідно для вдосконалення навчання студентів запропонувати анімаційну модель для створення прямолінійного поступального руху за допомогою рейкових та черв'ячно-рейкових механізмів.

Мета статті. Метою цієї роботи є пропозиція анімаційного моделювання прямолінійного поступального руху за допомогою рейкових та черв'ячно-рейкових механізмів.

Виклад основного матеріалу. У Чернігівському національному технологічному університеті (ЧНТУ) на кафедрі «Автомобільний транспорт та галузеве машинобудування» для вивчення навчальних дисциплін «Підйомно-транспортне обладнання і роботи», «Спеціалізований рухомий склад автотранспортних і вантажно-розвантажувальних машин», «Обладнання та транспорт механоскладальних цехів», «Промислові роботи», «Металообробне обладнання», розроблено навчальний продукт: «Анімація роботи рейкових та черв'ячно-рейкових механізмів для створення прямолінійного поступального руху». Анімація розроблена для лабораторій «Промислові роботи» з реальними роботами: МП-11, М10П, М20П, РМ-01 та «Металообробне обладнання».

Під час розроблення анімаційного моделювання рейкових та черв'ячно-рейкових механізмів для створення прямолінійного поступального руху були використані сучасні програмні продукти: «3Ds Max» та «КОМПАС-3D».

Рейкова передача. Тут можливі два варіанти. За першим варіантом (рис. 1) рейкова шестірня тільки обертається, а поступальний рух одержує рейка разом з робочим органом (подача шпинделя свердлильних верстатів). За другим варіантом (рис. 2) рейка нерухома, а рейкова шестірня обертається і рухається поступально разом з робочим органом (поздовжня подача супорта токарного верстата при обточуванні).

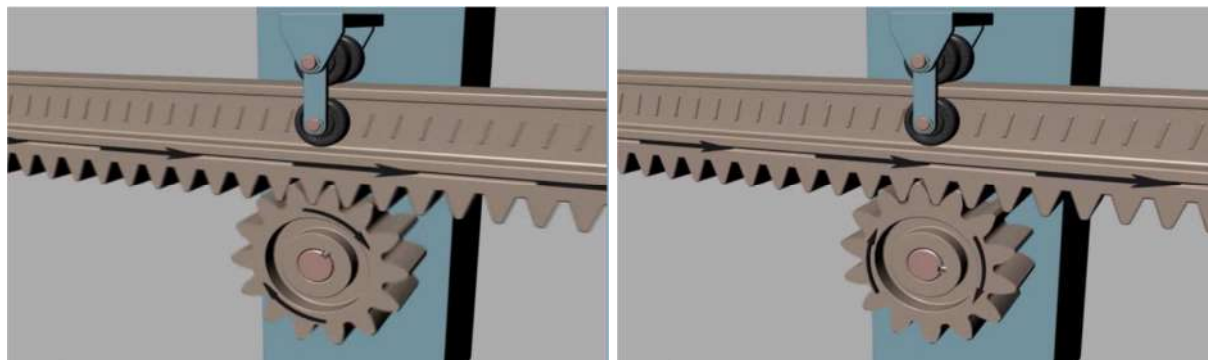


Рис. 1. 3D-модель рейкової передачі (рейка рухома)

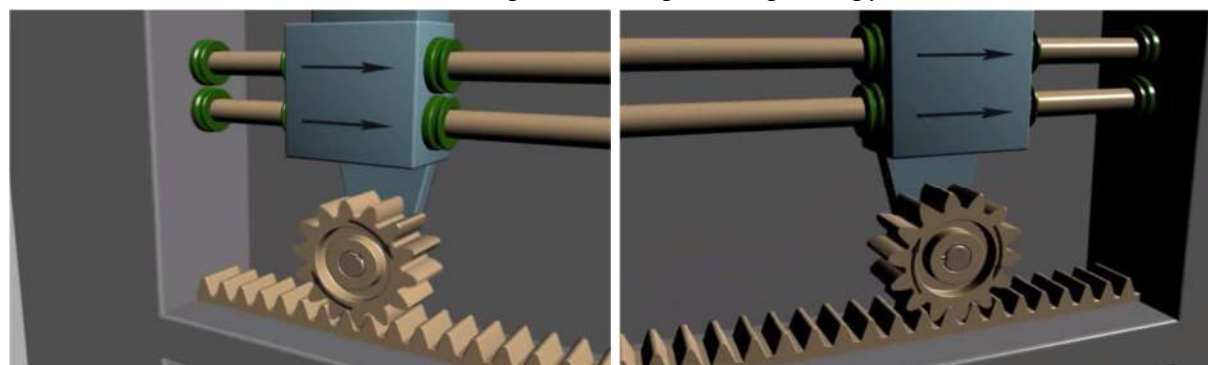


Рис. 2. 3D-модель рейкової передачі (рейка не рухома)

Черв'ячно-рейкова передача. Середнє положення між гвинтовою і рейковою передачею займає черв'ячно-рейкова передача (рис. 3, 4). Вона має більшу жорсткість з досить високим коефіцієнтом корисної дії, що забезпечує їй широке застосування у приводах руху різання сучасних поздовжньо-стругальних верстатів (рис. 3) (рейка рухома) та у приводі подачі важких фрезерних і горизонтально-розточувальних верстатів (рис. 4) (рейка не рухома).

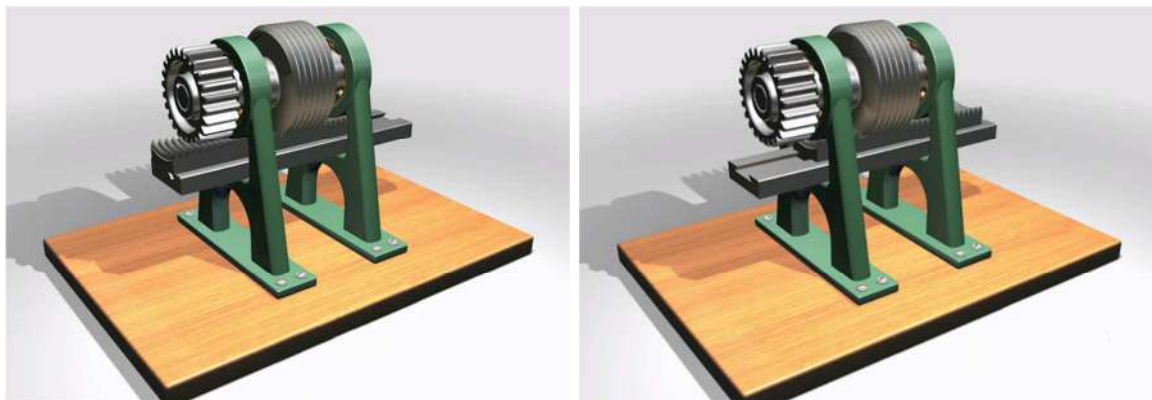


Рис. 3. 3D-модель черв'ячно-рейкової передачі (рейка рухома)

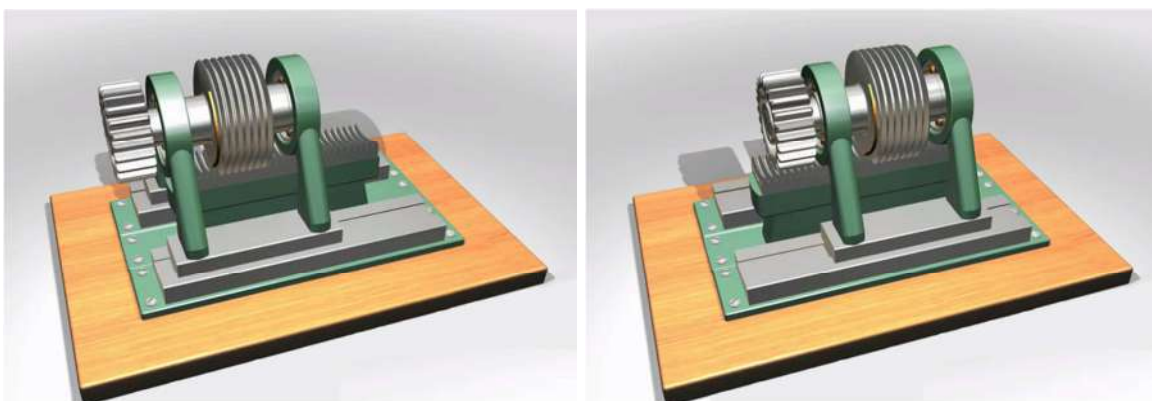


Рис. 4. 3D-модель черв'ячно-рейкової передачі (рейка не рухома)

Висновки і пропозиції. Розроблений програмний продукт може ефективно використовуватись у процесі вивчення наступних дисциплін: «Промислові роботи», «Металобробне обладнання», «Спеціалізований рухомий склад автотранспортних і вантажно-розвантажувальних машин», «Проектування механічних цехів», «Обладнання та транспорт механоскладальних цехів», «Підйомно-транспортне обладнання і роботи», «Проектування та оснащення гаражного господарства». На основі цих розробок можливо створювати аналогічні програмні анімаційні продукти й для інших дисциплін: «Теорія різання» – рух інструменту й утворення стружки, «Гідравліка» – робота гідравлічних систем верстатів та багато інших дисциплін.

Список використаних джерел

1. Використання ЄОМ в навчальному процесі / Г. В. Пасов, К. В. Дьяконов, Р. С. Кит, О. В. Хажанець, С. А. Шурубенко // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту. – 2007. – № 30. – С. 45–54.
2. Пасов Г. В. Анімаційне моделювання роботи окремих вузлів промислового робота / Г. В. Пасов, О. В. Ратозей, С. В. Лоскутов // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту. – 2008. – № 36. – С. 82–87.
3. Пасов Г. В. Керування анімаційною 3D-моделлю промислового робота М10П / Г. В. Пасов, В. М. Чуприна, С. Ю. Кирієнко // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту. – 2009. – № 40. – С. 156–164.
4. Анімаційне моделювання гнучкої виробничої системи / С. Ю. Кирієнко, А. В. Полуян, Г. В. Пасов, В. М. Чуприна // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту. – 2010. – № 45. – С. 78–86.
5. Пасов Г. В. Анімаційне моделювання лабораторії промислових роботів / Г. В. Пасов, Є. В. Загуменник // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту. – 2012. – № 2 (57). – С. 148–154.
6. Пасов Г. В. Використання анімаційного моделювання лабораторії промислових роботів в учбовому процесі / Г. В. Пасов // Матеріали II Міжнародної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем». – Чернігів : ЧДТУ, 2012. – С. 31–32.

7. Пасов Г. В. Використання анімаційного моделювання механізмів для створення прямолінійного поступального руху / Г. В. Пасов // Матеріали третьої Міжнародної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем». – Чернігів : ЧДТУ, 2013. – С. 60–61.

8. Пасов Г. В. Використання анімаційного моделювання механізмів для створення прямолінійного поступального руху за допомогою кулачкових механізмів / Г. В. Пасов, В. І. Венжега // Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем». – Чернігів : ЧНТУ, 2014. – С. 81–84.

9. Пасов Г. В. Анімаційне моделювання кульково-гвинтових передач, які використовуються для створення прямолінійного поступального руху / Г. В. Пасов, В. І. Венжега // Вісн. Черніг. нац. технол. ун-ту. – 2015. – № 1 (77). – С. 19–25.

10. Пасов Г. В. Анімаційне моделювання механізмів для створення реверсивного, обертального руху / Г. В. Пасов, В. І. Венжега, А. В. Рудик // Технічні науки та технології : науковий журнал. – 2016. – № 1 (3). – С. 60–65.

11. Пасов Г. В. Навчальний симулятор роботизованого технологічного комплексу на базі токарного верстата з ЧПК / Г. В. Пасов, В. І. Венжега, А. В. Рудик // Технічні науки та технології : науковий журнал. – 2017. – № 1 (7). – С. 42–50.

References

1. Pasov, H.V., Diakonov, K.V., Kyt, R.S., Khazhanets, O.V. & Shurubenko, S.A. (2007). Vykorystannia YeOM v navchalnomu protsesi [The use of IBM in educational process]. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu – Journal of Chernihiv State Technological University*, no. 30, pp. 45–54 (in Ukrainian).

2. Pasov, H.V., Ratozei, O.V. & Loskutov, S.V. (2008). Animatsiine modeliuвання roboty okremykh vuzliv promyslovoho robota [Animation design work of separate knots of industrial robot]. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu – Journal of Chernihiv State Technological University*, no. 36, pp. 82–87 (in Ukrainian).

3. Pasov, H.V., Chupryna, V.M. & Kyriienko, S.Iu. (2009). Keruvannia animatsiinoiu 3D-modelliu promyslovoho robota M10P [Management of industrial robot M10P an animation 3D-model]. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu – Journal of Chernihiv State Technological University*, no. 40, pp. 156–164 (in Ukrainian).

4. Kyriienko, S.Iu., Poluian, A.V., Pasov, H.V. & Chupryna, V.M. (2010). Animatsiine modeliuвання hnuchkoi vyrobnychoi systemy [Animated simulations of a flexible manufacturing system]. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu – Journal of Chernihiv State Technological University*, no. 45, pp. 78–86 (in Ukrainian).

5. Pasov, H.V. & Zahumennyk, Ye.V. (2012). Animatsiine modeliuвання laboratorii promyslovykh robotiv [The animated laboratory design of industrial robots]. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu – Journal of Chernihiv State Technological University*, no. 2 (57), pp. 148–154 (in Ukrainian).

6. Pasov, H.V. (2012). Vykorystannia animatsiinoho modeliuвання laboratorii promyslovykh robotiv v uchbovomu protsesi [Using animated simulation of industrial robots in the lab learning process]. Proceeding from *Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system: zb. nauk. prats II Mizhnarodnoi konferentsii – Comprehensive quality assurance processes and systems: Materials of 2 International Conference* (Chernihiv, May 23-25, 2012). Chernihiv: CnSTU, pp. 31–32 (in Ukrainian).

7. Pasov, H.V. (2013). Vykorystannia animatsiinoho modeliuвання mekhanizmiv dlia stvorennia priamoliniinoho postupalnoho rukhu [Using animated simulation of mechanisms to create a straight forward motion]. Proceeding from *Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system: zb. nauk. prats III Mizhnarodnoi konferentsii – Comprehensive quality assurance processes and systems: Materials of 3 International Conference* (Chernihiv, May 14-16, 2013). Chernihiv: CnSTU, pp. 60–61 (in Ukrainian).

8. Pasov, H.V. & Venzheha, V.I. (2014). Vykorystannia animatsiinoho modeliuвання mekhanizmiv dlia stvorennia priamoliniinoho postupalnoho rukhu za dopomohoiu kulachkovykh mekhanizmiv [Using animated simulation of mechanisms to create a rectilinear translational motion via cam]. Proceeding from *Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system: zb. nauk. prats IV Mizhnarodnoi nauково-praktychnoi konferentsii – Comprehensive quality assurance processes and sys-*

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

tems: Materials of 4 th International Scientific Conference (Chernihiv, May 19-21, 2014). Chernihiv: CnNTU, pp. 81–84 (in Ukrainian).

9. Pasov, H.V. & Venzheha, V.I. (2015). Animatsiine modeliuвання kulkovo-hvyntovykh peredach, yaki vykorystovuiutsia dlia stvorennia priamoliniinoho postupalnoho rukhu [Animation simulation ball screw is used to create rectilinear translational motion]. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu – Journal of Chernihiv State Technological University*, no. 1 (77), pp. 19–25 (in Ukrainian).

10. Pasov, H. V., Venzheha, V. I. & Rudyk, A. V. (2016). Animatsiine modeliuвання mekhaniz-miv dlia stvorennia reversyvnogo, obertalnoho rukhu [Animation simulation of reverse mechanism for creating rotary motion]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, no. 1 (3), pp. 60–65 (in Ukrainian).

11. Pasov, H. V., Venzheha, V. I. & Rudyk, A. V. (2017) Navchalnyi symulator robotyzovanoho tekhnolohichnoho kompleksu na bazi tokarnoho verstata z ChPK [Training simulator of robotic technology complex on the basis of CNC turning machine]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii:– Technical sciences and technologies*, no. 1 (7). pp. 42–50 (in Ukrainian).

UDC 621.9.06

Hennadii Pasov, Olena Sliednikova, Antonina Kolohoida

ANIMATION MODELING OF RIVER AND WRENCH-RECHARGE TRANSMISSIONS FOR ESTABLISHING A PRIMARY LINEAR MOTION

Urgency of the research. *Modern education should be bright, clear, fast and cheap. Using animation modeling allows you to achieve this.*

Target setting. *Education is the foundation of any society. In our time in the process of studying various disciplines, many sources of various information use: textbooks, manuals, journals, collections, the Internet. In modern conditions, the broad opportunities open the use of computers (computers) in the learning process, especially personal computers (PCs) and high-tech software products.*

Actual scientific researches and issues analysis. *Traditionally, when mastering any discipline, a student must study it at lectures, laboratory and practical classes. But at the same time, as a methodological visual material, for the most part, illustrations of the appearance, structure and design of various mechanisms are used in the form of two-dimensional static scheme of elements. It is the use of computers and related software and allows you to improve the learning process (and education in general), giving it an intensity and interactive content.*

Uninvestigated parts of general matters defining. *It is necessary to offer an animation model to create straightforward translational movement with the help of rail and worm-rail mechanisms to improve students' learning.*

The research objective. *The purpose of this work is to offer an animation modeling of straight-line translational motion with the help of rail and worm-rail mechanisms.*

The statement of basic materials. *In the Chernihiv National University of Technology(CHNUT) at the Department of Motor transport and branch engineering for the study of educational disciplines “Lifting and transport equipment and works”, “Specialized rolling stock of vehicles and loading and unloading machines”, “Equipment and transport of machine-building workshops”, “Industrial works”, “Metalworking equipment”, the educational product was developed: “Animation of work of rail and worm-rail mechanisms for creating straight-line forward movement”. The animation was developed for laboratories “Industrial works” with real works: MP-11, M10P, M20P, RM-01 and “Metalworking equipment”.*

Conclusions. *The proposed software allows you to make the learning process more vivid, more visible and cheaper. The proposed software product has some limitations, including the lack of the ability to interact with these mechanisms. It is desirable to remove this issue in future versions.*

Key words: *animation; modeling; rack mechanism; worm-rack mechanism; rectilinear; translational motion.*

Fig.: 4. Bibl.: 11.

УДК 621.9.06

Геннадий Пасов, Елена Следникова, Антонина Кологойда

АНИМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЕЧНЫХ И ЧЕРВЯЧНО-РЕЕЧНЫХ ПЕРЕДАЧ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

В статье рассмотрено анимационное моделирование механизмов для создания прямолинейного поступательного движения с помощью реечных и червячно-реечных механизмов при изучении таких дисциплин, как «Подъемно-транспортное оборудование и роботы», «Специализированный подвижной состав автотранспортных и погрузочно-разгрузочных машин», «Оборудование и транспорт механо-сборочных цехов», «Промышленные роботы», «Металлообработкающее оборудование». Описаны составляющие этих механизмов и перспективы интерактивного управления ими в дальнейшем.

Ключевые слова: анимация; моделирование; реечный механизм; червячно-реечный механизм; прямолинейное; поступательное движение.

Рис.:4. Библ.: 11.

Пасов Геннадій Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Пасов Геннадий Владимирович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автомобильного транспорта и отраслевого машиностроения, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченка, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Pasov Hennadii – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automobile Transport and Sectoral Machine Building, Chernihiv National Technological University (95 Shevchenko Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: genapasov@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7248-9085>

ResearcherID: H-4455-2014

Следнікова Олена Сергіївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Следникова Елена Сергеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта и отраслевого машиностроения, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченка, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Sljednukova Olena – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automobile Transport and Sectoral Machine Building, Chernihiv National Technological University (95 Shevchenko Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: s_lena_s@bigmir.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5444-1747>

ResearcherID: N-4430-2015

Кологойда Антоніна Вікторівна – старший викладач кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Кологойда Антонина Викторовна – старший преподаватель кафедры автомобильного транспорта и отраслевого машиностроения, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченка, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Kolohoida Antonina – senior teacher of the Department of Automobile Transport and Sectoral Machine Building, Chernihiv National Technological University (95 Shevchenko Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: kolohoida@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1742-2686>

ResearcherID: I-1118-2014

Андрій Рудик, Владислав Рудик

ЕФЕКТИВНЕ ФОРМОУТВОРЕННЯ ПОВЕРХОНЬ ОБЕРТАННЯ ТОРЦЕМ КРУГА

Актуальність теми дослідження. Ефективність процесу шліфування поверхонь обертання при підвищенні продуктивності, покращенні якості та енергозбереженні є проблемою, актуальною для сучасного машинобудування, яка може бути вирішеною на верстатах з ЧПК при використанні торцевого шліфування заправленим чашковим кругом.

Нові перспективні способи дають можливість керувати геометрією контакту та навантаженням локальних ділянок у межах контакту за рахунок зміни відстані між осями обертання деталі та інструмента.

Постановка проблеми. У наукових роботах, присвячених подібній тематиці, вказувалося, що кутове керування орієнтацією інструмента здатне значно підвищити продуктивність та якість обробки. Інструментом простої геометричної форми можна обробляти різноманітні форми поверхні при простих відносних рухах.

Актуальним є вибір параметрів наладки та програмного забезпечення заточувального верстата з метою ефективного впровадження нових способів шліфування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблему ефективного формоутворення поверхонь, у тому числі обертання, при керуванні взаємною орієнтацією, зазвичай кутовою, досліджували багато вітчизняних учених, серед яких П. Р. Родин, Н. С. Равська, В. І. Кальченко та інші. Крім того, спеціалістами фірми ЮНКЕР (Німеччина) було створено спосіб та ефективне обладнання для обробки ступінчастих валів.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Однак на ефективність значною мірою впливають його форма круга та кінематика формоутворення. Ці питання у сучасній літературі мають лише часткове обґрунтування та потребують створення нового обладнання.

Постановка завдання. Метою цієї роботи є визначення параметрів обробки при керуванні контактом за рахунок зміни міжосьової відстані. На цій базі теоретично дослідити створені нові високоефективні способи шліфування поверхонь обертання торцем абразивного інструмента чашкової форми.

Виклад основного матеріалу. Для точного формоутворення ділянки поверхні деталі необхідно у точці контакту втримати рівність нахилу дотичних, відповідність діаметральних розмірів та накладти умови на радіуси кривизни деталі в осьовій площині та інструмента. Для обробки впадої ділянки профілю деталі у напрямку осьової подачі такими умовами є менші значення радіуса кривизни інструмента, що наближається до необхідного значення відповідної ділянки заготовки.

Ці вимоги можна забезпечити раціональним вибором діаметральних розмірів, зміною значень кута, що характеризує конус заправленого торця, відносних поздовжньої та поперечної подач. З використанням матриць перетворення координат побудовані математичні моделі поверхні круга, обробки та формоутворення на верстаті деталі з урахуванням значень поздовжньої та поперечної подач.

Висновки. Отримана система рівнянь та робочих програм, складених у пакеті програм MathCAD, дозволяють у зручному для практичного використання вигляді з урахуванням усіх кінематичних складових визначати режимні параметри та товщину зрізів з метою навантаження інструмента до граничного рівня, який визначається різальною здатністю.

Матеріали теоретичних досліджень, розрахунків та їх порівняння доводять можливість значного збільшення ефективності обробки шліфуванням поверхонь обертання заправленим на конус торцем круга.

Результати роботи можуть бути впровадженими на існуючому обладнанні після незначної модернізації, а моделювання – для оцінки теплової напруженості даних способів.

Ключові слова: формоутворення; лінія контакту; кривизна поверхні; моделювання обробки; точність; продуктивність; якість; ефективність; профіль деталі.

Рис.: 8. Бібл.: 11.

Постановка проблеми. Ефективність процесу шліфування поверхонь обертання при підвищенні продуктивності, поліпшенні якості та енергозбереженні є проблемою, актуальною для сучасного машинобудування, яка може бути вирішеною на верстатах з ЧПК при використанні торцевого шліфування заправленим чашковим кругом. Це дає можливість керувати геометрією контакту за рахунок зміни відстані H між осями обертання деталі та інструмента.

Як відомо [1], підвищення продуктивності шліфування $Q = \iint_S V_n \cdot dS$ визначається

збільшенням розмірів контакту S між інструментом та деталлю та швидкістю V_n відносного руху у напрямку нормалі (у подальшому нормальною швидкістю) на кожній елементарній ділянці у його межах.

Рівняння для нормальної відносної швидкості було отримано авторами та наведено у роботі [8].

Для нових способів доведено [4; 5], що розміри контакту в Ейлєревих перетинах, тобто напрямках площин як обертання деталі, так і осьової подачі, при наближенні відповідних радіусів кривизни, є значно більшими, а підведення припуску є більш раціональним [9].

Крім того, поліпшення якості забезпечується розподіленням функцій вздовж профілю інструменту з виділенням чорнової та захищених чистової та фінішної ділянок в околі базової точки. За рахунок наближення радіусів кривизни у напрямку осьової подачі можливо збільшити кількість проходів. Напрямок швидкості різання вздовж контакту спрямований під різними кутами до осі виробу, що дозволяє отримати шорсткість обробленої поверхні у вигляді сітки.

Динаміка процесу покращується за рахунок зменшення маси інструмента, таким чином збільшуються частота власних коливань та демпфування через зростання розмірів контакту, а самі коливання спрямовані під кутом до поверхні, яку оброблюють. Енергозбереження може бути поясненим зменшенням витрат машинного часу, що викликане збільшенням осьової подачі, кількості проходів при скороченні холостого ходу, та можливим спрощенням приводу верстата для меншого за розмірами інструмента. Крім того, вплив здійснює раціональне завантаження робочої поверхні інструмента до рівня його різальної здатності, що викликане зміною характеру залежності V_n .

Основні переваги нових способів обробки порівняно до традиційних наведені на рис. 1.

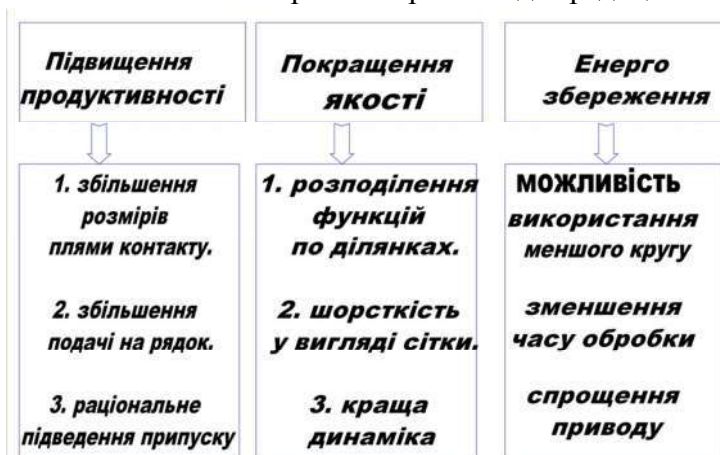


Рис. 1. Переваги нових способів обробки порівняно до традиційних

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблему ефективного формоутворення поверхонь, у тому числі обертання, при керуванні взаємною орієнтацією, зазвичай кутковою, досліджували багато вітчизняних учених, серед яких П. Р. Родин, Н. С. Равська, В. І. Кальченко [2; 3] та інші. Крім того, спеціалістами фірми ЮНКЕР (Німеччина) було створено спосіб та ефективне обладнання для обробки ступінчастих валів [1].

У наукових роботах, присвячених подібній тематиці, вказувалося, що кутове керування орієнтацією інструмента здатне значно підвищити продуктивність та якість обробки, а також дозволяє інструментом простої геометричної форми обробляти різноманітні поверхні. Однак на ефективність обробки значною мірою впливають форма круга та кінематика формоутворення. Ці питання у сучасній науковій літературі мають лише часткове обґрунтування та потребують створення нового (або значного удосконалення існуючого) обладнання.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. У цій статті обґрунтовано новий науковий принцип підвищення ефективності процесу шліфування за рахунок керування міжосьовою відстанню [2; 3], що може бути використаний для обробки поверхонь обертання як із фасонною твірною, так і ступінчастих та запропоновано нові способи, захищені патентами України [6; 7]. Цей принцип є конкурентоспроможний порівняно з існуючими та може бути реалізований на вітчизняному обладнанні при проведенні незначної модернізації.

Мета дослідження. Метою цієї роботи є визначення параметрів обробки при керуванні контактом за рахунок зміни міжосьової відстані. На цій базі теоретично дослідити створені нові високоефективні способи шліфування поверхонь обертання торцем абразивного інструмента чашкової форми.

Виклад основного матеріалу. Складена [4; 5] модель обробки заправленим конічним торцем на заточувальному верстаті з ЧПК мод. ВЗ 208Ф3 (рис. 2), де забезпечуються обертання деталі та інструмента при відносних поздовжній та поперечній подачах.

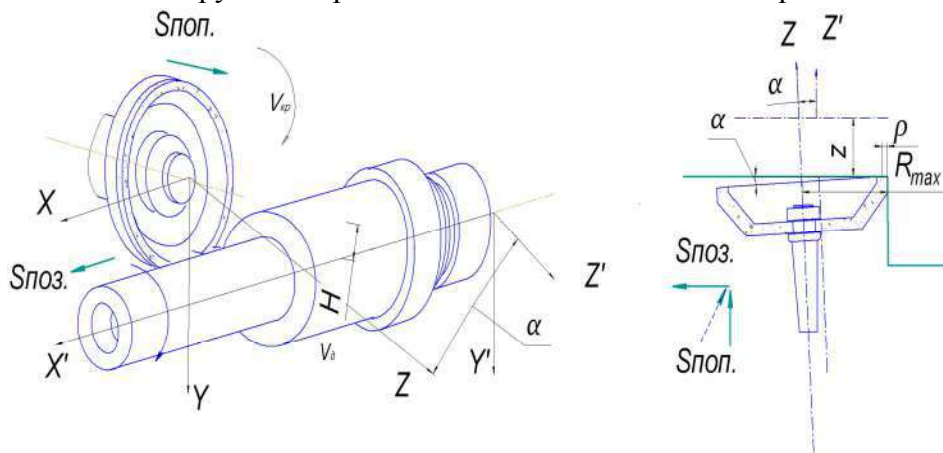


Рис. 2. Схема ефективної обробки ступінчастих валів торцем чашкового круга при керуванні геометрією контакту за рахунок зміни відстані H між осями

Для точного формоутворення ділянки поверхні деталі необхідно у точці контакту витримати рівність нахилу дотичних, відповідність діаметральних розмірів та накласти умови на радіуси кривизни деталі в осьовій площині та інструмента. Для обробки впапої ділянки профілю деталі у напрямку осьової подачі такими умовами є менші значення радіуса кривизни інструмента, що наближається до необхідного значення відповідної ділянки заготовки.

Ці вимоги можна забезпечити раціональним вибором його діаметральних розмірів, зміною значень кута α , що характеризує конус заправленого торця, відносних поздовжньої та поперечної подач. За допомогою матриць перетворення систем координат [1] побудовані [4; 5; 6; 8] математичні тривимірні моделі поверхні круга, обробки та формоутворення на верстаті деталі з урахуванням значень поздовжньої та поперечної подач.

Формоутворення фрагмента поверхні на верстаті [1] можна записати матричним рівнянням, враховуючи послідовні переходи між його ланками до СК деталі. Отримане рівняння має вигляд:

$$\vec{r}_{oi}(\phi, z, x, \theta, \rho) = A^4(\phi) \cdot A^3(z) \cdot A^1(x) \cdot A^5(-\alpha) \cdot A^2(H) \cdot \vec{r}(\theta, \rho), \quad (1)$$

де $\vec{r}(\theta, \rho) = A^6(\theta) \cdot A^1(R_{\max}) \cdot A^5(\alpha) \cdot A^1(-\rho) \cdot \vec{e}^4$ – радіус-вектор торцевої конічної поверхні круга.

Знайти вектор відносної швидкості, перенесений до СК деталі, можна диференціюванням рівняння (1) за часом або параметром ϕ :

$$\vec{V}_{oi}(\phi, \theta, \rho) = DA^4(\phi) \cdot A^3(z) \cdot A^1(x) \cdot A^5(-\alpha) \cdot A^2(H) \cdot \vec{r}(\theta, \rho) \cdot \frac{d\phi}{dt} + \vec{i} \cdot S_0; \quad (2)$$

$$\vec{V}_{oi}(\theta, \rho) = \omega \cdot \begin{vmatrix} \rho \\ -z - \cos \theta \cdot \sin \alpha \cdot (R_{\max} - \rho \cdot \cos \alpha) - \rho \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \\ H + \sin \theta \cdot (R_{\max} - \rho \cdot \cos \alpha) \end{vmatrix},$$

де $\omega = \frac{d\phi}{dt}$ – кутова швидкість; $p = \frac{S_0}{2\pi}$ – параметр гвинтового руху.

Вперше в явному функціональному вигляді отримано [5; 8] рівняння для знаходження швидкості підведення припуску по ділянках контакту в напрямку нормалі до поверхні інструмента. Після перетворень це рівняння має вигляд:

$$V_n(\rho, \theta) = \omega \cdot \left\{ \left[R_{\max} \cdot \cos^2 \alpha - \rho \cdot \cos \alpha - z \cdot \sin \alpha \right] \cdot \sin \theta + \right. \\ \left. + (H \cdot \sin^2 \alpha + \frac{P}{2} \cdot \sin 2\alpha) \cdot \cos \theta + H \cdot \cos^2 \alpha - \frac{P}{2} \cdot \sin 2\alpha \right\}, \quad (3)$$

де θ, ρ – криволінійні координати торцевої конічної поверхні інструмента, які відповідають за зміну радіального розміру відповідно, параметр ρ , що спрямований вздовж твірної конічної поверхні торця від найбільшого радіуса та кутового положення навколо осі інструмента;

α – кутова орієнтація інструмента, який встановлений на колоні верстата та в такому положенні проходить правку;

R_{\max} – максимальний радіальний розмір круга;

z – координати, які відповідають за вертикальне та поздовжнє переміщення.

Аналіз цього рівняння (рис. 3), проведений для вказаного способу обробки, доводить раціональний характер зміни навантажень вздовж контакту порівняно з відомими та перспективними методами. Крім того, методика дозволяє враховувати вплив подачі p на значення цього добутку, чим у більшості випадків нехтують.

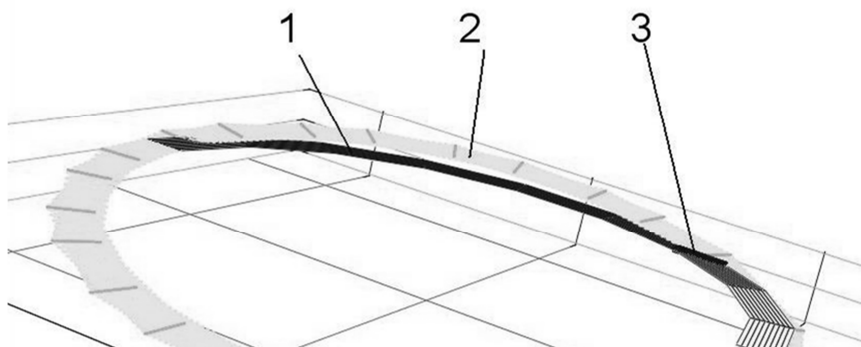


Рис. 3. Етюра зміни навантажень V_n , викликаних підведенням припуску до торця інструмента: 1 – поверхня відліку, 2 – етюра зміни навантажень по поверхні торця V_n , 3 – характеристика

Рівняння зв'язку між параметрами $\theta(\rho, H)$ лінії контакту $V_n=0$, та її похідними по параметрах ρ, H із урахуванням прийнятих позначень можна записати, використовуючи деяку допоміжну функцію $C(\rho, H)$, або подати її із достатньою для практики точністю у вигляді лінійного полінома (рис. 4):

$$C(\rho, H) = \frac{R(\rho) \cdot \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha \cdot \sqrt{R(\rho)^2 - H^2} \cdot \cos 2\alpha}{(R(\rho)^2 + H^2 \cdot \sin^4 \alpha) \cdot \sqrt{R(\rho)^2 - H^2} \cdot \cos 2\alpha} \approx Kt_1 \cdot \rho + Kt_2 \cdot H^2 + Kt_3; \quad (4)$$

та

$$\theta_\rho = \frac{\partial \theta}{\partial \rho} = -H \cdot \cos \alpha \cdot C(\rho, H); \quad \theta_H = \frac{\partial \theta}{\partial H} = -R(\rho) \cdot C(\rho, H);$$

$$\theta(\rho, H) = \Delta X \cdot \left[(Kt_1 \cdot \rho_0 + Kt_3) \cdot H + Kt_2 \cdot \frac{H^3}{3} \right], \quad (5)$$

де θ_ρ, θ_H – похідні рівняння зв'язку, які залежать від відстані H , діаметральних розмірів інструмента та кута правки $R(\rho)$ – радіальне положення базової точки; ΔX – проекція відстані між центрами систем координат на ось.

Коефіцієнти Kt_1, Kt_2, Kt_3 знаходять, наприклад, за принципом Лежандра, мінімізуючи похибку заміни лінійним поліномом [5;11]. Розрахунками доведено, що навіть при регулюванні параметра H у широкому діапазоні така заміна може бути прийнятною.

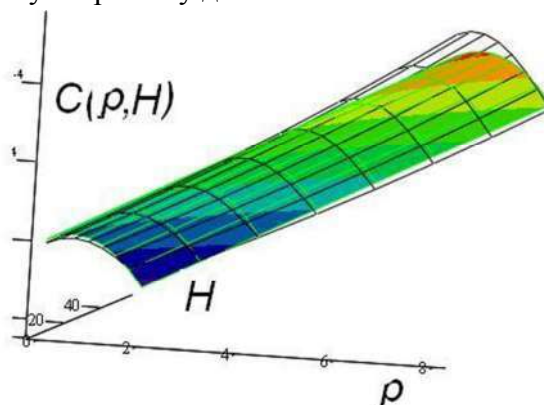


Рис. 4. Порівняльні графіки залежностей функції $C(\rho, H)$ з апроксимуючим її лінійним поліномом

Порівняння характеру епюр інтенсивності підведення припуску [9] для питомої продуктивності та нормальної швидкості методів поздовжнього шліфування, що використовують на верстаті “Quickpoint 1002”. Erwin Junker [10; 11] та згідно з новими способами наведено на рис. 5.

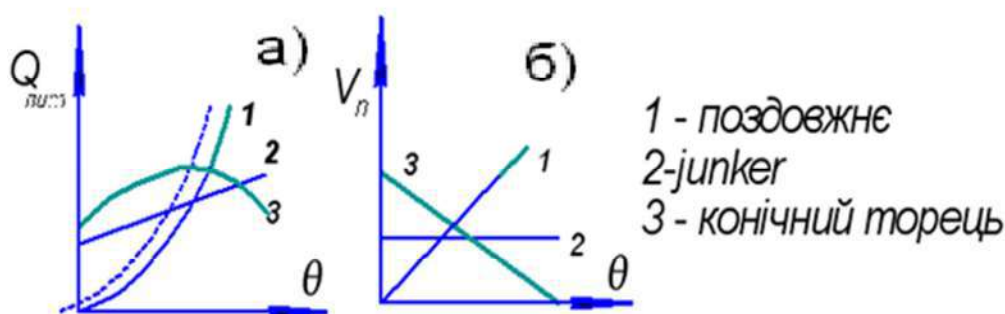


Рис. 5. Графіки питомої продуктивності (а) та нормальної швидкості (б) для відомих та нових методів

Отже, згідно з аналізом графіків, для нових способів обробки у міру наближення до границі контакту відбувається зменшення навантаження ділянок при раціональному підведенні припуску на більшості площі. Разом з тим найбільш навантаженою для відомих способів обробки з поздовжньою подачею є лише вузька смужка на вході кромки до контакту.

Рівняння (1) із урахуванням зв'язку (5) визначають лінію контакту (рис. 6; 7) між інструментом та деталлю. Векторне рівняння формотворних точок лінії контакту поверхні інструмента, перенесених до системи координат деталі, задовольняє векторному рівнянню:

$$\vec{r}_{oi}(\rho) = \begin{bmatrix} X_{oi} \\ Y_{oi} \\ Z_{oi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\rho \cdot \sin^2 \alpha + R(\rho) \cdot \cos \theta(\rho) \cdot \cos \alpha \\ R(\rho) \cdot \sin \theta(\rho) + H \\ Z + R(\rho) \cdot \cos \theta(\rho) \cdot \sin \alpha + \rho \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \end{bmatrix}, \quad (6)$$

де z – відстань між осями систем координат; ρ – лінійний параметр заправленого конічного торця круга, що вимірюють у напрямку від периферії.

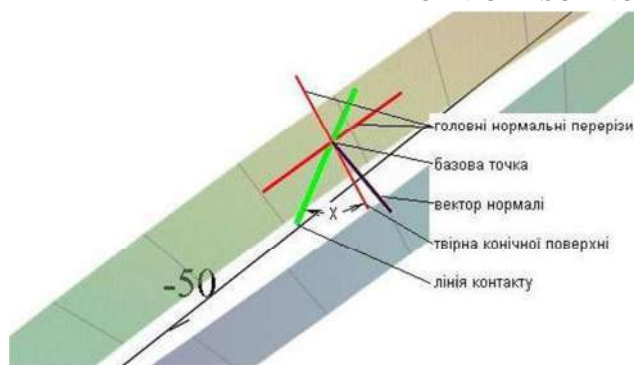


Рис. 6. Локальна геометрія контакту в околі базової точки та схема до визначення кривизни конічної поверхні торця – отримані розрахунком у пакеті програм MathCAD

Диференціювання лінії контакту за радіальним параметром ρ відповідає вектору $D_E(\rho_0)$ дотичній до неї, який після спрощень має вигляд (рис.7):

$$\overrightarrow{D_E(\rho_0)} = \frac{\partial \vec{r}(\theta(\rho_0), \rho_0)}{\partial \rho} = \begin{bmatrix} \cos \theta_0 \cdot \cos \alpha - \theta'_\rho \cdot R_0 \cdot \sin \theta_0 \\ \theta'_\rho \cdot R_0 \cdot \cos \theta_0 + \sin \theta_0 \cdot \cos \alpha \\ -\sin \alpha \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

де θ_0 – значення кутового параметра θ конічної поверхні у базовій точці характеристики E .

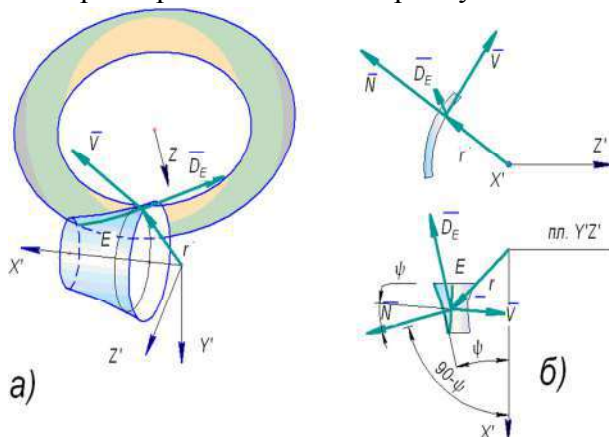


Рис. 7. Схема до знаходження кута нахилу та кривизни ділянки профілю деталі: а – відносно розташування векторів $\overrightarrow{D_E}, \overrightarrow{V}$ дотичних до характеристики E та напрямної деталі; б – визначення нормалі \overrightarrow{N} до поверхні обертання деталі та куту ψ нахилу ділянки профілю

Знайдемо радіус кривизни фрагмента профілю.

Відомо, що для довільної гладкої поверхні, у околі деякої (базової) точки, кривизну нормального перерізу визначають згідно з теоремою Ейлера:

$$K_\chi = K_1 \cdot \cos^2 \chi + K_2 \cdot \sin^2 \chi, \quad (8)$$

де χ – кут орієнтації навколо головної нормалі між ейлеревим та головним перерізами, K_χ, K_1, K_2 – ейлерева та головні нормальні кривизни, причому для конічної поверхні кру-

га з кутом конуса α вони відповідно дорівнюють $K_1 = 0, K_2 = \frac{\sin \alpha}{[R_{\max} - \rho \cdot \cos \alpha]} = \frac{\sin \alpha}{R_0}$;

$R_0 = R_{\max} - \rho_0 \cdot \cos \alpha$ – радіус базової точки, де контактують номінальні поверхні інструмента і деталі.

Таким чином, кривизну конічної поверхні торця інструмента у площині контакту визначають:

$$K_{\chi} = \frac{\sin \alpha}{R_{\sigma}} \cdot \sin^2 \chi. \tag{9}$$

У наведеному рівнянні невідомим є кут χ між характеристикою та твірною конічної поверхні, який відповідає орієнтації навколо головної нормалі. Це підкреслює важливість зручного знаходження характеристики.

Відомо, як визначають косинус кута χ між двома додатними напрямками довільних кривих поверхні. Для робочої конічної поверхні інструмента такими напрямками є радіальна твірна (перший) та дотична до характеристики (другий напрям). Використовуючи коефіцієнти квадратичної форми [3], після спрощень знаходять радіус кривизни фрагмента інструмента у нормальній ейлеревій площині дотичній до характеристики, що утворює ділянку профілю деталі.

$$R_{\chi} = \frac{R_{\sigma}}{\sin \alpha} + \frac{1}{R_{\sigma} \cdot \theta_{\rho}^2 \cdot \sin \alpha}. \tag{10}$$

Епюра зміни вказаних радіусів у функції міжосьової відстані наведена у роботі [5]. Однак цей плоский нормальний переріз поверхонь деталі та інструмента, що проходить через характеристику, є повернутим щодо осьової площини деталі. Тому кривизна ділянки її профілю буде відрізнятися від знайденої за рівнянням (10). Цю залежність, у свою чергу, також можна знайти за теоремою Ейлера [3] з рівняння (8).

$$K_1 = \frac{K_{\chi} - K_2 \cdot \sin^2 \zeta}{\cos^2 \zeta}. \tag{11}$$

Головні Ейлереві перетини деталі, як поверхні обертання, проходять через її ось та вектор швидкості $\vec{V}_{oi}(\theta, \rho)$, що відповідає відносному руху подачі. Тому косинус кута ζ між ними визначають через їх скалярний добуток:

$$\cos \zeta = \frac{\vec{D}_E(\rho_{\sigma}) \cdot \vec{V}_{oi}(\rho_{\sigma})}{|\vec{D}_E(\rho_{\sigma})| \cdot |\vec{V}_{oi}(\rho_{\sigma})|}, \tag{12}$$

де довжину вектора дотичної знаходять, врахувавши залежність (7):

$$|\vec{D}_E(\rho_{\sigma})| = \sqrt{1 + (\theta'_{\rho} \cdot R_{\sigma})^2}. \tag{13}$$

Остаточо знаходять кривизну профілю фрагмента деталі, враховуючи залежності (10) та (12), (13).

Радіальні розміри деталі у формотвірній точці згідно з (11) та (6) мають значення:

$$R_{\sigma}(H, \rho_{\sigma}) = \frac{1}{K_2} = \sqrt{Y_{oi}^2 + Z_{oi}^2}. \tag{14}$$

Змінюючи параметр ρ у межах конічної ділянки заправленої торцевої поверхні, отримують рівняння ділянки профілю обробленого рядка.

Визначимо вплив зміни розміру між осями H на діаметральний.

Проведемо диференціювання виразу (14):

$$\frac{\partial R_{\sigma}(H)}{\partial H} = \frac{2 \cdot \partial Y_{oi} \cdot \frac{\partial Y_{oi}}{\partial H} + 2 \cdot \partial Z_{oi} \cdot \frac{\partial Z_{oi}}{\partial H}}{2 \cdot \sqrt{Y_{oi}^2 + Z_{oi}^2}}, \text{ або} \tag{15}$$

$$\partial R_{\sigma}(H) = \frac{Y_{oi} \cdot [R(\rho_{\sigma}) \cdot \theta_H \cdot \cos \theta(\rho_{\sigma}) + 1] - Z_{oi} \cdot R(\rho_{\sigma}) \cdot \theta_H \cdot \sin \theta(\rho_{\sigma}) \cdot \sin \alpha}{R_{\sigma}(H_0, \rho_{\sigma})} \cdot \partial H.$$

Після подальшого інтегрування значень під час зміни міжосьової відстані H у межах $[H_0, H_1]$ можна визначати кривизну K_2 та характер зміни профілю обробленої поверхні, який коригують за необхідності додаванням поперечної подачі.

$$R_{\sigma\sigma}(H) = \int_{H_0}^{H_1} dR_{\sigma\sigma}(H). \quad (16)$$

Кут нахилу ψ ділянки профілю, що утворюється відносно осі деталі, визначають:

$$\cos(90^\circ - \psi) = \sin \psi = \vec{n} \cdot \vec{i}. \quad (17)$$

Тут векторний добуток визначає орт нормалі до площини, що дотична до фрагмента поверхні деталі.

$$\vec{n} = \frac{\overrightarrow{D_E}(\rho_{\sigma}) \cdot \overrightarrow{V_{di}}(\rho_{\sigma})}{\left| \overrightarrow{D_E}(\rho_{\sigma}) \right| \cdot \left| \overrightarrow{V_{di}}(\rho_{\sigma}) \right|}. \quad (18)$$

Ефективну обробку ступінчастих циліндричних поверхонь також можна проводити, використовуючи керування міжосьовою висотою. Отриманий патент України на спосіб шліфування [6].

Керування геометрією контакту викликає перерозподіл навантажень на ділянки профілю інструмента (рис. 8).

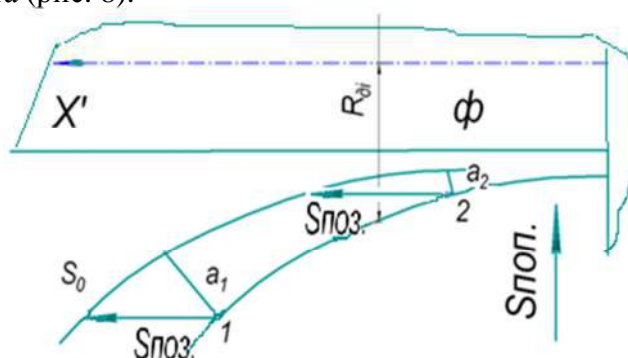


Рис. 8. Зменшення товщини зрізів a_1 та a_2 вздовж профілю круга у бік до формотворної точки Φ між сусідніми поверхнями різання при утворення фрагмента деталі

Круг працює у режимі глибинного шліфування, що забезпечує більшу довжину навантаження його профілю та значні розміри контакту. Таким чином, за один робочий хід можна проводити багатопрхідну обробку, як це, наприклад, здійснено на верстаті “Quickpoint 1002”. Erwin Junker [10; 11]. Подібно до цього методу мається виділена розвантажена формотворна ділянка інструмента.

Профіль деталі отримують послідовністю та комбінацією подач: радіальної при обробці фасонного профілю або торця та поздовжньої для циліндричної ступені. Для кожної ступені, торці яких спрямовані в один бік, послідовно проводять урізне та поздовжнє глибинне шліфування.

Під час обробки однієї ступені, в міру наближення до неї, для збільшення радіуса кривизни міжосьову відстань можна зменшувати. Таким чином можна обробляти вали з однаковим напрямком ступенів.

Для обробки протилежно спрямованих торців ступенів вісь шліфувального круга слід дзеркально повернути відносно площини обертання деталі.

Режими шліфування визначають подібно до урізних методів, згідно з методією, яка описана у роботі [9]. Очевидно, доцільно, як це виконують на верстаті «Quickpoint» фірми “Junker maschinen”, проводити швидке обертання деталі з метою збільшення хвилинної подачі. Якість торців ступенів, як і під час шліфування тарілчастими кругами, виходить краще, без припалів, порівняно з обробкою торцем круга.

Опукла форма поверхонь обертання є досить поширеною серед деталей машинобудівної галузі. Це і шківні передачі з плоским пасом, і бомбовані поверхні роликів підшипників та інші.

Часто до таких деталей одночасно надають жорсткі вимоги як по шорсткості, так і по точності профілю поверхні.

Для виготовлення опуклих поверхонь тіл обертання слід використовувати правку під кутом α , що забезпечує утворення впалої конічної поверхні торця інструмента. Розрахунок профілю проводять за подібним алгоритмом.

Висновки і пропозиції. Отримана система рівнянь та робочих програм, складених у пакеті програм MathCAD, дозволяють у зручному для практичного використання вигляді з урахуванням усіх кінематичних складових визначати режимні параметри та товщину зрізів з метою навантаження інструмента до граничного рівня, який визначається різальною здатністю.

Матеріали теоретичних досліджень, розрахунків та їх порівняння доводять можливість значного збільшення ефективності обробки шліфуванням поверхонь обертання заправленим на конус торцем круга.

Результати роботи можуть бути впровадженими на існуючому обладнанні після незначної модернізації.

Програми можуть бути використаними для оцінки теплової напруженості таких способів.

Список використаних джерел

1. Решетов Д. Н. Точность металлорежущих станков / Д. Н. Решетов, В. Т. Портман. – М. : Машиностроение, 1986. – 336 с.
2. Кальченко В. И. Шлифование криволинейных поверхностей крупногабаритных деталей / В. И. Кальченко. – М. : Машиностроение, 1979. – 160 с.
3. Основи формоутворення поверхонь при механічній обробці : навч. посіб. / Н. С. Равська, П. Р. Родін, Т. П. Ніколаєнко, П. П. Мельничук. – Житомир : ЖІТІ, 2000. – 332 с.
4. Рудик А. В. Шліфування впалих поверхонь обертання конічною поверхнею абразивного інструмента / А. В. Рудик, В. А. Рудик // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – 2013. – Вип. 1 (63). – С. 54–59.
5. Рудик А. В. Формоутворення поверхонь обертання торцем круга чашкової форми / А. В. Рудик, В. А. Рудик // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2016. – Вип. 1 (56). – С. 77–83.
6. Пат. 117066 Україна МПК (2017) В 24 В 5/04 Рудик А. В., Рудик В. А. Спосіб шліфування ступінчастих поверхонь обертання конічними поверхнями абразивного інструмента – заявл. на патент України №u201700546 В24В 5/04, пріоритет от 20.01.2017 ; власник патенту ЧНТУ.
7. Пат. №92147 Україна МПК (2014) В24В 5/04 Спосіб шліфування впалих поверхонь обертання конічною поверхнею торця абразивного інструмента / А. В. Рудик, В. А. Рудик. – заявл. на патент України №u201310754 В24В 5/04, пріоритет від 06.09.2013 ; власники патенту Рудик А. В., Рудик В. А.
8. Рудик А. В. Продуктивність високоефективного поздовжнього та глибинного шліфування поверхонь обертання периферією та торцем орієнтованим абразивним інструментом / А. В. Рудик, В. І. Венжега // Вісник Чернігівського національного технологічного університету. – 2014. – Вип. 72. – С. 76–80.
9. Вибір режимів ефективного шліфування поверхонь обертання / А. В. Рудик, О. С. Следнікова, А. П. Подзолкіна, О. Л. Куций // Технічні науки та технології. – 2016. – № 4 (6). – С. 62–70.
10. Круглое шлифование с ЧПУ / Проспект фирмы “Junker maschinen” на станке “Quickpoint 1001” и “Quickpoint 1002”. Erwin Junker. Maschinen fabrik GmbH, Junkerstraße 2. Postfach 25. D 7618 Nordrach. Germany, 1991. – 16 с.
11. Ефективне шліфування ступінчастих поверхонь на верстаті з ЧПК моделі В3208Ф3 / А. В. Рудик, Г. В. Пасов, В. І. Венжега, В. А. Рудик // Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (24-26 квітня. 2017, м. Чернігів). – Чернігів : ЧНТУ, 2017. – С. 60–62.

References

1. Reshetov, D. N., Portman, V. T. (1986). *Tochnost metallorezhushchikh stankov [Precision of machine tools]*. Moscow: Mashinostroenie (in Russian).
2. Kalchenko, V. I. (1979). Shlifovaniye krivolinyeynykh poverkhnostey krupnogabaritnykh detaley. [Grinding of curved surfaces of large-sized parts]. Moscow: Mashinostroenie (in Russian).
3. Ravska, N. S., Rodin, P. R., Nikolaienko, T. P., Melnychuk, P. P. (2000). *Osnovy formoutvorenniya poverkhon' pry mekhanichniy obrobsi [Fundamentals of surface shaping under machining]*. Zhytomyr: ZhITI (in Ukrainian).
4. Rudyk, A. V., Rudyk, V. A. (2013). Shlifuvannia vpalykh poverkhon obertannia konichnoiu poverkhneiu abrazyvnoho instrumenta [Grinding of fallen surfaces of rotation with a conical surface of abrasive tool]. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu – Bulletin of Chernihiv State Technological University*, issue 1 (63), pp. 54–59 (in Ukrainian).
5. Rudyk, A. V., Rudyk, V. A. (2016). Formoutvorennia poverkhon obertannia tortsem kruha chashkovoi formy [Formation of surfaces of rotation by the end of a circle of cup shape]. *Visnyk Khersonskoho natsional'noho tekhnichnoho universytetu universytetu – Bulletin of Kherson National Technical University*, issue 1 (56), pp. 77–83 (in Ukrainian).
6. Rudyk, A. V., Rudyk, V. A. (2017). *Sposib shlifuvannia stupinchastykh poverkhon obertannia konichnyimi poverkhniami abrazyvnoho instrumenta [Method of grinding of stepped surfaces of rotation with conical surfaces of abrasive tool]*. Patent UA No. 117066.
7. Rudyk, A. V., Rudyk, V. A. (2014). *Sposib shlifuvannia vpalykh poverkhon obertannia konichnoiu poverkhneiu tortsia abrazyvnoho instrumenta [Method fallen grinding surfaces of revolution conical end surface of the abrasive tool]*. Patent UA No. 92147.
8. Rudyk, A. V., Venzheha, V. I. (2015). Produktyvnist vysokoefektyvnoho pozdovzhnoho ta hlybynnoho shlifuvannia poverkhon obertannia peryferiieiu ta tortsem oriientovanyim abrazyvnym instrumentom [Performance is highly length and depth grinding surfaces of revolution periphery and end face oriented abrasive]. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu – Bulletin of Chernihiv State Technological University*, issue 1 (77), pp. 59–64 (in Ukrainian).
9. Rudyk, A. V., Sliednikova, O. S., Podzolkina, A. P., Kutsiy, O. L. (2016). Vybir rezhymiv efektyvnoho shlifuvannia poverkhon' obertannia [Selection modes for effective grinding surface rotation]. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu – Bulletin of Chernihiv State Technological University*, issue 4 (6), pp. 62–70 (in Ukrainian).
10. *Krugloe shlifovanie s CHPU/Prospekt firmy Junker maschinen na stanke Quickpoint 1001 i Quickpoint 1002 Erwin Junker Maschinen fabric GmbH Junkerstra e 2 Postfach 25 D 7618 Nordrach (1991)[Cylindrical grinding CNC “Junker maschinen” company prospectus on the machine “Quickpoint, 1001” and “Quickpoint, 1002”. Erwin Junker. Maschinen fabric GmbH, Junkerstraße 2. Postfach 25. D 7618 Nordrach]. Germany (in Russian).*
11. Rudyk, A.V., Pasov, H.V., Venzheha, V.I., Rudyk, V.A. (2017). Efektyvne shlifuvannia stupinchastykh poverkhon na verstati z CHPK modeli VZ208F3 [Effective grinding of stepped surfaces on a CNC machine tools model B3208Φ3]. Proceeding from VI Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia «Kompleksne zabezpechennya yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system» – The 6th International scientific and practical conference “Integrated quality assurance of technological processes and systems” (April 24-26, 2017). Chernihiv: ChNTU, pp. 60–62 (in Ukrainian).

UDC 621.923.42

Andriy Rudik, Vlad Rudik

EFFECTIVE SHAPE FORMATION OF ROTATION SURFACES WITH THE BUTT END OF WHEEL

Urgency of the research. The grinding surface effectiveness of the rotation surfaces with increasing productivity, improvement quality and energy conservation is a problem of relevance to modern mechanical engineering, which can be solved on CNC machine tools using face finishes with a refilled cup circle.

New promising methods make it possible to control the geometry of contact and the loading of local areas within the contact due to a change in the distance between the rotation axes of the detail and tool.

Target setting. In the advanced studies sanctified to the similar subjects, specified, that an angular management the orientation of instrument is able considerably to promote the productivity and quality of treatment; it is possible to process the various forms of surface the instrument of geometrical simply-shaped at simple relative motions.

The actual selection parameters are debugging of software grinding machines for the effective implementation of new methods.

Actual scientific researches and issues analysis. The problem of effectively forming surfaces, including rotation, while driving a mutual orientation, usually angular, engaged in a number of local scientists, including Rodyn P.R., Ravska N.S., Kalchenko V.I., and other. In addition, the specialists of UNKER (Germany) created a way and efficient equipment for the processing of stepped shafts.

Uninvestigated parts of general matters defining. However on efficiency his form and sharpening kinematics influence largely. These questions in modern literature have only a partial ground and need creation new equipments.

The research objective. The purpose of this work is to determine the processing parameters when managing the contact by changing the axial distance. On this basis, theoretically explore the new highly effective methods of grinding surfaces of rotation by the end of the abrasive tool of the cup shape.

The statement of basic materials. For precise shaping of the surface of the part, it is necessary at the contact point to maintain the equality of the inclination of the tangent, the conformity of the diametric dimensions and to impose conditions on the radii of curvature of the component in the axial plane and the tool. For processing the fallen section of the profile of the part in the direction of the axial feed, such conditions are lower values of the radius of curvature of the tool, approaching the required value of the corresponding section of the workpiece.

These requirements can be ensured by rational choice of diametric sizes, by changing the values of the angle, which characterizes the cone of the tight end, relative longitudinal and transverse feeds. Using matrices of coordinate transformations, mathematical 3D models of the circle surface, machining and forming on the machine tool are constructed taking into account the values of longitudinal and transverse feeds.

Conclusions. The resulting system of equations and work programs, compiled in the MathCAD program package, allows us to determine the mode parameters and the thickness of the sections in a convenient for practical use, taking into account all kinematic components, in order to load the tool to the marginal level determined by the cutting power.

The materials of theoretical studies, calculations and their comparison prove the possibility of a significant increase in the efficiency of the treatment by grinding the surfaces of the rotation, filled to the cone by the end of the circle.

The results of the work can be implemented on existing equipment after a minor upgrade, and simulation - to assess the thermal tension of these methods.

Key words: shape formation; contact line; the curvature of the surface; the simulation of processing; accuracy; productivity; quality and efficiency; details profile.

Fig.: 8. Bibl.: 11.

УДК 621.923.42

Андрей Рудик, Владислав Рудик

ЭФФЕКТИВНОЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ ТОРЦОМ КРУГА

Рассмотрены предложенные новые способы шлифования как фасонных, так и ступенчатых поверхностей вращения заправленным на конус торцом абразивного инструмента чашечной формы. Способы позволяют повысить производительность и качество обработанных поверхностей при рациональной загрузке рабочей поверхности круга вдоль пятна контакта. Рост эффективности можно достигнуть за счет управления межосевым расстоянием, выбором угла правки торца. Это позволяет увеличить размеры контакта и возможную подачу на строку. Улучшение качества обусловлено выделением защищенной базовой формообразующей точки и появлением шероховатости в виде сетки. Новые способы имеют лучшую динамику и позволяют экономить энергию вследствие меньшего времени машинной обработки и использования менее габаритного станка.

Ключевые слова: формообразование; линия контакта; кривизна поверхности; моделирование обработки; точность; производительность, качество; эффективность; профиль детали.

Рис.: 8. Библ.: 11.

Рудик Андрій Васильович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Рудик Андрей Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта и отраслевого машиностроения, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Rudik Andriy – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Department of Road Transport Industry and Mechanical Engineering, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: andrei.rudik@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3582-9279>

ResearcherID: H-7173-2014

Рудик Владислав Андрійович – інженер

Рудик Владислав Андреевич – инженер

Rudik Vlad – engineer

E-mail: andrei.rudik@gmail.com

УДК 621.923

DOI: 10.25140/2411-5363-2017-4(10)-44-53

Дмитро Кальченко

ТЕОРЕТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ДВОСТОРОННЬОГО ШЛІФУВАННЯ ТОРЦІВ ЗІ СХРЕЩЕНИМИ ОСЯМИ ЦИЛІНДРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ ТА КРУГІВ З КАЛІБРУЮЧИМИ ДІЛЯНКАМИ

Актуальність теми дослідження. Розроблена 3D-модель уперше визначає загальну продуктивність Q_s обробки двох торців деталей залежно від координати θb по всій дожині лінії контакту L .

Постановка проблеми. У верстатобудуванні, машинобудуванні та підшипниковій промисловості широко використовуються циліндричні деталі з високоточними торцевими поверхнями, остаточною точністю яких забезпечується фінішними операціями.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В останніх дослідженнях було розглянуто методику обробку торцевих поверхонь циліндричних деталей з круговою подачею в зону обробки. Використовуються круги без калібруючих ділянок, що вимагає багатопрохідну обробку для отримання необхідної точності, що знижує продуктивність шліфування.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Дослідження продуктивності шліфування кожного торця, потужності, сили різання та їх вплив на загальну продуктивність і точність обробки торців круглих циліндричних деталей кругами з калібруючими ділянками.

Постановка завдання. Розробка 3D-моделі продуктивності обробки кожного торця деталі та сумарної продуктивності на базі отриманих значень продуктивності визначення необхідної потужності.

Виклад основного матеріалу. Уперше було проведено дослідження сумарної потужності за координатою обробки θ_b , яка становить суму потужностей одночасно оброблюваних деталей. Всі дослідження проводилися при постійній кутовій швидкості барабана $\Omega = 4,61^\circ/\text{с}$ і кути, якій відповідає зоні обробки $\theta_{b2} = 65^\circ$, час обробки становить 14 с, якщо змінюється кутлова швидкість барабана, кут θ_{b2} залишається постійним, то змінюватиметься буде час обробки.

Висновки. Доведено що при двосторонньому шліфуванні торців одночасно відбувається два процеси з різними за координатою θb обробки на кожному торці силами різання, припусками, що знімаються, зносами кругів, температурами нагрівання торців, податливостями технологічних систем від кругів до торців, миттєвими продуктивностями, потужностями шліфування, що суттєво впливає на сумарну продуктивність на кожному торці й на загальну продуктивність і точність обробки двох торців. Вперше розроблена загальна методика теоретичного та експериментального досліджень продуктивності, потужності питомої та загальної, сил різання питомих та загальних на лівому та правому торцях деталі.

Ключові слова: шліфування; торці деталей; орієнтовані шліфувальні круги; продуктивність шліфування.

Рис.: 8. Бібл.: 6.

Постановка проблеми. У верстатобудуванні, машинобудуванні та підшипниковій промисловості широко використовуються циліндричні деталі з високоточними торцевими поверхнями, остаточною точністю яких забезпечується фінішними операціями. В умовах подальшого розвитку ринкових відносин актуальною є проблема розробки нових способів шліфування, які забезпечать підвищення продуктивності й точності обробки торців циліндричних деталей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На двосторонніх торцешліфувальних верстатах фірми Saturn (Німеччина) [1] виконується обробка торцевих поверхонь циліндричних деталей з круговою подачею в зону обробки. Використовуються круги без калібруючих ділянок, що вимагає багатопрохідної обробки для отримання необхідної точності, що знижує продуктивність шліфування.

У роботах [2; 3] представлено високоефективний спосіб однопрохідного двостороннього шліфування торців циліндричних деталей кругами з калібруючими ділянками, що забезпечує підвищення точності формоутворення, продуктивності, за рахунок однопрохідного шліфування, та якості обробленої поверхні.

У роботах [2; 4] досліджено продуктивність двостороннього шліфування торців, однак продуктивність рахується тільки для одного торця деталі, продуктивність шліфування для другого торця, потужність, сили різання, сумарна продуктивність не розглядалися.

При двосторонньому шліфуванні торців одночасно відбувається два процеси з різними за координатою обробки на кожному торці силами різання, припусками, що знімаються, зносами кругів, температурами нагрівання торців податливостями технологічних систем від кругів до торців, миттєвими продуктивностями, потужностями

шліфування, що суттєво впливає на сумарну продуктивність на кожному торці та на загальну продуктивність і точність обробки двох торців.

Підвищення продуктивності й точності обробки потребує теоретичного та експериментального дослідження процесів шліфування на кожному торці і їх вплив на загальну продуктивність і точність.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Дослідження продуктивності шліфування кожного торця, потужності, сили різання і їх вплив на загальну продуктивність і точність обробки торців круглих циліндричних деталей кругами з калібруючими ділянками.

Мета статті. Розробка 3D-моделі продуктивності обробки кожного торця деталі та сумарної продуктивності на базі отриманих значень продуктивності визначення необхідної потужності. При експериментальних дослідженнях визначення питомої потужності за координатою обробки, сил різання та сумарних потужностей і сил різання при шліфуванні деталей, які знаходяться в зоні обробки.

Виклад основного матеріалу. На рис. 1 зображено схему процесу двостороннього шліфування торців циліндричних деталей шліфувальними кругами 1, 2 з калібруючими ділянками 3, 4. Заготовки 5 закріплені в барабані подачі виробів 6, в отворах 8 (рис. 1, А-А) з зазором. Шліфувальні круги 1, 2 разом з бабками двостороннього торцешліфувального верстата повернуті на кути ψ у вертикальній та φ в горизонтальній площинах. Кути орієнтації шліфувальних кругів обираються залежно від величини припуску δ , що знімається з заготовки. Правка калібруючих ділянок 3, 4 здійснюється алмазним олівцем 7, який розташований на радіусі $R_a = R_b$. При подачі деталей 5 у зону обробки по направляючих щічках 11 деталі 5 зміщуються в осьовому напрямку на величину $\Delta\delta$ (рис. 1, Б), що збільшує припуск, що знімається, на одному торці і зменшує на другому, це призводить до різних продуктивностей, сил різання, зносу кругів.

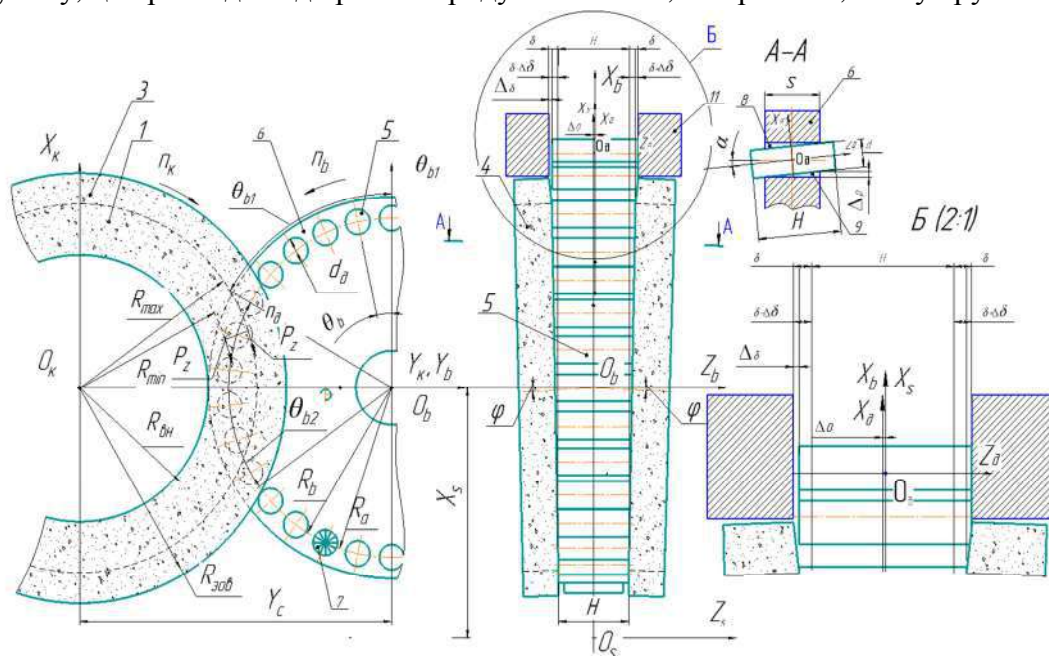


Рис. 1. Схема обробки деталей, що обертаються

Крутний момент M , який обертає деталі 5 під час обробки (рис. 1), визначається за формулою:

$$M = 2(R_{\max} - R_{\min}) \cdot P_z, \tag{1}$$

де P_z – значення сили різання на максимальному R_{\max} та мінімальному R_{\min} радіусах дотику шліфувального круга 1 та деталі 5 діаметром d .

Обертання деталі під час обробки дає нерівномірне зняття припуску за площею до-тику круга та деталі, що зменшує продуктивність обробки та збільшує знос кругів.

При обробці торців заготовок 5, що обертаються у процесі шліфування, базування виконується в отворах 8 барабана подачі 6 з зазором Δp , у зв'язку з чим виникає не перпендикулярність торців до осі деталі через їх поворот на кут α , який дорівнює:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta p}{S}, \quad (2)$$

де S – висота (рис. 1, А-А) барабана подачі 6.

Тому при обробці високоточних деталей прийнято базувати їх без зазорів як показано на рис. 2.

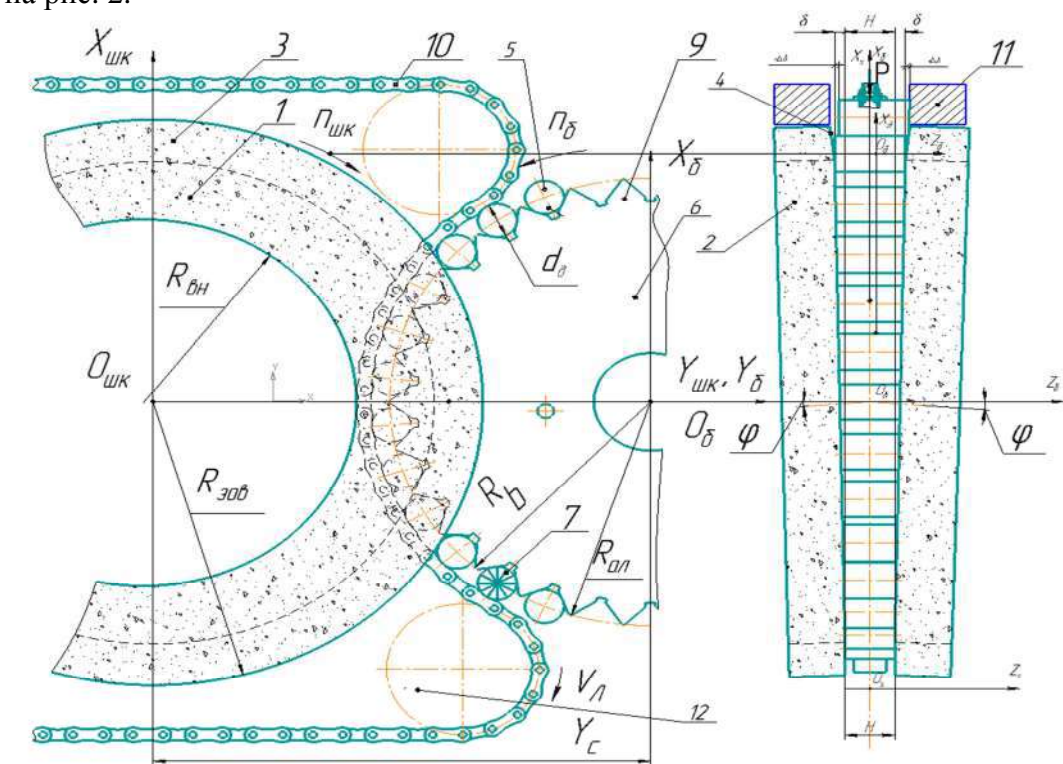


Рис. 2. Схема обробки деталей, що не обертаються

Беззазорна схема базування відбувається при загрузці деталей 5 (рис. 2) у призми 9, де вони притискаються силами P , які лежать у площинах, що проходять через вісь деталей 5 та вісь барабана подачі 6. Сили P забезпечуються ланцюговим механізмом 10, де на ділянці притиску швидкість ланцюга $V_{л}$ та деталей 5 однакові, це забезпечується за рахунок передаточного відношення привода барабана 6 і ведучою зірочкою 12.

При шліфуванні штовхачів 5 з різними діаметрами, вони базуються в отворах 8 (рис. 3, а, А-А) барабана 6 з зазором Δp , у зв'язку з чим виникає неперпендикулярність торців до осі деталі через їх поворот на кут α , який розраховується за формулою (2).

При шліфуванні максимальна неперпендикулярність виникає на більшому діаметрі, і якщо вона перевищує допустиму, то базування виконується у призмах 9 (рис. 2) за беззазornoю схемою. Обробка ведеться з поворотом кожного наступного штовхача на 180° , що вирівнює сумарні нормальні сили різання P_{nl} , P_{nr} , продуктивність обробки Q_l та Q_n (4) зноси кругів I_{inl} , I_{inr} , сумарні податливості технологічних систем Π_{il} , Π_{ir} , що підвищує продуктивність і точність шліфування.

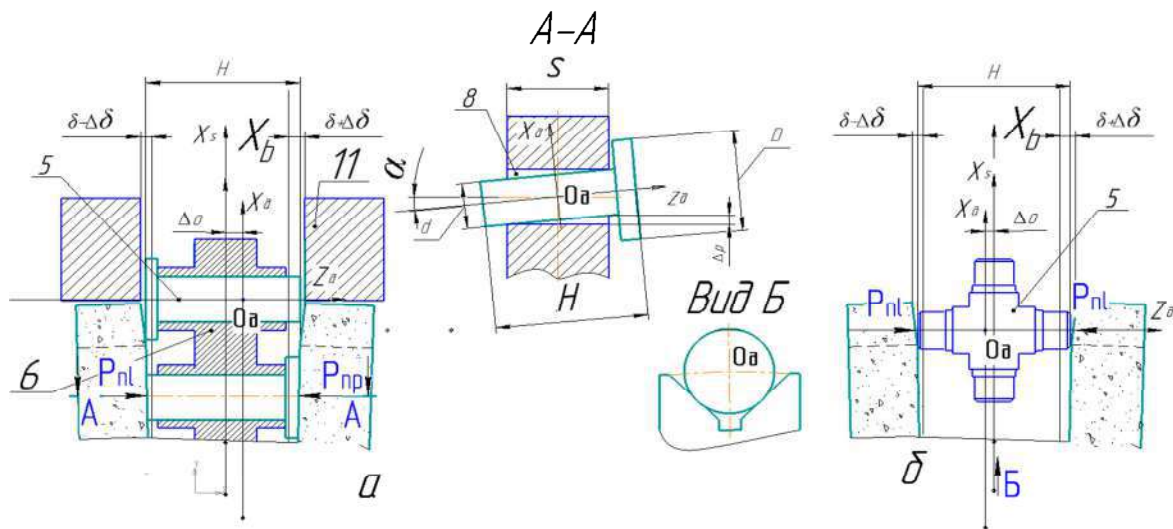


Рис. 3. Схема обробки циліндричних деталей з осовою фіксацією в барабані подач: а – шліфування штовхачів з різними діаметрами торців; б – шліфування хрестовин з осовою фіксацією у призмах барабана подач

При шліфуванні хрестовин 5 (рис. 3, б) з осовою фіксацією у призмах барабана б (рис. 3, б, вид Б) виникає похибка базування $\Delta\sigma$ вздовж осі оброблювальної деталі, що збільшує асиметричність торців. Для підвищення точності обробки потрібно зменшувати похибку припуску, та похибку базування $\Delta\sigma$.

Максимальна продуктивність, яка забезпечує необхідну точність та якість, є інтегральним показником процесу шліфування різних поверхонь. Розроблена 3D-модель вперше визначає загальну продуктивність Q_s обробки двох торців деталей залежно від координати θ_b по всій довжині лінії контакту L . Вона дорівнює:

$$Q_s = Q_l + Q_p, \quad (3)$$

де Q_l і Q_p – продуктивності обробки лівого і правого торців деталей.

Лівий торець у системі координат деталі (рис. 1, 2) має координату $-Z_d = -\frac{H}{2}$, а правий $Z_d = \frac{H}{2}$, де H довжина деталі.

$$Q_s = \sum_{n=1}^m \int^{T_n} \left(\int_{i_{1l}}^{i_{2l}} \left(\int_{\theta_{1kil}}^{\theta_{2kil}} \overline{V_{inl}} \cdot \overline{n_{inl}} \cdot (R_{il} - I_{inl} \cdot \sin \alpha_{inl} - \Pi_{il} - \Delta\delta - \Delta\sigma) \left[1 - \exp\left(-\frac{\sum b(t,\theta)}{b_0}\right) \right] \cdot d\theta_{kil} \right) \cdot \sqrt{\left(\frac{dR_{inl}}{di}\right)^2 + \left(\frac{dz_{inl}}{di}\right)^2} \cdot di \right) \cdot dT_n + \sum_{n=1}^m \int^{T_n} \left(\int_{i_{1p}}^{i_{2p}} \left(\int_{\theta_{1kip}}^{\theta_{2kip}} \overline{V_{inp}} \cdot \overline{n_{inp}} \cdot (R_{ip} - I_{inp} \cdot \sin \alpha_{inp} - \Pi_{ip} + \Delta\delta + \Delta\sigma) \left[1 - \exp\left(-\frac{\sum b(t,\theta)}{b_0}\right) \right] \cdot d\theta_{kip} \right) \cdot \sqrt{\left(\frac{dR_{inp}}{di}\right)^2 + \left(\frac{dz_{inp}}{di}\right)^2} \cdot di \right) \cdot dT_n, \quad (4)$$

де m – кількість одночасно оброблюваних деталей 5 (рис. 1, 2);

T_n – час контакту n -ої деталі 5 з кругами 1,2;

$i_{1l}, i_{2l}, i_{1p}, i_{2p}$ – граничні значення параметра i осового перерізу кругів 1, 2 у зоні контакту (рис. 1, 2);

$\theta_{2kil}, \theta_{1kil}, \theta_{2kip}, \theta_{1kip}$ – кутові координати плями контакту на радіусах $R_{il} - I_{inl} \cdot \sin \alpha_{inl}, R_{ip} - I_{inp} \cdot \sin \alpha_{inp}$;

$1 - \exp\left(-\frac{\sum b(t,\theta)}{b_0}\right)$ – ймовірність видалення матеріалу заготовки;

$I_{inl}(\theta_b)$, $I_{inr}(\theta_b)$ – знос шліфувальних кругів, який виникає від тимчасового опору, що залежить від температури нагрівання деталі;

α_{inl} , α_{inr} – кути нахилу дотичної в i -тій точці профілю, що визначає напрямок зносу;

Π_{il} , Π_{ip} – сумарні податливості технологічних систем;

$\Delta\delta$ – зміщення припуску δ ;

Δo – осьове зміщення початку O_d координат деталі 5 з площини симетрії барабана 6 (рис. 1, 2, 3) яке проходить через осі X_b барабана, X_s станини.

Кількість деталей m , які одночасно обробляються на верстаті, визначаються з виразу:

$$m = \frac{L}{d} + v_p, \quad (5)$$

де $L = R_b \cdot \theta_{b2}$ – довжина дуги контакту на радіусі R_b , подаючого барабана 6, деталей 5 з кругами 1, 2 у межах кута θ_{b2} ;

θ_{b1} , θ_{b2} – кути положення деталі на початку обробки та точках n ;

d – зовнішній діаметр деталі 5;

v_p – відстань між деталями на радіусі R_b подаючого барабана.

Після розрахунку продуктивності по моделі (3) для дослідження потужності її знаходять із виразу:

$$N_d = a \cdot Q_n, \quad (6)$$

де a – коефіцієнт, який визначає потужність, що затрачується на знімання одиниці об'єму;

Q_n – питома або сумарна продуктивність, що знаходиться з виразу (3).

Уперше було проведено дослідження сумарної потужності за координатою обробки θ_b , яка становить суму потужностей одночасно оброблюваних деталей (рис. 1).

Експериментальні потужності 1, 2 при обробці двох торців однієї деталі зображені на рис. 4. При обробці торців деталі 3, потужність поступово збільшується до моменту, коли деталь повністю зайде в зону чорнової обробки, потім величина потужності має практично стабільне значення, тому що знімається однаковий припуск, рівномірно по дузі обробки, потім йде спад потужності, так як деталь переходить на обробку калібруючими ділянками 5, 6 і в кінці, вихід деталі 4 з калібруючої ділянки. На базі цих потужностей розраховані сили різання P_z за формулою, наведеною в роботі [6] (рис. 5).

$$P_z = \frac{N_e}{V_{\theta b}}, \quad (7)$$

де $V_{\theta b}$ – швидкість різання за координатою обробки θ_b при шліфуванні.

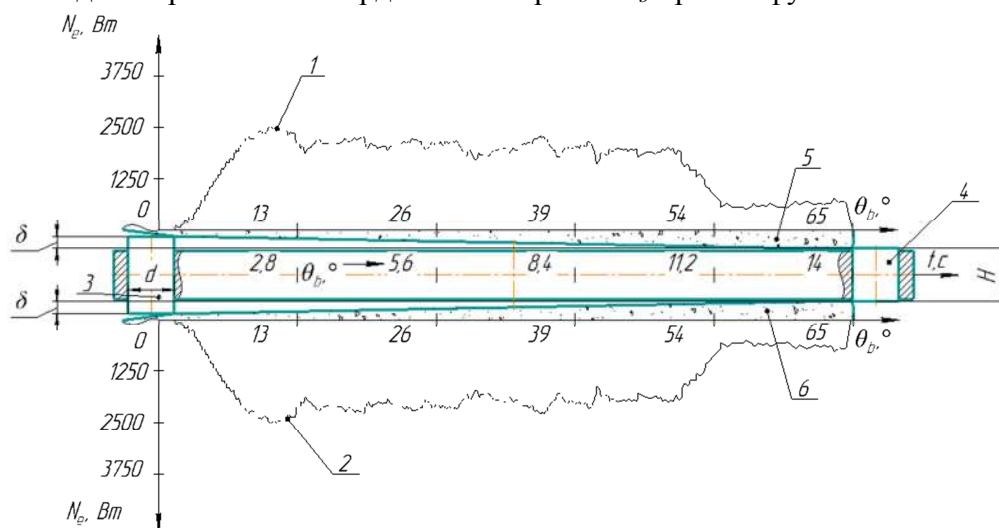


Рис. 4. Ефективна потужність за координатою обробки θ_b на двох торцях однієї деталі

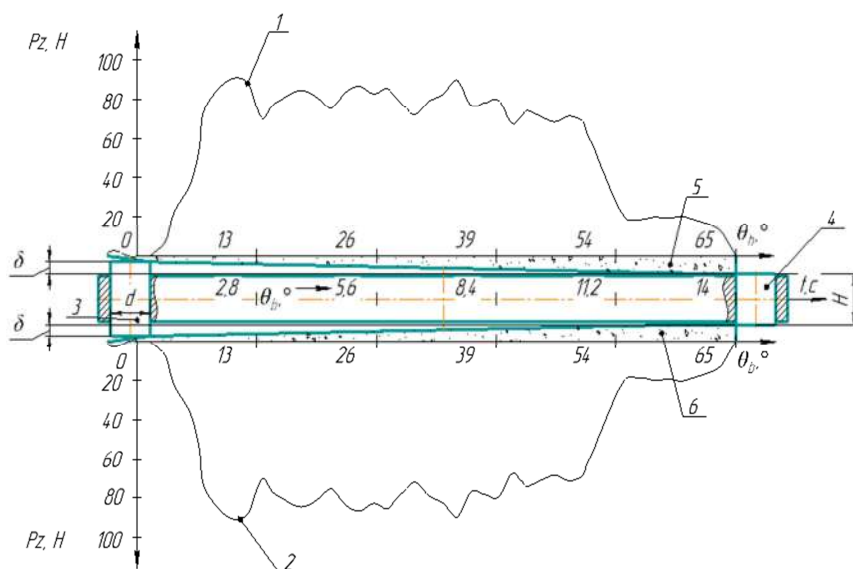


Рис. 5. Сили різання P_z за координатою обробки θ_b на двох торцях однієї деталі

На рис. 6 показано складові сумарної потужності від кожної з 6 деталей (1-6 на графіку); 7 сумарна ефективна потужність; 1', 2', 3' – значення відповідних величин питомої потужності кожної деталі, які в сумі утворюють сумарну потужність за координатою обробки θ_b , у поточний момент часу. Максимальна питома потужність описується стовпцями 1"-6". При вході кожної деталі в зону обробки додаються значення потужності шліфування всіх деталей, які перебувають у зоні обробки. При виході кожної наступної деталі сумарна потужність зменшується у випадку обробки тільки для 6 деталей, які потрапляють у кут θ_{b2} (рис. 1).

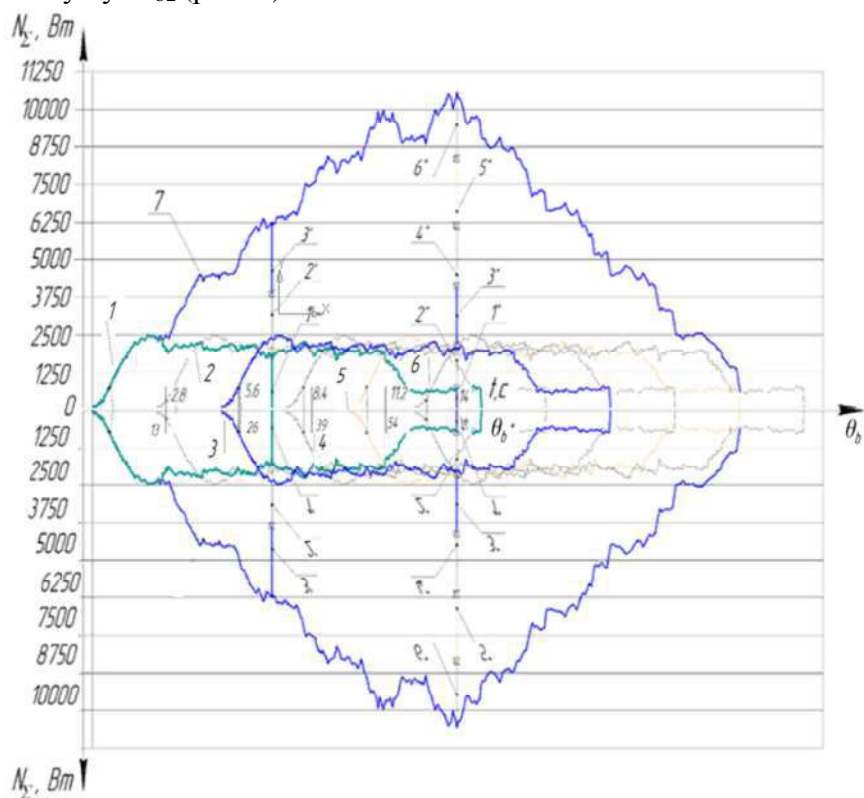


Рис. 6. Питомі та сумарна потужність на довжині дуги контакту в межах кута θ_{b2}

На рис. 7 показані питомі та сумарна активні потужності на двох торцях при безперервному потоці деталей. 8 – загальна потужність за координатою обробки θ_b , яка збільшується до максимального значення, далі при безперервній обробці деталей практично не змінюється; стовпцем 1", 2", 3" показані поточні сумарні значення питомої потужності за координатою обробки θ_b . Стовпцями 1"-6" показані максимальне сумарне значення питомої потужності за координатою обробки θ_b .

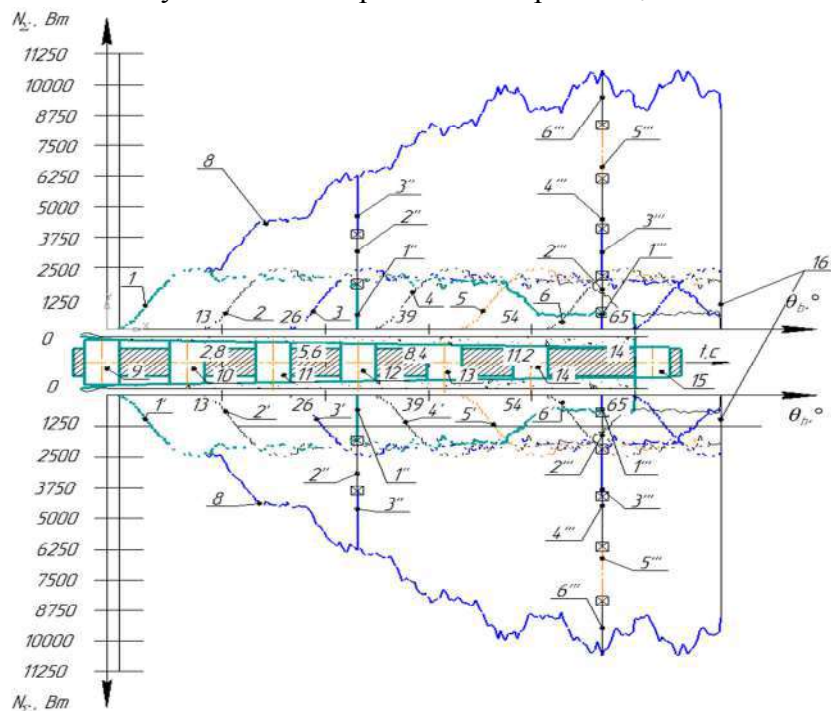


Рис. 7. Питомі та сумарна активні потужності, на двох торцях при безперервній подачі деталей у зону обробки

На рис. 8 показана поточна сумарна сила P_z при безперервному потоці деталей на двох торцях за координатою обробки θ_b . Сила P_z розраховується за формулою (7), в яку підставляються значення максимальної питомої потужності за координатою обробки θ_b , а швидкість шліфування V_{θ_b} за координатою обробки.

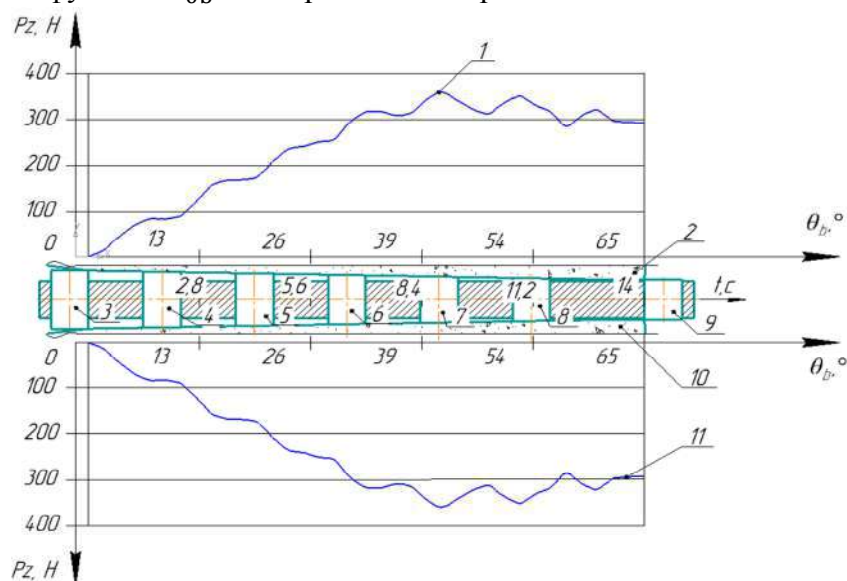


Рис. 8. Сумарна сила різання P_z за координатою обробки θ_b на двох торцях при безперервній подачі деталей у зону обробки

Всі дослідження, які показані на (рис. 4–8), проводилися при постійній кутовій швидкості барабана $\omega = 4,61^0/\text{с}$ і куті, якій відповідає зоні обробки $\theta_{b2} = 65^0$, час обробки становить 14 с, якщо змінюється кутова швидкість барабана, кут θ_{b2} залишається постійним, то змінюватися буде час обробки.

При шліфуванні торців хрестовин з діаметром цапф $\varnothing 13h7$ (рис. 3, б) ефективна потужність та сили різання P_z за координатою обробки θ_b на двох торцях однієї деталі (рис 4,5) питомі та сумарна активні потужності та сумарні сили різання P_z на двох торцях при безперервній подачі деталей у зону обробки (рис. 7, 8) будуть однаковими з шліфуванням торців циліндричних роликів $\varnothing 13h7$.

При шліфуванні штовхачів з різними діаметрами торців (рис. 3, а) кругами з калібруючими ділянками довжиною рівною більшому діаметрові D . Спочатку входить у зону обробки лівий більший торець і потужність поступово збільшується до моменту коли деталь повністю зайде в зону чорнової обробки, потім величина потужності має стабільне значення, тому що знімається однаковий припуск по дузі L обробки, потім потужність зменшується, оскільки деталь переходить на обробку калібруючими ділянками (рис. 4). Величина потужності розраховується за формулою (6) на базі продуктивності Q , розрахованої за формулою (4) для лівого торця. Потім розраховується для меншого діаметра, наступного за координатою обробки θ_b штовхача, і всі поточні питомі потужності, за координатою обробки θ_b додаються стовпцями, як показано на рис. 7.

Максимальна питома потужність буде при вході в зону обробки 6-ї деталі. Сума всіх питомих потужностей за координатою обробки θ_b дає загальну сумарну потужність.

Аналогічний розрахунок буде для правого торця Q_r (4), де обробка починається з меншого торця діаметром d . При парній кількості деталей у межах ділянки θ_{b2} (рис. 1) максимально вирівнюються продуктивності, потужності сили різання, і після 8 деталей для кожного торця цикл повторюється.

Розроблена загальна методика теоретичного та експериментального дослідження продуктивності Q_s , потужності питомої та загальної, сил різання P_z питомих та загальних, на лівому та правому торцях деталі.

При цьому розраховують поточні сили різання [5], потужності за координатою обробки θ_b , які сумуються стовпцями, що збільшуються при вході кожної наступної деталі. Сумарна максимальна питома потужність (рис. 7) стовпець 1"-6" є також максимальною загальною потужністю 8.

Висновок. Розроблена 3D-модель уперше визначає загальну продуктивність Q_s обробки двох торців деталей залежно від координати θ_b по всій дожині лінії контакту L . Вперше доведено що при двосторонньому шліфуванні торців одночасно відбувається два процеси з різними за координатою θ_b обробки на кожному торці силами різання, припусками, що знімаються, зносами кругів, температурами нагрівання торців, податливостями технологічних систем від кругів до торців, миттєвими продуктивностями, потужностями шліфування, що суттєво впливає на сумарну продуктивність на кожному торці й на загальну продуктивність і точність обробки двох торців. Уперше розроблена загальна методика теоретичного та експериментального досліджень продуктивності, потужності питомої та загальної, сил різання питомих та загальних на лівому та правому торцях деталі.

Список використаних джерел

1. *Saturn*. Торцевое шлифование спаренными шлифовальными кругами : [Журнал для клиентов фирмы «Junkermaschinen»] / Erwin Junker: Maschinenfabric GmbH, Junkerstraße 2. Postfach 25. D 77787. – Nordrash, Germany, 2005. – 8 с.
2. *Грабченко А. И.* Шлифование со скрещивающимися осями инструмента и детали : монография / А. И. Грабченко, В. И. Кальченко, В. В. Кальченко. – Издание 2-е, дополненное. – Чернигов : ЧНТУ, 2015. – 504 с.

3. Деклараційний патент України на винахід (корисну модель), №10636B24ВМКЛ5/04. Спосіб одночасного шліфування двох торців циліндричних деталей / Кальченко В. В., Жадан О. В.; заявник та патентовласник Кальченко В. В., Жадан О. В. – № u200505125 ; заявл. 30.05.05; опубл. 15.11.05, Бюл. № 1.

4. Венжега В. І. Підвищення ефективності шліфування торців при схрещених осях деталі та круга з калібрувальною ділянкою : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.03.01 / В. І. Венжега. – Х., 2009. – 214 с.

5. Дослідження процесу шліфування торців орієнтованих деталей профільованими кругами / В. І. Кальченко, В. В. Кальченко, О.С. Следнікова, Д.В. Кальченко // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2016. – № 4 (2016). – С. 72–82.

6. Теоретичне та експериментальне дослідження процесів знаття припуску, зносу кругів, точності формоутворення та теплонапруженості під час шліфування торців деталей / В. І. Кальченко, В. І. Венжега, О. С. Следнікова, Д. В. Кальченко // Технічні науки та технології : науковий журнал. – 2016. – №4(6). – С. 25–34.

References

1. Saturn. Tortcevoe shlifovanie sparennyimi shlifoval'nymi krugami: Zhurnal dlja klientov firmy «Junkermaschinen» [Saturn. Mechanical grinding paired grinding wheels: Customer magazine company «Junkermaschinen»] (2005). Erwin Junker: Maschinenfabric GmbH, Junkerstraße 2. Postfach 25. D 77787. Nordrash, Germany (in Russian).

2. Grabchenko, A.I., Kalchenko, V.I. & Kalchenko, V.V. (2009). *Shlifovanie so skreshhivaiushchimisia osiami instrumenta i detail* [Grinding with crossed axes of tool and workpiece] (2nd ed.). Chernigov: ChDTU (in Russian).

3. Kalchenko, V.V., Zhadan, O.V. (2005). *Sposib odnochasnoho shlifuvannya dvokh tortsiv tsylindrychnykh detalei* [The method of simultaneous grinding of two ends of cylindrical parts]. Deklaratsiynyi patent Ukrainy na vynakhid (korysnu model) № 10636B24ВМКЛ5/04 (in Ukrainian).

4. Venzheha, V.I. (2009) *Pidvyshchennia efektyvnosti shlifuvannia tortsiv pry skhreshchenykh osiakh detali ta kruha z kalibruvalnoiu diliankoiu* [Improved grinding ends with crossed axes and circle details of calibration plot]. *Candidate's thesis*. Kharkiv: National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute” (in Russian).

5. Kalchenko, V.I., Kalchenko, V.V., Slidnikova, O.S., Kalchenko, D.V. (2016). *Doslizhennia protsesu shlifuvania tortsiv oriientovanykh detalei profilovanymy kruhamy* [Research grinding process ends oriented profiled parts circles]. *Bulletin ChSTU. Series: Engineering – Cherkasy ChSTU*, no. 4 (2016), pp. 72–82 (in Ukrainian).

6. Kalchenko, V.I., Venzheha, V.I., Slidnikova, O.S., Kalchenko, D.V. (2016). *Teoretychne ta eksperymentalne doslidzhennia protsesiv zniattia pryusku, znosu kruhiv, tochnosti formoutvorennia ta teplonapruzenosti pid chas shlifuvannia tortsiv detalei* [Theoretical and experimental researches of processes of removal of abandonment, wear of circles accuracy of forming and heat stress during grinding of ends of parts]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, no. 4 (6), pp. 25–34 (in Ukrainian).

UDC 621.923

Dmytro Kalchenko

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF THE PROCESS OF DOUBLE-SIDED GRINDING THE END FACES WITH SKEW AXES OF CYLINDRICAL PARTS, AND CIRCLES WITH CALIBRATED PARTS

Urgency of the research. The developed 3D model first determines the overall performance Q_s of processing the two ends of the parts, depending on the coordinate θ_b throughout the ladder of the contact line L .

Target setting. Machine-tool construction, machine-building and bearing industry are widely used cylindrical parts with high-precision end surfaces, the final accuracy of which is provided by finishing operations.

Actual scientific researches and issues analysis. In recent studies, the technique of processing end surfaces of cylindrical parts with a circular feed into the processing area was considered. Circles without calibrating plots are used, which requires a lot of processing to obtain the required precision, which reduces the productivity of grinding.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Uninvestigated parts of general matters defining. Study of the productivity of grinding each end, the power, the cutting forces and their influence on the overall performance and accuracy of finishing the ends of round cylindrical parts with circles of calibrated sections.

The research objective. Development of 3D model of processing performance of each end of the part and total productivity, based on the acquired performance values for determining the required power.

The statement of basic materials. For the first time, a total power analysis was performed on the coordinate of the processing θb , which is the sum of the capacities of the simultaneously machined parts. All studies were conducted at a constant angular velocity of the drum = 4.610 / s and the angle corresponds to the processing area $\theta b_2 = 650$, the processing time is 14 seconds. If the angular velocity of the drum changes, the angle θb_2 remains constant, then the processing time will vary.

Conclusions. It has been proved for the first time that when two-sided grinding ends, there are two processes simultaneously with different coordinates θb of processing on each end by the cutting forces, removable assumptions, wear of circles, heating temperatures of faces, pleasures of technological systems from circles to ends, instant productivities, and grinding capacities that significantly affect on the total productivity at each end and on the overall performance and accuracy of the processing of the two ends. For the first time, a general methodology of theoretical and experimental On produktyvnyvnosti research, capacity specific and general, specific cutting forces and common on the left and right ends of the parts.

Key words: grinding; details of the parts; oriented grinding wheels; grinding performance.

Fig.: 8. Bibl.: 6.

УДК 621.923

Дмитрий Кальченко

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ДВУСТОРОННЕГО ШЛИФОВАНИЯ ТОРЦОВ СО СКРЕЩИВАЮЩИМИСЯ ОСЯМИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ И КРУГОВ С КАЛИБРУЮЩИМИ УЧАСТКАМИ

Разработанная 3D-модель впервые определяет общую производительность Q_s обработки двух торцов деталей в зависимости от координаты θb по всей длине линии контакта L . Впервые доказано, что при двустороннем шлифовании торцов одновременно происходит два процесса с различными по координате θb обработки на каждом торце силами резания, снимаемыми припусками, износами кругов, температурами нагревания торцов, податливостями технологических систем от кругов к торцам, мгновенными производительностями, мощностями шлифования, существенно влияет на суммарную производительность на каждом торце и на общую производительность и точность обработки двух торцов. Впервые разработана общая методика теоретического и экспериментального исследований производительности, мощности удельной и общей, сил резания удельных и общих на левом и правом торцах детали. При этом рассчитывают текущие силы резания, мощности по координате обработки θb , суммируются столбцами с увеличением при входе каждой последующей детали.

Ключевые слова: шлифовка; торцы деталей; ориентированные шлифовальные круги; производительность шлифования.

Рис.: 8. Библ.: 6.

Кальченко Дмитро Володимирович – магістр, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Кальченко Дмитрий Владимирович – магистр, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Kalchenko Dmytro – master, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: itmia@ukr.net

РОЗДІЛ II. ЗВАРЮВАННЯ ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621.791.4

DOI: 10.25140/2411-5363-2017-4(10)-54-66

Юрій Фальченко, Олег Новомлинець, Лідія Петрушинець, Ірина Нагорна

ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ДЛЯ ПРЕЦИЗІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ

Актуальність теми дослідження. Використання поверхневих фізико-хімічних процесів є перспективним засобом активації для прецизійного з'єднання металевих матеріалів.

Постановка проблеми. Сучасна теорія твердофазного з'єднання стосовно використання поверхневих процесів не може повною мірою визначати безпосередні критерії технології зварювання з мінімальним рівнем пластичної деформації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При зварюванні у твердій фазі різних металів і сплавів використання попереднього підігріву деталей, що зварюються, у розведеному стані, може прискорити процес відновлення оксидних плівок та сублімації одного з матеріалів з наступною конденсацією на поверхню іншого.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Застосування сублімованих прошарків при зварюванні різномірних матеріалів дозволяє отримати міцність на 15...20 % більше міцності з'єднань, зварених безпосередньо напруженим. Однак у роботах не досліджено можливість використання таких прошарків для прецизійного зварювання тиском.

Постановка завдання. Дослідження впливу поверхневих фізико-хімічних процесів (самоочищення від оксидних плівок, сублімація та конденсація) на здатність до прецизійного зварювання тиском у вакуумі різномірних металів.

Викладення основного матеріалу. Досліджено здатність до прецизійного зварювання тиском міді з молібденом та хромом через мідний сублімований прошарок та міді з титаном через сублімований прошарок з титану.

Висновки. Встановлено, що деформація основних матеріалів при зварюванні не перевищує 1 %, а міцність зварених з'єднань міді з молібденом та хромом становить 85...90 % від міцності основного матеріалу (міді), міцність з'єднань міді з титаном – 73...77 % міцності міді.

Запропоновано новий спосіб дифузійного зварювання у вакуумі через тонкі сублімовані активні прошарки. Розроблено новий технологічний процес ДЗВ міді з тугоплавкими металами та титаном з використанням спеціалізованої оснастки, яка дозволяє здійснювати дифузійне зварювання через сублімовані прошарки за один цикл в одній робочій камері.

Запропоновано модель формування нероз'ємних з'єднань при зварюванні тиском у твердій фазі з використанням поверхневих фізико-хімічних процесів.

Ключові слова: дифузійне зварювання у вакуумі; поверхневі фізико-хімічні процеси; сублімовані прошарки; прецизійні нероз'ємні з'єднання.

Табл.: 3. Рис.: 3. Бібл.: 28.

Постановка проблеми. Деформація має вирішальне значення при зварюванні тиском. Однак при виготовленні сучасних деталей машин, конструкцій та виробів для різних галузей часто виникає необхідність отримання зварних з'єднань з обмеженим рівнем деформації основних матеріалів. Основним технологічним прийомом для прецизійного зварювання тиском є застосування додаткових засобів активації поверхонь та вибір оптимальних параметрів режиму зварювання, що забезпечить допустимий рівень деформації основних матеріалів. При цьому важлива роль відводиться відновленню оксидних плівок на поверхні зразків в процесі зварювання. Проте нині сучасна теорія твердофазного з'єднання стосовно використання поверхневих процесів не може повною мірою визначати безпосередні критерії технології зварювання з мінімальним рівнем пластичної деформації. Тому актуальним є вивчення можливості отримання прецизійних з'єднань металевих матеріалів з використанням поверхневих фізико-хімічних процесів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що атомній взаємодії перешкоджає оксидний шар, що перебуває на поверхні контактуючих металевих поверхонь. В умовах вакууму ($1,33 \cdot 10^{-6}$ - $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па) і нагрівання ($0,3$ - $0,7 T_{пл}$) пари води, газові молекули й жирові плівки зникають із металевої поверхні. Таким чином, від того, що буде відбуватися під час нагрівання у вакуумі із шаром оксидів, буде залежати зварюваність металів у твердій фазі як в однорідній, так і в різномірній комбінації [1].

При нагріванні у вакуумі багато металів мають блискучий вигляд. Однак це не свідчить про те, що поверхня повністю звільняється від оксидів, тому що, по-перше, при товщині менше 5 нм плівка оксидів стає безбарвною й прозорою, а по-друге, у процесі

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

поверхневої рекристалізації утворюються грані, які відбивають світло, що й створює враження повного очищення поверхні. Оксидні плівки при товщині більше 5 нм починають набувати колір через інтерференцію світла в них [2].

Тонкий оксидний шар на поверхні металу сам по собі має дуже складну будову, яка визначається складом металу і навколишнім середовищем. Так у ніобію є три оксиди (NbO , NbO_2 , Nb_2O_5), а окалина на залізі має шарувату будову й може складатися залежно від умов із трьох шарів (FeO , Fe_3O_4 , Fe_2O_3), двох шарів (FeO , Fe_3O_4 або Fe_2O_3) або одного шару (FeO або Fe_3O_4) [3]. Оксиди тугоплавких металів мають відносно невисокий питомий об'єм у порівнянні з питомим об'ємом основного металу (особливо W і Mo). Це викликає відшаровування й розтріскування оксидів, що сприяє більш швидкому очищенню поверхонь при нагріванні у вакуумі. Структура оксидів і міцність зчеплення мають різний характер для металів. Найбільш міцно пов'язані з металом оксиди Ti , Zr , Hf , Nb , Ta [4; 5].

Розглянемо процеси, які відбуваються у поверхневому шарі металу під час нагрівання у вакуумі: *дисоціація оксиду*; *сублімація оксиду*; *розчинення оксидів*; *відновлення оксидів*; *механічний вплив*.

Найбільш імовірним процесом *термічної дисоціації* у процесі дифузійного зварювання у вакуумі є розкладання водяної пари й металу на нагрітій поверхні металу за реакціями: $2\text{H}_2\text{O} = 2\text{H}_2 + \text{O}_2$; $\text{CH}_4 = 2\text{H}_2 + \text{C}$. Утворені в результаті реакції, водень, вуглець і кисень, реагуючи з нагрітою поверхнею металу, сприяють протіканню процесів, які ми розглянемо нижче.

Дисоціація оксиду може мати місце, якщо парціальний тиск кисню середовища менше пружності дисоціації оксиду. Розрахунки для жароміцних сплавів на Ni основі показують, що у вакуумі $1,33 \cdot 10^{-3}$ - $1,33 \cdot 10^{-1}$ Па дисоціація не можлива [6]. У роботах [7; 8] стверджується, що є ймовірність дисоціації оксидів тільки таких елементів, як Pt , Ir , Rh , Ru , Os , Cu , Re , Ni , Co , Ge , Sn , Mo , W , Fe . Дисоціація інших елементів не може мати місце при будь-якому практично досяжному вакуумі.

Умовою сублімації є перевищення тиску насиченого пару оксиду над парціальним тиском парів того ж оксиду в газовій фазі. За даними робіт [9; 10] при нагріванні у вакуумі до $0,7 T_{\text{пл}}$ найбільш імовірна сублімація оксидів молібдену, ванадію й нікелю за реакцією: $\text{MeO}_{(\text{твердий стан})} = \text{MeO}_{(\text{газоподібний стан})}$. Якщо для ніобію така реакція можлива тільки при 1775°C [11], то для молібдену й вольфраму вона вже відчутна при 600°C і 800°C . Оксид нікелю товщиною 3 нм при 1200°C випаровується за 13 секунд [6].

У роботі [12] встановлено, що швидкість випаровування багатьох оксидів може бути на кілька порядків вище або нижче швидкості випаровування самих металів. Так, наприклад, сам молібден починає помітно випаровуватися тільки при температурах вище 1727°C , а оксид MoO_3 з такою ж швидкістю випаровується вже при 377°C . У той же час нікель випаровується при температурі 1000°C , при якій його оксид NiO не випаровується.

Цікаво відзначити, що в космічному вакуумі з поверхні металів відбувається сублімація навіть дислокацій [4].

Розчинення оксидів проходить у дві стадії. Спочатку відбувається розрив хімічного зв'язку між атомами кисню й металу, а потім атоми кисню дифундують у глиб металу, тобто дифузія є вторинним процесом [13]. Розчинення оксидів шляхом дифузії кисню є характерним способом розкладання поверхневих оксидів для металів, що мають велику спорідненість до кисню (Ti , Zr , V , Nb). Так, при нагріванні титану у вакуумі, вже починаючи з 700°C , оксидна плівка починає інтенсивно розчинятися в основному металі.

При взаємодії оксидів з деякими речовинами, які дають продукти реакції в газоподібному стані, може відбуватися *відновлення оксидів*. До таких речовин відносять вуглець і його хімічні сполуки типу вуглеводнів, водень, а також хлористий алюміній, фтористий амоній тощо. Розглянемо окремо кожний з можливих процесів відновлення.

Відновлення вуглецем. Процес відновлення плівки оксиду при нагріванні у вакуумі є основним для вуглецевмісних і низьколегованих сталей. При відновленні оксиду заліза (FeO) у газову фазу виділяються оксид вуглецю CO і діоксид вуглецю CO₂, а залізо відновлюється. Дуже важливим є висновок про те, що звільнені від кисню атоми компонентів, що входять до складу оксидів, є матеріалом для прискороного утворення загальних зерен у зоні контакту [10]. Реакція відновлення вуглецем з виділенням CO така: $m\text{Me}_{n/m}\text{O}_{2/m} + 2\text{C} = m\text{Me} + 2\text{CO}$. Реакція буде протікати вправо, якщо спорідненість вуглецю до кисню більша, ніж до металу. Діоксид вуглецю (CO₂) є результатом реакції взаємодії CO і оксиду: $2n\text{CO}_{(\text{газ})} + \text{MeO}_{2n(\text{ТВ})} = 2n\text{CO}_{(\text{газ})} + m\text{Me}_{(\text{ТВ})}$ [14].

Відновна здатність вуглецю при високих температурах пояснюється тим, що пружність дисоціації CO дуже мала й несуттєво змінюється з температурою. У табл. 1 показано, що відновлення різних оксидів вуглецем найчастіше протікає в певному температурному інтервалі [9]. Згідно з роботою [14] температура відновлення вуглецем FeO визначена як 1050–1000 °C і якщо вона знижується хоча б на 50 °C, то відновлення йде дуже повільно.

Таблиця 1

Температура початку й кінця відновлення різних оксидів вуглецем

Оксиди	Початок відновлення, °C	Кінець відновлення, °C
FeO	800	1100
MnO	1000	1200
SiO ₂	1100	1500
Al ₂ O ₃	1300	1600
Cr ₂ O ₃	-	1200
MoO ₃	-	1200
V ₂ O ₅	800	1200
ZrO ₂	1200	1500
TiO ₂	1000	1400
B ₂ O ₃	1000	1400

Як видно з табл. 1, в умовах зварювання у твердій фазі процеси відновлення оксидних плівок на Fe, Mn, Cr, Mo, V можуть носити визначальний характер.

Таким чином, знаючи особливості газовиділення у вакуумі металів, ми можемо орієнтовно оцінювати механізм очищення поверхні від оксидних плівок. Інтенсивне виділення оксиду вуглецю повинне свідчити про інтенсивне очищення поверхні за механізмом відновлення оксиду вуглецем. У табл. 2 на підставі ряду робіт наведені експериментальні відомості про газовиділення деяких металів при нагріванні у вакуумі.

Таблиця 2

Газовиділення металів при нагріванні у вакуумі

Метал	Гази, що виділяються	Основне газовиділення		Література
		газ	температура, °C	
Mo*, W, Ni, Cr, V		CO	1000	[10; 16]
Сталь Ст.3	CO, CO ₂	CO	1200	[17]
Нікель	CO, CO ₂ , H ₂ , N ₂	CO ₂	1100-1200	[14]
Нікель	CO, CO ₂	CO	800	[18]
Сталь X18H10T	CO, H ₂ , N ₂ , H ₂ O	H ₂	400	[19]
Ніобій	CO, H ₂ , N ₂	H ₂	900-1250	[11; 4]
Титан	H ₂ , H ₂ O, CO+H ₂	H ₂	700-800	[9]

* – Мо при T≥1000 виділяє CO, а при T>1200 – N₂, при T<1000 – H₂.

Аналізуючи табл. 2 можна зробити припущення про те, що для багатьох металів процес відновлення плівки оксидів вуглецем є найбільш імовірним. Однак ніобій, тантал, титан і аустенітні сталі (18 % Cr і 8 % Ni) явно не характеризуються процесом від-

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

новлення оксидної плівки вуглецем. Виділення CO із ніобію, найімовірніше, є наслідком реакції типу $[C] + [O] \rightarrow [CO_2]$, тобто реакція може слугувати як для видалення вуглецю, так і кисню, розчиненого в металі. У роботі [15] було знайдено, що вміст кисню після відпалу сплавів ВН-1 і ВН-2 при 1800 °С протягом 10 годин знижувався з 0,05 до 0,005 %. Отже, реакція з виділенням CO іде в ніобії не за шляхом відновлення оксиду вуглецем. Відзначимо, що водень із ніобію видаляється при 900...1400 °С і у вакуумі вище $1,33 \cdot 10^{-1}$ Па продукти реакції Nb-H втрачають стабільність [11; 16].

За даними роботи [16], при температурі 1000 °С у вакуумі оксид вуглецю виділяється в основному з таких металів: Fe, вуглецева сталь, Ni, ковар, Mo, W. Причому Ni виділяє менше CO порівняно з Fe і вуглецевою сталлю. Необхідно відзначити той факт, що Fe покриті Ni виділяє CO не як Fe, а як Ni. Остання обставина може мати велике практичне значення при виборі проміжних прошарків у випадку зварювання у твердій фазі різнорідних металів.

Відновлення оксидом вуглецю. Відновлення оксидом вуглецю відбувається за реакцією: $2nCO_{(газ)} + M_mO_{2(тв)} = 2nCO_{2(газ)} + mM_{(тв)}$. Відновлення відбувається з виділенням вуглекислого газу CO₂. Оксид вуглецю, що виділився з металу (табл. 2), додатково призводить до часткового відновлення оксидів. Залежно від матеріалу, температури нагрівання й глибини вакууму спостерігається присутність у газовій фазі переважно або CO або CO₂.

Проте оксид вуглецю поряд з відновленням може призводити до утворення карбідів й оксидів. При $T > 500-600$ °С можлива реакція [14]: $3Fe + 2CO \rightarrow Fe_3C + CO_2$; $Ni + CO_2 \rightarrow NiO + CO$; $TiO + CO \leftrightarrow Ti + CO_2$; $Ti + 2CO \leftrightarrow TiC + CO_2$ і т. ін. Присутній при вакуумі $1,33 \cdot 10^{-3}-1,33 \cdot 10^{-1}$ Па метан (CH₄) розкладається на нагрітій поверхні металу за реакцією $CH_4 \rightarrow C + 2H_2$, що може призвести до відновлення оксиду як за рахунок вуглецю, так і водню.

Відновлення воднем. Присутні в атмосфері газової фази пари води при взаємодії з нагрітим металом розкладаються із виділенням атомарного водню, який є сильним відновлювачем оксидів. Ідуть реакції дисоціації $2H_2O = 2H_2 + O_2$ і відновлення $2nH_{2(газ)} + M_mO_{2(тв)} = 2nH_2O_{(газ)} + mM_{(тв)}$. Відновлення оксиду воднем іде безупинно, тому що після відновлення оксиду знову утворюються пари води, тобто цикл повторюється. Відновлення оксиду відбувається також воднем, що виділяється з металу, при цьому швидкість відновлення визначається адсорбцією H₂ на поверхні оксиду. Відзначимо, що в металі водяна пара не розчиняється [14]. Водень відновлює оксидну плівку міді вже при нагріванні понад 800 °С: $Cu_2O + H_2 = 2Cu + H_2O$. За даними роботи [14], водень може відновлювати оксиди таких металів, як хром, молібден, вольфрам, титан, нікель. Відзначається, що особливо легко відновлюються воднем оксиди нікелю.

Відновлення фтористим амонієм починається з моменту його дисоціації при 200 °С у вакуумі. Ідуть процеси утворення летучих фторидів металу: $2NH_4F = N_2 + 3H_2 + 2HF$ та відновлення оксидів воднем: $mMe_{n/m}O_{2/m} + xHF = cMe_{n/c}Fe_{x/c} + x/cH_2O$; $mMe_{n/m}O_{2/m} + 2H_2 = nMe + H_2O$.

Розроблено спосіб зварювання [20], який полягає в тому, що у стик поміщається матеріал, який у результаті хімічної реакції з основним металом утворює газоподібні продукти й поверхня очищається від оксидів. Після видалення оксидів можна здійснювати процес зварювання. У роботі розглядається приклад видалення оксидних плівок хрому й титану з деталей за допомогою фтористого амонію (NH₄F). Фтористий амоній відновлює плівки оксиду на Cr і Ti за 15 хвилин при 1100 °С.

Механічний вплив. У процесі пластичної деформації відбувається механічне пошкодження або руйнування оксидної плівки на металі. Тріщини в плівці й місця розриву полегшують вихід глибинних газів на поверхню, тобто інтенсивність очищення металу зростає. У роботі [18] прямими експериментами показано зростання газовиділення при

деформації сплавів ніобію або нікелю. Додаткове виділення газів на ніобієвому сплаві (H_2 , CO , N_2) пояснюється утворенням додаткових шляхів більш легкої дифузії газів. При деформації в металі виникають напруження, площини ковзання, нові границі й блоки, руйнується поверхнева оксидна плівка. Зі збільшенням ступеня деформації при одній температурі нагрівання газовиділення зростає [18]. Процеси рекристалізації можуть вплинути на оксидну плівку. По-перше, при рекристалізації прискорюються процеси пластичної деформації й дифузійна рухливість атомів, а по-друге, може відбуватися виламування плівки зростаючим кристалом [21; 22].

Фізичний стан є фактором, що впливає на зварюваність у твердому стані у вакуумі. Тому поряд зі знанням того, що ж відбувається з оксидами в контакті, необхідно знати й ті зміни в поверхневому шарі металу, які відбуваються у процесі випаровування самого металу або легуючих елементів, а також ураховувати небезпеку забруднення поверхні продуктами реакцій та залишковими газами.

Випаровування металів і сплавів. Найбільшу випаровуваність мають хром, марганець, нікель, кобальт, а найменшу – титан, мідь, цирконій, алюміній тощо [7; 12]. У вакуумі при температурі $1200\text{ }^\circ\text{C}$ швидкість випаровування (оцінка по зменшенню ваги) збільшується для ряду деяких металів у такій послідовності: W, Mo, Pd, Ni, Fe, Cu [23]. Також у роботі [23] представлені результати дослідження складу поверхні хромомарганцевої і хромонікельмолібденової сталі після різних витримок ($5 \div 120$ хв) в інтервалі температур від 700 до $1200\text{ }^\circ\text{C}$ при вакуумі порядку $1,33 \cdot 10^{-2}$ Па. Спектроаналітичне обстеження поверхні показало, що загальна глибина поверхневого шару, що брав участь у сублімації, досягає $0,3 \div 0,4$ мм.

Відомо, що випаровування твердих тіл є ступінчастим процесом. Спочатку атоми металу переходять в адсорбований на поверхні шар, а потім випаровуються після деякого блукання по поверхні. Ріст чисельності поверхневих дефектів і перерозподіл легуючих елементів у процесі пластичної деформації сприяє збільшенню швидкості випаровування. Наявність поверхневих дефектів полегшує перехід атомів в адсорбований стан і зменшує роботу випаровування елементів [13].

Слід зазначити, що тривала витримка у вакуумі при високій температурі обумовлює появу своєрідного мікрорельєфу на поверхні металу. Нерівна терасоподібна поверхня з висотою сходів до 10^{-4} мм, ямки й канавки термічного травлення є наслідком вибіркового випаровування металу й протікання процесів поверхневої дифузії [13]. Термічне травлення має місце переважно з областей з найбільшими викривленнями кристалічних ґраток і підвищеної вільної енергії (границі зерна, місця виходу дислокацій).

Поглинання газів. Склад газової фази при вакуумі $1,33 \cdot 10^{-3}$ – $1,33 \cdot 10^{-1}$ Па різко відрізняється від розрахункового, який відповідає прийнятому ступеню розрядження. У робочій вакуумній камері при зазначеному розрядженні міститься H_2O , H_2 , CH_4 (метан). При нагріванні метан взаємодіє із цими залишковими газами, наприклад, метан розкладається на гарячому ніобії за реакцією $CH_4 \rightarrow C + 2H_2$ і обумовлює насичення поверхні вуглецем [11]. У такий спосіб навіть вакуум $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па не є нейтральним середовищем при нагріванні, особливо таких хімічноактивних металів, як ніобій, молібден, титан тощо.

Можна вважати доведеним необхідність застосування максимально можливого розрядження, якщо температура нагрівання перевищує $0,4 T_{пл}$. Відзначимо, що дані спектроскопії свідчать про те, що на поверхнях свіжого зламу вуглець і кисень можуть бути присутніми навіть у надвисокому вакуумі $1,33 \cdot 10^{-7}$ Па [24].

При низьких тисках і високих температурах поглинання газів металами визначається трьома процесами: хемосорбцією газу на поверхні металу і його наступною дифузійною в глиб зразка, а також десорбцією газу з поверхні металу в газову фазу. Поглинання газів супроводжується окисленням поверхні металів, наприклад, на ніобії у вакуумі утворюються продукти окислення у вигляді окремих ізольованих ділянок на поверхні [11].

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

У роботі [25] стверджується, що зазор між деталями, які при зварюванні тиском перед нагріванням попередньо стискаються на повітрі, можна розглядати як суму герметичних мікрооб'ємів, що заповнені повітрям. У період нагрівання в цих мікрооб'ємах відбуваються процеси самоочищення від оксидних плівок і утворення вакууму, а процеси автовакуумного зварювання тиском, гарячої прокатки герметичних пакетів, пресового зварювання, дифузійного зварювання у вакуумі та контактного зварювання характеризуються спільністю фізико-хімічних процесів, які протікають у герметичному зазорі.

У світлі вищевикладеного становить інтерес результат досліджень попередньо окислених зразків зі сталі Ст3 і сталі 12Х18Н10Т [26]. Встановлено, що на затиснутих поверхнях спостерігається різке зниження швидкості очищення, а вільна поверхня металу очищається більш інтенсивно, коли вона контактує з газовою фазою (вакуумом). На сталі Ст3 плівка товщиною 50-60 нм при 900 °С видаляється за 5...10 хвилин одночасно як на затиснутих, так і на вільних поверхнях. На сталі 12Х18Н10Т товсту оксидну плівку на затиснутих поверхнях вилучити при нагріванні до 1000 °С не вдалося, а на вільній поверхні товщина плівки зменшилась. Тобто істотне значення має відновлення оксидів за рахунок їх взаємодії з елементами-відновлювачами, що є в газовій фазі. Відзначимо, що наявність цих елементів у вакуумі залежить від глибини вакууму, величини натікання у вакуумну камеру, інтенсивності газовиділення.

Імовірно, для кожного металу й сплаву є характерна величина вакууму й натікання, обумовлені фізико-хімічними властивостями матеріалів, що зварюються, і температурою нагрівання. У такий спосіб ми можемо зробити висновок, що при нагріванні металу у вакуумі він може як очищатися від оксидів, так і окислюватися одночасно.

На підставі зробленого аналізу літератури можна зазначити, що під час нагрівання металу у вакуумі на його поверхні відбувається комплекс поверхневих фізико-хімічних процесів, які взаємозалежні й можуть привести не тільки до очищення поверхні від оксидів, але й до істотної зміни механічних і фізико-хімічних властивостей тонкого поверхневого шару металу. У табл. 3 на підставі викладеного матеріалу наведені основні відомості, які можуть надати істотну допомогу при розробці технології зварювання у твердій фазі у вакуумі $1,33 \cdot 10^{-4}$ - $1,33 \cdot 10^{-2}$ Па, з температурою зварювання вище $0,4T_{пл}$.

Аналізуючи відомості, наведені в табл. 3, можна зробити висновок, що у процесі зварювання як однорідних, так і різнорідних металів необхідно враховувати процеси, що протікають у поверхневому шарі металу при його нагріванні у вакуумі. У випадку зварювання різнорідних металів слід визначати параметри нагрівання не тільки з погляду появи крихких фаз у зоні контакту, але й з позицій оптимального очищення поверхні від оксидів. При виборі проміжних прошарків необхідно також враховувати не тільки діаграму стану металів, що зварюються, але й той вплив, який матеріал прошарку може виявити на інтенсивність очищення поверхні контакту основного металу від оксидів.

Таблиця 3

Можливі процеси очищення металів від оксидів при нагріванні у вакуумі

Метал	Основне газовиділення $T=(0,4-0,7)T_{пл}$	Можливі процеси очищення металу від оксидів у вакуумі при нагріванні
Fe, Ст3	CO	Дисоціація, відновлення вуглецем
Ni	CO	Дисоціація, сублимація, відновлення вуглецем і воднем
Cu	-	Дисоціація, відновлення воднем
Cr	-	Відновлення воднем і вуглецем
Mn	-	Відновлення вуглецем
V	CO	Сублимація, розчинення, відновлення вуглецем
Mo	CO	Дисоціація, сублимація, відновлення вуглецем і воднем
W	CO	Дисоціація, сублимація, відновлення вуглецем і воднем
Ti, Zr, Nb	H ₂	Розчинення, відновлення вуглецем
Pd	H ₂	Дисоціація, сублимація, відновлення воднем
X19H10T	N ₂	Відновлення вуглецем і воднем

Таким чином, стосовно зварювання у твердій фазі різних металів і сплавів можна запропонувати п'ять підходів до розробки технологій з використанням поверхневих фізико-хімічних процесів для забезпечення утворення якісного нероз'ємного з'єднання:

- гальванічне покриття матеріалом, який не утворює термодинамічно стійких оксидів, нітридів й карбідів на поверхні та сприяє процесам очищення основного металу від оксидів;
- застосування проміжних прошарків, матеріал яких дозволяє інтенсифікувати очищення від оксидів основного металу;
- застосування штучних методів відновлення оксидних плівок;
- скорочення до мінімуму часу від обробки поверхні металу до моменту зварювання й зварювання у граничному для цієї системи вакуумі;
- використання попереднього підігріву деталей, що зварюються, у розведеному стані для прискорення процесу відновлення оксидних плівок та сублимації одного з матеріалів з наступною конденсацією на поверхню іншого.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. У роботах [27; 28] встановлено, що при дифузійному зварюванні у вакуумі (ДЗВ) міді з хромом та титаном міцність зварних з'єднань, отриманих із застосуванням сублимованих прошарків міді (пара мідь-хром) та титану (пара мідь-титан), на 15...20 % більше міцності з'єднань, зварених безпосередньо напругою. Однак у роботах не досліджено можливість використання поверхневих фізико-хімічних процесів для прецизійного зварювання тиском. Крім того, умови проведення експерименту, коли спочатку створювали проміжні шари міді, а потім проводили зварювання, не дозволили повною мірою оцінити ефективність використання сублимованих прошарків, у зв'язку з тим, що сублимовані прошарки при цьому встигають окислитись.

Тому **метою** нашої роботи було дослідження впливу поверхневих фізико-хімічних процесів (самоочищення від оксидних плівок, сублимація та конденсація) на здатність до прецизійного зварювання тиском у вакуумі різнорідних металів.

Викладення основного матеріалу. У роботах [27; 28] зазначено, що у разі нагрівання у вакуумі негерметичних об'ємів, час, необхідний для утворення сублимованих прошарків, становить 1-3 хвилини незалежно від природи іншого металу, що значно менше, ніж час, необхідний для утворення таких прошарків при нагріві герметичних об'ємів.

Отже, нами був запропоновано новий спосіб дифузійного зварювання у вакуумі через тонкі сублимовані прошарки, що здійснюється за схемою, зображеною на рис. 1. Зварні деталі 2 встановлюються та фіксуються за допомогою спеціальної оснастки 4 таким чином, щоб зазор між поверхнями становив 0,5...1 мм. Після герметизації та створення розрідження у робочій камері 1, зібраний вузол нагрівачем 3 нагрівається до температури сублимації одного із матеріалів, що зварюється і після витримки протягом 1-5 хвилин, яка необхідна для прогріву заготовок і проходження процесу сублимації та конденсації з утворенням тонкого проміжного прошарку, прикладається зусилля зварювання і проводиться дифузійне зварювання. Після зварювання з'єднання охолоджують та виймають із камери. У випадку, коли температура зварювання менше температури сублимації матеріалу, то зусилля зварювання прикладають після зменшення температури до необхідної межі. Представлена схема дозволяє здійснювати дифузійне зварювання через тонкі проміжні прошарки за один цикл в одній робочій камері.

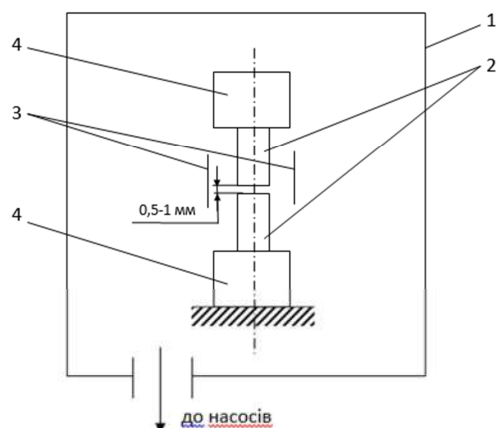


Рис. 1. Схема ДЗВ різнорідних металів через сублимовані прошарки:
 1 – вакуумна камера; 2 – деталі, що зварюються; 3 – нагрівач;
 4 – верхній та нижній штоки

Для реалізації представленої схеми зварювання була розроблена спеціалізована оснастка, що дозволяє проводити попереднє нагрівання заготовок, що зварюються, у розведеному стані з наступним прикладанням зусилля зварювання та розроблена нова технологія ДЗВ міді з тугоплавкими металами та титаном, яка передбачає:

- збирання заготовок, що зварюються, у вакуумній камері з використанням спеціальної оснастки;
- нагрів заготовок у розведеному стані для створення сублимаційних прошарків;
- процес дифузійного зварювання на режимах: *мідь-тугоплавкі метали (молібден, хром):* $T_{зв} = 950 \dots 970$ °С, час витримки при температурі зварювання до прикладання зусилля – 1...2 хвилини; $t_{зв} = 10$ хвилин; тиск зварювання 1-2 МПа; *мідь-титан:* $T_{зв} = 850$ °С, час витримки при температурі зварювання до прикладання зусилля – 1...2 хвилини; $t_{зв} = 10$ хвилин; тиск зварювання 2-3 МПа.

Тиск зварювання був попередньо визначений з метою мінімізації пластичної деформації. Необхідно зауважити, що з врахуванням розміру сублимованих частинок (товщини конденсованого прошарку) порядку 2 мкм, поверхні перед зварюванням полірували до 7-го класу шорсткості (параметри шорсткості визначали за допомогою профілографа-профілометра).

Характерний вид зварних з'єднань, отриманих на вказаних режимах, представлено на рис. 2. Встановлено, що деформація основних матеріалів при зварюванні на вказаних режимах не перевищує 1 %, що відповідає вимогам прецизійності. Механічні випробування на зріз показали, що міцність зварних з'єднань міді з молібденом та хромом при цьому досягає 95...100 МПа, що складає 85...90 % від міцності основного матеріалу (міді). Міцність з'єднань міді з титаном становить 80–85 МПа, або 73...77 % міцності міді (110 МПа).

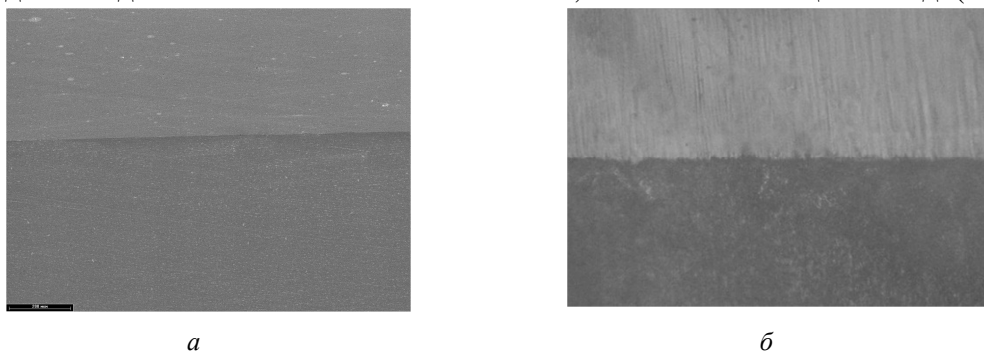


Рис. 2. Мікроструктура зони з'єднання мідь-молібден (а) (растрова електронна мікроскопія); мідь-титан (б) (оптична мікроскопія) (x100).

Таким чином, літературний аналіз можливих поверхневих фізико-хімічних процесів при зварюванні тиском різних однорідних та різнорідних матеріалів, а також отримані експериментальні дані щодо використання таких процесів як засіб активації поверхонь, дозволяє нам запропонувати модель формування нероз'ємних з'єднань при зварюванні у твердій фазі за розробленою технологією за рахунок проходження таких стадій: 1 – самоочищення поверхні від оксидних плівок на стадії попереднього нагрівання заготовок у вакуумі у розведеному стані (внаслідок дисоціації, відновлення та розчинення оксидів); 2 – сублимація одного з матеріалів з наступною конденсацією на поверхні іншого; 3 – утворення на стадії осадки хімічних зв'язків та формування зони об'ємної взаємодії (рис. 3).

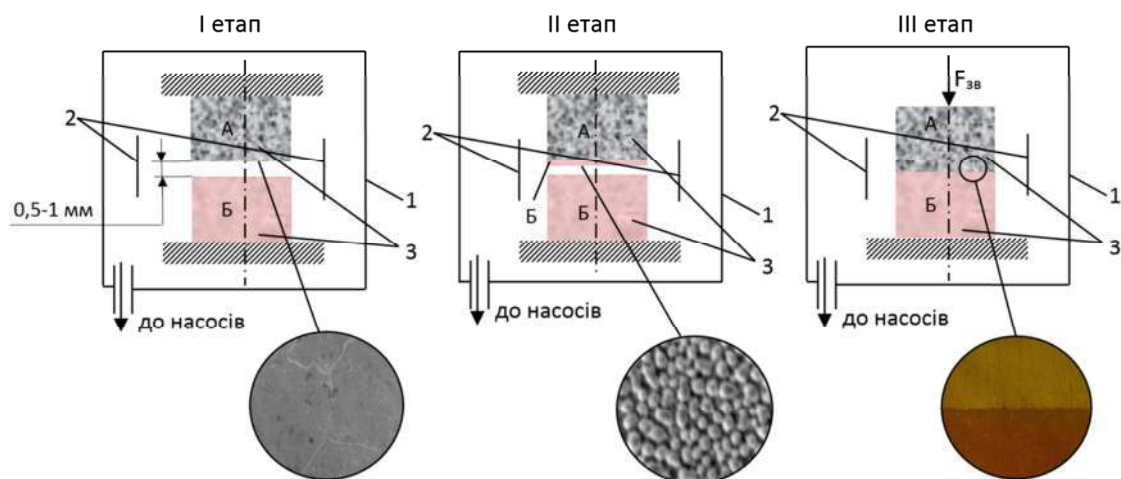


Рис. 3. Стадії формування нероз'ємних з'єднань при зварюванні тиском у твердій фазі з використанням поверхневих фізико-хімічних процесів: 1 – вакуумна камера; 2 – нагрівач; 3 – деталі, що зварюються

Висновки.

1. Запропоновано новий спосіб дифузійного зварювання у вакуумі через тонкі сублимовані активні прошарки.
2. Розроблено новий технологічний процес ДЗВ міді з тугоплавкими металами та титаном з використанням спеціалізованої оснастки, яка дозволяє здійснювати дифузійне зварювання через сублимовані прошарки за один цикл в одній робочій камері.
3. Запропоновано модель формування нероз'ємних з'єднань при зварюванні тиском у твердій фазі з використанням поверхневих фізико-хімічних процесів.

Список використаних джерел

1. Кочергин К. А. Сварка давлением / К. А. Кочергин. – Л. : Машиностроение, 1972. – 216 с.
2. Окисление металлов / под ред. Ж. Бенара ; пер. с французского. – М. : Металлургия, 1967. – Т. 1. – 499 с.
3. Стычинский В. Б. Предупреждение образования окалины и методы очистки деталей / В. Б. Стычинский, С. Д. Бешелев. – М. : Машиностроение, 1964. – 132 с.
4. Савицкий Е. М. Металловедение сплавов тугоплавких металлов / Е. М. Савицкий, Г. С. Бурханов. – М. : Наука, 1971. – 356 с.
5. Гуляев Б. Б. Литье из тугоплавких металлов / Б. Б. Гуляев, О. Н. Магницкий, А. А. Демидов. – М.-Л. : Машиностроение, 1964. – 192 с.
6. Квасницкий В. Ф. О возгонке поверхностных пленок при соединении жаропрочных сплавов в твердом состоянии в вакууме / В. Ф. Квасницкий // Труды НКИ им. С. О. Макарова. – 1971. – Вып. 45. Технология судостроения и сварочного производства в судостроении.
7. Шмыков А. А. Закономерности взаимодействия контролируемых атмосфер с металлами / А. А. Шмыков // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1967. – № 5. – С. 54–65.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

8. Шмыков А. А. Термодинамика и кинетика процессов взаимодействия контролируемых атмосфер с поверхностью стали / А. А. Шмыков, В. Г. Хорошайлов, Е. Л. Гюлиханданов. – М. : Metallurgiya, 1991. – 160 с.
9. Взаимодействие марганца, хрома и титана с воздухом в условиях автовакуумного нагрева при пайке / В. И. Рымарь, С. Н. Лоцманов, В. М. Радзиевский, В. Ю. Чернов // Сварочное производство. – 1973. – № 11. – С. 6–8.
10. Слепуха В. Т. Образование поверхностей, свободных от оксидных пленок при диффузной сварке в вакууме / В. Т. Слепуха // Сварочное производство. – 1965. – № 5. – С. 30–40.
11. Соколова Г. В. Взаимодействие ниобия с газами при высоких температурах и низких давлениях (обзор литературы) / Г. В. Соколова, С. Ф. Юрьев // Металловедение. – 1970. – № 14.
12. Куликов И. С. Термическая диссоциация соединений / И. С. Куликов. – М. : Metallurgiya, 1966. – 250 с.
13. Испарение и металлические свойства металлических материалов в вакууме (обзор литературы) / Н. Н. Грибов, Ю. И. Звездин, А. И. Мелькер, С. С. Шураков, В. А. Яковлев // Металловедение. – 1964. – № 8.
14. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники : пер. с англ. / С. Дэшман. – М. : Мир, 1964. – 715 с.
15. Масс-спектрометрический анализ газов при прокате в вакууме / Н. А. Аникеев, Я. Б. Гуревич и др. // Известия Вузов. Черная металлургия. – 1969. – № 7. – С. 61–67.
16. Коллинз Д. Термическое обезгаживание электровакуумных материалов / Д. Коллинз, К. Тернбалл // Техника электронных ламп : материалы V Национальной конференции по технике электронных ламп. – М. : Изд-во иностр. лит., 1963. – С. 178–183.
17. Гельман А. С. О взаимодействии сталей с газами в условиях автовакуумного нагрева при сварке / А. С. Гельман, М. С. Барышев // Сварочное производство. – 1971. – № 5. – С. 9–11.
18. О кинетике выделения газов при прокатке в вакуум / Н. А. Аникеев, Я. Б. Гуревич и др. // Физика и химия обработки материалов. – 1970. – № 12. – С. 52–61.
19. Скибина Г. В. Исследование газоотделения нержавеющей сталей в динамическом высоком вакууме : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Г. В. Скибина ; МВТУ им. Н. Е. Баумана. – М., 1970.
20. Норман С. Усовершенствования в области сварки металлов. Английский Патент, кл. 83(ч). В23к, № 919031 (РЖМЕТ, № 11, 1963, 11Е327П).
21. Семенов А. П. Схватывание металлов / А. П. Семенов. – М. : Машгиз, 1958. – 280 с.
22. Вадило П. С. Кристаллизация металлов / П. С. Вадило. – М. : Metallurgiya, 1964. – 183 с.
23. Борисов А. Я. Исследование испаряемости нержавеющей сталей и никелевых жаропрочных сплавов в вакууме при высоких температурах / А. Я. Борисов, Г. В. Ильина, Ю. В. Соломко // Металловедение. – 1965. – № 9. – С. 124–131.
24. Methods for diffusion welding the superalloy Udimet 700 / Duvall D. S., Owszarski W. A., Paulonis D. F., King W. H. // Welding Journal». – 1972. – Issue 51, № 2. – Pp. 41–49.
25. Самоочистка от оксидов стыкуемых поверхностей при сварке в твердой фазе с нагревом / С. И. Кучук-Яценко, Г. К. Харченко, Ю. В. Фальченко и др. // Автоматическая сварка. – 1998. – № 2. – С. 16–23.
26. Гельман А. С. Основы сварки давлением / А. С. Гельман. – М. : Машиностроение, 1970. – 312 с.
27. Дослідження впливу сублімаційних процесів в стику на якість зварних хром-мідних з'єднань / Г. К. Харченко, О. О. Новомлинець, Д. М. Демиденко, Ю. В. Фальченко // Вісник ЧДТУ. – 2005. – № 22. – С. 91–93.
28. Falchenko Y. Diffusion welding of titanium with copper using surface physical and chemical processes / Falchenko Y., Novomlynets O. // Collection of Scientific Papers: Information, Technologies, Management and Society. – Riga, Latvia, 2015. – № 4 (12). – Pp. 184–191.

References

1. Kochergin, K. A. (1972). *Svarka davleniem [Pressure welding]*. Lviv: Mashinostroenie (in Russian).
2. Benar, Zh. (ed.) (1967). *Okislenie metallov [Metals oxidation]*. Vol. 1. Translated from French. Moscow: Metallurgija (in Russian).

3. Stychinskii, V. B. & Beshelev, S. D. (1964). *Preduprezhdenie obrazovaniia okaliny i metody ochistki detalei [Prevention of scale formation and methods of parts cleaning]*. Moscow: Mashinostroenie (in Russian).
4. Savickii, E. M. & Burhanov, G. S. (1971). *Metallovedenie splavov tugoplavkikh metallov [Metal science of refractory metals alloys]*. Moscow: Nauka (in Russian).
5. Guliaev, B. B., Magnitskii, O. N., Demidov, A. A. (1964). *Lite iz tugoplavkikh metallov [Casting of refractory metals]*. Moscow-Lviv: Mashinostroenie (in Russian).
6. Kvasnitskii, V.F. (1971). O vozgonke poverkhnostnykh plenok pri soedinenii zharoprochnykh splavov v tverdom sostoianii v vakuume [About the sublimation of surface films during the joining of high-temperature alloys in the solid state in a vacuum]. *Tehnologiya sudostroeniia i svarchnogo proizvodstva v sudostroenii – Shipbuilding technology and welding production in shipbuilding*, issue 45 (in Russian).
7. Shmykov, A. A. (1967). Zakonomernosti vzaimodeistviia kontroliruemyykh atmosfer s metallami [The regularities of the interaction of controlled atmospheres with metals]. *Metallovedenie i termicheskii obrabotka metallov – Metal science and heat treatment of metals*, no. 5, pp. 54–65 (in Russian).
8. Shmykov, A.A., Khoroshailov, V.G., Giulikhandanov, E.L. (1991). *Termodinamika i kinetika processov vzaimodeistviia kontroliruemyykh atmosfer s poverhnostiui stali [Thermodynamics and kinetics of processes of interaction of controlled atmospheres with the surface of the steel]*. Moscow: Metallurgiya (in Russian).
9. Rymar, V.I., Lotsmanov, S.N., Radzievskii, V.M., Chernov, V.Ju. (1973). Vzaimodeistvie margantsa, khroma i titana s vozduhom v usloviakh avtovakuumnogo nagreva pri paika [The interaction of manganese, chromium and titanium with air under conditions of autovacuum heating during the brazing process]. *Svarchnoe proizvodstvo – Welding production*, no. 11, pp. 6–8 (in Russian).
10. Slepaha, V. T. (1965). Obrazovanie poverkhnostei, svobodnykh ot oksidnykh plenok pri diffuznoi svarke v vakuume [The formation of surfaces free of oxide films during vacuum diffusion welding]. *Svarchnoe proizvodstvo – Welding production*, no. 5, pp. 30–40 (in Russian).
11. Sokolova, G.V. & Iurev, S.F. (1970). Vzaimodeistvie niobia s gazami pri vysokikh temperaturakh i nizkikh davleniiakh (obzor literatury) [Interaction of niobium with gases at high temperatures and low pressures (literature review)]. *Metallovedenie – Metal science*, no. 14. Lviv: Sudostroenie (in Russian).
12. Kulikov, I.S. (1966). *Termicheskaiia dissotsiatsiia soedinenii [Thermal dissociation of compounds]*. Moscow: Metallurgiya (in Russian).
13. Gribov, N.N., Zvezdin, Iu.I., Melker, A.I., Shurakov, S.S., Jakovlev, V.A. (1964). Isparenie i metalicheskie svoystva metallicheskih materialov v vakuume (obzor literatury) sb. [Evaporation and metal properties of metal materials in vacuum (literature review)]. *Metallovedenie – Metal science*, no. 8. Lviv: Sudostroenie (in Russian).
14. Dushman, S. (1964). *Nauchnye osnovy vakuumnoi tekhniki [Scientific basis of vacuum technology]* (translated from English). Moscow: Mir (in Russian).
15. Anikeev, N. A., Gurevich, Ja. B. et al. (1969). Mass-spektrmetricheskii analiz gazov pri prokate v vakuume [Mass-spectrometric analysis of the gases during the rolling at vacuum]. *Izvestiia Vuzov. Chernaia metallurgiya – News of Universities. Ferrous metallurgy*, no. 7, pp. 61–67 (in Russian).
16. Kollinz, D., Ternball, K. (1963). Termicheskoe obezgazhivanie elektrovakuumnykh materialov [Thermal degassing of electrovacuum materials]. Proceedings from *Tehnika elektronnykh lamp: sbornik materialov V Natsionalnoi konferentsii po tekhnike elektronnykh lamp – The technique of electron tubes: Conference proceedings of the 5 th National conference of electron tubes technique*. Moscow: Izd-vo inostr. lit., pp. 178–183 (in Russian).
17. Gelman, A.C. & Baryshev, M.S. (1971). O vzaimodeistvii stali s gazami v usloviakh avtovakuumnogo nagreva pri svarke [About the interaction of steels with gases in the conditions of autovacuum heating during the welding]. *Svarchnoe proizvodstvo – Welding production*, no. 5, pp. 9–11 (in Russian).
18. Anikeev, N. A., Gurevich, Ia. B. et al. (1970) O kinetike vydeleniia gazov pri prokatke v vakuume [About the kinetics of gases at rolling in vacuum]. *Fizika i khimiia obrabotki materialov – Physics and chemistry of materials processing*, no. 12, pp. 52–61 (in Russian).
19. Skibina, G.V. (1970). Issledovanie gazootdeleniia nerzhaveiushchikh stali v dinamicheskom vysokom vakuume [The investigation of gas liberation of stainless steels in dynamic high vacuum]. *Extended abstract*. Moscow: MVTU (in Russian).

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

20. Norman, S. (1963). *Usovershenstvovaniia v oblasti svarki metallov [The improvements in the field of metals welding]*. Patent № 919031.
21. Semenov, A.P. (1958). *Skhvatyvanie metallov [Metals seizure]*. Moscow: Mashgiz (in Russian).
22. Vadilo, P.S. (1964). *Kristallizatsiia metallov [Metals crystallization]*. Moscow: Metallurgiiia (in Russian).
23. Borisov, A.Ia., Ilina, G.V., Solomko, Iu.V. (1965). Issledovanie ispariaemosti nerzhavieushchikh stalei i nikelovykh zharoprochnykh splavov v vakuume pri vysokikh temperaturakh [The investigation of the evaporability of stainless steels and Nickel heat-resistant alloys in vacuum at high temperatures]. *Metallovedenie – Metal science*, no. 9, pp. 124–131 (in Russian).
24. Duvall, D. S., Owszarski, W. A., Paulonis, D. F., King, W. H. (1972). Methods for diffusion welding the superalloy Udimet 700. *Welding Journal*, issue 51, no. 2, pp. 41–49.
25. Kuchuk-Jacenko, S.I., Harchenko, G.K., Falchenko, Ju.V. et al. (1998). Samoochistka ot oksidov stykuemykh poverhnostej pri svarke v tverdoj faze s nagrevom [Self-cleaning of oxides from the joining surfaces during the solid phase welding with heating]. *Avtomaticheskaia svarka – Automatic welding*, no. 2, pp. 16–23 (in Russian).
26. Gelman, A. S. (1970). *Osnovy svarki davleniem [The basics of pressure welding]*. Moscow: Mashinostroenie (in Russian).
27. Kharchenko, H.K., Novomlynets, O.O., Demydenko, D.M., Falchenko, Iu.V. (2005). Doslidzhennia vplyvu sublimatsiinykh protsesiv v styku na yakist zvarnykh khrom-midnykh ziednan [The investigation of the influence of sublimation processes in the joint on the quality of chromium-copper welded joints]. *Visnyk ChDTU – Herald of ChDTU*, no. 22, pp. 91–93 (in Ukrainian).
28. Falchenko, Y. & Novomlynets, O. (2015). Diffusion welding of titanium with copper using surface physical and chemical processes. *Collection of Scientific Papers: Information, Technologies, Management and Society*. Riga, Latvia, no. 4 (12), pp. 184–191.

UDC 621.791.4

Iurii Falchenko, Oleg Novomlynets, Lidiia Petrushynets, Iryna Nahorna

BASIC USAGE OF SURFACE PHYSICAL-CHEMICAL PROCESSES FOR PRECISION PRESSURE WELDING

Urgency of the research. The usage of surface physical-chemical processes is the perspective activation method for precision joining of metal materials.

Target setting. The modern theory of solid-phase joining concerning to the usage of surface processes cannot fully determine the direct criteria of welding technology with a minimum level of plastic deformation.

Actual scientific researches and issues analysis. During the solid-phase welding of various metals and alloys, the usage of preheating of the welded parts in separated state may speed up the recovery process of oxide films and sublimation of one of the materials with subsequent condensation onto the surface of another.

Uninvestigated parts of general matters defining. The usage of sublimated layers during the welding of dissimilar materials allows obtaining strength by 15–20 % higher than the strength of joints that welded directly. However, the works have not investigated the possibility of using such layers for precision pressure welding.

The research objective. The investigation of the influence of surface physical-chemical processes (self-cleaning of the oxide films, sublimation and condensation) on the ability to precision pressure welding of dissimilar metals in vacuum.

The statement of basic materials. The ability of precision pressure welding of copper with molybdenum and chrome through the sublimated copper layer was investigated. The precision weldability of copper and titanium through the sublimated titanium layer was also researched.

Conclusions. It was established that the deformation of the basic materials during the welding does not exceed 1 %, and the strength of welded joints of copper with molybdenum and chromium amounts to 85-90 % of the strength of the basic material (copper). The strength of the copper - titanium welded joints amounts to 73-77 % of the strength of copper.

A new method of vacuum diffusion welding through the thin sublimated active layers was proposed. A new technological process of vacuum diffusion welding of copper with refractory metals and titanium was developed. Such technological process demands of specialized equipment that allows carrying out of diffusion welding through the sublimated layers in one cycle in the same working chamber.

The model of formation of permanent joints during solid-phase pressure welding using surface physical-chemical processes was proposed.

Key words: vacuum diffusion welding; surface physical-chemical processes; sublimated layers; precision welded joints.

Tabl.: 3. Fig.: 3. Bibl.: 28.

УДК 621.791.4

*Юрій Фальченко, Олег Новомлинець, Лідія Петрушинець, Ірина Нагорная***ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОЙ СВАРКИ ДАВЛЕНИЕМ**

В работе исследована возможность получения прецизионных неразъемных соединений разных однородных и разнородных металлических материалов с использованием поверхностных физико-химических процессов. На основании анализа литературных данных относительно возможных поверхностных физико-химических процессов при сварке в твердой фазе предложено новый технологический процесс сварки давлением, который предусматривает предварительный нагрев заготовок в разбавленном состоянии для создания сублимированных прослоек. Определены оптимальные режимы для прецизионной диффузионной сварки в вакууме меди с тугоплавкими материалами и титаном.

Ключевые слова: диффузионная сварка в вакууме; поверхностные физико-химические процессы; сублимированные прослойки; прецизионные неразъемные соединения.

Табл.: 3. Рис.: 3. Библ.: 28.

Фальченко Юрій В'ячеславович – доктор технічних наук, Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України (вул. Малевича, 11, м. Київ, 03680, Україна).

Фальченко Юрий Вячеславович – доктор технических наук, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины (ул. Малевича, 11, г. Киев, 03680, Украина).

Falchenko Iurii – Doctor of Technical Sciences, Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine (11 Malevich Str., 03680 Kyiv, Ukraine).

E-mail: falchenko@paton.kiev.ua

Scopus Author ID: 7801687476

Новомлинець Олег Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, перший проректор, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Новомлинець Олег Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сварочного производства и автоматизированного проектирования строительных конструкций, Черниговский национальный технологический университет, первый проректор. (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Novomlincets Oleg – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Welding and Automated Engineering Design of Building Constructions, First Vice-Rector, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: oon1@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0774-434X>

Scopus Author ID: 6507741249

Петрушинець Лідія Вячеславівна – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України (вул. Малевича, 11, м. Київ, 03680, Україна).

Петрушинець Лидия Вячеславовна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины (ул. Малевича, 11, г. Киев, 03680, Украина).

Petrushynets Lidiia – PhD in Technical Sciences, Senior staff scientist, Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine (11 Malevich Str., 03680 Kyiv, Ukraine).

E-mail: moremia2@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7946-3056>

Нагорна Ірина В'ячеславівна – асистент кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Нагорная Ирина Вячеславовна – асистент кафедры сварочного производства и автоматизированного проектирования строительных конструкций, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Nahorna Iryna – Assistant Lecturer of Department of Welding and Automated Engineering Design of Building Constructions, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: zavalnaya89@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5075-8712>

Scopus Author ID: 56939026500 (Zavalna, I. V.), 57192820279 (Nahorna, Iryna V)

Олег Новомлинець, Сергій Олексієнко,
Світлана Ющенко, Євген Половецький

ПРЕЦИЗІЙНЕ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

Актуальність теми дослідження. Алюмінієві сплави широко застосовуються у конструкціях різних галузей індустрії, при виготовленні яких, крім забезпечення високої міцності нероз'ємних з'єднань у характерних вузлах, існує необхідність збереження їх проектної форми.

Постановка проблеми. Вирішення завдання прецизійного з'єднання алюмінієвих сплавів зварюванням тиском ускладнюється внаслідок їх високих термопластичних властивостей, тепло- та електропровідності, що потребує пошуку ефективних способів одержання виробів з низьким рівнем деформації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із перспективних способів прецизійного з'єднання алюмінієвих сплавів є електроконтактне зварювання через проміжні прошарки з алюмінієвої фольги, використання яких сприяє локалізації теплової енергії в контактній деталі, що зварюються, та зменшенню рівня деформації виробу.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Недослідженим залишається процес тепловиділення у контактній деталі, що зварюються, при електроконтактному стиковому зварюванні алюмінієвих сплавів через прошарки.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка прецизійного електроконтактного стикового зварювання алюмінієвих сплавів.

Виклад основного матеріалу. Дослідження процесу тепловиділення здійснювали розрахунковим шляхом з використанням скінченно-елементного моделювання. З'єднання прутків з алюмінієвого сплаву АД31 проводили за схемою електроконтактного стикового зварювання опором через проміжні прошарки з алюмінієвої фольги марки АД0 товщиною 11 мкм на режимі: густина струму 300А/мм², питомих тиск 8 МПа, час зварювання 0,5...0,7 с.

Висновки. Показано, що кількість теплоти, яка виділяється у стикі при електроконтактному стиковому зварюванні, залежить від кількості шарів у проміжному прошарку. Встановлено, що при зварюванні алюмінієвого сплаву АД31 на запропонованому режимі через 6 шарів фольги алюмінію АД0 товщиною 11 мкм міцність зварних з'єднань досягає 95 % міцності основного металу при деформації до 2 %.

Ключові слова: прецизійне зварювання тиском; алюміній; електроконтактне зварювання; проміжний прошарок; локалізація тепловиділення; зварне з'єднання; міцність.

Табл.: 2. Рис.: 6. Бібл.: 12.

Постановка проблеми. Деформація виробів має вирішальне значення при зварюванні тиском. Вирішення завдання прецизійного з'єднання алюмінію та його сплавів зварюванням тиском ускладнюється через притаманні їм високі термопластичні властивості, тепло- та електропровідність. Тому пошук нових ефективних засобів для прецизійного зварювання тиском алюмінієвих сплавів є актуальним завданням для виготовлення виробів з низьким рівнем деформації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [1] розглянуто фізичні основи прецизійного зварювання тиском. Вказується, що зварне з'єднання з залишковою пластичною деформацією, що не перевищує 2 % від товщини (діаметра) деталі, можна назвати прецизійним, якщо виконується умова геометричної точності:

$$-1 \leq T \leq +1, \quad (1)$$

де T – безрозмірний критерій геометричної точності з'єднання, який визначається співвідношенням:

$$T = (\Delta_0 - \varepsilon_e \pm j) j, \quad (2)$$

де Δ_0 – відносна залишкова деформація (осадка або вдавненість) зварного з'єднання; ε_e – врахована у припуску заготовки відносна вимушена деформація, за якої завершується процес утворення зварного з'єднання; j – відносний допуск на номінальний розмір зварного з'єднання для цього класу точності його виготовлення.

Для того щоб виконувалася умова прецизійності (1), необхідна умова:

$$(\Delta_0 - \varepsilon_e) \rightarrow 0. \quad (3)$$

Відносну вимушену деформацію можна виразити у безрозмірній формі:

$$\varepsilon_e = \varepsilon_k K_y J_n C^{-1}, \quad (4)$$

де ε_k – показник повного зближення приконтактних шорстких поверхонь, за якого щільність у контакті наближається до одиниці; практично для реальних поверхонь $\varepsilon_k = 0,3 \dots 0,6$; K_y і C – відповідно показники зміцнення і напруження у шорсткому шарі контакту; для реальних умов $K_y = 1 \dots 10$; $C = 4,6 \dots 9,2$; L_n – показник локальності нагріву, $L_n = 1 \dots 0,1$.

Формула (4) дозволяє оцінювати вимушену деформацію з урахуванням крайових граничних умов при різних способах зварювання тиском [1].

Наприклад, при зварюванні тиском з загальним рівномірним нагріванням всієї деталі ($L_n = 1$) і стисненні деталей без деформаційного зміцнення шорсткого шару в контакті ($K_y \leq 1$), а також за умови $\varepsilon_k = 0,5$ (механічна обробка поверхонь) і $C = 5$ (повільне стиснення деталей):

$$\varepsilon_g = 0,5 \cdot 10 \cdot 1 / 5 = 0,1 (10 \%)$$

Якщо стиснення деталей проводять при кімнатній температурі ($L_n = 1$) з максимальним зміцненням шорсткого шару в контакті, тобто при $C = 10$; $K_y = 10$, то ε_g досягає свого максимального значення (холодне зварювання):

$$\varepsilon_g = 0,5 \cdot 10 \cdot 1 / 10 = 0,5 (50 \%)$$

Формула (3) показує, що локалізувати осадку деталей зварюванням тиском можна чотирма основними прийомами [1]:

- зменшенням деформаційного зміцнення шорсткого шару в контакті ($K_y \rightarrow 1$) шляхом уповільненого стиснення деталей при високих температурах нагріву (контактне зварювання за способом А. М. Ігнат'єва, дифузійне зварювання у вакуумі, газопресове зварювання; у цих випадках $\varepsilon_g < 8 \%$);

- різким збільшенням напруженого стану в шорсткому шарі контакту ($C \gg 10$) шляхом створення чисто контактного напруження (зварювання вибухом, зварювання імпульсом магнітної енергії; у цьому випадку $\varepsilon_g \rightarrow 1 \%$);

- створенням чистого контактного локального нагріву деталей;

- контактуванням деталей з критичною швидкістю деформування, за якої завдяки дії механізму порогової та непорогової (дифузійної) повзучості знеміцнення в шорсткому шарі матеріалу контакту переважає над його деформаційним зміцненням.

Таким чином, виходячи з цієї методики, нам видається можливим досягти ефекту прецизійності при зварюванні тиском шляхом зменшення об'єму розплавленого металу, зниження зусилля стиску та зростання температури у зоні контакту шляхом короткоімпульсного дозованого вкладення енергії.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Недослідженим залишається процес тепловиділення у контакті деталей, що зварюються, та його вплив на міцність і рівень деформації при електроконтактному стиковому зварюванні алюмінію та його сплавів через прошарки.

Мета статті. Метою цієї роботи є розробка прецизійного електроконтактного стикового зварювання алюмінієвих сплавів.

Виклад основного матеріалу. Необхідною умовою, що забезпечує утворення прецизійного з'єднання при електроконтактному зварюванні, є зосередження тепловиділення у приконтактній зоні з'єднання та збільшення опору в контакті деталь–деталь. Саме контактний опір між деталями є ключовим фактором у нагріві деталей при електроконтактному зварюванні, оскільки залежить від стану поверхні та зварювального тиску й у 2–3 рази перевищує опір самих деталей [2].

Ефективним засобом інтенсифікації процесу тепловиділення у контакті деталей і, відповідно, зменшення деформації виробів, при електроконтактному зварюванні алюмінію та його сплавів є використання тонких проміжних прошарків з матеріалу, що має високий електричний опір та близький до основного металу хімічний склад [3; 4].

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Розміщення такого прошарку з декількох шарів фольги дозволяє зосередити тепло-виділення у зоні з'єднання внаслідок утворення між прошарком та деталями більшої кількості контактних опорів, на яких локалізується виділення теплової енергії значної величини при проходженні електричного струму. Це дозволяє збільшити контактний опір, температуру в контакті деталь–деталь, зменшити час нагріву та рівень залишкових деформацій за рахунок зниження об'єму розплавленого металу та утворення зв'язків між матеріалом проміжного шару й основним металом.

Електроконтактне зварювання ґрунтується на використанні джоулевого тепла. Загальна кількість теплоти, що виділяється електричним струмом у провіднику, визначається за законом Джоуля-Ленца, Дж [2; 5]:

$$Q = I^2 R t, \quad (5)$$

де R – омичний опір провідника; I – струм; t – час.

Загальний опір зварювального ланцюга при електроконтактному зварюванні складається із опору R_d ділянок основного металу, що нагріваються, опору контакту між деталями R_k та опору контакту між електродом і деталлю $R_{ед}$, Ом [2; 5]:

$$R = 2R_d + R_k + 2R_{ед}. \quad (6)$$

При стиковому зварюванні контактний опір між електродом та деталями відносно низький і практично не впливає на нагрів зони з'єднання [5].

Власний опір деталей визначається за формулою, Ом [2; 5]:

$$2R_d = \frac{2\rho_0 l_0}{S}, \quad (7)$$

де ρ_0 – питомий електричний опір металу; $2l_0$ – установочна довжина деталей; S – площа поперечного перерізу деталей.

Теоретично встановлена та експериментально підтверджена залежність між тиском, прикладеним до контакту, та його електричним опором [6]:

$$R_k = \frac{r_k}{P^\alpha}, \quad (8)$$

де P – зусилля, що діє в контакті, кг; r_k – одиничний контактний опір при зусиллі $P = 1$ кг; α – експериментальний коефіцієнт, змінюється у межах 0,5...1,0.

Одиничний опір r_k залежить від марки металу і стану його поверхні, та, як правило, зменшується для м'яких металів та матеріалів з високою теплопровідністю. Для алюмінієвих сплавів r_k змінюється в межах 0,001...0,002 Ом, а коефіцієнт α від 0,75 до 0,85 [6].

Кількість теплоти, що виділяється в контакті між деталями за секунду під час стикового зварювання, визначається за формулою [7]:

$$q = m_1 \cdot I^2 R_k, \quad (9)$$

де m_1 – коефіцієнт, що враховує зміну контактного опору у процесі нагріву контакту, $m_1 \approx 0,4$.

Для дослідження процесу тепловиділення у зоні контакту при електроконтактному стиковому зварюванні (ЕКСЗ) опором алюмінієвого сплаву марки АД31 через проміжний прошарок з алюмінієвої фольги АД0 було проведено розрахунок кількості теплової енергії, що виділяється на контактному опорі та в об'ємі деталей. Вхідні дані для розрахунку наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Вхідні дані для розрахунку теплової енергії, що виділяється у стику при ЕКСЗ

Діаметр деталі d , мм	Довжина вильоту l_0 , мм	Питомий тиск p , МПа	Питомий електричний опір ρ_0 , Ом·м	Струм I , А
12	15	8	$3,44 \cdot 10^{-8}$	8000

Для зручності розрахунку було використано припущення, що об'єм металу, в якому здійснюється виділення тепла на контактному опорі, – це об'єм металу в шорсткій поверхні. Відомо, що у шорстких поверхонь при токарній підготовці на деталей величина $R_a \approx 2,5$ мкм [8], а висота нерівностей контактуючих поверхонь становить $2R_a$ [9]. При цьому повнота заповнення контактуючих поверхонь металом C_x становить $(0,2 \dots 0,4)$ від вихідної концентрації C_0 (рис. 1, а) [9]. Після змінання шорсткої поверхні розрахункову схему можна представити у вигляді, зображеному на рис. 1, б, де $V_{ш}$ – об'єм металу шорсткої зони, деформованого до повного змінання мікрорівностей.

Прийmemo, що частка об'єму металу в шорсткій поверхні становить $(0,4) C_0$. Тоді величина деформації після змінання шорсткої поверхні дорівнює:

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_2}{l_1} = \frac{2R_a - 0,4 \cdot 2R_a}{2R_a} = 0,6.$$

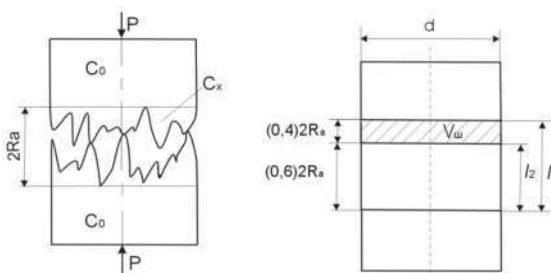


Рис. 1. Схема контактування до (а) та після (б) змінання шорстких поверхонь

Як вказано у роботі [10], для розрахунку кількості теплоти на ранній стадії нагріву приконтантне джерело вважають миттєвим і прикладеним у момент початку нагріву $t = 0$. При цьому теплота за критичної швидкості деформування $v = 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ [1] у контакті деталей протягом його змінання виділяється за час:

$$t = \frac{v}{\varepsilon} = \frac{10^{-2}}{0,6} = 0,017, \text{ с}.$$

Контактний опір для алюмінієвих механічно очищених токарною обробкою поверхонь, розрахований за виразом (8) при зусиллі стиску 90 кг, $r_k = 0,0015$ Ом та $\alpha = 0,8$, становить:

$$R_k = \frac{r_k}{P^\alpha} = \frac{0,0015}{90^{0,8}} = 40 \cdot 10^{-6}, \text{ Ом}.$$

Тоді, враховуючи, що контактних опорів при розміщенні між деталями двох шарів фольги виникає три, за виразом (9) одержимо:

$$q = m_1 I^2 3R_k = 0,4 \cdot 8000^2 \cdot 3 \cdot 40 \cdot 10^{-6} = 3,07 \cdot 10^3, \text{ Вт}.$$

При стиковому ЕКЗ опором теплота, що виділяється у контакті між торцями деталей по мірі нагрівання з'єднання, швидко зменшується [2], тому після досягнення часу $t > 0,017$ с теплота виділяється тільки в об'ємі деталей на їх власному електричному опорі $2R_d$.

Враховуючи, що площа поперечного перерізу деталі дорівнює $(\pi \cdot d^2)/4 = (\pi \cdot 0,012^2)/4 = 113 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$, власний опір деталей, визначений за формулою (7):

$$2R_d = 2 \frac{\rho_0 l_0}{S} = 2 \cdot \frac{3,44 \cdot 10^{-8} \cdot 0,015}{113 \cdot 10^{-6}} = 9,125 \cdot 10^{-6}, \text{ Ом}.$$

Кількість теплоти, що виділяється в об'ємі деталей у початковий момент виділення в них тепла при проходженні електричного струму, можна визначити за формулою:

$$Q = I^2 2R_d = 8000^2 \cdot 2 \cdot 9,125 \cdot 10^{-6} = 1168 \text{ Вт}.$$

Аналогічний розрахунок було проведено для випадку стикового ЕКЗ через чотири та шість шарів алюмінієвої фольги. Результати розрахунків наведені у табл. 2.

Таблиця 2

Кількість теплової енергії при ЕКСЗ опором алюмінієвого сплаву АД31 через прошарок

Величина	2 шари	4 шари	6 шарів
$q, \times 10^3 \text{ Вт}$	3,07	5,12	7,17
$Q, \text{ Вт}$	1168		

Отримані результати було використано для скінченно-елементного моделювання процесу нагріву при електроконтактному стиковому зварюванні опором алюмінієвого сплаву АД31 через два, чотири та шість шарів алюмінієвої фольги у проміжному прошарку.

Розрахункова схема стержня для моделювання тепловиділення у процесі нагріву під час зварювання двох циліндричних стержнів зі сплаву АД31 діаметром 12 мм через проміжний прошарок, що складається з двох шарів алюмінієвої фольги марки АД0 товщиною 11 мкм, зображена на рис. 2. Розрахункові схеми для моделювання процесу нагріву при зварюванні через чотири та шість прошарків аналогічні. Результати скінченно-елементного моделювання представлено на рис. 3.

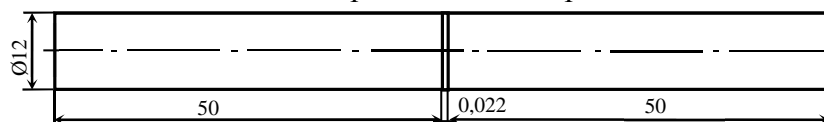


Рис. 2. Розрахункова схема стержня

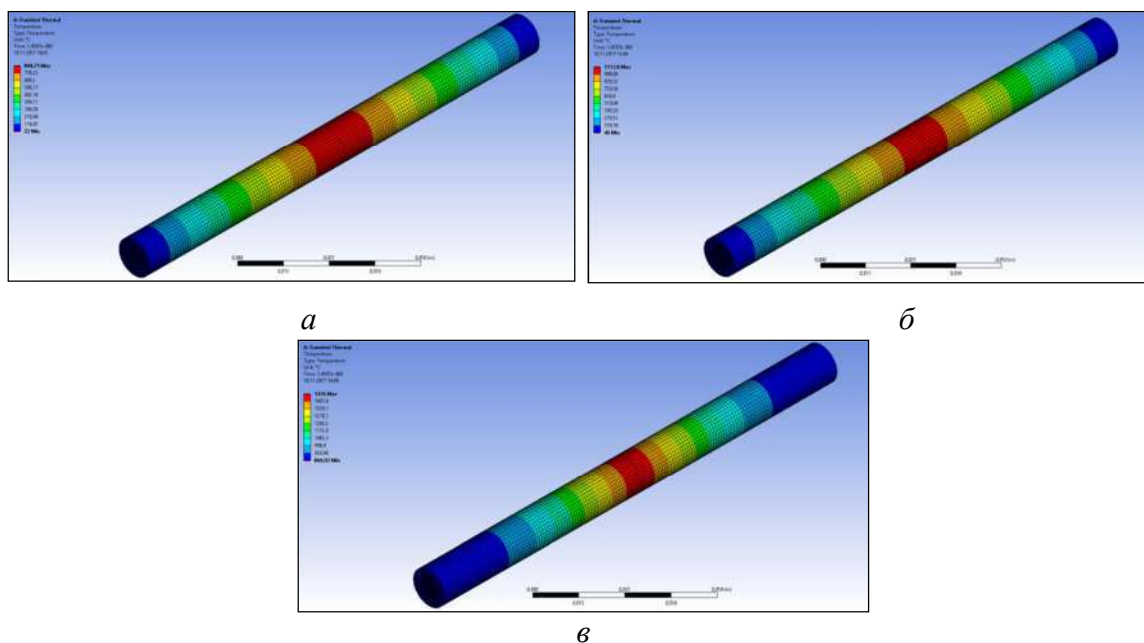


Рис. 3. Розподілення температури вздовж стержня при ЕКСЗ опором алюмінієвого сплаву АД31 залежно від кількості шарів фольги:
а – 2 прошарки; б – 4 прошарки; в – 6 прошарків

Як показали результати моделювання, зі збільшенням кількості шарів фольги у початковий момент нагріву відбувається більше тепловиділення деталей у більш вузькій приконтактній зоні порівняно з використанням меншої кількості шарів (рис. 4).

Зростання температури в контакті пов'язується зі збільшенням кількості контактних опорів, що виникають між шарами фольги. Зменшення зони температурного впливу можна пояснити тим, що з підвищенням температури теплопровідність алюмінію зменшується.

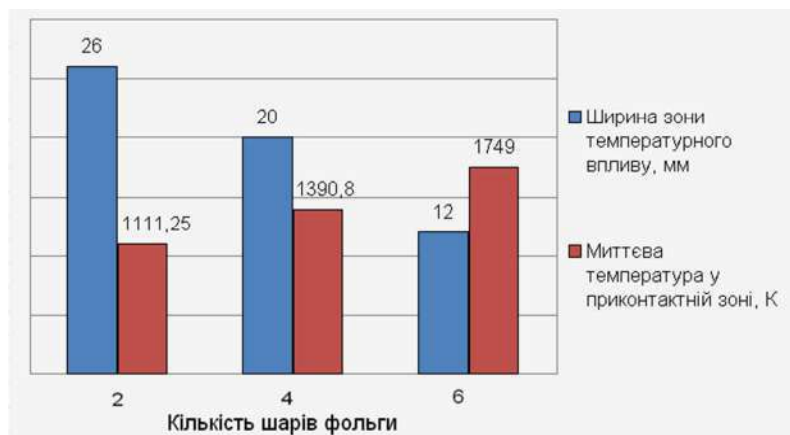


Рис. 4. Результати моделювання процесу нагріву при ЕКЗ3 через прошарок

Для експериментального дослідження використовували прутки діаметром 6 мм з алюмінієвого сплаву марки АД31. Електроконтактне стикове зварювання опором проводили на машині МС-802У на режимі, який є максимально жорстким для цього типу машин: $j = 300 \text{ А/мм}^2$; $P_{зв} = 8 \text{ МПа}$; $t_{зв} = 0,5...0,7 \text{ с}$. Було досліджено вплив кількості тонких прошарків з алюмінію АД0 завтовшки 11 мкм на міцність зварних з'єднань на розтяг (рис. 5). Необхідно зазначити, що при зварюванні заготовок на вказаних режимах напряду нероз'ємне з'єднання не утворюється взагалі.

Встановлено, що при зварюванні прутків з алюмінію АД31 через 6 шарів алюмінієвої фольги міцність зварних з'єднань досягає 250 МПа, що становить 95 % міцності основного матеріалу. При цьому рівень деформації основного матеріалу не перевищує 2 %.

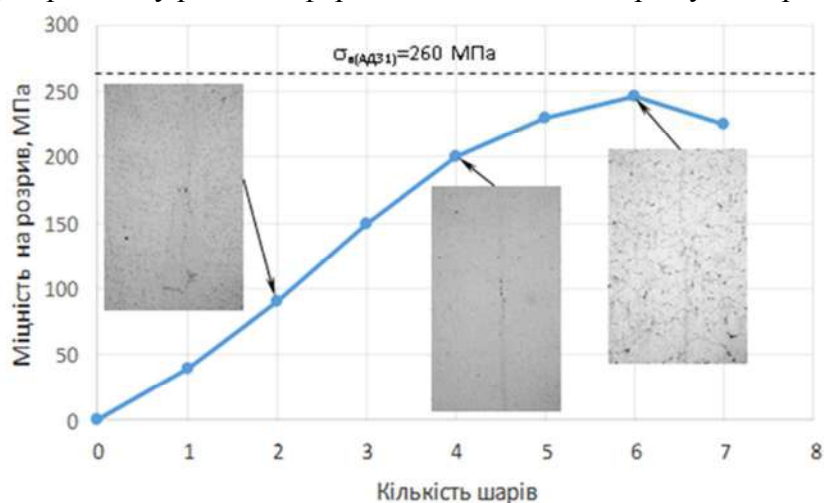


Рис. 5. Вплив кількості шарів фольги з алюмінію на міцність зварних з'єднань АД31+АД31, отриманих електроконтактним стиковим зварюванням опором на режимі: $j = 300 \text{ А/мм}^2$; $P_{зв} = 8 \text{ МПа}$; $t_{зв} = 0,5...0,7 \text{ с}$

Той факт, що оптимальна кількість шарів у тонких прошарках з алюмінію для стикового ЕКЗ опором сплаву АД31 становила 6 шарів, а в роботах [4; 11] при точковому ЕКЗ алюмінію АМц оптимальна кількість проміжних шарів з алюмінієвої фольги – 4, дозволяє стверджувати, що вибір кількості шарів (тобто вибір величини контактного опору) залежить для кожного конкретного випадку від співвідношення контактний опору деталь–деталь та щільності зварювального струму для утворення максимального рівня теплової енергії в стикі.

Проведено дослідження мікроструктури та вимірювання мікротвердості зварних з'єднань, отриманих на оптимальних режимах через 6 шарів проміжних тонких прошарків (рис. 6).

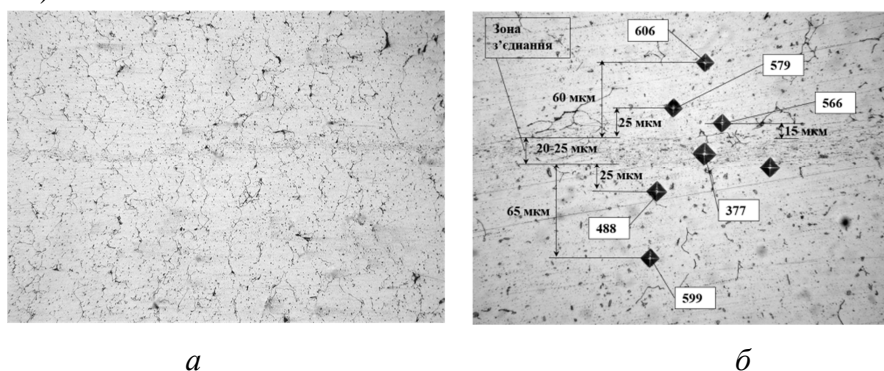


Рис. 6. Мікроструктура (а, $\times 250$) та мікротвердість (б, $\times 500$) зони з'єднання АД31+АД31, отриманого електроконтактним стиковим зварюванням опором на режимі: $j = 300 \text{ А/мм}^2$; $P_{зв} = 8 \text{ МПа}$; $t_{зв} = 0,5...0,7 \text{ с}$, через 6 шарів фольги з алюмінію товщиною 11 мкм (оптична мікроскопія)

З фотознімки на рис. 6, б видно, що ширина зона взаємного розплавлення становить величину близько 20...25 мкм, що свідчить про високий ступінь локалізації теплової енергії в стику. При цьому мікротвердість зони контакту на 25...30 % менше мікротвердості основного металу, що, як відомо, позитивно позначається на працездатності зварних з'єднань.

Таким чином, проведені дослідження підтверджують ефективність використання для прецизійного електроконтактного зварювання тонких проміжних прошарків з матеріалу з високим електричним опором, близького за хімічним складом до основного.

На основі проведених досліджень нами був запропонований спосіб електроконтактного стикового зварювання опором алюмінію та його сплавів через прошарок [12].

Висновки і пропозиції. Встановлено, що ефективним засобом локалізації теплової енергії в стику при електроконтактному стиковому зварюванні є використання тонких проміжних прошарків з алюмінієвої фольги. Показано, що регулювати кількість теплоти, яка виділяється у стику при електроконтактному зварюванні, можна за рахунок зміни кількості шарів у прошарку.

Запропоновано спосіб електроконтактного стикового зварювання опором алюмінію та його сплавів через прошарок. Показано, що при стиковому зварюванні опором прутків із алюмінієвого сплаву АД31 на режимі $j = 300 \text{ А/мм}^2$; $P_{зв} = 8 \text{ МПа}$; $t_{зв} = 0,5...0,7 \text{ с}$ через 6 шарів з фольги алюмінію АД0 завтовшки 11 мкм, міцність зварних з'єднань досягає 95 % міцності основного матеріалу при деформації не більше 2 %.

Список використаних джерел

1. Банов М. Д. Специальные способы сварки и резки : учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования / М. Д. Банов, В. В. Масаков, Н. П. Плюснина. – М. : Академия, 2009. – 207 с.
2. Гуляев А. И. Технология и оборудование контактной сварки / А. И. Гуляев. – М. : Машиностроение, 1985. – 254 с.
3. Пат. 89671 UA, МПК51 В23К 11/10. Спосіб електроконтактного точкового зварювання металевих деталей через прошарок / Г. К. Харченко, О. О. Новомлинець, Ю. В. Фальченко, Л. В. Петрушинець; заявник і власник Чернігівський національний технологічний університет. – № u201314308; заявл. 09.12.2013; опубл. 25.04.2014, Бюл. № 8.
4. Прецизійне електроконтактне точкове зварювання металевих матеріалів / О. О. Новомлинець, С. В. Олексієнко, І. В. Завальна, Є. В. Половецький // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – 2014. – № 2. – С. 104–111.

5. *Технология и оборудование контактной сварки: Учебник для машиностроительных вузов* / Б. Д. Орлов, А. А. Чакалев, Ю. В. Дмитриев и др. – М. : Машиностроение, 1986. – 352 с.
6. *Кочергин К. А. Контактная сварка* / К. А. Кочергин. – Л. : Машиностроение, 1987. – 240 с.
7. *Кочергин К. А. Сварка давлением* / К. А. Кочергин. – М. : Машиностроение. 1972. – 215 с.
8. *Мартыненко О. В. Точность в машиностроении : учеб. пособие* / О. В. Мартыненко. – Волгоград : РПК “Политехник”, 2005. – 62 с.
9. *Ковшиков Е. К. Новое в технологии диффузионного соединения материалов : учеб. пособие* / Е. К. Ковшиков, Г. А. Маслов. – М. : Машиностроение, 1990. – 64 с.
10. *Гельман А. С. Технология контактной электросварки* / А. С. Гельман. – М. : Машгиз, 1952. – 368 с.
11. *Дослідження процесів масоперенесення при прецизійному електроконтактному зварюванні алюмінію* / В. Мазанко, О. Новомлинець, С. Олексієнко, С. Ющенко // *Технічні науки та технології: науковий журнал*. – 2017. – № 2 (8). – С. 75–81.
12. *Пат. 117001 UA, МПК51 В23К 20/16. Спосіб електроконтактного стикового зварювання опором алюмінію та його сплавів через прошарок* / Г. К. Харченко, О. О. Новомлинець, С. В. Олексієнко, С. М. Ющенко, Є. В. Половецький, І. О. Прибитько, І. В. Нагорна; заявник і власник Чернігівський національний технологічний університет. – № u201613635; заявл. 30.12.2016; опубл. 12.06.2017, Бюл. № 11.

References

1. Banov, M.D., Masakov, V.V. & Plusnina, N.P. (2009). *Spetsialnye sposoby svarki i rezki [Special methods of welding and cutting]*. Moscow: Academia (in Russian).
2. Guliaiev, A.I. (1985). *Tekhnologiya i oborudovanie kontaktnoi svarki [Technology and equipment of resistance welding]*. Moscow: Mashinostroenie (in Russian).
3. Kharchenko, G.K., Novomlynets, O.O., Falchenko, Yu.V., & Petrushinets, L.V. (2014). *Sposib elektrokontaknoho tochkovoho zvariuvannia metalevykh detalej cherez prosharok [The method of resistance spot welding of metal parts through interlayer]*. UA Patent No. 89671.
4. Novomlynets, O.O., Oleksiienko, S.V., Zavalna, I.V. & Polovetskyi, Ye.V. (2014). *Pretsyziine elektrokontaktne tochkove zvariuvannia metalevykh materialiv [High-precision electrocontact spot welding of metallic materials]*. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnoho tehnolohichnoho universytetu – Visnyk of Chernihiv State Technological University*, no. 2, pp. 104–111 (in Ukrainian).
5. Orlov, B.D., Chakalev, A.A. & Dmitriev, Yu.V. (1986). *Tekhnologiya i oborudovanie kontaktnoi svarki [Technology and equipment of resistance welding]*. Moscow: Mashinostroenie (in Russian).
6. Kochergin, K.A. (1987). *Kontaknaia svarka [Resistance welding]*. Leningrad: Mashinostroenie (in Russian).
7. Kochergin, K.A. (1972). *Svarka davleniem [Pressure welding]*. Moscow: Mashinostroenie (in Russian).
8. Martynenko, O.V. (2005). *Tochnost v mashinostroenii [Precision in mechanical engineering]*. Volgograd: RPK “Politekhnik” (in Russian).
9. Kovshikov, E. K. & Maslov, G. A. (1990). *Novoe v tekhnologii diffuzionnogo soedineniia materialov [New in technologies of diffusion bonding of materials]*. Moscow: Mashinostroenie (in Russian).
10. Gelman, A.S. (1952). *Tekhnologiya kontaktnoi elektrosvarki [Technology of electric resistance welding]*. Moscow: Mashgiz (in Russian).
11. Mazanko, V., Novomlynets, O., Oleksiinko, S. & Yushchenko, S. (2017). *Doslidzhennia protsesiv masoperenesennia pry elektrokontaktному zvariuvanni aliuminiuu [Investigation of mass transfer processes during high-precision electric resistance welding of aluminium]*. *Tekhnichni nauky ta tehnolohii. – Technical sciences and technology*, no. 2 (8), pp. 75–81 (in Ukrainian).
12. Kharchenko, G.K., Novomlynets, O.O., Oleksiienko, S.V., Yushchenko, S.M., Polovetskyi, Ye.V., Prybytko, I.O., Nahorna, I.V. (2016). *Sposib elektrokontaknoho stykovoho zvariuvannia oporom aliuminiuu ta yoho splaviv [The method of resistance butt welding of aluminium and its alloys through interlayer]*. UA Patent No. 13635.

*Oleg Novomlynets, Serhii Oleksiienko,
Svitlana Yushchenko, Evgen Polovetskiy*

PRECISION PRESSURE WELDING OF ALUMINIUM ALLOYS

Urgency of the research. Aluminum alloys are widespread materials in constructions of different branches of industry. Apart from ensuring the strength of permanent joints in typical units of constructions, their production requires to retain their designed form.

Target setting. Precision joining of aluminum alloys by pressure welding is complicated owing to their high thermoplastic properties, heat- and electro conductivity. It requires the search of effective methods for obtaining products with low deformation level.

Actual scientific researches and issues analysis. One of perspective joining methods of aluminium alloys is precision electric resistance welding through intermediate layers of aluminium foil. Their application promotes to localization of heat energy in the contact of welded components and decrease of product deformation level.

Uninvestigated parts of general matters defining. Heat release process in the contact of welded components during electric resistance butt-welding of aluminum alloys through interlayers remains unstudied.

The research objective. Aim of this paper is the development of precision electric resistance welding of aluminium alloys.

The statement of basic materials. The investigation of heat release process has been carried out by estimated way with using of finite-element modeling. The joining of aluminum alloy 6063 has been realized by electric resistance butt-welding through intermediate layers of aluminum 1050 foil by thickness 11 μm . Welding conditions: the current density 300 A/mm², the specific pressure 8 MPa, the welding time 0.5-0.7 sec.

Conclusions. It is shown, that quantity of heat generated in the contact zone during electric resistance butt-welding depends on number of layers in the interlayer. It has been determined that welding of aluminum alloy 6063 under offered conditions through 6 layers of aluminum foil allows to obtain welded joints with strength by 95 % from base metal strength and deformation level up to 2 %.

Key words: precision pressure welding; aluminium; resistance welding; intermediate layer; localization of heat release; welded joint; strength.

Tabl.: 2. Fig.: 8. Bibl.: 12.

УДК 621.791.4

*Олег Новомлинец, Сергей Олексиевко,
Светлана Ющенко, Евгений Половецкий*

ПРЕЦИЗИОННАЯ СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

На сегодняшний день конструкции из алюминиевых сплавов имеют широкое распространение в приоритетных высокотехнологических отраслях индустрии, в частности авиационной, ракетно-космической, автомобиле- и судостроительной, производстве приборов военного назначения. При этом, кроме обеспечения высокой прочности неразъемных соединений в узлах конструкций, существует необходимость сохранения их проектной формы. В связи с этим актуальным заданием является поиск новых и совершенствование существующих способов прецизионного соединения алюминия и его сплавов.

Проведено исследование прецизионной электроконтактной стыковой сварки на примере алюминиевого сплава АД31 с использованием промежуточных слоев из алюминиевой фольги марки АДЮ. Установлен оптимальный режим сварки, исследована микроструктура полученных сварных соединений.

Ключевые слова: прецизионная сварка давлением; алюминий; электроконтактная сварка; промежуточная прослойка; локализация тепловыделения; сварное соединение; прочность.

Табл.: 2. Рис.: 8. Библ.: 12.

Новомлинец Олег Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сварочного производства та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Новомлинец Олег Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сварочного производства и автоматизированного проектирования строительных конструкций, первый проректор, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Novomlynets Oleg – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Welding and Automated Engineering Design of Building Constructions, First Vice-Rector, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko Str., 14027, Chernihiv, Ukraine).

E-mail: oon1@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0774-434X>

Researcher ID: F-8166-2014

Scopus Author ID: 56938958300; 6507741249

Олексієвко Сергій Владиславович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сварочного производства та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Олексієвко Сергей Владиславович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сварочного производства и автоматизированного проектирования строительных конструкций, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Oleksienko Serhii – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Welding and Automated Engineering Design of Building Constructions, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko Str., 14027, Chernihiv, Ukraine).

E-mail: sv.oleks@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5475-4439>

ResearcherID: F-8197-2014

Scopus Author ID: 57190370561

Ющенко Світлана Михайлівна – асистент кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Ющенко Светлана Михайловна – ассистент кафедры сварочного производства и автоматизированного проектирования строительных конструкций, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Yushchenko Svitlana – Assistant Lecturer of Department of Welding and Automated Engineering Design of Building Constructions, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko Str., 14027, Chernihiv, Ukraine).

E-mail: rasssveta@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0863-9020>

Researcher ID: F-7741-2014

Scopus Author ID: 57190373626

Половецький Євген Вікторович – кандидат технічних наук, науковий співробітник відділу фізико-хімічних методів дослідження матеріалів, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України (вул. К. Малевича, 11, м. Київ, 03680, Україна).

Половецкий Евгений Викторович – кандидат технических наук, научный сотрудник отдела физико-химических методов исследования материалов, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины (ул. К. Малевича, 11, г. Киев, 03680, Украина).

Polovetskiy Evgen – PhD in Technical Sciences, research engineer of the department of physical-chemical investigation methods of materials, The E.O. Paton electric welding institute of the National Academy of Science of Ukraine (11 Malevicha Str., 03680 Kyiv, Ukraine).

E-mail: poloveckiy@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8113-0434>

Researcher ID: U-9135-2017

Геннадій Болотов, Максим Болотов

ОСОБЛИВОСТІ З'ЄДНАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ У ВУЗЛАХ МАШИН ТА БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Вступ. Композиційні матеріали (КМ) володіють комплексом властивостей, що відрізняють їх від традиційних конструкційних матеріалів (металів і сплавів), і в сукупності відкривають широкі можливості, як для вдосконалення існуючих конструкцій самого різного призначення, так і для розробки нових конструкцій.

Постановка проблеми. Процес виготовлення конструкцій із застосуванням композитів складається з операцій з'єднання різних елементів у вузли та агрегати. Конструктивне оформлення з'єднань композитних елементів характеризується значною різноманітністю. Кожне з'єднання володіє перевагами та недоліками і їх вибір залежить від характеру і величини навантажень, розмірів деталей, фізико-механічних властивостей матеріалів, умов експлуатації, вартості. Звідси виникають технологічні проблеми при з'єднанні деталей з КМ, пов'язані, в першу чергу, із вибором оптимального способу з'єднання.

Мета роботи. Метою роботи є аналіз особливостей основних способів з'єднання волокнистих композиційних матеріалів на полімерній основі та визначення галузей їх застосування для створення конструкцій.

Викладення основного матеріалу. Композиційні матеріали, у більшості, володіють незначними деформаціями руйнування, тому навіть їх несуттєве подовження може призвести до локального руйнування композита вже в процесі застосування різьбових з'єднань або клепок при механічному з'єднанні. Шаруватість структури композитів призводить до переважання шарів КМ, що прилягають до клейового прошарку, і може викликати їх відрив або розширення при адгезійних способах з'єднання. Ці особливості слід враховувати при виборі виду з'єднань та оцінці їх міцності.

Механічні способи з'єднання доцільно застосовувати при наявності значних розширюючих напружень, коли необхідні особливі критерії надійності і у випадку обов'язкового періодичного розбирання конструкції, при цьому слід враховувати вплив появи у з'єднанні концентраторів напружень.

Адгезійні (клеєні) з'єднання забезпечують суттєве зниження концентрації напружень, що дозволяє підвищити межю міцності в умовах дії як статичних, так і динамічних навантажень, із одночасним зниженням маси конструкції і вартості вузлів з композиційних матеріалів.

Висновки. Вибір та застосування виду з'єднання композиційних матеріалів залежить від типу навантажень (статичні або втомні), надійності, легкості у виробництві, вартості та від спеціальних умов (необхідності отримання розбірних, розсувних або інших видів з'єднань).

Ключові слова: волокнисті композиційні матеріали; полімерна матриця; способи з'єднання; галузь застосування.

Рис.: 9. Бібл.: 8.

Вступ. Композиційні матеріали (КМ) являють собою гетерофазні системи, побудовані з двох або більше компонентів зі збереженням індивідуальності кожного окремого компонента. Здебільшого компоненти КМ розрізняються за геометричною ознакою. Один з компонентів володіє неперервністю по усьому об'єму і є матрицею. Другий компонент є переривчастим, розподіленим у об'ємі, і вважається підсилюючим або армуючим. Як матричні матеріали найбільше поширення знайшли метали (в основному, алюміній) та полімери. Армуючими компонентами для силових елементів конструкцій з композитів у авіабудуванні, суднобудуванні, космічній техніці переважно є волокнисті матеріали різної природи (вуглецеві та борні волокна, високоміцні арамідні та скловолокна). Армовані композиції з успіхом застосовуються замість таких різноманітних матеріалів, як бетон, деревина, сталь, алюміній.

Композиційні матеріали володіють комплексом властивостей, що відрізняють їх від традиційних конструкційних матеріалів (металів і сплавів), і в сукупності відкривають широкі можливості як для вдосконалення існуючих конструкцій самого різного призначення, так і для розробки нових конструкцій і технологічних процесів.

Постановка проблеми. Процес виготовлення конструкцій із застосуванням композитів складається з операцій з'єднання різних елементів (листів, профілів, балок, стержнів) у вузли та агрегати. Конструктивне оформлення з'єднань композитних елементів характеризується значною різноманітністю і залежить як від призначення і відповідних вимог, так і від технологічних операцій, за допомогою яких вони виконуються.

Відмінності фізико-механічних властивостей композитів від аналогічних властивостей традиційних металів (анізотропія міцнісних характеристик, низька міжшарова міцність, гетерогенність структури та ін.) призводять до того, що ці матеріали значно гірше, ніж метали, забезпечують передавання зусиль з одного елемента до іншого.

Елементи, що утворюють вузол або виріб, можуть бути з'єднаними між собою за допомогою клеєного прошарку, механічного кріплення (болтами, заклепками), або поєднанням цих способів [1]. Композиційні матеріали із металевою матрицею можуть з'єднуватись також за допомогою зварювання.

Кожне з'єднання володіє особливостями, перевагами та недоліками і вибір будь-якого з них залежить від багатьох факторів – характеру і величини навантажень, розмірів деталей, фізико-механічних властивостей матеріалів, умов експлуатації, вартості. Звідси виникають технологічні проблеми при з'єднанні деталей з КМ між собою та з деталями з традиційних матеріалів, пов'язані передусім із вибором оптимального способу з'єднання.

Мета роботи. Метою роботи є аналіз особливостей основних способів з'єднання волокнистих композиційних матеріалів на полімерній основі та визначення галузей їх застосування для створення конструкцій.

Викладення основного матеріалу. Волокнисті композиційні матеріали складаються з багатьох шарів армуючої компоненти (волокон). Ця компонента сприймає розтягуючі та стискаючі навантаження, а зв'язуюча їх основа (матриця) перерозподіляє напруження між волокнами і запобігає втраті їх стійкості.

Композиційні матеріали здебільшого володіють незначними деформаціями руйнування (близько 1...2 %), тому навіть їх несуттєве подовження може призвести до локального руйнування композита вже у процесі затягування різьбових з'єднань або клепання при механічному з'єднанні [2]. Шаруватість структури композитів призводить до перевантаження шарів КМ, що прилягають до клейового прошарку, і може викликати їх відрив або розшарування при адгезійних способах з'єднання. Ці особливості слід враховувати при виборі виду з'єднань та оцінці їх міцності.

Будь-яку конструкцію з композиційних матеріалів можна розглядати як комбінацію окремих елементів різної форми (листи, балки, оболонки та ін.), з'єднаних в одне ціле. Комбінуючи ці елементи, можливо отримати значну кількість різних за геометрією з'єднань. На практиці їх можна привести до декількох основних видів: стикові, напусткові та кутові. На рис. 1 наведені основні типи механічних з'єднань композиційних матеріалів [3], звідки видно, що це переважно відносно прості з'єднання напусткового типу. Для підсилення можуть застосовуватись ті ж з'єднання, але з удвоєними елементами, які знижують рівень зсувних напружень. Загалом, основні умови проектування з'єднань композиційних матеріалів залежать від типу структур композитів, призначення з'єднаних деталей, умов експлуатації та інших факторів.

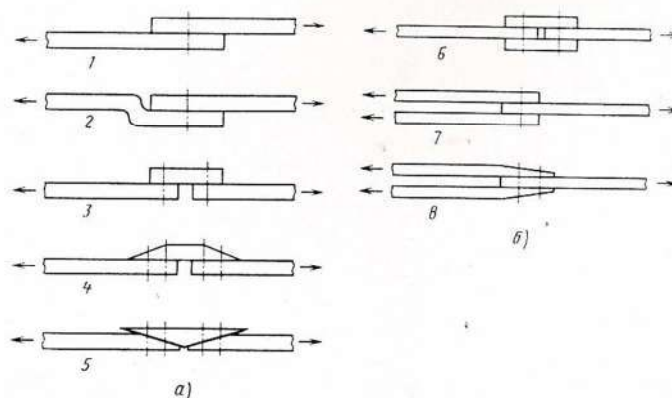


Рис.1. Види механічних з'єднань композиційних матеріалів:

- а* – прості з'єднання: 1 – звичайне напусткове; 2 – напусткове із вигином;
 3 – стикове із накладкою; 4 – стикове із зкошеною накладкою; 5 – з'єднання у вус із накладкою; *б* – двійні з'єднання: 6 – стикове із двома накладками;
 7 – двостороннє напусткове; 8 – скошене двостороннє напусткове

При проектуванні механічних з'єднань композитів необхідно спочатку експериментально визначити основні показники міцності композитів на зминання, зрізання та розрив із урахуванням напрямку дії зовнішнього навантаження. Далі виконується теоретичний аналіз розподілу навантажень та напружень у з'єднанні і здійснюється вибір оптимальних параметрів з'єднання виходячи з умови його рівномірності (рис. 2) [2]:

$$P_c = P_{o.c} = P_{cm} = P_{cp} = P_{cp.t},$$

де $P_{o.c}$, P_{cm} , P_{cp} , $P_{cp.t}$ – навантаження, що руйнують зразок відповідно по послабленому перерізу, в результаті зминання, зрізання та зрізання силової точки.

Оскільки для композиційних матеріалів ця умова не виконується однозначно, то ефективність їх з'єднань оцінюють як [4]

$$K_{ef} = F_c / F_{km},$$

де F_c – міцність з'єднання; F_{km} – міцність композиційного матеріалу.

Як і при проектуванні з'єднань елементів з металів, для композиційних матеріалів також застосовується поняття запасу міцності. При проектуванні у літакобудуванні конструкцій з металевих деталей запас міцності обирається рівним 1,5. Для композиційних матеріалів, які практично не володіють текучістю, запас міцності обирається рівним 3.

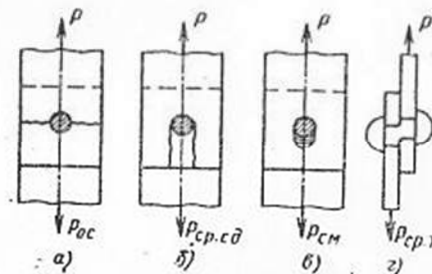


Рис. 2. Форми руйнувань механічних з'єднань композитних елементів:
 а – руйнування по послабленому перерізу; б – зрізання-зсув композита;
 в – зминання композита; г – зрізання силової точки

Заклепкові та різьбові з'єднання плоских композиційних панелей можуть виконуватись як із зенковкою під потайні головки, так і без неї. Зокрема, конструювання з'єднань склопластикових матеріалів засновано на використанні з'єднувальних елементів без потайних головок, для чого необхідно знати тільки діаметр отвору, який залежить від товщини з'єднуваних пластин. Для пластин товщиною менше 1 мм можуть застосовуватись додатково накладки із роззенкованими отворами. Якщо конструкція передбачає наявність багатьох отворів, то між ними повинна бути передбачена певна відстань. Відстань між суміжними рядами визначається по центрах отворів у кожному ряду (рис. 3). Найчастіше ця відстань обирається рівною п'яти діаметрам отворів, що забезпечує достатній запас міцності.

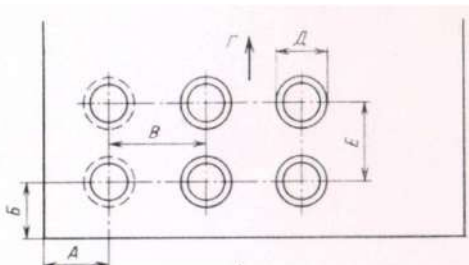


Рис. 3. Болтові з'єднання деталей з композитів:
 А, Б – віддалення центру отвору від кромки та краю листа;
 В – відстань між центрами отворів впоперек листа; Г – напрямок прикладання навантаження; Д – діаметр кріпильного виробу (болта); Е – відстань між центрами отворів вздовж листа

Крім простоти, особливістю механічних з'єднань композиційних матеріалів є те, що вони можуть не тільки витримувати значні навантаження, а й перерозподіляти їх, що знижує, в цілому, експлуатаційні навантаження на елементи з'єднання. Разом з тим необхідно враховувати навантаження, що виникають при самому процесі з'єднання. Зазвичай такі навантаження не повинні перевищувати 10 % від загального аксіального навантаження на композит. Пошкодження композита при з'єднанні можуть призвести до його передчасного руйнування при стисканні або розтягуванні, тому дуже важливо запобігати його руйнування при затисканні. Крім того, свердління отворів завжди пов'язане із руйнуванням волокон, і міцність таких з'єднань залежить від міцності матеріалу матриці. Підвищують міцність болтових та заклепкових з'єднань додатковим армуванням накладками з корозійно-стійкої сталі або титанових сплавів [5].

Суттєві недоліки механічних з'єднань композиційних матеріалів, які в першу чергу пов'язані з наявністю концентраторів напружень і найбільш яскраво проявляються в умовах дії динамічних навантажень, обмежують їх застосування у певних галузях, зокрема, літакобудуванні. В цих випадках для створення конструкційних структур ефективно застосовують адгезійні способи з'єднання композитів між собою та з іншими металами. Адгезійно з'єднані елементи почали застосовувати у літакобудуванні ще з 1945 року. Адгезійні з'єднання мають суттєві переваги перед механічними, зокрема:

- адгезійні з'єднання є меншими концентраторами напружень, ніж механічні, завдяки чому зростає межа міцності при статичному навантаженні;
- адгезійні з'єднання можуть бути спроектовані таким чином, що будуть мати гладку зовнішню поверхню і володіти мінімальною можливістю для розповсюдження тріщин;
- можуть бути легко з'єднані значні площі, причому вартість такого з'єднання буде суттєво нижче, ніж механічного.

Класичні види адгезійних з'єднань схематично зображені на рис. 4 [6].

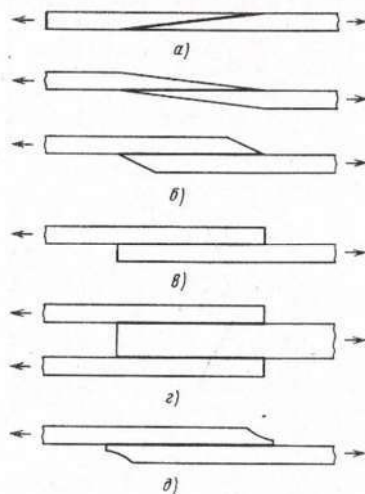


Рис. 4. Види адгезійних з'єднань:

- а – вуз; б – напусткове із скосом; в – просте напусткове;
г – двійне напусткове; д – модифіковане напусткове

Кожен з видів з'єднань має свої переваги залежно від характеру і напрямку прикладання навантажень. З'єднання, яке добре витримує навантаження при стисканні, може незадовільно працювати на розтягування або зминання. Типовий розподіл напружень у вузлах адгезійно з'єднаних композитів наведений на рис. 5 [7], звідки видно, що дотичні напруження по довжині клеєного з'єднання розподіляються нерівномірно і мають максимальне значення на кінцях напустку. При збільшенні довжини напустку максимальні напруження знижуються і після досягнення певної межі залишаються незмінними.

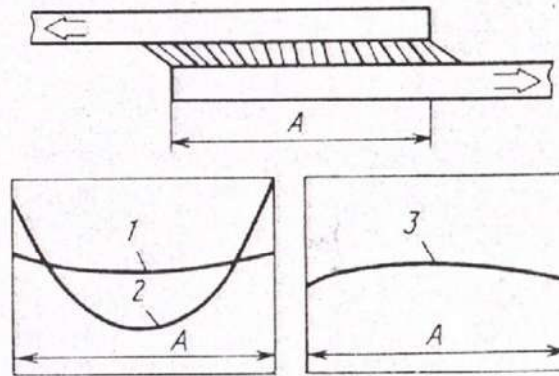


Рис. 5. Розподіл напружень зсуву в адгезійному напустковому з'єднанні довжиною A: 1 – еластифікований адгезив (нееластичний із високим опором зсуву); 2 – стандартний розподіл зсувних напружень для нормального адгезиву; 3 – оптимальна крива розподілу зсувних напружень

На рис. 6 показано, що для простого напусткового з'єднання із збільшенням довжини перекриття утримуюче питоме зусилля зростає пропорційно ширині, а зсувні напруження в адгезійному шарі залишаються постійними або навіть знижуються.

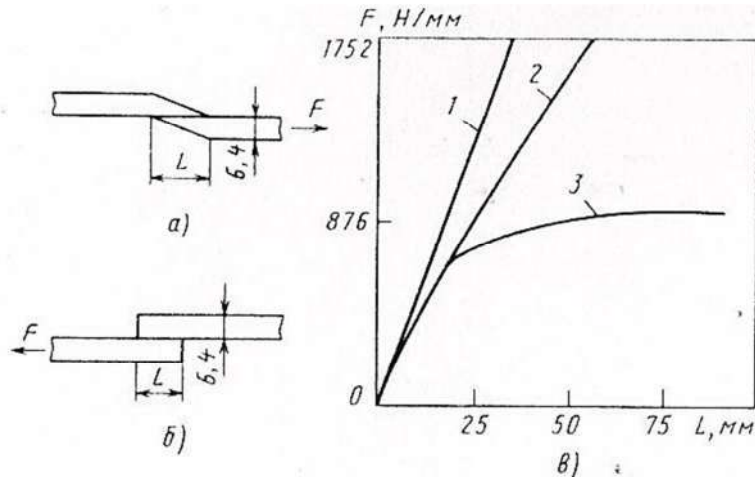


Рис. 6. Вплив довжини перекриття на міцність плоских напусткових з'єднань: а – із скосом кромки; б – із прямими кромками; в – залежність питомої (на 1 мм ширини) міцності з'єднань F від довжини напустку L; 1 – теоретична крива; 2 та 3 – криві з'єднань відповідно із скосом кромки та без скосу кромки

Особливістю адгезійних з'єднань є залежність внутрішніх напружень не тільки від навантаження, а й від температури. Підвищена температура експлуатації конструкцій, що мають з'єднання, призводить до зростання термічних напружень, особливо якщо коефіцієнти лінійного розширення окремих елементів не збігаються. Крім того, напруження зростають ще внаслідок того, що лінійні коефіцієнти термічного розширення адгезійного шару не збігаються із їх значеннями для з'єднуваних елементів. Оскільки елементи конструкції повинні працювати у широкому діапазоні температур (що є особливо важливим для авіаційної техніки), існування температурних напружень повинно обов'язково враховуватись. Аналітична оцінка середніх зсувних напружень, що виникають у з'єднанні під впливом перепадів температур, оцінюється виразом [7]

$$\tau_0 = \frac{\Delta T_1 \alpha_1 - \Delta T_2 \alpha_2}{1/E_1 + 1/E_2},$$

де τ_0 – середнє зсувне напруження; E_1, E_2 – модулі пружності з'єднаних матеріалів; a_1, a_2 – коефіцієнти лінійного розширення тих же матеріалів; $\Delta T_1, \Delta T_2$ – різниця температур елементів з'єднання і температури отвердженого адгезиву.

Максимальні залишкові напруження тим вище, чим тонше клейовий прошарок, вище його модуль пружності і менше різниця жорсткостей з'єднаних матеріалів. Необхідно враховувати також, що напруження, які виникають у з'єднаних елементах, можуть викликати вигин (викривлення) з'єднання, притому тим більший, чим більше різниця жорсткостей елементів. На рис. 7 наведені типові градієнти напружень для різних термодформаційних умов у з'єднанні.

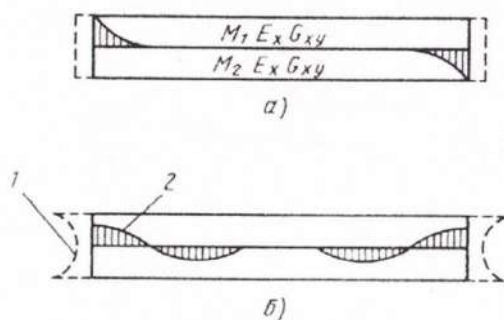


Рис. 7. Епюри напружень, що виникають унаслідок різниці температурних коефіцієнтів лінійного розширення елементів з'єднання: а – розширення одного елемента відносно іншого; б – одночасне розширення обох елементів;

1 – форма торців внаслідок нагріву; 2 – градієнт напружень

Втомні властивості адгезійних з'єднань композиційних матеріалів визначаються, в основному, властивостями адгезива. Крім того, вони залежать також від характеристик з'єднання й умов експлуатації таким чином:

- 1) втомні властивості підвищуються зі збільшенням довжини перекриття напусткового з'єднання;
- 2) втомні властивості адгезива знижуються із ростом товщини з'єднаних елементів;
- 3) залежно від типу адгезиву вплив температури на втомні властивості з'єднання може бути протилежним.

При прикладанні циклічного стискуючого навантаження адгезійно з'єднані зразки забезпечують на 25 % більшу стійкість у порівнянні з механічними з'єднаннями. Особливо суттєві переваги адгезійне з'єднання забезпечує при багатоцикловому навантаженні. Порівняльний аналіз стійкості в цих умовах для різних типів з'єднань наведений на рис. 8 [8].

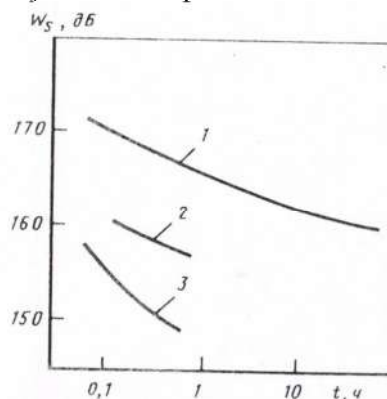


Рис. 8. Втомні властивості клеєних та заклепкових конструкцій під дією навантажень звукової частоти інтенсивністю W_s та тривалістю t :

1 – сандвічеві конструкції із сотовим наповнювачем; 2 – адгезійні (клеєні) з'єднання; 3 – заклепкові з'єднання

Зі збільшенням товщини з'єднуваних матеріалів для усіх видів з'єднань показники ефективності знижуються (рис. 9) [2]. Це пояснюється зростанням кількості рядів і, відповідно, кількості кріпильних елементів у механічних з'єднаннях, та збільшення ексцентриситету передавання навантажень у адгезійних. З наведеного рисунку видно, що область ефективного застосування клеєних з'єднань знаходиться у межах до 1,6 мм товщини з'єднуваних деталей. Для заклепкових з'єднань ефективна область товщин становить 1,5...3,0 мм, а для болтових – більше 3 мм. Для стикових з'єднань оболонки із товщиною матеріалу більше 8 мм доцільно застосовувати штифтоболтові з'єднання.

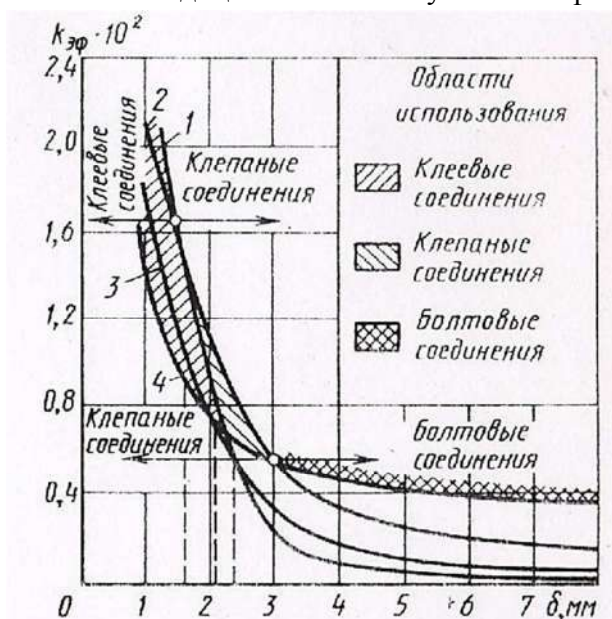


Рис. 9. Области ефективного застосування різних видів з'єднань композитів:
1 – клеєні; 2 – заклепкові; 3 – заклепково-клеєні; 4 – болтові

Висновки.

1. Вибір та застосування виду з'єднання композиційних матеріалів залежить від типу навантажень (статичні або втомні), надійності, легкості у виробництві, вартості та від спеціальних умов (необхідності отримання розбірних, розсувних або інших видів з'єднань).

2. Механічні способи з'єднання доцільно застосовувати за наявності значних розшаровуючих напружень, коли необхідні особливі критерії надійності й у випадку обов'язкового періодичного розбирання конструкції, при цьому слід враховувати вплив появи у з'єднанні концентраторів напружень.

Адгезійні (клеєні) з'єднання забезпечують суттєве зниження концентрації напружень, що дозволяє підвищити межу міцності в умовах дії як статичних, так і динамічних навантажень, із одночасним зниженням маси конструкції і вартості вузлів з композиційних матеріалів.

Список використаних джерел

1. Воробей В. В. Соединения конструкций из композиционных материалов / В. В. Воробей, О. С. Сироткин. – М. : Машиностроение, 1985. – 166 с.
2. Композиционные материалы: справочник / под ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского. – М. : Машиностроение, 1990. – 512 с.
3. Strauss E.L. How to Design Mechanical Joints / Materials in Design Engineering, February, 1963.
4. Справочник по композиционным материалам / под ред. Дж. Любина. – М. : Машиностроение, 1988. – 584 с.
5. Царахов Ю. С. Конструирование соединений элементов ЛА из композиционных материалов / Ю. С. Царахов. – М. : МАТИ, 1980. – 80 с.

6. Jungstrom O. L. Design Aspects of Bonded Structures / O. L. Jungstrom // Aircraft Bulletin, No. 4, Bonded Structures, LTD, Duxford, England, May 1959.
7. Bloomingdale Rubber Division of American Cyanamid Co., Handbook for Adhesives, 1957.
8. Catchpole E.J. Bonding and Sandwich Construction /Aeroplane and Astronautics, June, 1961.

References

1. Vorobey, V.V., Sirotkin, O.S. (1985). *Soedineniia konstruksii iz kompozitsionnykh materialov [Compound structures from composite materials]*. Moscow: Mashinostroenie (in Russian).
2. Vasilev, V.V. (ed.), Tarnopolskii, Yu.M. (1990). *Kompozitsionnye materialy: spravochnik [Composite materials. Reference book]*. Moscow: Mashinostroenie (in Russian).
3. Strauss, E.L. (1963). How to Design Mechanical Joints. *Materials in Design Engineering*, February.
4. Liubin, Dzh. (ed.) (1988). *Spravochnik po kompozitsionnym materialam [Handbook of composite materials]*. Moscow: Mashinostroenie (in Russian).
5. Tsarakhov, Yu.S. (1980). *Konstruirovaniie soedinenii elementov LA iz kompozitsionnykh materialov [Construction of compounds of aircraft elements from composite materials]*. Moscow: MATI (in Russian).
6. Jungstrom, O.L. Design Aspects of Bonded Structures. *Aircraft Bulletin*, No. 4, Bonded Structures, LTD, Duxford, England, May 1959.
7. Bloomingdale Rubber Division of American Cyanamid Co., Handbook for Adhesives, 1957.
8. Catchpole E. J. Bonding and Sandwich Construction. *Aeroplane and Astronautics*, June, 1961.

UDC 669.018:624.1

Gennadii Bolotov, Maksym Bolotov

FEATURES OF CONNECTION OF COMPOSITE MATERIALS IN MACHINE UNITS AND BUILDING STRUCTURES

Urgency of the research. Composite materials (CM) have a complex of properties that distinguish them from traditional construction materials (metals and alloys), and in combination open up wide opportunities, both for improving existing designs of various purposes, and for developing new designs.

Target setting. The process of manufacturing structures using composites consists of operations of connecting various elements into knots and aggregates. Constructive design of compounds of composite elements is characterized by considerable variety. Each connection has advantages and disadvantages and their choice depends on the nature and size of loads, the size of parts, physical and mechanical properties of materials, conditions of operation, cost. Hence there are technological problems when connecting parts with KM, connected, first of all, with the choice of the optimal method of connection.

The research objective. The aim of the work is to analyze the peculiarities of the main methods of combining fibrous composite materials on a polymeric basis and to determine the branches of their application for the construction of structures.

The statement of the basic material. Composite materials, in most cases, have insignificant deformations, so even their insignificant elongation can lead to local destruction of the composite already during the tightening of threaded joints or riveting during mechanical connection. The lamination of the composite structure leads to an overload of the CM layers adjacent to the adhesive layer and can cause their separation or delamination in adhesion bonding methods. These features should be considered when choosing the type of joints and assessing their strength.

Mechanical methods of connection is advisable to use in the presence of significant stratification stresses, when necessary special reliability criteria and in the case of mandatory periodic disassembly of the structure, while taking into account the effect of the appearance of the connection of stress concentrators..

Adhesive (laminated) connections provide a significant reduction in stress concentration, allow to increase the ultimate strength under conditions of both static and dynamic loads, while reducing the weight of the structure and the cost of assemblies of composite materials.

Conclusions. Selection and application of composite materials type depends on the type of loads (static or fatigue), reliability, facility of **manufacture**, cost and special conditions (the need for collapsible, sliding or other kinds of connections).

Key words: fibrous composite materials; polymer matrix; ways to connect; field of application.

Fig.: 9. Bibl.: 8.

УДК 669.018:624.1

Геннадий Болотов, Максим Болотов

ОСОБЕННОСТИ СОЕДИНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В УЗЛАХ МАШИН И СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Приведены конструктивные особенности механических и адгезионных соединений волокнистых композиционных материалов на полимерной основе, определены основные условия их проектирования и область применения. Проведен анализ особенностей основных способов соединения волокнистых композиционных материалов на полимерной основе и определения отраслей их применения для создания конструкций.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Ключевые слова: волокнистые композиционные материалы; полимерная матрица; способы соединения; область применения.

Рис.: 9. *Библ.:* 8.

Болотов Геннадій Павлович – доктор технічних наук, професор кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (95, вул. Шевченка, 14027, м. Чернігів, Україна).

Болотов Геннадий Павлович – доктор технических наук, профессор кафедры сварочного производства и автоматизированного проектирования строительных конструкций, Черниговский национальный технологический университет (95, ул. Шевченко, 14027, г. Чернигов, Украина).

Bolotov Gennadyi – Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of welding technology and CAD/CAM/CAE systems of building structures, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: bolotovgp@gmail.com

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

Болотов Максим Геннадійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (95, вул. Шевченка, 14027, м. Чернігів, Україна).

Болотов Максим Геннадиевич – кандидат технических наук, доцент кафедры сварочного производства и автоматизированного проектирования строительных конструкций, Черниговский национальный технологический университет (95, ул. Шевченко, 14027, г. Чернигов, Украина).

Bolotov Maksym – PhD in Technical Sciences, Seniore Lecturer of Department of welding technology and CAD/CAM/CAE systems of building structures, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: bolotovmg@gmail.com

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

УДК 620.179.4/.178.1:678.664;667.61:678.664

DOI 10.25140/2411-5363-2017-4(10)-86-93

Антон Клименко, Володимир Анісімов, Володимир Ситар

ВПЛИВ ТВЕРДИХ ШАРУВАТИХ НАПОВНЮВАЧІВ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ ФЕНІЛОНУ

Актуальність дослідження. Полімерні матеріали вже давно використовуються у багатьох галузях промисловості, вони часто використовуються як альтернатива металевим деталям. Водночас полімерні матеріали можуть перевіряти традиційні матеріали за деякими характеристиками, але поступаються за іншими. Нещодавно були розроблені полімерні матеріали з підвищеними адгезійними властивостями, тому актуальним завданням є вивчення їх фізико-механічних характеристик для оцінки перспектив їх використання у промисловості.

Постановка проблеми. Метою дослідження є визначення фізико-механічних характеристик полімерних матеріалів з високими адгезійними властивостями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Є багато досліджень фізико-механічних характеристик різних типів полімерів, також розроблені полімери з високими адгезійними характеристиками.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Є багато досліджень фізико-механічних характеристик полімерів, але не вистачає інформації про матеріали з підвищеними адгезійними характеристиками на основі фенілону.

Мета дослідження. Метою є експериментальне вивчення фізико-механічних властивостей композиційних покриттів на основі фенілону, зокрема різних видів міцності, еластичності, мікроструктури та ін.

Виклад основного матеріалу. В статті проводиться загальний аналіз полімерів на основі фенілону, показано необхідність вивчення їх фізико-механічних характеристик. Далі представлені результати експериментальних досліджень різних типів сили, пружності, мікроструктури тощо.

Висновки. Встановлено, що більша частина запропонованих наповнювачів призводить до збільшення таких параметрів, як мікротвердість, зносостійкість, модуль пружності та деяке зниження міцнісних характеристик. Показано появу конгломератів частинок на поверхні покриття при частці наповнювача >20 %, що викликає зниження експлуатаційних властивостей покриттів.

Ключові слова: покриття; фенілон; фізико-механічні властивості; наповнювач.

Рис.: 6. Табл.: 1. Бібл.: 6.

Постановка проблеми. Полімерні матеріали знайшли широке застосування у вузлах тертя сучасних машин і механізмів [1-6]. Використання полімерів дозволяє збільшити надійність та ресурс машин, покращити їх експлуатаційні, техніко-економічні характеристики і технологічність, відмовитися від дефіцитних сплавів кольорових металів і знизити вартість машин.

Серед інших, перспективною є технологія покриття деталей машин зносостійким полімером – фенілоном замість використання цільної деталі з кольорового сплаву, що приводить до значної економії на матеріалі. Проте для використання цієї технології необхідно забезпечити не тільки високі фізико-механічні показники полімерного покриття, а й хороші показники адгезії покриття до основного матеріалу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Полімери використовуються як антифрикційний матеріал як у чистому вигляді, так і у вигляді композиційних матеріалів з різними наповнювачами [1; 3]. Прогресивним напрямком є їх використання у якості антифрикційне покриття [1].

Працездатність вузла тертя залежить від правильного вибору полімерного матеріалу, товщини функціонального шару, технологічних параметрів процесу формування покриття та багатьох інших факторів, які встановлюються з урахуванням умов і режимів експлуатації. Властивості фрикційних покриттів багато в чому визначаються складом композиції, змінюючи який можна у широких межах регулювати фрикційні характеристики.

Серед багатьох відомих полімерних матеріалів, за найбільш вдалим поєднанням властивостей для вузлів тертя, можна виділити ароматичні поліаміди [1–3]. Одним з перспективних термостійких полімерів триботехнічного призначення є ароматичний поліамід фенілон. Як антифрикційний матеріал фенілон використовується у важконавантажених вузлах тертя, які працюють при підвищених температурах.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Враховуючи достатньо високі значення коефіцієнта тертя фенілонового покриття (0,40-0,41), що

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

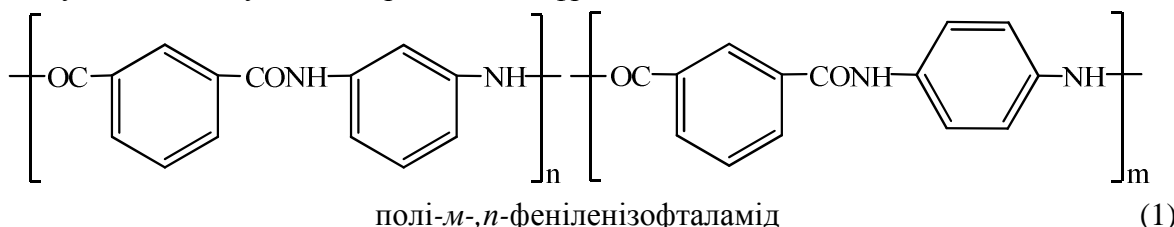
робить неможливим його використання у вузлах тертя, що працюють без змащування, до його складу вводять тверді шаруваті мастила, які широко використовуються для створення самозмащувальних матеріалів на основі полімерів: графіт, нітрид бору, дисульфід молібдену та фталоціанін міді.

Проте відомо [5], що поряд із високими показниками триботехнічних властивостей ароматичні поліаміди мають низьку адгезію до металів, що ускладнює отримання якісних покриттів. Зокрема, невідомий вплив твердих шаруватих наповнювачів на фізико-механічні властивості композиційних покриттів на основі фенілону.

Мета статті. Для практичного використання вищезазначених полімерних матеріалів, зокрема як антифрикційне покриття, необхідно дослідити їх фізико-механічні властивості, що і є метою цієї статті.

Виклад основного матеріалу. Об'єкти та методики досліджень. Об'єктами дослідження є ароматичний поліамід полі-*m*-,*n*-феніленізофталамід (фенілон С2), зокрема покриття з нього, та композиційні покриття на його основі, що містять функціональні наповнювачі.

Фенілон С2 (ТУ 6-05-226-72) являє собою лінійний гетероланцюговий полімер, макромолекули якого побудовані з ароматичних фрагментів, які з'єднані амідними зв'язками.



За зовнішнім виглядом – це високодисперсний порошок з розміром часток 20...40 мкм та насипною густиною 0,33 г/см³. Фенілон С2 отримують шляхом сумісної поліконденсації *m*-фенілендіаміну та *p*-фенілендіаміну з дихлорангідридом ізофталевої кислоти. Після синтезу має аморфну структуру з температурою склування $T_{ск} = 290$ °С, але в інтервалі температур 340...360 °С швидко кристалізується.

За комплексом фізико-механічних показників фенілон С2 перевершує переважну більшість промислових пластмас. Матеріали на його основі поєднують у собі високу тепло- і термостійкість, морозостійкість, міцність, жорсткість, хорошу пластичність, стійкість до ударних навантажень, високу втомну міцність, стабільність діелектричних характеристик, підвищену радіаційну й хімічну стійкість, та достатньо високу (до 260 °С) температуру тривалої експлуатації.

Як наповнювач використовували шаруваті тверді мастила, які широко використовуються для створення самозмащувальних матеріалів на основі полімерів: графіт, нітрид бору, дисульфід молібдену та фталоціанін міді. Обрані антифрикційні наповнювачі використовували у мілкодисперсному вигляді з розміром частинок 1...2 мкм. Вмістом наповнювача варіювали від 5 до 30 мас. %.

Полімерні покриття завтовшки 80...85 мкм отримували шляхом нанесення розчину фенілону на поверхню металевго субстрату, поверхню якого попередньо очистили та знежирили, з наступним випаровуванням розчинника шляхом сушки. Сушіння зразків здійснювали в сушильній шафі при температурі 145...200 °С протягом 30...60 хв. Температурно-часовий режим формування встановлювався виходячи з допустимої кількості залишку розчинника у складі покриття та його адгезійної міцності.

Перед нанесенням розчин перемішували в лопатевій лабораторній мішалці з частотою обертання 60 об/хв протягом двох хвилин. Розроблена методика приготування покриттів дозволяє отримати хороше розподілення наповнювача в об'ємі полімерної матриці (рис. 1).

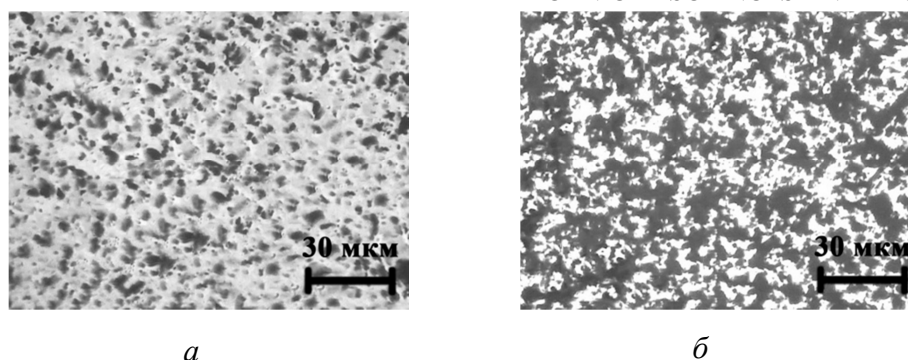


Рис. 1. Мікроструктура композиційних покриттів на основі фенілоу, що містять у своєму складі антифрикційний наповнювач: а – графіт (5 мас.%); б – графіт (20 мас.%)

Мікроструктуру зразків полімерних покриттів вивчали за допомогою оптичного фотомікроскопа відбитого світла ПОЛАМ Р-312 при збільшеннях 450–500.

Мікротвердість покриттів (H_{μ}) вимірювали згідно з ГОСТ 9450-76 методом устанавленого відбитку на приладі ПМТ-3. Сутність методу полягає у нанесенні на поверхню зразка відбитка під дією статичного навантаження, що прикладене до алмазного накопечника протягом певного часу.

Визначення рівня адгезії покриттів до субстрату здійснювали методом решітчастих надрізів за ГОСТ 15140-78 (ISO 2409).

Вимірювання межі міцності при розтяганні (σ), відносного подовження (ϵ) при розриві та модуля пружності (E) покриттів виконували відповідно до ГОСТ 18299-72 на розривній машині 2167 Р-50.

Обговорення результатів досліджень. Випробування досліджуваних покриттів методом решітчастих надрізів (таблиця) показали високий бал (1–2) для всіх зразків з вмістом наповнювача понад 15 %. Найвищий бал має фенілонове покриття з вмістом 20 % фталоціаніну міді у своєму складі.

Таблиця

Результати випробування покриттів з антифрикційними наповнювачами методом решітчастих надрізів

Вміст наповнювача, мас.%	Результати випробування, бал			
	Дисульфід молібдену	Графіт	НіGRID бора	Фталоціанін міді
5	4	4	4	4
10	3	3	3	3
15	2	2	2	2
20	1–2	1–2	1–2	1
30	2	2	2	2

Встановлено, що введення у склад фенілонового покриття обраних наповнювачів призводить до деякого зниження механічних характеристик композиційних покриттів на його основі. Результати дослідження залежності межі міцності при розтяганні фенілонового покриття від кількості наповнювача (рис. 2) показали, що збільшення вмісту наповнювача призводить до зменшення значень міцності.

Зниження міцнісних властивостей фенілонових покриттів при наповненні, пояснюється тим, що полімер не може забезпечити достатнього зв'язку з частинками наповнювача на границі їх розподілу. Різке падіння міцності композиційних покриттів спостерігається при вмісті наповнювачів у кількості >20 мас.%.

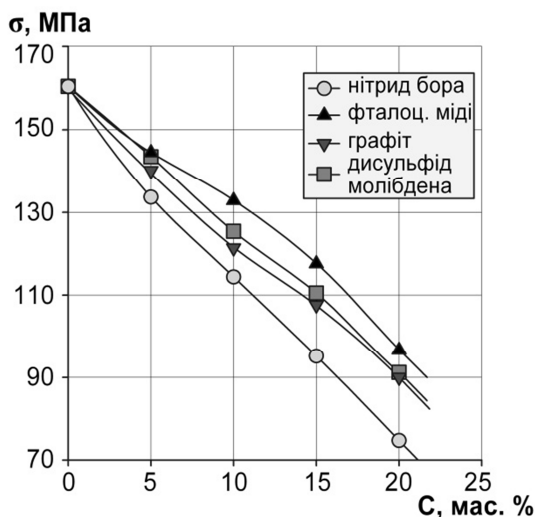


Рис. 2. Залежність межі міцності (σ) при розтяганні від вмісту наповнювача (C) у складі покриття

Встановлено вплив обраних наповнювачів і на деформаційні властивості композиційних покриттів на основі фенілону. Введення твердих частинок у фенілонове покриття призводить до обмеження рухливості надмолекулярних утворень та їх елементів в процесі деформування. У результаті чого підвищується їх опір до деформування та знижується величина відносного подовження при розтяганні (рис. 3).

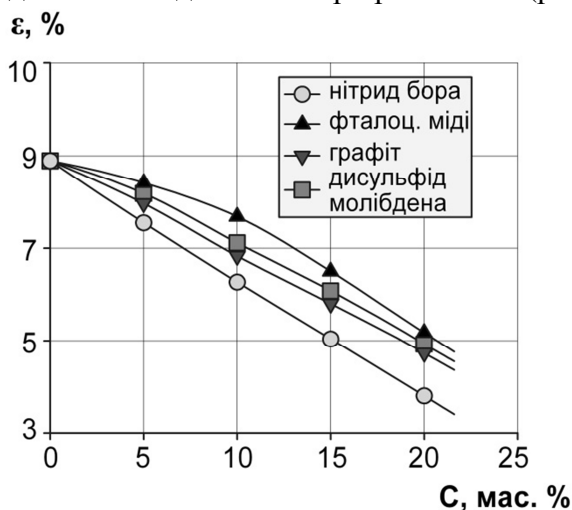


Рис. 3. Залежність відносного подовження (ϵ) від вмісту наповнювача (C) у складі покриття

Ще одна причина підвищення опору композиційних фенілонових покриттів до деформування та зниження величини їх граничної деформації пов'язана з тим, що модуль пружності твердих частинок обраних наповнювачів значно вище модуля пружності полімеру і наповнювачі не здатні до таких великих деформацій, як полімер. Тому заміщення частини об'єму полімеру твердими частинками наповнювача викликає зростання модуля пружності композиційного покриття (рис. 4), чим підвищує його опір до деформування.

Слід зазначити, що для досліджуваних фракцій 1–2 мкм тип наповнювача практично не впливає на характер отриманих концентраційних залежностей як міцнісних, так і деформаційних властивостей композиційних покриттів. Це можна пояснити відсутністю або незначною хімічною взаємодією між частинками наповнювача та полімерною матрицею для всіх обраних антифрикційних домішок, а також однотипною шаруватою структурою всіх наповнювачів.

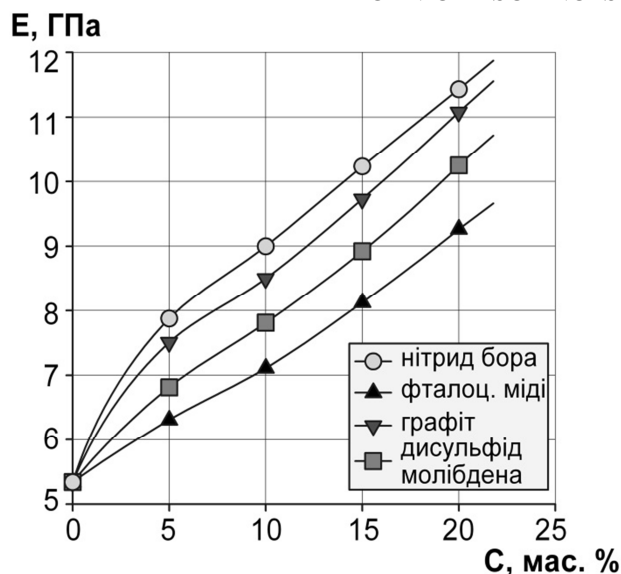


Рис. 4. Залежність модуля пружності (E) від вмісту наповнювача (C) у складі покриття

Важливим експлуатаційним параметром антифрикційного покриття є мікротвердість його поверхні. На рис. 5 представлена залежність мікротвердості композиційних покриттів від концентрації антифрикційного наповнювача.

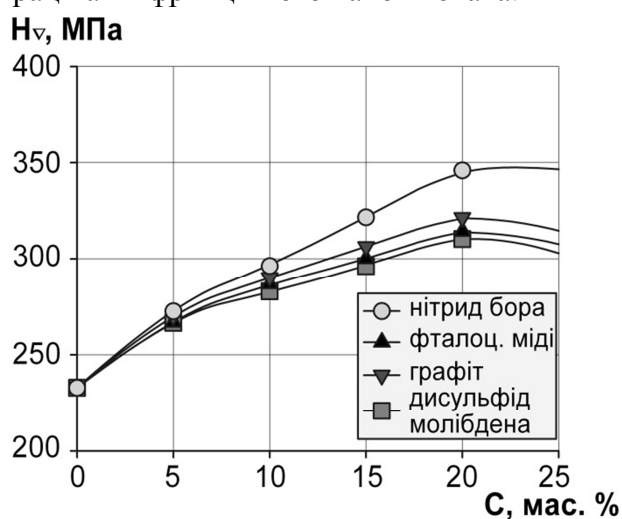


Рис. 5. Залежність мікротвердості (Hv) від вмісту наповнювача (C) у складі покриття

Встановлено, що збільшення концентрації наповнювача у складі покриття призводить до зростання мікротвердості, яке набуває свого максимального значення при вмісті наповнювача у кількості 20 мас.%. При подальшому збільшенні концентрації антифрикційного наповнювача у покритті мікротвердість починає падати.

Слід зауважити, що при вмісті наповнювача більше ніж 20 % на поверхні зразків можна спостерігати конгломерати з частинок наповнювачів. Відзначається також утворення на поверхні покриття мережевої структури, відомої як комірки Бенарда (рис. 6). Утворення такої структури пояснюється тим, що розчинник, який випаровується, піднімаючись з глибини покриття, захоплює із собою матеріал покриття. При цьому на одних ділянках нагору підіймається збагачений розчинником матеріал, на інших опускається збіднений з утворенням комірок, а зростання в'язкості перешкоджає вирівнюванню покриття, тобто виникає локальна різниця концентрацій компонентів покриття.

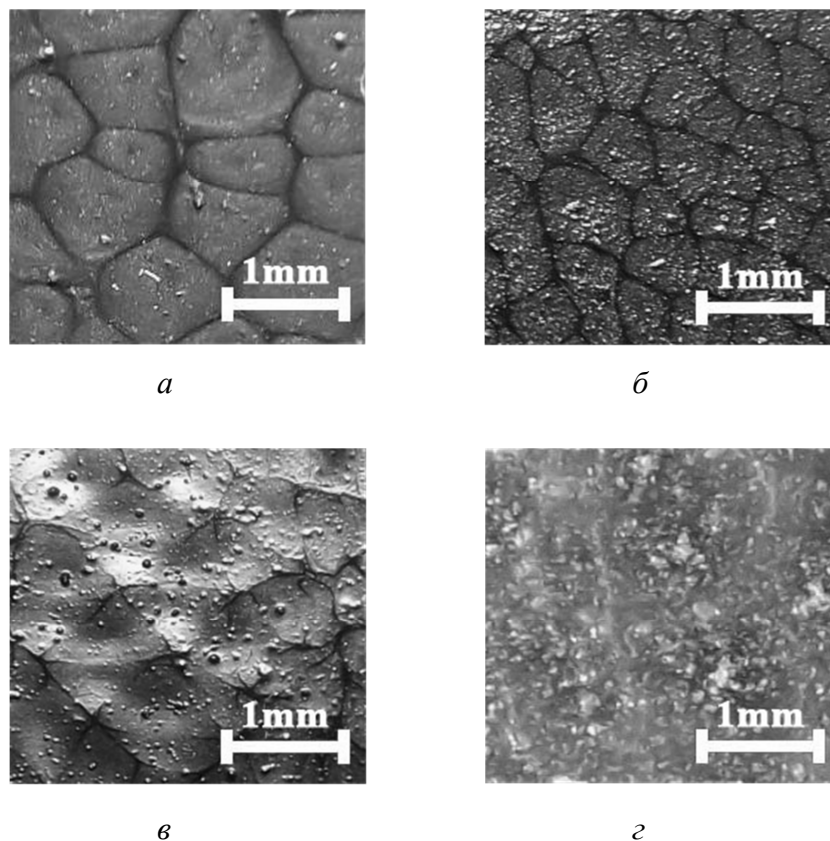


Рис. 6. Макроструктура поверхні композиційних покриттів на основі фенілонової матриці, що містять 30 мас.% наповнювача:
 а – дисульфід молибдену; б – графіт;
 в – фталоціанін міді; г – нітрид бору

Виходячи з отриманих результатів можна зробити висновок, що гранично допустима кількість антифрикційного наповнювача у складі фенілонової матриці, з огляду на наявність технологічних дефектів, становить 20 мас.%.

Висновки та пропозиції. Встановлено, що введення у фенілонове покриття таких антифрикційних наповнювачів, як фталоціанін міді, дисульфід молибдена, графіт та нітрид бору призводить до збільшення таких показників, як мікротвердість, зносостійкість, модуль пружності та деякого зниження міцнісних характеристик.

Встановлено, що при формуванні композиційних покриттів, що мають у своєму складі >20 % наповнювача на поверхні покриттів виявляються конгломерати частинок, а також комірочки Бенарда, що мають негативний вплив на комплекс експлуатаційних властивостей покриттів.

Список використаних джерел

1. *Полимерные композиционные материалы в триботехнике* / Ю. К. Машков, З. Н. Овчар, М. Ю. Байбарацкая, О. А. Мамаев. – М. : Недра, 2004. – 262 с.
2. *Термостойкие ароматические полиамиды* / Л. Б. Соколов, В. Д. Герасимов, В. М. Савинов и др. – М. : Химия, 1967. – 256 с.
3. *Коршак В. В. Термостойкие полимеры* / В. В. Коршак. – М. : Наука, 1969. – 391 с.
4. *Adhesion of polymers* / F. Awaja, M. Gilbert, G. Kelly, B. Fox, P. Pigram // *Progress in Polymer Science*. – 2009. – № 34. – Pp. 948–968.
5. *Pocius A. V. Adhesion and Adhesives Technology* / A. V. Pocius. – Carl Hanser Verlag, Munich, 2012. – 370 p.
6. *Yang H. H. Aromatic high-strength fibers* / H. H. Yang. – New York : Wiley, 1989. – 248 p.

References

1. Mashkov, Iu.K., Ovchar, Z.N., Mamaev, O.A. (2004). *Polimernye kompozicionnye materialy v tribotekhnike [Polymer composites in tribotechnics]*. Moscow: Nedra (in Russian).
2. Sokolov, L.B., Gerasimov, V.D., Savinov, V.M. at al. (1967). *Termostoikie aromatische poliamidy [Thermostable aromatic polyamides]*. Moscow: Khimiia (in Russian).
3. Korshak, V.V. (1969). *Termostoikie polimery [Thermostable polymers]*. Moscow: Nauka (in Russian).
4. Awaja, F., Gilbert, M., Kelly, G., Fox, B., Pigram, P. (2009). Adhesion of polymers. *Progress in Polymer Science*, no. 34, pp. 948–968.
5. Pocius, A.V. (2012). *Adhesion and Adhesives Technology*. Carl Hanser Verlag, Munich.
6. Yang, H.H. (1989). *Aromatic high-strength fibers*. New York: Wiley.

УДК 620.179.4/.178.1:678.664;667.61:678.664

Anton Klimenko, Volodymyr Anisimov, Volodymyr Sytar

IMPACT OF SOLID SPHERICAL FILLERS ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF COMPOSITE COATINGS BASED ON PHENILONE

Urgency of the research. Polymer materials have been used in many industries for a long time; they are often used as an alternative to metal parts. At the same time, polymeric materials can exceed traditional materials in some characteristics, but inferior in others. Recently, polymeric materials with increased adhesion properties have been developed, so the actual task is to study their physical and mechanical characteristics for estimation of their usage in industry perspectives.

Target setting. Target is the physical and mechanical characteristics of the polymer materials with high adhesive properties.

Actual scientific researches and issues analysis. There are many researches of physical and mechanical characteristics of different types of polymers; also, there are polymers with high adhesive characteristics developed.

Uninvestigated parts of general matters defining. There are many researches of physical and mechanical characteristics of polymers, but there are not enough information about materials with increased adhesion characteristics based on phenilone.

The research objective. The objective is an experimental study of the physical and mechanical properties of composite coatings based on phenilone, in particular various types of strength, elasticity, microstructure, etc.

The statement of basic materials. In the beginning of the article, the general analysis of phenilone-based polymers is performed and necessity of its physical and mechanical characteristics study is shown. Then results of various types of strength, elasticity, microstructure, etc. characteristics experimental studies are presented.

Conclusions. It is found, that insertion the most part of proposed fillers causes to increase of such parameters as microhardness, wear resistance, modulus of elasticity and some reduction of strong characteristics. An appearance of particle conglomerates on coating surface at filler part >20% is shown, that causes decrease of operational properties of the coatings.

Key words: coating; phenilone; physical and mechanical properties; filler.

Fig.: 6. Tabl.: 1. Bibl.: 6.

УДК 620.179.4/.178.1:678.664;667.61:678.664

Антон Клименко, Владимир Анисимов, Владимир Сытар

ВЛИЯНИЕ ТВЕРДЫХ ШАРООБРАЗНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ФЕНИЛОНА

Полимерные материалы давно используют во многих отраслях промышленности, часто в качестве альтернативы металлическим деталям. При этом по отдельным характеристикам полимерные материалы могут превышать традиционные материалы, но по другим уступать. Недавно разработаны полимерные материалы с повышенными адгезионными свойствами, поэтому актуальной является задача исследования их физико-механических характеристик для оценки перспектив использования в промышленности.

Статья посвящена экспериментальному исследованию физико-механических свойств композиционных покрытий на основе фенилона, в частности различных видов прочности, упругости, микроструктуры и др.

Ключевые слова: покрытие; фенилон; физико-механические свойства; наполнитель.

Рис.: 6. Табл.: 1. Библи.: 6.

Клименко Антон Володимирович – кандидат технічних наук, асистент кафедри машинобудування та інженерної механіки, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет» (просп. Гагаріна, 8, м. Дніпро, 49000, Україна).

Клименко Антон Володимирович – кандидат технических наук, ассистент кафедры машиностроения и инженерной механики, Государственное высшее учебное заведение «Украинский государственный химико-технологический университет» (просп. Гагарина, 8, г. Днепр, 49000, Украина).

Klimentko Anton – PhD in Technical Sciences, Assistant of Department of Machinery and Engineering Mechanics, State High Educational Department «Ukrainian State University of Chemical Technology» (8 Gagarin Av., 49000 Dnipro, Ukraine).

E-mail: 03udhtu021990@ukr.net

Анісімов Володимир Володимирович – кандидат технічних наук, асистент кафедри машинобудування та інженерної механіки, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет» (просп. Гагаріна, 8, м. Дніпро, 49000, Україна).

Анисимов Владимир Владимирович – кандидат технических наук, ассистент кафедры машиностроения и инженерной механики, Государственное высшее учебное заведение «Украинский государственный химико-технологический университет» (просп. Гагарина, 8, г. Днепр, 49000, Украина).

Anisimov Volodymyr – PhD in Technical Sciences, Assistant of Department of Machinery and Engineering Mechanics, State High Educational Department «Ukrainian State University of Chemical Technology» (8 Gagarin Av., 49000 Dnipro, Ukraine).

E-mail: wwwovilon@gmail.com

Ситар Володимир Іванович – кандидат технічних наук, професор кафедри машинобудування та інженерної механіки, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет» (просп. Гагаріна, 8, м. Дніпро, 49000, Україна).

Ситар Владимир Иванович – кандидат технических наук, профессор кафедры машиностроения и инженерной механики, Государственное высшее учебное заведение «Украинский государственный химико-технологический университет» (просп. Гагарина, 8, г. Днепр, 49000, Украина).

Sytar Volodymyr – PhD in Technical Sciences, professor of Department of Machinery and Engineering Mechanics, State High Educational Department «Ukrainian State University of Chemical Technology» (8 Gagarin Av., 49000 Dnipro, Ukraine).

РОЗДІЛ III. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 004.4

DOI 10.25140/2411-5363-2017-4(10)-94-100

Володимир Казимир, Денис Юрченко

МЕТОД ДЕТЕКТУВАННЯ РУХУ ДЛЯ НЕСТАТИЧНИХ КАМЕР АБО ДЛЯ КАМЕР З ФУНКЦІЄЮ PTZ

Актуальність теми дослідження. Сучасні тенденції розвитку систем відеоспостереження орієнтовані на створення автоматичних функціональних комплексів, що володіють інтелектом. Виявлення областей руху в кадрі є фундаментальною проблемою цих систем. Тому існує потреба створення програмного забезпечення, яке виявляє зони руху в кадрі.

Постановка проблеми. У процесі розроблення таких систем розробникам доводиться вирішувати суперечність між обчислювальною складністю алгоритмів обробки, якістю створюваних зображень і апаратними можливостями сучасної обчислювальної техніки. Багатовимірний характер відеоінформації (координати, колір) накладає значні обмеження на швидкість і якість її обробки. Крім того, виявлення руху на мобільних камерах ускладнюється через постійну зміну фону.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Були розглянуті останні публікації у відкритому доступі, включаючи технологію оптичного потоку та алгоритм SURF.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Підвищення швидкодії існуючих методів детектування зон руху по відеоряду низької якості.

Постановка завдання. Удосконалення методу детектування руху за допомогою нестатичних камер або камер з функцією PTZ у напрямку прискорення його роботи.

Виклад основного матеріалу. Виявлення зон руху в кадрі відбувається за допомогою стандартних бібліотек *opencv*. Для визначення зони руху використовується пара послідовних кадрів: попередній – об'єкт, поточний – сцена. Формування контурів об'єктів відбувається шляхом побудови відповідних гісторам.

Висновки. Запропонований метод дозволяє вв'ічі прискорити процес виявлення зон руху по даним відеоряду нестатичних камер.

Ключові слова: виявлення руху; нестатичні камери; *opencv*; гістограма.

Рис.: 8. Бібл.: 15.

Постановка проблеми. Сучасні тенденції розвитку систем відеоспостереження орієнтовані на створення автоматичних функціональних комплексів, що володіють інтелектом. Виявлення областей руху в кадрі є фундаментальною проблемою цих систем, особливо у випадку використання нестатичних камер [1] або камер із функцією PTZ. Вирішення цієї проблеми сприятиме подальшому стеженню за об'єктами: визначанню параметрів їх руху, підрахунку кількості рухомих об'єктів у кадрі, встановленню їх взаємного розташування, а у багатьох випадках, у поєднанні з іншими методами, забезпечить економію обчислювальних ресурсів.

У деяких випадках виявлення руху може виконувати і роль допоміжного механізму. Так, наприклад, розпізнавання автомобільних номерів може відбуватися тільки для рухомих об'єктів у кадрі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема виявлення областей руху детально описана у двох відомих методах [2; 3]. Перший з них для детектування руху використовує технологію «оптичного потоку». Оптичний потік [4] – зображення видимого руху, що являє собою зсув кожної точки між двома зображеннями. По суті, він являє собою поле швидкостей, оскільки зрушення, з точністю до масштабу, еквівалентно миттєвій швидкості. Ця технологія привела до значних результатів в оптимізації алгоритму виявлення рухомих об'єктів, що дозволило використовувати її на мобільних пристроях. Другий метод використовує алгоритм SURF. Цей алгоритм дозволяє знаходити потрібний об'єкт у кадрі навіть тоді, коли він змінює розмір і нахилений під будь-яким кутом. Цей метод успішно використовувався для визначення рухомих областей на відеоряді, знятому за допомогою БПЛА, у тому числі він дає можливість передбачити положення рухомого об'єкта в наступному кадрі відеоряду [5].

Слід зазначити, що в розглянутих роботах як джерело відео виступає відео низької якості, що знижує надійність виявлення об'єктів руху. Крім того, в них пропонується використовувати алгоритм пошуку контурів (findcontours opencv), що знижує загальну швидкодію методів розпізнавання.

Метою статті є опис удосконаленого методу детектування руху за допомогою нестатичної камери, який базується на пошуку ключових точок та дозволяє усунути недоліки існуючих підходів. Особлива увага приділяється зниженню обчислювальних витрат з метою подальшого використання цього методу у вбудованих системах комп'ютерного зору.

Метод детектування руху. Роботу методу можна продемонструвати на прикладі двох кадрів з відеоряду, які представлені на рис. 1.

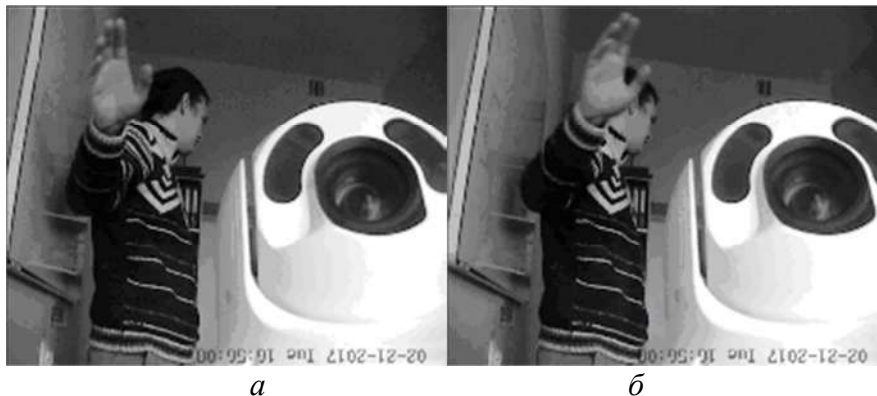


Рис. 1. Приклади кадрів з відеоряду:
а – сцена; б – об'єкт

Для виявлення руху використовуються два кадри з відеоряду: попередній кадр називається «об'єктом», а поточний – «сценою».

Особливу роль відіграють ключові точки – це точки зображення, що задовольняють певним властивостям:

- визначеність – особливість повинна виділятися на тлі сусідніх точок;
- стійкість – зміна яскравості, контрасту і колірної гами не повинні впливати на місце особливої точки на об'єкті або сцені;
- стабільність – зашумленість зображення, що не перевищує певний поріг, не повинна впливати на роботу детектора щодо цієї точки;
- інтерпретованість – особливі точки повинні бути представлені у форматі, придатному для подальшої обробки.

У загальному вигляді запропонований метод детектування областей руху на кадрі може бути представлений у вигляді алгоритму, наведеному на рис. 2.

Розглянемо більш детально окремі кроки цього алгоритму.

Пошук ключових точок. На цьому кроці використовується дескриптор Speeded up Robust Features (SURF) [6]. Він відноситься до числа тих дескрипторів, які одночасно виконують пошук особливих точок і будують їх опис, інваріантний до зміни масштабу та обертання. Крім того, пошук ключових точок є інваріантним також у тому сенсі, що нахилений об'єкт має той же набір особливих точок, що і сцена [7]. З огляду на те, що камери можуть бути встановлені на різних засобах пересування, таких як вертольоти і БПЛА, цей дескриптор підходить для вирішення цього завдання якнайкраще. У opencv вже є інструмент, який здатний знаходити ключові точки методом SURF – це метод SurfFeatureDetectorp[8]. Цьому методу передаються як параметри саме зображення і посилення на масив точок, в який буде зроблений запис знайдених ключових точок.

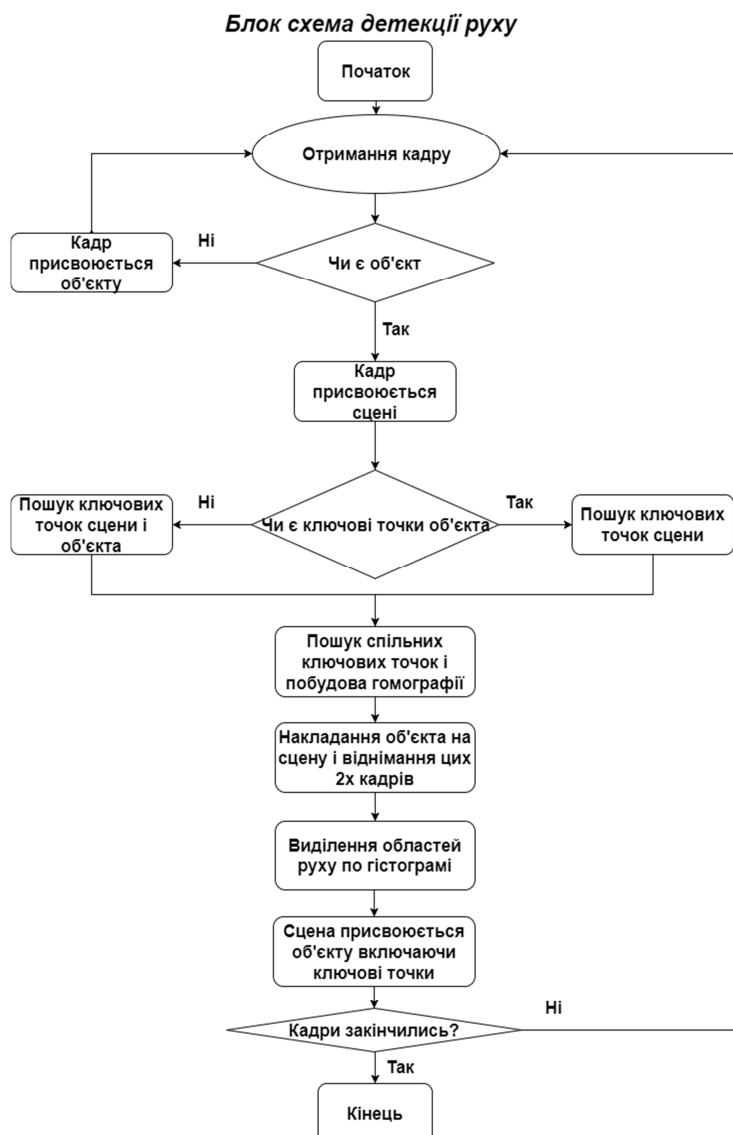


Рис. 2. Блок-схема детектування руху

Пошук спільних точок. На цьому кроці стоїть завдання пошуку спільних ключових точок з метою знаходження позиції об'єкта на сцені для подальшого його накладення на поточний кадр. Спільні точки – це ті ключові точки які присутні на сцені і на об'єкті.

Відповідності між дескрипторами знаходяться шляхом порівняння набору дескрипторів з першого зображення з набором дескрипторів з другого зображення. Для такого порівняння пропонується використовувати відомий метод VFMatcher [9]. Результат цього кроку наведено на рис. 3.

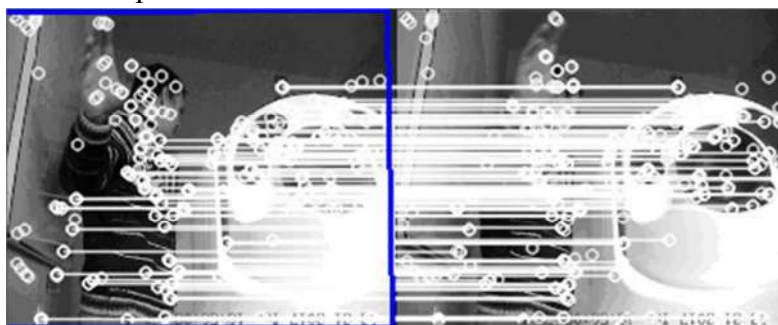


Рис. 3. Знаходження позиції об'єкта відносно сцени

Накладення попереднього кадру на поточний. Результати попереднього кроку використовуються для побудови гомографії.

Використовуючи набір ключових точок на цільовому об'єкті і зіставлений йому набір ключових точок у сцені, знаходиться відповідність між ними у вигляді матриці гомографії H . Знаходження позиції об'єкта на сцені відбувається шляхом порівняння дескрипторів, за допомогою яких ідентифікуються ключові точки. У свою чергу, дескриптори забезпечують інваріантність відповідності між точками щодо перетворень зображень. Чотири точки по краях цільового об'єкта відображаються на зображенні сцени за допомогою знайденого перетворення [9]. У результаті будуть отримані координати вершин об'єкта, на яких він має бути розташованим відносно сцени – об'єкт розміщується саме у ці межі за допомогою методу `warpPerspective` [10]. Оскільки знайдені вершини для об'єкта можуть знаходитися за межами сцени, потрібно спочатку створити тимчасове зображення з розміром, який може його вмістити, а вже потім поміщати в нього перетворений об'єкт. Розміщення об'єкта відносно сцени показано на рис. 4.



Рис. 4. Положення перетвореного об'єкта відносно сцени

Детектування руху. Після накладання об'єкта на сцену необхідно визначити абсолютну різницю цих двох кадрів і виявити, чи був рух у цей момент. Для цього використовується метод `absdiff` [11], який приймає на вхід два зображення і видає їх різницю у вигляді, показаному на рис. 5.



Рис. 5. Різниця об'єкта і сцени

Далі проводиться бінаризація зображення [14], а також його ерозія [15] для зменшення шумів. Це досягається шляхом використання, відповідно, методів `threshold` і `erode` [12].

На виході отримуємо результат, представлений на рис. 6.



Рис. 6. Результат бінаризації та ерозії

Ерозія дозволила позбавитися зайвих шумів, але це привело до зменшення реальної області руху. Щоб уникнути цього і відновити реальний розмір області руху був використаний метод dilate [13].

Знаходження контурів об'єктів. Виявлення контурів об'єктів відбувається шляхом побудови гістограм. Спочатку зображення розбивається на вертикальні смуги в товщину в 1 піксель. Далі вони перевіряються на наявність білих пікселів у ній. Якщо в смугі є білі пікселі, то призначається початкова координата ($xS1$) майбутньої «обрізки». Далі у разі виявлення відсутності білих пікселів у смугі можна задати кінцеву координату «обрізки» ($xE1$). Після проходження всього кадру проводиться вертикальна нарізка на смуги по отриманим координатам. Далі ці смуги обробляються таким же чином, але по горизонталі. Як результат, будуть отримані координати областей руху, показані на рис. 7.

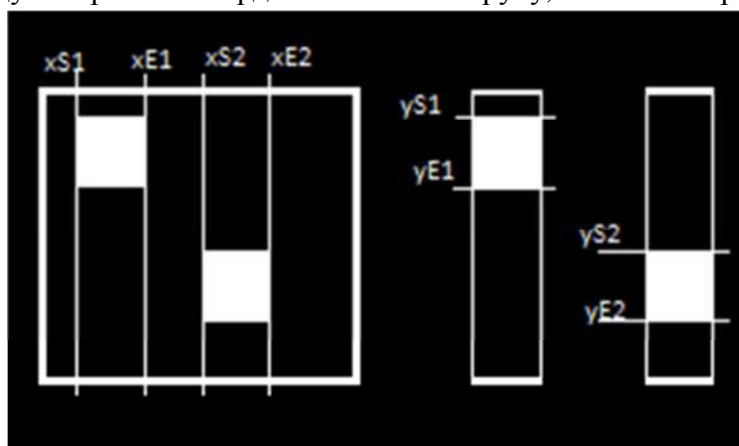


Рис. 7. Виділення областей руху з відповідними координатами

Важливо зазначити, що хоч цей метод і працює вдвічі швидше, ніж стандартний findcontours від opencv, але визначені області досить приблизні, а не точні, оскільки будуть мати контури прямокутної форми, як показано на рис. 8.

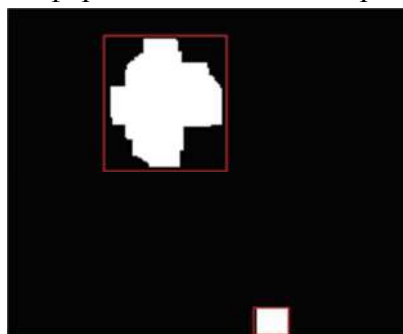


Рис. 8. Формування прямокутних контурів об'єктів

Висновок. Запропонований метод успішно справляється зі своїм завданням, а саме виявлення рухомих об'єктів за допомогою нестаціонарної камери. Використання гістограм для виявлення об'єктів дозволило прискорити його роботу – на обробку одного кадру запропонованим методом витрачається часу на 50 % менше у порівнянні зі стандартним методом, що підкреслює його ефективність, особливо у разі використання для обробки відеоданих від БПЛА.

Список використаних джерел

1. *Detection of Moving Objects with Non-Stationary Cameras in 5.8ms: Bringing Motion Detection to your Mobile Device* [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://f4k.dieei.unict.it/proceedings/CVPR12/data/papers/workshops/4990a027.pdf>.
2. *2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6595847/>.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

3. *Moving object detection in unmanned aircraft images* [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://volkansalma.blogspot.com.tr/2015/11/insansz-hava-arac-goruntulerinde.html>.
4. *То, что вы хотели знать про оптический поток, но стеснялись спросить* [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://habrahabr.ru/post/201306>.
5. *Motion detection on uav videos* [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.youtube.com/watch?v=vMnpD-6PtmE>.
6. C4.5: Programs for Machine Learning Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo.
7. *Введение в разработку мультимедийных приложений с использованием библиотек OpenCV и IPP* [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.intuit.ru/studies/courses/10621/1005/lecture/16983?page=2>.
8. *Feature Detection* [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://docs.opencv.org/2.4/doc/tutorials/features2d/feature_detection/feature_detection.html.
9. *Common Interfaces of Descriptor Matchers* [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://docs.opencv.org/2.4/modules/features2d/doc/common_interfaces_of_descriptor_matchers.html.
10. *Geometric Image Transformations* [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://docs.opencv.org/2.4/modules/imgproc/doc/geometric_transformations.html.
11. *Operations on Arrays* [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://docs.opencv.org/2.4/modules/core/doc/operations_on_arrays.html.
12. *Miscellaneous Image Transformations* [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://docs.opencv.org/2.4/modules/imgproc/doc/miscellaneous_transformations.html?highlight=threshold#threshold.
13. *Image Filtering* [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://docs.opencv.org/2.4/modules/imgproc/doc/filtering.html?highlight=dilate#cv2.dilate>.
14. *Бинаризация изображений: алгоритм Брэдли* [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://habrahabr.ru/post/278435>.
15. *Morphological Transformations* [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://docs.opencv.org/3.0-beta/doc/py_tutorials/py_imgproc/py_morphological_ops/py_morphological_ops.html.

References

1. *Detection of Moving Objects with Non-Stationary Cameras in 5.8ms: Bringing Motion Detection to your Mobile Device*. Retrieved from <http://f4k.dieei.unict.it/proceedings/CVPR12/data/papers/workshops/4990a027.pdf>.
2. *2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*. Retrieved from <http://ieeexplore.ieee.org/document/6595847>.
3. *Moving object detection in unmanned aircraft images*. Retrieved from <http://volkansalma.blogspot.com.tr/2015/11/insansz-hava-arac-goruntulerinde.html>.
4. *To, что вы хотели знать про оптический поток, но стеснялись спросить [What you wanted to know about the optical flow, but were shy to ask]*. Retrieved from <https://habrahabr.ru/post/201406>.
5. *Motion detection on uav videos*. Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v=vMnpD-6PtmE>.
6. C4.5: Programs for Machine Learning Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo.
7. *Vvedenie v razrabotku multimediyinyh prilozheniy s ispolzovaniem bibliotek OpenCV i IPP [Introduction to the development of multimedia applications using libraries]*. Retrieved from <http://www.intuit.ru/studies/courses/10621/1005/lecture/16983?page=2/>.
8. *Feature Detection*. Retrieved from http://docs.opencv.org/2.4/doc/tutorials/features2d/feature_detection/feature_detection.html.
9. *Common Interfaces of Descriptor Matchers*. Retrieved from http://docs.opencv.org/2.4/modules/features2d/doc/common_interfaces_of_descriptor_matchers.html.
10. *Geometric Image Transformations*. Retrieved from http://docs.opencv.org/2.4/modules/imgproc/doc/geometric_transformations.html.
11. *Operations on Arrays*. Retrieved from http://docs.opencv.org/2.4/modules/core/doc/operations_on_arrays.html.
12. *Miscellaneous Image Transformations*. Retrieved from http://docs.opencv.org/2.4/modules/imgproc/doc/miscellaneous_transformations.html?highlight=threshold#threshold.

13. *Image Filtering*. Retrieved from <http://docs.opencv.org/2.4/modules/imgproc/doc/filtering.html?highlight=dilate#cv2.dilate>.

14. *Binarizatsiya izobrazheniy: algoritm Bredli [Binarization of images: the Bradley algorithm]* (2016). Retrieved from <https://habrahabr.ru/post/278435>.

15. *Morphological Transformations*. Retrieved from https://docs.opencv.org/3.0-beta/doc/py_tutorials/py_imgproc/py_morphological_ops/py_morphological_ops.html.

UDC 004.4

Volodymyr Kazymyr, Denis Yurchenko

THE METHOD OF MOTION DETECTION FOR MOBILE CAMERAS OR FOR CAMERAS WITH PTZ FUNCTION

Urgency of the research. Modern trends in the development of video surveillance systems focus on the creation of automatic functional complexes with intelligence. Detection of the areas of motion in a frame is a fundamental problem of these systems. Therefore, there is a need to create software that detects areas of motion in the frame.

Target setting. By developing such systems, developers have to solve the contradiction between the computational complexity of processing algorithms, the quality of images created and the hardware capabilities of modern computing. The multidimensional nature of video information (coordinates, color) imposes significant limitations on the speed and quality of its processing. In addition, motion detection on mobile cameras is complicated due to constant background change.

Actual scientific researches and issues analysis. The latest open access publications, including optical streaming technology and the SURF algorithm, were considered.

Uninvestigated parts of general matters defining. Increasing the speed of existing methods of detecting traffic zones on the video of low quality.

The research objective. Improvement of the method of detecting motion using non-static cameras or cameras with PTZ function in the direction of accelerating its operation.

The statement of basic materials. Detection zone of motion in the scene comes with standard libraries openCV. To determine the zone of motion, a pair of sequential frames are used: the previous one - the object, the current one - the scene. Forming contours of objects occurs by constructing the corresponding histograms.

Conclusions. The proposed method allows twice accelerating the process of detecting traffic zones by the given video of non-static cameras.

Key words: motion detection; non-static camera; openCV; histogram.

Fig.: 8. Bibl.: 15.

УДК 004.4

Владимир Казимир, Денис Юрченко

МЕТОД ДЕТЕКЦИИ ДВИЖЕНИЯ ДЛЯ НЕСТАТИЧНЫХ КАМЕР ИЛИ ДЛЯ КАМЕР С ФУНКЦИЕЙ PTZ

В статье описан усовершенствованный метод надежного и быстрого обнаружения движения объектов по данным видеоряда. Для первичной обработки изображений предлагается использовать стандартные библиотеки *opencv*, встроенные в программное обеспечение динамических систем видеонаблюдения. Поиск контуров объектов осуществляется путем построения гистограмм контрастных изображений выделенных областей движения.

Ключевые слова: обнаружения движения; нестатические камеры; *opencv*; гистограмма.

Рис.: 8. Библ.: 15.

Казимир Володимир Вікторович – доктор технічних наук, професор, проректор з наукової роботи, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Казимир Владимир Викторович – доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Kazymyr Volodymyr – Doctor of Technical Sciences, professor, Vice-Rector for scientific work, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: vvkazymyr@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8163-1119>

ResearcherID: Q-2925-2016

Юрченко Денис Юрійович – аспірант, асистент кафедри ІКС, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Юрченко Денис Юрьевич – аспирант, ассистент кафедры ИКС, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Yurchenko Denis – Phd student, assistant of Department of IKS, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

Ruslan Zarovsky, Andrii Radchenko

ARCHITECTURE OF SOFTWARE FOR VIDEO SURVEILLANCE SYSTEMS WITH DIFFERENT TYPES OF CAMERAS

Urgency of the research. Usually, the software that performs NVR functions on a normal PC is suitable only for certain types of cameras. Accordingly, the use of cameras from many manufacturers in the video surveillance system leads to use a large number of different software. This creates inconvenience to the user because for performing necessary functions (viewing, recording video, etc.) on different cameras it is necessary to run various software. Therefore, there is a need of creation software that would support different types of cameras.

Target setting. Non-optimal implementation of software architecture that supports devices of different manufacturers can lead to difficulty in understanding of source code, non-optimal use of network resources and so on. Thus, there is a problem of proper construction of the software architecture in order to eliminate these problems.

Actual scientific researches and issues analysis. The analysis of publications allows revealing the general tendencies of building video surveillance architectures, among which decreasing networking and storage costs. Reduction of network costs implies the use of special measures to minimize the total size of transmitted media data. This can be achieved through a video surveillance system architecture that eliminates the retransmission of the same information and in general minimizes the exchange of information in the IP network of video surveillance. So, in publications describes the architecture of a video surveillance system, but not software architecture for such systems.

Uninvestigated parts of general matters defining. Now there is no open software architecture that support the IP cameras from different manufactures.

The research objective. The objective of this paper is to describe the architecture of software that supports IP cameras and NVRs from leading Chinese manufacturers, such as Hikvision, Dahua, UniView, Aevision, as well as devices that operate on universal protocol Onvif.

The statement of basic materials. The architecture that works with different types of cameras should be designed accordingly. First of all it is necessary to build architecture at the level of logical components and then at the level of functional components. Software architecture at the level of logical components consists of Screen, VideoPlayer, VideoSchedule, CameraView, ModulesContainer and VideoSender components. Software architecture at the level of functional components consists of Screen, VideoPlayer, VideoSchedule, CameraView, ModulesContainer, VideoSender, FrameSourcer, FrameSaviour and Logger components.

Conclusions. The proposed architecture allows using many types of cameras in single software, which is much more convenient than using many programs for many types of cameras. It minimize network load by using only one video stream from one channel, allows to connect all the channels of devices of supported manufacturers and to use all necessary functions for video surveillance systems of supported IP cameras. It does not lead to the redundancy of the source code or its great complexity. Thus, software is not difficult to maintain and add new functionality.

Key words: software; software architecture; video surveillance; IP camera.

Fig.: 3. Bibl.: 14.

Introduction. In the modern world, video surveillance systems are becoming widespread, the role and importance of which is difficult to overestimate. Such systems consist of a set of hardware and software that include:

- IP surveillance cameras [1];
- video display devices (monitors, video walls and etc.);
- video recorders (DVR, NVR [2]) and/or intelligent software that performs a similar function as NVR, but on a normal PC.

Usually, the software that performs NVR functions on a normal PC is suitable only for certain types of cameras. Accordingly, the use of cameras from many manufacturers in the video surveillance system leads to use a large number of different software. This creates inconvenience to the user because for performing necessary functions (viewing, recording video, etc.) on different cameras it is necessary to run various software. Therefore, there is a need of creation software that would support different types of cameras.

Non-optimal implementation of architecture of software that supports devices of different manufacturers can lead to:

- difficulty in understanding of source code, that lead to a high cost of its modification and addition of new functions;
- redundancy of source code;
- non-optimal use of network resources, that is expressed in the receipt of multiple video streams from a single video channel;

- non-optimal use of PC resources, that is expressed in the multiple decoding of one video stream or multiple decoding of video streams from one channel;
- limitation of video channels count that can be connected from NVRs by software.

Thus, there is a problem of proper construction of the software architecture in order to eliminate the above-mentioned problems.

Analysis of recent research and publications. There are too few research and publications on this matter that are in open access since the development of such software is carried out by a large corporate sector (which regard information about it's software as a trade secret) or small companies (which do not spend time on the development of documentation and its publication).

In [3] describes the architectures of video surveillance systems, compares them, points out advantages and disadvantages. Also mentioned the software functions that reduce the load on computers and improve the functioning of video surveillance systems: cluster organization of servers, restart in case of failures, support of various video streams, using hardware decoders, support multitasking, optimizing video streams by using a computer as a gateway.

In [4] the reasons of wasting network resources in video surveillance systems are named, as well as software functions that reduce the network load and reduce the total cost of video surveillance systems. Among such functions it is possible to select the following: the use of multicast video streaming instead of unicast, the receipt of video streams of different resolutions, the automatic determination of the quality of the desired video stream and the caching of video stream in the event of its transfer from the server.

In [5] five different system architectures of video surveillance are described, its advantages and shortcomings are mentioned.

In [6] describes the design and optimization of a wireless video surveillance system, specifies the criteria for selecting cameras, hardware and software for such a system, describes the architecture of the wireless surveillance system, as an example shows the physical location of the cameras, describes the software that was implemented for such a system, describes experiments to determine the parameters of cameras for optimizing the load on the network, hardware and software.

In [7] describes designing, development, integration and delivery of Intel technology-based digital security and surveillance systems. Technical information and design support including recommended system components, technical requirements and specifications is mentioned.

The analysis of publications allows revealing the general tendencies, among which: decreasing networking and storage costs of surveillance system. Reduction of network costs implies the use of special measures to minimize the total size of transmitted media data. This can be achieved through a video surveillance system architecture that eliminates the retransmission of the same information and in general minimizes the exchange of information in the IP network of video surveillance.

So, in publications describes the architecture of a video surveillance system, but not software architecture for such systems.

The goal of the article. The objective of this paper is to describe the architecture of software that supports IP cameras and NVRs from leading Chinese manufacturers, such as Hikvision [8], Dahua [9], UniView [10], Aevision [11], as well as devices that operate on universal protocol Onvif [12].

Basic concepts for the building of software architecture. The software for video surveillance systems must provide the following functions:

- simultaneous viewing many video streams from cameras or NVRs in real time;
- obtaining data of various events from devices (motion detection, alarm, etc);
- displaying events data;
- recording a video stream on a hard drive on the user's request;
- recording a video stream on a schedule and events like motion detection and alarm;
- saving images from a video stream;
- playback saved video streams;
- transferring a video stream and event's data from connected devices to some client's software.

Software architecture must also support intelligent modules, such as license plate recognition module, face detection module, persons counting module, module for counting abandoned objects, etc for solving specific practical problems without modification of software source code.

Each manufacturer provides unique libraries, which allow interacting with their devices. These libraries include a set of functions that can be used by video surveillance system software. The exception is *onvif* protocol, which is the result of an international organization of Open Network Video Interface Forum (ONVIF) work for creating a standardized protocol for interaction with devices of different manufacturers. For interaction with devices that use this protocol, the library similar to the libraries of manufacturers must be developed.

The main functions provided by the manufacturer’s libraries, which are needed for creating intelligent surveillance system software with the requirements described above, are the following:

- authorization/deauthorization on the device;
- receiving and displaying a video stream;
- receiving a video stream without displaying it;
- recording a video stream;
- playback of stored video stream;
- saving images from a video stream;
- receiving data (encoded frames) from a video stream through the callback function;
- displaying received data of a video stream from the corresponding callback function;
- obtaining events from devices via callback functions;
- obtaining decoded frames via callback functions;
- obtaining individual frames from video stream;
- displaying data on a top of a video stream (for recognition of license plate’s, highlighting objects, etc).

Therefore, all the functions, except the sending of video stream, are present in the libraries provided by manufacturers.

The total sequence of actions for interacting with devices taking into account a predetermined functional is as follows (see Fig. 1, optional actions are shown in dotted lines):

- authorization on the device;
- event’s data retrieving if necessary;
- start receiving video stream;
- performing appropriate action with a video stream (display it, save images, recording to hard drive);
- stop receiving video stream;
- logout on the device.

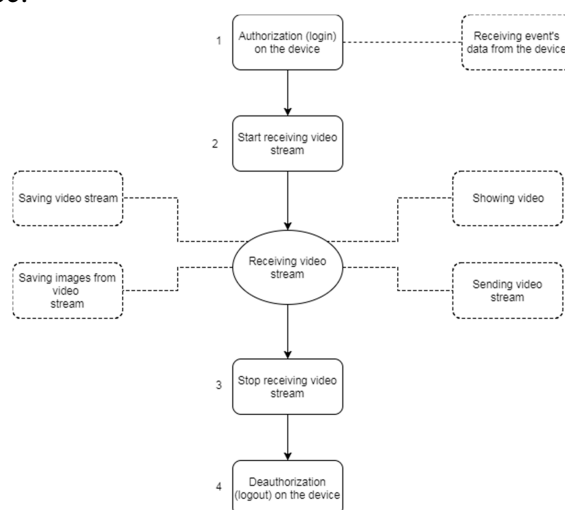


Fig 1. The sequence of actions for interaction with devices

Each device in a video surveillance system has a one (IP camera) or more (NVR) video channels. Each video channel has at least two video streams – primary and secondary. The primary video stream has a high resolution and excellent picture quality. The secondary one – low resolution and worse, compared to the primary stream, picture quality.

Logical and functional components. Now, software is rarely developed from scratch. As a rule, for performing necessary functions existing libraries are used in order to reduce development time and the final cost of the application.

Typically, the libraries that are used in the application do not affect its architecture, however in this case the researches showed that the libraries of the manufactures work differently, and that it is impossible to construct effective architecture of the software without regard to their work.

Therefore, the development of software architecture for video surveillance systems consists of two stages. At the first stage, the so-called logical components of the architecture are allocated, which do not take into account the work of manufacturer's libraries, with the goal of splitting the application into separate modules that perform necessary functions. At the second stage, the so-called functional components are allocated, which take into account the work of manufacturer's libraries and form the final architecture of the application.

The software architecture at the level of logical components.

In Windows to display a video stream from specific device it is needed to pass the window object handle to a corresponding library. Since there must be the ability to display up to 64 video streams and the ability to display events from corresponding IP cameras, one of the components of the architecture must be a component "Screen" that will show the video stream and information about events. In addition, this component should be responsible for user interaction with the software (start recording, stop recording, save the image from the video stream, etc).

One of the components of the architecture must be a component that is responsible for the recording of video streams according to a schedule or event. This component must work on separate thread for each camera, which has a set up schedule. These threads will enable or disable recording, depending on the schedule settings, the current time and events on the respective device. The component with the described functionality will be called "VideoSchedule".

To transfer the video stream to other software it is necessary to allocate a separate component. As "VideoSchedule", this component must work on a separate thread for each camera, from which it is necessary to transfer the video stream. This component will be called "VideoSender".

For the functioning of intelligent modules, a component which will upload and store them in a special list is required. This component will be called "ModulesContainer".

The above components should not interact directly with manufacturer's libraries for performing the appropriate actions, since it will lead to the redundant source code. To eliminate this redundancy the architectural pattern "mediator" can be used [13]. The essence of such pattern is in the introduction of an additional component, which will be located between components and libraries of manufacturers. Such component will be called "CameraView". This component must call the appropriate library function to perform a certain action. For example, to display a video stream the authorization function and video receive function with window handle as parameter must be invoked, for storing video – the authorization function, the function of receiving a video stream and the function of preserving a relevant video stream. Also, this component should interact with "ModulesContainer" to create module's objects for each video stream, and should call necessary functions in order to receive the video frame and draw data on the displayed stream by module's objects. Actually "CameraView" should encapsulate various realizations of SDK's functions for obtaining the required data for the functioning of the modules.

The last necessary logical component is the component responsible for playing of stored video streams. It will called "VideoPlayer". To display the stored video on the screen, it can be used the "Screen" component. The interaction between "VideoPlayer" and libraries will

not lead to the redundancy of the source code because except this one there are no more components that interact with the functions for playing stored video streams.

The software architecture at the level of the logical components shows in Fig. 2. The arrows show the direction of the interaction between the individual components. The arrow between the “manufacturer’s libraries” and “VideoSender” means data transfer to the component by the libraries via calling installed callback functions.

Shown in Figure 2 architecture has certain drawbacks.

Firstly, library functions of all manufacturers are not able to parallelize the incoming video stream from the device to reduce network load. Because of this, the number of video streams of one channel retrieving simultaneously from the device can reach four: one stream for playing and for recording on the user demand, two video streams for event recording with prerecord and one for sending a video stream to other software. Implementation of prerecording requires two video streams because libraries do not support circumscision of the stored video stream. That is why prerecording with a one video stream becomes impossible. Four video streams from a device quadruple the load on the network. When using a primary video stream with a bit rate of 4 Mbit/s it would be 12 Mbit/s on the network. When at least 10 cameras are connected, the software work will require a gigabit network. Moreover, each intelligent module requires a separate video stream. So, if software, for example, have 5 modules, then a video stream with a bit rate of 4 Mbit/s would require at least 20 Mbit/s network speed. Thus, such architecture creates a large exceed load on the network.

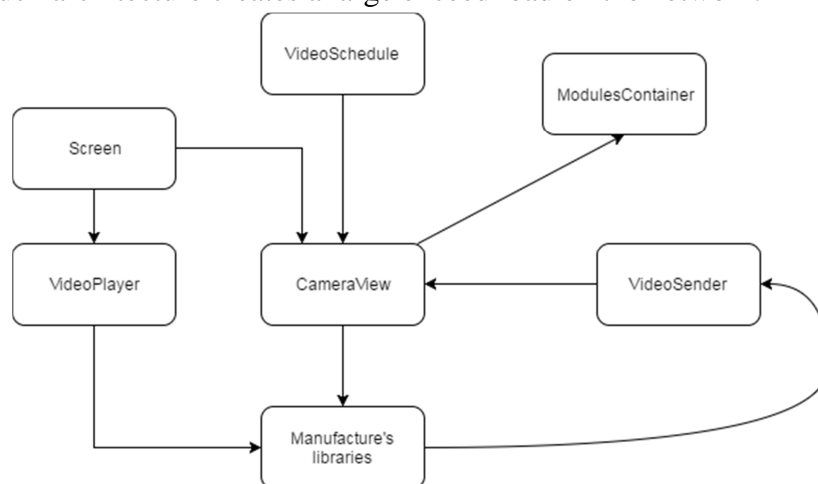


Fig. 2. The software architecture at the level of the logical components

Secondly, it was found that although the library’s API is similar, its functions performing differently. For example, Dahua manufacturer libraries require authorization every time when it is necessary to receive a video stream. Because of this, it is impossible to login on the device once and receive video streams from different device channels. Libraries of other manufacturers do not have the authorization limit and it allows receiving a video stream from multiple channels with one authorization. It was also found that Aevision’s devices do not support more than 16 per device authorizations from one IP address. This means that if implement the architecture that is shown in Figure 2, the maximum number of channels from which a video stream can be received from Aevision’s device are 16. This limits the use of such software architecture with Aevision’s devices.

The software architecture at the level of the functional components. For the above reasons it is necessary to create architecture at the level of functional component. Such architecture must allow:

- use one video stream for any purpose from a single video channel;
- receive video streams from all device channels;
- simplify the implementation of “CameraView” component.

Any interaction with device starts with the authorization process and ends with the process of unauthorization. Since manufacturer's libraries implement the authorization process differently, it is necessary to encapsulate it from the rest of the architectures to ensure its extensibility and to obtain all the streams available on the device. The component responsible for the authorization encapsulation will be called "Logginer". It must return the handle of the appropriate authorization on the device. Thus, for Dahua devices this component, every time when referring to it, must login to the device and return the new handle of authorization. For other types of devices it login on specific device only once and store the appropriate handle which is available at any time.

After authorization a lot of functions for work with device are available, including setting of callback functions for receiving data of events from the devices. In fact, it is needed only once to set such function for appropriate device for receiving all events. From the fact that for all vendors except Dahua authorization should be carried out only once and that the callback function for receiving events must be set only once follows that the easiest way to implement the receipt of all events is to implement callback functions in the component that is responsible for the authorization on device. Implementation of an additional component for obtaining information about the events will lead to the needing of implementation the interaction with the "Logginer" that would complicate the system architecture.

One of the requirements of the architecture is the requirement that only one stream per channel must be receiving from the device in order to avoid an excessive load on the network. For this, it is necessary to create a component – the source of the video data that will receive the video stream's data and transmit it to all the necessary components of the software. This component will be called "FrameSourcer". Components that require a video stream from a particular device must "subscribe" to the appropriate video stream and pass to this component the callback function that will be called every time when new data from the respective device has arrive. If a component is "signed" on the video stream, which still does not come from the device, then "FrameSourcer" asks "Logginer" component for authorization descriptor, calls the specific library function for receiving a video stream and passes to it its own callback function that will be called every time when library gets a new bit of data. This "FrameSources's" callback function must call the callback functions of those components that have subscribed to the corresponding video stream. Also it makes sense to pass to this component the relevant callback functions which are intended to receive events from the device. "FrameSources" should not work with these functions but must pass it to "Logginer" component. This will lead to encapsulation of "Logginer" component and its use only by "FrameSourcer". Thus, other components of the architecture will not be aware of the presence of any component for obtaining data from a device except "FrameSourcer". This will facilitate the interaction of various components of the architecture.

Receiving the video stream by only one component and it's paralleling lead to the disappearance of excessive load on the network. However, this solution has a disadvantage. While the data is being processed by one function, the others are waiting for completion of it. Therefore, if the callback function of any component will process income data for too long then the software will freeze. Because of this, all the callback functions should be implemented so that the data are processed as quickly as possible.

For recording a video stream to the file the library's functions can be used. However, in such case the device starts transmit the video stream over a network regardless of whether it already comes from the device or not. To eliminate redundancy of video streams the "FrameSourcer" component must be used. It was found that the saved video stream via the library functions of such manufacturers as Dahua, Hikvision and Aevisision is the data which come in a callback function that receives the video stream. As described above, this function is set in the component "FrameSourcer" and calls all of the functions that have been "signed" for the corresponding video

stream. Therefore, for saving the video stream of these manufacturers it is necessary to save the data that was transferred by “FrameSourcer” to the corresponding callback function.

Since the video stream saving is a separate feature, it makes sense to create a separate component for it. This component will be called “FrameSaviour”. The objectives of this component are obtaining data from “FrameSourcer” and saving it to a file. In addition, with the objective of reducing the load on the hard drive of this component, it makes sense to use an intermediate buffer which must store data before writing it on the disk. The size of this buffer must be larger than the size of the data coming, but not very large to avoid ram over usage (because all 64 channels can be recorded). It was found that the maximum size of the incoming data at a resolution 2048x1536 is about 200 kb (coded I-Frame [14]). So the size of the buffer has been selected 2 MB taking into account bigger bitrate and bigger resolution. In the worst case – when recording 64 video streams at the user’s request and 64-event streams with prerecord – it will use 384 MB of RAM.

Because of “FrameSourcer” the functionality of the “CameraView” component must be changed. Now, this component should not access the libraries directly but must access a “FrameSourcer” component for receiving video stream in order to eliminate the excess load on the network. As for playing the received video data, the manufacture’s libraries have functions for showing it. In addition, theirs should be used. In addition, this component should also be responsible for saving the image in a separate file from the video stream. Besides, it should take the frames through the setting callback functions and transfer theirs into modules for further processing.

Received events from devices must be captured and processed. Since “FrameSourcer” component encapsulates “Logginer” component, which actually received events from devices and send it to other components, it is necessary refer to “FrameSourcer” component for obtaining information about events.

Is this architecture there is no sense to implement the interaction between the “VideoSender” components and “CameraView” because in such case “CameraView” will act as an intermediary and will not do any necessary functions. So, it makes sense to implement the interaction between “VideoSender” component and “FrameSourcer” component directly.

The software architecture at the level of the functional components are shown in Figure 3.

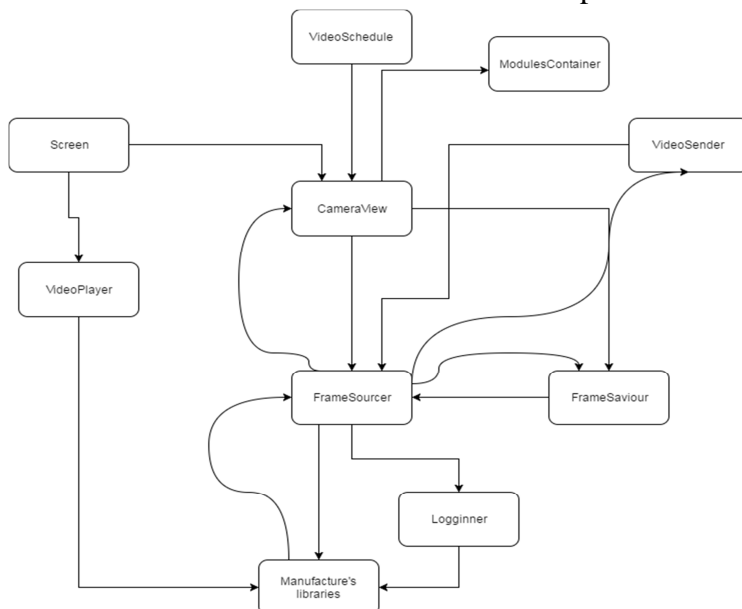


Fig. 3. The software architecture at the level of the functional components

Conclusions. The proposed architecture allows using many types of cameras in single software, which is much more convenient than using many programs for many types of cameras. It minimize network load by using only one video stream from one channel, allows to connect all

the channels of devices of supported manufacturers and to use all necessary functions for video surveillance systems of supported IP cameras. It does not lead to the redundancy of the source code or its great complexity. Thus, software is not difficult to maintain and add new functionality.

References

1. *What is IP camera?* Retrieved from <http://www.proximasip.ru/ip-camera.html>.
2. *What is NVR?* Retrieved from <http://inprog.kz/news/что-такое-nvr/>.
3. *Some aspects of the design of IP-surveillance systems.* Retrieved from <http://www.algorithm.org/arch/arch.php?id=73&a=1716>.
4. *Decreasing Networking and Storage Costs of Your IP Video Surveillance System.* Retrieved from <https://www.securitymagazine.com/ext/resources/whitepapers/Genetec-Bandwidth-Management-White-Paper.pdf>.
5. *Architecture of video surveillance systems based on IP networks.* Retrieved from http://www.dipolnet.com/architecture_of_video_surveillance_systems_based_on_ip_networks_bib701.htm.
6. *Design and Optimization of the VideoWeb Wireless Camera Network.* Retrieved from <https://jivp-eurasiipjournals.springeropen.com/articles/10.1155/2010/865803>.
7. *Building Digital Security & Surveillance Systems Based on Intel Technology.* Retrieved from <https://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/presentation/dss-systems-intel-technology-guide.pdf>.
8. *HikVision.* Retrieved from <http://www.hikvision.com>.
9. *Dahua.* Retrieved from <http://www.dahuasecurity.com>.
10. *Uniview.* Retrieved from <http://en.uniview.com>.
11. *Aevison.* Retrieved from <http://www.aevison.com.cn>.
12. *Onvif protocol.* Retrieved from <http://www.onvif.org>.
13. *Pattern "Mediator".* Retrieved from <http://cpp-reference.ru/patterns/behavioral-patterns/mediator>.
14. *Overview of the H.264/AVC Video Coding Standard.* Retrieved from http://ip.hhi.de/imagecom_G1/assets/pdfs/csvt_overview_0305.pdf.

УДК 004.4

Руслан Заровський, Андрій Радченко

АРХІТЕКТУРА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ СИСТЕМ ВІДЕОСПОСТЕРЕЖЕННЯ З РІЗНИМИ ТИПАМИ КАМЕР

Актуальність теми дослідження. Зазвичай програмне забезпечення, яке виконує функції NVR на звичайному ПК, підходить тільки для певних типів камер. Відповідно, використання камер багатьох виробників у системі відеоспостереження призводить до використання великої кількості різних програм. Це створює незручності для користувача, тому що для виконання необхідних функцій (перегляду, запису відео та ін.) на різних камерах необхідно запускати різне програмне забезпечення. Тому існує потреба створення програмного забезпечення, яке підтримує різні типи камер.

Постановка проблеми. Неоптимальна реалізація архітектури програмного забезпечення, яке підтримує пристрої різних виробників, може призвести до ускладнення розуміння вихідного коду, не оптимального використання мережевих ресурсів тощо. Таким чином, існує проблема побудови відповідної архітектури програмного забезпечення для усунення цих проблем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз публікацій дозволив виявити загальні тенденції при побудові архітектур систем відеоспостереження, серед яких зменшення витрат на створення мережі та зберігання даних. Зменшення мережевих витрат передбачає застосування спеціальних заходів для мінімізації загального обсягу переданих мультимедійних даних. Це може бути досягнуто завдяки архітектурі системи відеоспостереження, яка усуває повторну передачу тієї ж інформації і загалом мінімізує обмін інформацією в мережі. У цілому в публікаціях описуються архітектури систем відеоспостереження, але не описується архітектура програмного забезпечення для таких систем.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Нині немає відкритої архітектури програмного забезпечення, яка підтримує камери різних виробників.

Постановка завдання. Мета цієї роботи описати архітектуру програмного забезпечення, що підтримує сумісність з камерами та NVR від провідних китайських виробників, таких як Hikvision, Dahua, UniView, Aevison, а також пристроями, що працюють за універсальним протоколом Onvif.

Виклад основного матеріалу. Архітектура, яка працює з різними типами камер, повинна бути відповідно розроблена. Насамперед необхідно побудувати архітектуру на рівні логічних компонентів, а потім на рівні функціональних компонентів. Архітектура програмного забезпечення на рівні логічних компонентів складається з компонентів Screen, VideoPlayer, VideoSchedule, CameraView, ModulesContainer та VideoSender. Архітектура програмного забезпечення на рівні функціональних компонентів складається з компонентів Screen, VideoPlayer, VideoSchedule, CameraView, ModulesContainer, VideoSender, FrameSourcer, FrameSaviour та Logger.

Висновки. Запропонована архітектура дозволяє використовувати багато типів камер в одному програмному забезпеченні, що набагато зручніше, ніж використання багатьох програм для багатьох типів камер. Така архітектура мінімізує завантаження мережі завдяки використанню лише одного відеопотоку з одного каналу, дозволяє

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

підключати всі канали пристроїв підтримуваних виробників і використовувати всі необхідні функції для систем відеоспостереження підтримуваних IP-камер. Вона не створює надмірності вихідного коду або його великої складності. Таким чином, програмне забезпечення не важко підтримувати і додавати нові функціональні можливості.

Ключові слова: програмне забезпечення; архітектура ПО; відеоспостереження; IP камера.

Рис.: 3. Бібл.: 14.

УДК 004.4

Руслан Заровский, Андрей Радченко

АРХИТЕКТУРА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ С РАЗНЫМИ ТИПАМИ КАМЕР

В статье описана универсальная архитектура программного обеспечения для систем видеонаблюдения, в которых используются IP камеры ведущих производителей и которая максимально раскрывает функционал IP камер при минимизации нагрузки на сетевую инфраструктуру. Данная архитектура рассмотрена как на уровне логических, так и функциональных компонент. Описаны ограничения относительно программных библиотек, которые поставляются с IP камерами, и процесс взаимодействия с ними в ходе реализации предложенной архитектуры.

Ключевые слова: программное обеспечение; архитектура ПО; видеонаблюдение; IP камера.

Рис.: 3. Библ.: 14.

Zarovsky Ruslan – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

Заровський Руслан Владиславович – кандидат технічних наук, доцент, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Zarovskiy Ruslan Vladislavovich – кандидат технических наук, доцент, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

E-mail: rolandzar@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5598-1879>

ResearcherID: R-2937-2016

Radchenko Andrii Oleksiyovich – PhD student, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko Str., Chernihiv, 14027, Ukraine).

Радченко Андрій Олексійович – аспірант, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Радченко Андрей Алексеевич – аспирант, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

E-mail: teor292@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5019-8364>

ResearcherID: R-2879-2016

UDC 004.8

DOI: 10.25140/2411-5363-2017-4(10)-110-115

*Volodymyr Fomenko, Heorhii Loutskii, Pavlo Rehida, Artem Volokyta***THEMATIC TEXTS GENERATION ISSUES BASED ON RECURRENT NEURAL NETWORKS AND WORD2VEC**

Urgency of the research. The problem of natural language generation is becoming more actual in recent days due to the growing demand for automated generation of object descriptions, article excerpts, news summaries, passages in microblogging services, response messages used by chat bots, etc. Thus, the problem is to generate a text given the context. This paper deals with the problem of generating text specifically in Russian since each language group requires an individual approach.

Target setting. There is no method to generate thematic texts automatically, especially in Russian language, that gives well-interpreted and suitable results.

Actual scientific researches and issues analysis. In the past few years, more articles have been devoted to the topic of generating thematic texts, due to the emergence of new methods for sequences generation using recurrent neural networks. However, approaches related specifically to thematic texts generations, in Russian are insufficiently explored.

Uninvestigated parts of general matters defining. This article focuses on a study and analysis of the proposed approach for generating Russian-language thematic texts. It is specialized in one language group and specific approach in terms of model selection.

The research objective. Create model trained on a group of short passages that identifies a context of a text and as output generates a well-interpreted natural text in Russian.

The statement of basic materials. The analysis of the joint use of the RNN and word2vec models is conducted. Approaches for the transformation of the input text, analysis of sentences structure, prediction of subsequent parts of speech, prediction of following words and the general model structures are proposed. The results of the models are appeared to be well interpreted and meaningful.

Conclusions. The interpretability, structure and parameters of the models that showed the best results for the generation were analyzed. The approach proved to be good for generating thematic texts. The results and analysis of the subsequent steps are given.

Key words: text generation; recurrent neural networks; long short-term memory; word2vec.

Fig.: 3. Tabl.: 1. Bibl.: 13.

Target setting. Due to the growing demand for automated generation of object descriptions, article excerpts, news summaries, etc., generation of thematic texts has become an actual topic in the recent years. At the same time, the problem of generating thematic texts with the help of recurrent neural networks [1] is still little understood, moreover, in the context of the Russian language. Because of that, a new approach to the generation of Russian-language thematic texts with the use of recurrent neural networks in combination with word2vec has been offered.

Actual scientific researches and issues analysis. In connection to the invention of new methods and approaches in the field of artificial intelligence, the topic of text generation has become more studied in recent years. In particular, in [2] the generation of English texts on a general topic on a basis of recurrent neural networks is studied, in [3] the application of recurrent neural networks for the generation of an English-language image descriptions is investigated, and in [4] the application of recurrent neural networks for constructing a model capable of an English-speaking dialogue system with the user is developed.

Uninvestigated parts of general matters defining. Despite a considerable number of works devoted to the application of recurrent neural networks for the text generation, the problem of thematic text generation remains little investigated. Moreover, in connection with the fact that models behave differently for each language group, it is necessary to conduct a separate study and a separate selection of parameters for the each language. Therefore, this work focuses on the generation of thematic texts in Russian.

The research objective. The purpose of this paper is to investigate the application of the recurrent neural networks in combination with word2vec to generate thematic texts specifically for the Russian language. As a solution, the article will focus on creating a model that generates Russian-language text on a given topic using the above-mentioned structures and analyzing its interpretability and parameters.

The statement of basic materials. The standard formulation of the task of pseudo-random text generation occurs in two forms. In the first form, the goal is to predict the next character of the text given N previous characters, where N usually varies from 50 to 1000 [5]. An alternative is to predict the next word given N previous words. Here, N usually varies

from 5 to 20 [5]. The approach where the next character of the text is being predicted has a big advantage in terms of a small number of classes of elements: the size of the alphabet and separating symbols. The other approach that learns words sequences has significantly more variants, depending on the size of the vocabulary of training data.

In this article we focus on developing model that deals with word sequences to extract more data from every word by using word2vec transformations.

Basic definitions. A recurrent neural network (RNN) [1, 6] is a type of artificial neural network that involves directed cycles in memory. The input to such networks is a sequential signal. Each element of the sequence is successively transmitted to the same neurons, which return their prediction to themselves together with its next element until the sequence ends.

LSTM [7] is a type of Recurrent Neural Network that has a complex dynamics and makes it easy to "remember" information for an extended number of timestamps. The "long-term" memory is stored in the memory cell vector. Despite the fact that many LSTM architectures differ in their connection structure and activation functions, all LSTM architectures have explicit memory cells for storing information for long periods. LSTM can decide to overwrite the memory location, load it, or save it for the next time step. The architecture demonstrated itself better than RNN in a number of tasks [8, 9, 10].

To predict the next element in a sequence, specifically, the next word in the sentence, the Generative LSTM is used. Having the sequence of input vectors (x_1, \dots, x_T) , the model uses the sequence of its output vectors (o_1, \dots, o_T) , to have a sequence of predictable distributions $P(x_{t+1}|x_{\leq t}) = \text{softmax}(o_t)$, where the distribution of softmax function is given by:

$$P(\text{softmax}(o_t) = j) = \frac{\exp(o_t^{(j)})}{\sum_k \exp(o_t^{(k)})}, \quad (1)$$

where o_t is the output vector of the model.

The goal of the generative model is to maximize the total logarithm of the probability of the training sequence. Even considering the fact that the latent elements of the network are deterministic, our choice of network prediction will be stochastic, because the states of its output elements define the conditional distribution $P(x_{t+1}|x_{\leq t}) = \text{softmax}(o_t)$.

Word2vec [11] is a technology comprised of models used to convert words to word embeddings. These models are two-layer neural networks that processes text. Word2vec input is a text corpus and its output is a set of vectors: feature vectors for words in that corpus. The purpose and usefulness of Word2vec is to group the vectors of similar words together in vector-space. Word2vec creates vectors that are distributed numerical representations of word features, features such as the context of individual words.

General model structure. The structure of the model was chosen to predict the sequence of sentences most accurately, while taking into account the correspondence between the parts of speech, punctuation marks and the topic of the text. Fig. 1 illustrates its main components.

The input of the model is given by a sequence of N last words or punctuation marks. Then the sequence is directed to the input of two models. The first model preprocesses the input sequence and converts the words into the appropriate parts of the speech and punctuation marks into the corresponding codes. The processed sequence is forwarded to the Recurrent Model 1, which outputs a part of the speech of the word to be predicted.

The second model also preprocesses input sequence, converting words and punctuation marks into the corresponding vectors using the word2vec model. Then, the processed sequence is forwarded to the Recurrent Model 2, which outputs the vector representation of the following word.

Model number 3 aggregates the output data of both models and on their basis, as well as using a dictionary of words with the corresponding vector representations of word2vec model, and predicts the next word in the text. At the end, the predicted word is appended to the end of the text.

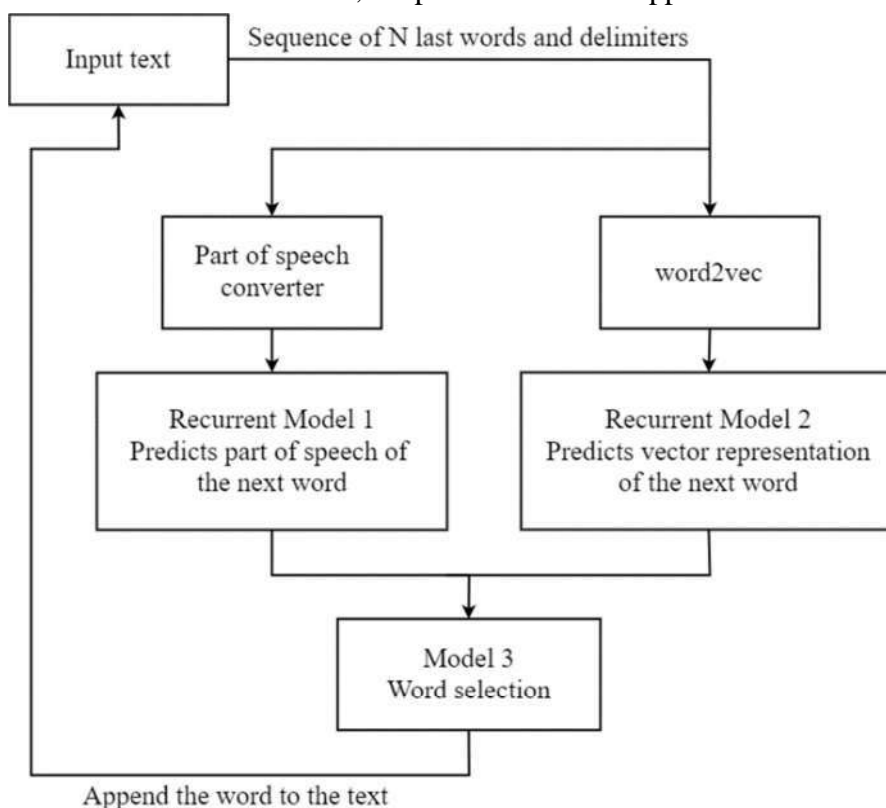


Fig. 1. General model structure

Recurrent models structure. Recurrent Model 1 is responsible for words’ parts of speech prediction and consists of two layers – LSTM and Dense one. As an input, it takes a sequence of N parts of speech and then predicts the part of speech of the following word.

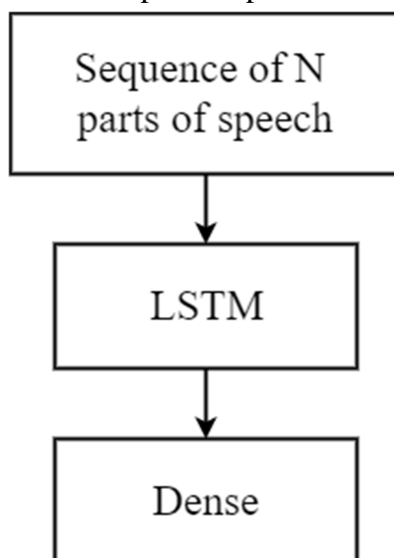


Fig. 2. Structure of the part of speech prediction model

Recurrent Model 2 is responsible for words prediction and consists of 12 layers and is the main part of the general model responsible for words generation.

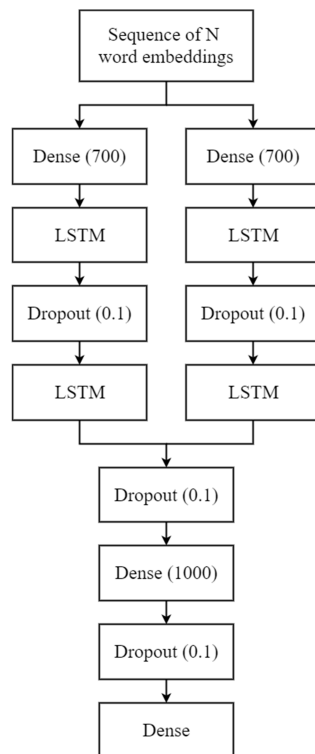


Fig. 3. Structure of the word prediction model

The input in format of N word embeddings firstly goes to two parallel networks, both of which consists of Dense layer, followed by LSTM along with Dropout layers and, lastly, the LSTM layer.

Finally, outputs of two networks are stacked together, pushed to the network of 4 Dense and Dropout layers, and the last Dense layer outputs the word embedding of the following word.

Data. To convert words to the word2vec format, the pre-trained fast Text model [12] was used. The model was trained on an open archive of Russian Wikipedia articles for the 2016 year [13]. To simplify the work of the model, the text content was preliminarily filtered, leaving only Russian-language words and punctuation marks ",", "-", ".", "!", "?". The brackets with the inner content were also removed. To filter out rare words, such as proper names, only those words that occurred at least 20 times were left in the set. All sentences that contained previously defined rare words were removed from the text. Finally, about articles with a total number of 300,000 words were kept in the training set.

Experiments. The training stage consisted of splitting the articles into sequences of N words while marking N + 1 word as the target variable. The experiments were done with N varying from 5 to 20 and the final results presented here were held with the value of 13. Final dataset consisted of 300,000 samples where the word prediction model reached the loss of 0.0195. The part of speech model reached the loss of 1.31417.

The testing stage evaluation was based on observations of generated text. Text generation process consisted of giving the network initial context and iterating the prediction phase until at least 30 words were produced. To give the network the context, first N/2 elements of the sequence were manually set. Table illustrates the produced results.

Table

Examples of generated texts

Given context	Produced results
1	2
экономика страна импорт экспорт налог	на судоходных реках или каналах основные статьи импорта , нефть , автомобили выделяются производительностью . в итоге помимо примечательности возвращения быстроменяющихся соответственных производительностей, выяснилось место соответственного спецучреждения.

1	2
азия китай китайский японский тайвань корея корейский	он учитывал и возможности придворного спектакля в итальянском духе . в последствии сингапурец помимо двадцатишестилетняя время также полу- чает более высокие позиции в списке.
электрический клавиатура программа программиро- вание компьютер	объекты виртуальной реальности должны вести себя аналогично постредакти- рования самонастраивающихся систем представления . техдокументации ком- понуется относительно машинального положения в дальнейшем используется.

Conclusions. The paper has demonstrated the ability of Long Short-Term Memory recurrent neural networks along with word2vec network to generate thematic meaningful Russian-language texts. It can be seen that the use of such combination produces qualitative results. A model that produces interpretable results has been developed and its parameters has been studied.

There are several directions for future work. One is to change the model structure, increasing the number of hidden units and adding more layers. Another is to increase the size of training dataset to give the model more context. These changes will definitely improve the results. It also would be interesting to test the model on different languages.

References

1. Mikolov, T., Karafiát, M., Burget, L., Cernocký, J., & Khudanpur, S. (2010, September). *Recurrent neural network based language model*. In *Interspeech* (Vol. 2, p. 3).
2. Sutskever, I., Martens, J., & Hinton, G. E. (2011). *Generating text with recurrent neural networks*. In *Proceedings of the 28th International Conference on Machine Learning (ICML-11)* (pp. 1017-1024).
3. Vinyals, O., Toshev, A., Bengio, S., & Erhan, D. (2015). *Show and tell: A neural image caption generator*. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 3156-3164).
4. Shang, L., Lu, Z., & Li, H. (2015). *Neural responding machine for short-text conversation*. arXiv preprint arXiv:1503.02364.
5. Graves, A. (2013). *Generating sequences with recurrent neural networks*. arXiv preprint arXiv:1308.0850.
6. Sutskever, I., Vinyals, O., & Le, Q. V. (2014). *Sequence to sequence learning with neural networks*. In *Advances in neural information processing systems* (pp. 3104-3112).
7. Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). *Long short-term memory*. *Neural computation*, 9(8), 1735-1780.
8. Graves, A., Mohamed, A. R., & Hinton, G. (2013, May). *Speech recognition with deep recurrent neural networks*. In *Acoustics, speech and signal processing (icassp), 2013 IEEE international conference on* (pp. 6645-6649). IEEE.
9. Graves, A., & Schmidhuber, J. (2009). *Offline handwriting recognition with multidimensional recurrent neural networks*. In *Advances in neural information processing systems* (pp. 545-552).
10. Eck, D., & Schmidhuber, J. (2002). *A first look at music composition using lstm recurrent neural networks*. *Istituto Dalle Molle Di Studi Sull Intelligenza Artificiale*, 103.
11. Mikolov, T., Chen, K., Corrado, G., & Dean, J. (2013). *Efficient estimation of word representations in vector space*. arXiv preprint arXiv:1301.3781
12. Bojanowski, P., Grave, E., Joulin, A., & Mikolov, T. (2016). *Enriching word vectors with subword information*. arXiv preprint arXiv:1607.04606.
13. Wikimedia downloads. Retrieved from <http://dumps.wikimedia.org>.

УДК 004.8

Володимир Фоменко, Георгій Луцький,
Павло Регіда, Артем Волокита

ПИТАННЯ ГЕНЕРАЦІЇ ТЕМАТИЧНИХ ТЕКСТІВ НА ОСНОВІ РЕКУРЕНТНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ТА WORD2VEC

Актуальність теми дослідження. Проблема генерації текстів стає більш актуальною в останні дні у зв'язку зі зростаючим попитом на автоматичне створення описів об'єктів, уривків статей, підсумків новин, повідомлень у службах мікроблогів, відповідей чат-ботів тощо. Таким чином, проблемою є створення текстів, що відповідають заданій тематичі. Ця робота присвячена проблемі генерації текстів саме російською мовою, оскільки кожна мовна група вимагає індивідуального підходу.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Постановка проблеми. Відсутність добре інтерпретованого методу для автоматичного створення російськомовних тематичних текстів за допомогою рекурентних нейронних мереж.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Протягом останніх років з'являється все більше статей, присвячених генерації тематичних текстів, зокрема, завдяки появі нових методів генерації послідовностей з використанням рекурентних нейронних мереж. Проте підходи специфічні для генерації тематичних текстів, особливо російською мовою, все ще недостатньо вивчені.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Стаття присвячена вивченню та аналізу запропонованого підходу для генерації тематичних текстів, зокрема написаних російською мовою. Дослідження сфокусовано на вивченні застосування рекурентних нейронних мереж та word2vec.

Постановка завдання. Завданням є створити модель, натреновану на групі уривків російськомовних статей, що навчиться визначати контекст тексту, і як результат видавати добре інтерпретований текст за тією ж самою тематикою.

Виклад основного матеріалу. Проведено аналіз спільного використання моделей RNN та word2vec. Описано підходи для обробки вхідного тексту, аналізу структури речень, прогнозування наступних частин мови, прогнозування наступних слів та структури відповідних моделей. Результати виявились добре інтерпретованими та змістовними.

Висновки. Проаналізовано зміст, структуру та параметри моделей, які показали найкращі результати для генерації текстів. Підхід показав себе добре для створення тематичних текстів. Наведені результати експериментів та аналіз наступних кроків.

Ключові слова: генерація тексту; рекурентні нейронні мережі; довга короткочасна пам'ять; word2vec.

Рис.: 3. Табл.: 1. Бібл.: 13.

УДК 004.8

Владимир Фоменко, Георгий Луцкий, Павел Региди, Артем Волокита
**ВОПРОСЫ ГЕНЕРАЦИИ ТЕМАТИЧЕСКИХ ТЕКСТОВ НА ОСНОВЕ
 РЕКУРРЕНТНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И WORD2VEC**

В статье рассматривается вопрос генерации псевдослучайных текстов на заданную тематику. Для генерации текстов используются рекуррентные нейронные сети (LSTM) с предварительной обработкой слов с помощью модели word2vec. Тема текста задается с помощью набора ключевых слов. Модели тренируются на наборе русскоязычных статей.

Ключевые слова: генерация текста; рекуррентные нейронные сети; долгая краткосрочная память; word2vec.

Рис.: 3. Табл.: 1. Библ.: 13.

Fomenko Volodymyr – student, Department of Computer Engineering, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (37 Pobedy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

Фоменко Володимир Андрійович – студент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

Фоменко Владимир Андреевич – студент, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» (просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина).

E-mail: vlfomenk@gmail.com

Loutskii Heorhii – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of Computer Engineering, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (37 Pobedy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

Луцкий Георгий Михайлович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри обчислювальної техніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

Луцкий Георгий Михайлович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» (просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина).

E-mail: georgijluckij80@gmail.com

Региди Павло Геннадійович – аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

Региди Павел Геннадиевич – аспирант, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» (просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина).

Rehida Pavlo – PhD student, Department of Computer Engineering, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (37 Pobedy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

E-mail: pavel.regida@gmail.com

Volokyta Artem – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Computer Engineering, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (37 Pobedy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

Волокита Артем Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри обчислювальної техніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

Волокита Артем Николаевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры вычислительной техники, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» (просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина).

E-mail: artem.volokita@kpi.ua

РОЗДІЛ V. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 629.374.7

DOI: 10.25140/2411-5363-2017-4(10)-116-122

Юрій Денисов, Анатолій Ревко,
Олег Середа, Андрей Дымерец

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Актуальность темы исследования. Беспилотные летательные аппараты постепенно становятся главной темой множества разработок различных научных коллективов. Появляется большое количество научных работ, разработчиков и производителей БПЛА, занимающихся беспилотными аппаратами, системами электропитания и управления, поэтому данная статья актуальна.

Постановка проблемы. Развитие беспилотных летательных аппаратов все больше ставит вопрос о повышении летно-технических характеристик. Системы электропитания беспилотной авиационных систем имеют ограничение по мощности. Проблема исследования состоит в разработке новых энергоэффективных систем преобразования энергии аппарата.

Анализ последних исследований и публикаций. Анализ публикаций говорит о том, что в литературных источниках большое внимание уделяется системам управления и навигации и меньше внимания уделяется повышению энергоэффективности систем электропитания беспилотного летательного аппарата с применением преобразователей с высокими энергетическими показателями.

Выделение не исследованных ранее частей общей проблемы. В работах по данной тематике малое внимание уделяется применению высокочастотных, высокоэнергетических преобразователей постоянного напряжения.

Постановка задания. Необходимо проанализировать пути повышения энергоэффективности электропривода беспилотного летательного аппарата с учетом имеющегося опыта эксплуатации.

Изложение основного материала. Анализ различных типов летательных аппаратов говорит о том, что силовые установки современных малогабаритных БПЛА строятся на основе энергоэффективных бесколлекторных двигателей постоянного тока. Применение именно этих приводов приводит к уменьшению габаритов и массы БПЛА. Бесколлекторные двигатели позволяют обеспечить ламинарный воздушный поток, который позволяет повысить устойчивость полета и снизить затраты на настройку БПЛА. Применение именно таких двигателей снижает генерацию помех в радиоэфир, тем самым снижает вероятность обнаружения БПЛА.

Выводы. Правильным путем снижения потерь системы электропитания БПЛА является одновременное снижение динамических и статических потери в ключевых элементах преобразователя и формирование новых законов управления преобразователем с целью снижения потерь в электроприводе, особенно в переходных режимах работы.

Ключевые слова: электропривод; беспилотный летательный аппарат; квазирезонансный преобразователь.

Рис.: 4. Библ.: 6.

Введение. В последние годы беспилотная авиация становится все в большей степени востребованной. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) постепенно становятся главной темой множества разработок различных научных коллективов. Появляется большое количество научных работ, разработчиков и производителей БПЛА, занимающихся беспилотными аппаратами, системами электропитания и управления БПЛА. Такое развитие происходит по многим причинам. Подготовка оператора беспилотной системы дешевле подготовки летчика, выставляются меньшие требования по здоровью и затратам. Отсутствие пилота позволяет исключить бортовые системы жизнеобеспечения, уменьшить массу и габариты БПЛА, а также увеличить диапазон допустимых перегрузок и влияющих факторов. Большое значение имеет и фактор безопасности – потери беспилотных аппаратов не ведут к потере пилота [1].

Постановка проблемы. Диапазон существующих и разрабатываемых аппаратов очень широк: от микро- и мини-БПЛА до тяжелых многотонных аппаратов, а также БПЛА, способных выполнять сверхдальние и сверхвысотные полеты длительностью в несколько суток. Назначение современных БПЛА не ограничивается только военной областью. Стремительно расширяется и сфера их гражданского применения (в таких отраслях, как: нефтегазовая промышленность, транспорт, строительство, сельское хо-

зйство, связь и др.), что придает дополнительные импульсы развитию беспилотной авиационной техники [1]. Развитие беспилотных летательных аппаратов все больше ставит вопрос о повышении летно-технических характеристик. Системы электропитания беспилотных авиационных систем имеют ограничение по мощности. Проблема исследования состоит в разработке новых энергоэффективных систем преобразования электрической энергии БПЛА.

Цель статьи. Проанализировать современный рынок БПЛА с различными силовыми установками. Рассмотреть одну из топологии построения системы электропитания БПЛА с целью дать конкретные рекомендации и пути решения повышения энергоэффективности системы питания БПЛА с электрической силовой установкой.

Изложение основного материала. **Hermes 1500** многоцелевой БПЛА самолётного типа, широкий спектр сменного оборудования позволяет использовать БПЛА Hermes 1500 для проведения аэрофоторазведки, радиотехнической разведки, РЭБ, разведки с использованием радара с синтезированной апертурой и ретрансляции радиосигналов. В гражданских целях он может быть использован для прибрежного патрулирования, контроля зон рыболовства и экологического мониторинга.

Летательный аппарат – моноплан с высокорасположенным крылом, V-образным хвостовым оперением с небольшим подфюзеляжным килем и полностью убираемым трехстоечным шасси с носовым колесом. Силовая установка с тянущими винтами располагается в мотогондолах под крылом.

Силовая установка – поршневой двигатель ROTAX 914 (115 л.с.) – бензиновый, четырехтактный, четырехцилиндровый с карбюраторным смесеобразованием, с турбонаддувом. Расположение цилиндров – оппозитное, расположение распределительного вала системы газораспределения — нижнее. Двигатель имеет воздушную систему охлаждения цилиндров и жидкостную систему охлаждения головок цилиндров [5].

Ту-123 Ястреб – цельнометаллический моноплан нормальной аэродинамической схемы с треугольным крылом. Фюзеляж типа монокок состоит из шести секций. В носовой части самолета Ту-123 размещалась разведывательная аппаратура. В хвостовой части фюзеляжа находились силовая установка, топливные баки, автопилот, агрегаты воздушной системы, электро- и радиооборудования, энергоузел и тормозной парашют [5].

Силовая установка – одновальный турбореактивный двигатель с форсажной камерой Р-15. Двигатель разрабатывался для высотных полетов с крейсерской скоростью с числом Маха равным 2,5. Двигатель имел специальный эжектор для увеличения суммарного тягового усилия на скоростях полета в диапазоне чисел $M = 2,4 \dots 2,5$ и уменьшения донного сопротивления. Технические характеристики — тяга на рабочем режиме: 73,50 кН, тяга на полном форсированном режиме – 100,1 кН. Минимальный удельный расход топлива: 1,25 кг/кгс-ч. Удельный расход топлива на форсаже: 2,70 кг/кгс-ч. Температура газов перед турбиной: 942 °С. Степень сжатия: 4,75.

DJI Phantom 2 – коммерческий квадрокоптер с видеопередатчиком и собственной камерой с матрицей в 14 мегапикселей, переключаемыми углами съемки в 110/85 градусов, возможностью снимать видео и фото. Максимальная горизонтальная скорость: 15 м/с, максимальная скорость вращения: 200°/с, максимальная угловая скорость: 90°/с, максимальный угол крена: 35°, точность управления: $\pm 0,03^\circ$, максимальная скорость набора высоты: 6 м/с, максимальная скорость спуска: 2 м/с. Съёмный литий-полимерный аккумулятор DJI: 5200 мАч, 11,1 В. Его заряда хватает на 25 минут полета. На аккумуляторе присутствует защита от избыточной зарядки или разрядки [5].

Приведем технические характеристики моторов левого и правого вращения для квадрокоптеров DJI Phantom 2 DJI E310 2312 Motor Set (CW+CCW): тип моторов: бесколлекторный; материал корпуса: металл; оборотов на 1В: 960; размер статора: 22×12

мм; рекомендуемая нагрузка: 350 г/ось (3S) или 400 г/ось (4S); максимальная нагрузка: 800 г/ось; вес: 60 г.

Применение новых типов малогабаритных двигателей приводит к повышению грузоподъемности, надежности и времени полета. Необходимо так-же учесть габариты аппарата отношение его массы к массе полезной нагрузки.

Силовые установки современных малогабаритных БПЛА строятся на основе энергоэффективных бесколлекторных двигателей постоянного тока (БДПТ). Применение именно этих приводов приводит к уменьшению габаритов и массы БПЛА. Бесколлекторные двигатели обеспечивают ламинарный воздушный поток, который позволяет повысить устойчивость полета и снизить затраты на настройку БПЛА. Применение именно таких двигателей снижает генерацию помех в радиоэфир, тем самым снижает вероятность обнаружения БПЛА.

Существующая система электропитания двигателя беспилотного летательного аппарата представлена на рис. 1.

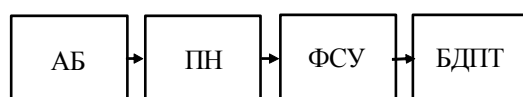


Рис. 1. Схема питания двигателя БПЛА: АБ – аккумуляторная батарея; ПН – преобразователь напряжения; ФСУ – формирователь сигнала управления; БДПТ – бесколлекторный двигатель постоянного тока

Электропитание БПЛА с электроприводной силовой установкой обычно осуществляется от аккумуляторной батареи (АБ) напряжением 7,2...14,4 В. Чаще всего применяются литий-полимерные или литий-железные АБ с тремя-четырьмя последовательно соединёнными ячейками. Системы навигации связи и управления, обычно, питаются от той же АБ, но через отдельный преобразователь напряжения с цепями защиты. Система электропривода построена на основе бесколлекторного двигателя постоянного тока. В работах, посвященных разработке систем управления бесколлекторными двигателями постоянного тока [2], вопрос повышения энергоэффективности решается несколькими путями. Первый путь это повышение энергоёмкости аккумуляторных батарей с одновременным снижением массогабаритных показателей. Второй путь это снижение потерь на преобразователях напряжения путем разработки новых законов управления с целью снижения статических и динамических потерь. Третий возможный путь повышения энергоэффективности это применение новых типов электропривода со сниженными массогабаритными показателями. По нашему мнению, повысить энергоэффективность можно путем применения в качестве преобразователя напряжения преобразователь с сниженными статическими и динамическими потерями. Применение понижающего преобразователя напряжения перед ФСУ позволит применять АБ с большим напряжением и, таким образом, разгрузить её по току. Также возможно оперативное изменение напряжения питания выходного инвертора в соответствии с оптимальным режимом работы двигателей при разных нагрузках. Конструктивно такие преобразователи описаны в [3] – это высокочастотные преобразователи, где применяются в качестве ключей транзисторы с пониженным уровнем падения напряжения, а также может применяется режим переключения транзисторных ключей при нулевом токе. Разработке преобразователей напряжения с переключением при нулевом токе или нулевом напряжении (ПНТ–ПНН) посвящено много работ [4]. Применение таких преобразователей в качестве систем электропитания БДПТ хорошо описаны в [2]. В нашем же случае речь идет о специфических нагрузках, на валу двигателя, а именно воздушный винт. В процессе полета привод в различных динамических режимах начинает потреблять значительно больше энергии, чем аналогичный работающий в других условиях. Эксплуатация же беспилотных лета-

тельных аппаратов показывает, что увеличение дальности полета приводит к увеличению массы аккумуляторных батарей, что снижает долю полезной нагрузки.

Величина полезной нагрузки особенно критична при эксплуатации беспилотных аппаратов военного и оборонного назначения.

На рис. 2 показана система электропитания БДПТ которая может применяться в качестве основы построения энергетической установки. Питание предлагается осуществлять от АБ с посредством квазирезонансного импульсного преобразователя, переключаемого при нулевом токе (КРИП-ПНТ). В БДПТ функции коллекторно-щеточного узла выполняет полупроводниковый инвертор напряжения коммутатор (транзисторы Т1-Т6), нагруженный на трехфазную обмотку, расположенную на статоре двигателя (рис. 2). Ротор создает поток возбуждения при помощи постоянного многополюсного магнита. Роль обмотки якоря в БДПТ выполняет обмотка, расположенная на его статоре, которая имеет гораздо меньше секции, чем обмотка якоря. В БДПТ вектор магнитодвижущей силы (МДС) поля статора совершает колебания вокруг нормали к вектору МДС потока возбуждения, создаваемого ротором-магнитом. Вентили коммутатора полевые и биполярные транзисторы с изолированным затвором (MOSFET, IGBT) управляются импульсами от датчиков положения ротора, в качестве которых используют оптопары, магнитные головки, датчики Холла, расположенные по окружности статора. Возможно и бездатчиковое управление электронным коммутатором обмоток БДПТ, когда моменты коммутации вычисляются по потребляемому току и напряжению на обмотках. Применение в качестве преобразователя системы электропитания квазирезонансных преобразователей снизит потери мощности и повысит точность вращения винтов БПЛА.

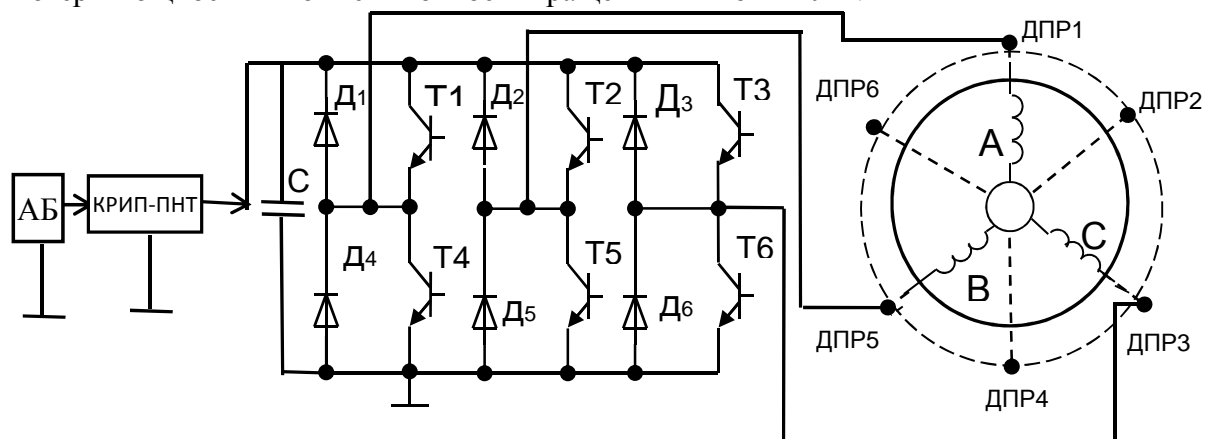


Рис. 2. Схема электропитания и электропривод с БДПТ беспилотного летательного аппарата

На кафедре промышленной электроники Черниговского национального технологического университета разработан действующий БПЛА (рис. 3). В этом БПЛА применены безколлекторные двигатели постоянного тока, параметры которых близки к параметрам двигателей, применяемых в БПЛА DJI Phantom 2, описанного выше. Суммарная мгновенная потребляемая мощность четырех двигателей достаточно велика, может достигать до 500 Вт. Данный БПЛА оснащен системой управления и навигации на базе модуля Ardupilot APM 2.8 и датчиком GPS навигации. Управление осуществляется посредством дистанционного пульта Radiolink-AT9. Как показывают опыт работы и литературные источники, система управления электроприводом одноконтурная. В системе управления силовой установкой применен стандартный пропорциональный интегрально дифференциальный закон управления. Управляющее воздействие формируется путем сравнения заданного положения аппарата в пространстве и измеренного посредством гироскопических датчиков.



Рис. 3. Экспериментальный БПЛА

Основные летно-технические характеристики следующие: время полёта около 20 минут, вес брутто около 2 кг, нетто около 1 кг. Дальность порядка 1 км. С целью получения информации о путях повышения энергоэффективности были проведены исследования электромагнитных процессов и пусковых моментов в системе электропривода БПЛА. С помощью прецизионных датчиков тока и напряжения получены осциллограммы переходных процессов. На осциллограммах (рис. 4) показаны переходные процессы напряжения, и тока управления одной из фаз БДПТ исследуемого БПЛА в разном масштабе времени и в разных режимах пуска (рис. 4, а) крупный масштаб (рис. 4, б – более длительное время наблюдения). Анализ процессов говорит о том, что параметры процесса регулирования неоптимальные, процесс затянут, имеет место большое перерегулирование. Все эти факторы снижают энергоэффективность системы электропитания и электропривода в частности. Пути повышения это оптимизация процессов регулирования внедрение новых, нестандартных законов управления и применение высокочастотных импульсных преобразователей. Большое распространение в последнее время получили системы автоматического управления с искусственным интеллектом на основе нестандартных законов управления. Нестандартные законы управления, по нашему пониманию, это адаптивные, нейронечеткие регуляторы, которые могут легко быть взаимосвязаны с системой навигации, в которой уже применяются такие системы [6].

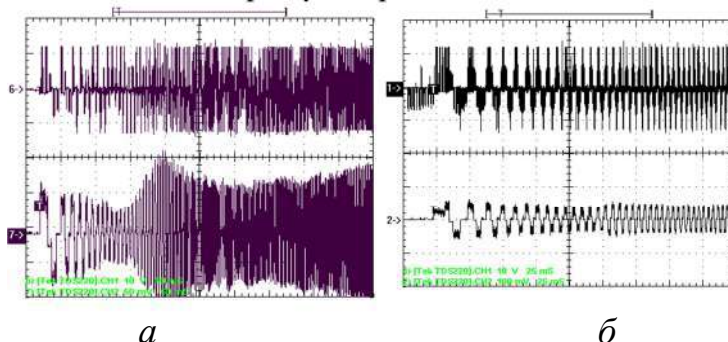


Рис. 4. Переходные процессы в системе электропитания

Вывод. Правильным путем снижения потерь системы электропитания БПЛА является одновременное снижение динамических и статических потерь в ключевых элементах преобразователя и формирование новых законов управления преобразователем с целью снижения потерь, а электроприводе, особенно в переходных режимах работы. Снижению уровня помех способствует переход на более высокие частоты работы преобразователя. Анализ режимов работы свидетельствует о том, что необходимо дополнять систему управления дополнительными контурами по скорости воздушного винта и по току БДПТ.

Список использованных источников

1. Беспилотная авиация: терминология, классификация, современное состояние / В. С. Фетисов и др. – Уфа : ФОТОН, 2014. – 217 с.
2. Денисов Ю. А. Субгармоническая устойчивость электропривода с бесколлекторным двигателем постоянного тока (БДПТ) и квазирезонансным импульсным преобразователем, пере-

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

лючаемым при нулевом токе (КРИП-ПНТ) / Ю. А. Денисов // Технічна електродинаміка. – 2003. – № 6. – С. 36–41.

3. Денисов Ю. О. Пульсації швидкості електропривода, що керується квазірезонансним перетворювачем з перемиканням при нульовому струмі / Ю. О. Денисов // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки». – 2004. – № 21. – С. 142–148.

4. Денисов Ю. А. Стабилизаторы постоянного напряжения с широтно-импульсными и частотно-импульсными квазирезонансными преобразователями / Ю. А. Денисов. – К. : ИЭД НАНУ, 2001. – 147 с.

5. Общие виды и характеристики беспилотных летательных аппаратов: справ. пособие / А. Г. Гребеников, А. К. Мялица, В. В. Парфенюк и др. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьковский авиационный институт», 2008. – 377 с.

6. Корченко А. Г. Обобщённая классификация беспилотных летательных аппаратов / А. Г. Корченко, О. С. Ильяш // Сборник научных трудов Харьковского университета воздушных сил. – 2012. – Вып. 4 (33). – С. 27–36.

References

1. Fetisov, V.S. et al. (2014). *Bespilotnaia aviatsiia terminologiya klassifikatsiia sovremennoe sostoianie [Unmanned aircraft: terminology, classification, current status]*. Ufa: FOTON (in Russian).

2. Denisov, Yu.A. (2003). Subgarmonicheskaia ustoichivost elektroprivoda s beskollektornym dvigatelem postoiannogo toka BDPT i kvazirezonsnym impulsnym preobrazovatelem perekliuchaemym pri nulevom toke KRIP-PNT [Subharmonic stability of an electric drive with a brushless DC motor (BDPT) and a quasi-resonant pulse converter switched at zero current (CRIP-PNT)]. *Tekhnichna elektrodinamika – Technical electrodynamics*, no. 6, pp. 36–41 (in Russian).

3. Denysov, Yu.O. (2004). Pulsatsii shvydkosti elektroprivoda, shcho keruietsia kvazirezonsnym peretvoriuvachem z peremykanniam pry nulovomu strumi [Electric drive speed pulsations controlled by a quasirezonal converter with zero-current switching]. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Seriya "Tekhnichni nauky" – Bulletin of the Chernihiv State Technological University. Series "Technical Sciences"*, № 21, pp. 142–148 (in Ukrainian).

4. Denisov, Yu.A. (2001). *Stabilizatory postoiannogo napriazheniia s shirotno-impulsnyimi i chastotno-impulsnyimi kvazirezonsnymi preobrazovateliami [Permanent voltage stabilizers with pulse-width and frequency-pulse quasi-resonant converters]*. Kyiv: IED NANU (in Russian).

5. Grebenikov, A.G., Mialitsa, A.K., Parfeniuk, V.V. et al. (2008). *Obshchie vidy i kharakteristiki bespilotnykh letatelnykh apparatov sprav posobie [Common types and characteristics of unmanned aerial vehicles]*. Kharkov: Nats. Aerokosm. un-t Kharkovskii aviatsionnyi institut (in Russian).

6. Korchenko, A.G., Iliash, O.S. (2012). Obobshchennaia klassifikatsiia bespilotnykh letatelnykh apparatov [A generalized classification of unmanned aerial vehicles]. *Zbornik nauchnykh trudov Kharkovskogo universitetu vozdushnykh Sil – Collection of scientific works of the Kharkov University of Air Force*, issue 4 (33), pp. 27–36 (in Russian).

UDC 629.374.7

Yuri Denisov, Anatoliy Revko, Oleg Sereda, Andrii Dymyrets

RESEARCH OF WAYS OF INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF THE SYSTEM OF THE ELECTRIC DEVICE OF THE UNMANNED AERIAL VEHICLE

Urgency of the research. *Unmanned aerial vehicle are gradually becoming the main theme of many developments of various scientific teams. There is a large number of scientific works, developers and manufacturers of UAVs, engaged in unmanned vehicles and power supply and control systems, so this article is relevant.*

Target setting. *The progress of unmanned aerial vehicles is increasingly raising the issue of improving flight-technical performance. The power supply systems of unmanned aerial systems have a power limitation. The research problem consists in the development of new energy-efficient systems for converting the energy of the apparatus.*

Actual scientific researches and issues analysis. *The analysis of publications says that in the literature sources much attention is paid to control and navigation systems and less attention is paid to improving the energy efficiency of power systems of an unmanned aircraft with using of converters with high-energy performance.*

Uninvestigated parts of general matters defining. *In works on this subject little attention is paid on using of high-frequency, highly energy-efficient DC voltage converters.*

The research objective. *It is necessary to analyze ways of increasing the energy efficiency of the electric drive of an unmanned aerial vehicle taking into account the experience of operation.*

The statement of basic materials. Analysis of various types of aerial vehicle shows that power units of modern small-sized UAVs are built based on energy-efficient brushless DC motors. Using of these drives leads to a reduction in the size and mass of the UAV. Brushless motors allow providing laminar airflow, which allows to increase the stability of flight and to reduce the costs for tuning UAV. Using of such engines reduces the generation of interference into the air, thereby reduces the probability of detection of a UAV.

Conclusions. The correct way of reducing the losses of the power supply system of a UAV is simultaneously reducing dynamic and static losses in key elements of the converter and forming new control laws for the converter in order to reduce losses in the drive, especially in transient operation modes.

Key words: electric drive; unmanned aerial vehicle; quasi-resonant converter.

Fig.: 4. Bibl.: 6.

УДК 629.374.7

Юрій Денисов, Анатолій Ревко, Олег Серєда, Андрій Димерець

ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА

За результатами аналізу сучасного стану рівня розробок безпілотних літальних апаратів з електричною тяговою установкою запропонована концепція підвищення енергоефективності електропривода тягової установки. Запропоновано застосовувати як основний перетворювач напруги безпілотних літальних апаратів імпульсні квазірезонансні перетворювачі з мінімальним динамічними втратами потужності перемикання.

Ключові слова: електропривод; безпілотний літальний апарат; квазірезонансний перетворювач.

Рис.: 4. Бібл.: 6.

Денисов Юрій Александрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленной электроники, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14035, Украина).

Денисов Юрій Олександрович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри промислової електроніки, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Denisov Yuri – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Industrial Electronics, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: den711td@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2293-7964>

ResearcherID: G-1144-2016

Ревко Анатолій Сергєевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленной электроники, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14035, Украина).

Ревко Анатолій Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри промислової електроніки, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Revko Anatoliy – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Industrial Electronics, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: asrmeister@gmail.com

ResearcherID: F-8024-2014

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6818-2961>

Серєда Олег Владимирович – аспирант кафедры промышленной электроники, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14035, Украина).

Серєда Олег Володимирович – аспірант кафедри промислової електроніки, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Sereda Oleg – postgraduate student Department of Industrial Electronics, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: seredaolegv@gmail.com

ResearcherID: G-86012-2017

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2270-0385>

Димерец Андрей – студент кафедры промышленной электроники, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14035, Украина).

Димерец Андрій – студент кафедри промислової електроніки, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Dymerets Andrii – student Department of Industrial Electronics, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: @gmail.com

ResearcherID: U-8987-2017

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7617-5291>

Юрий Шмелев, Сергей Бойко, Алексей Городний,
Елена Чернихова, Сергей Владов

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ АВИАЦИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

Актуальность темы исследования. На летательных аппаратах широко используются химические источники тока. Например, на вертолетах аккумуляторы используются как буферные и аварийные источники.

Постановка цели. В свою очередь, учитывая сложные специфические условия эксплуатации необходимо провести мониторинг состояния авиационных аккумуляторных батарей летательных аппаратов.

Анализ последних исследований и публикаций. Многие публикации предлагают решить эту проблему путем проверки состояния бортовых аккумуляторов в конце полетов, а также, если это возможно, и после каждого полета, в реальных условиях работы требует определенного времени для диагностики, а это не всегда возможно.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. Принимая во внимание, что свинцовые, серебряно-цинковые и никель-кадмиевые батареи используются как бортовые аккумуляторные батареи, и, как показывает практика, ни одна из существующих систем химических источников тока не может полностью удовлетворить все требования различных областей эксплуатации. В каждой области одна из систем может иметь преимущества перед другими. Для оценки состояния и эффективности систем источников химического тока летательных аппаратов необходимо учитывать их характеристики в процессе мониторинга с помощью электротехнического комплекса для контроля состояния авиационных аккумуляторных батарей.

Цель исследования. В этой работе основной целью с обоснования необходимости применения и разработки электротехнического комплекса для контроля состояния авиационных аккумуляторных батарей.

Изложение основного материала. Изменение физических свойств окружающего воздуха влияет на работу электрооборудования летательного аппарата. Тактико-технические требования к оборудованию летательных аппаратов разработаны с учетом условий работы электрооборудования и его назначения, включая такие показатели: надежность и безотказность работы, вес и размеры, прочность электрического оборудования, химическая устойчивость электрооборудования, легкость эксплуатации и ремонта электрооборудования, экономические требования. Исходя из этого, в конце полетов, а также, если это возможно и после каждого полета, необходимо проверить уровень зарядки аккумуляторных батарей и их состояние (рабочая емкость). Для выявления неисправностей аккумуляторов летательных аппаратов осуществляется мониторинг состояния их параметров во всех режимах работы с помощью разработанной контрольной системы. Своевременное выявление неисправностей аккумулятора позволяет уменьшить уровень их разрядки, повысить надежность электрооборудования летательных аппаратов и уменьшить эксплуатационные расходы.

Выводы. Разработанный электротехнический комплекс для мониторинга состояния авиационных аккумуляторов был предложен для дальнейшей практической реализации для выявления неисправностей аккумуляторов летательных объектов и обеспечения постоянного мониторинга состояния их параметров во всех режимах работы.

Ключевые слова: система контроля состояния; авиационные аккумуляторные батареи; зарядные характеристики.

Рис.: 11. Библ.: 11.

Постановка проблемы. На летательных аппаратах широкое применение находят химические источники тока. К примеру, на вертолетах аккумуляторные батареи применяются в качестве буферных и аварийных источников. Бортовые аккумуляторные батареи предназначаются для питания [1]:

- электростартеров и аппаратуры зажигания при автономном запуске авиадвигателей;
- жизненно важных потребителей во время полета, при выходе из строя генераторов;
- приёмников электроэнергии летательных аппаратов (ЛА) на земле при проверках, при выполнении регламентных работ и при проведении предварительной и предполётной подготовки;
- для покрытия пиков тока при включении мощных бортовых приёмников электроэнергии;
- для проверки работы маломощного электрооборудования на земле, при отсутствии аэродромных источников электроэнергии;
- при запуске авиационных двигателей.

В свою очередь, в виду сложных специфических условий эксплуатации, является необходимым контроль состояния бортовых аккумуляторных батарей ЛА.

Анализ последних исследований и публикаций. В ряде публикаций предлагается решение этой проблемы путём проверки состояния бортовых аккумуляторных батарей

в конце полетов, а при возможности и после каждого полета, что в реальных условиях эксплуатации занимает время на диагностику и не всегда возможно [1–4].

Определение ранее не решенных частей общей проблемы. Учитывая то, что в качестве бортовых аккумуляторных батарей применяются: свинцовые, серебряно-цинковые и никель-кадмиевые, и, как показывает практика, ни одна из существующих систем химических источников тока не может полностью удовлетворить всех требований различных областей применения. В каждой области одна из систем может иметь преимущества перед другими. Для оценки состояния и работоспособности систем химических источников тока ЛА необходимо учитывать их характеристики в процессе мониторинга с помощью электротехнического комплекса контроля состояния авиационных аккумуляторных батарей [2].

Цель статьи. Главной целью этой работы есть обоснование необходимости применения и разработка электротехнического комплекса контроля состояния авиационных аккумуляторных батарей.

Изложение основного материала. Электрохимические системы делятся на обратимые и необратимые.

Химические источники тока по особенностям работы можно разбить на три группы:

- гальванические элементы;
- аккумуляторы;
- топливные элементы.

Первыми источниками электрической энергии на (летательных аппаратах) ЛА были химические источники тока. Вначале применялись гальванические элементы, затем аккумуляторы, а с середины 60-х годов и топливные элементы [3].

В настоящее время гальванические элементы используются, как правило, на ЛА одноразового действия (на метеорологических ракетах, метеозондах и т. д.).

Аккумуляторные батареи (последовательное соединение нескольких аккумуляторов) по своему назначению делятся на бортовые, устанавливаемые на борту ЛА и аэродромные.

Основными характеристиками химических источников тока являются: электродвижущая сила, внутреннее сопротивление, напряжение, разрядная ёмкость, удельная энергия, коэффициенты отдачи по ёмкости и по энергии, срок службы и сохранность.

Срок службы определяется важной характеристикой для аккумуляторов. Срок службы аккумуляторов называется количество циклов, которое он выдерживает при определённых режимах разряда и заряда.

Следует иметь в виду, что если запуск газотурбинного двигателя происходил от бортовой авиационной аккумуляторной батареи, то остаточная емкость батареи, как правило, составляет 45...60 %. В полете батареи подзаряжаются от сети с напряжением 28,5 В. Степень восстановления емкости зависит от продолжительности полета и температуры.

Изменение физических свойств окружающего воздуха влияет на работу электрооборудования летательного аппарата. Тактико-технические требования, предъявляемые к оборудованию летательных аппаратов, разработаны с учетом условий работы электрооборудования и его назначения включают следующие показатели: надежность и безотказность работы, масса и габариты, прочность электрооборудования, химическая стойкость электрооборудования, простота эксплуатации и ремонта электрооборудования, экономические требования [5].

Исходя из этого, в конце полётов, а при возможности и после каждого полета, нужно проверять уровень зарядки аккумуляторных батарей и их состояние (работоспособность).

Не допускается установка или эксплуатация на летательном аппарате аккумуляторной батареи в разряженном или наполовину заряженном состоянии.

Срок службы аккумулятора зависит от многих внутренних и внешних факторов. Гарантийный срок, указанный в паспорте, зависит от конструкции и технологии изготовления [6].

Важнейшие эксплуатационные характеристики - надежность, суммарное время хранения и эксплуатации, разрядные характеристики - зависят от условий эксплуатации и хранения. Со временем эти характеристики ухудшаются. Это связано с необратимыми процессами износа аккумулятора.

Свинцовые аккумуляторы получили распространение в тех областях, в которых объемные и весовые характеристики не являются критическими.

На разрядные характеристики свинцовых аккумуляторов существенно влияет температура окружающей среды.

На рис. 1 показаны типичные кривые заряда свинцово-кислотного аккумулятора, разряженного до 100 % током 0,05 ёмкости аккумулятора в течение 20 часов.

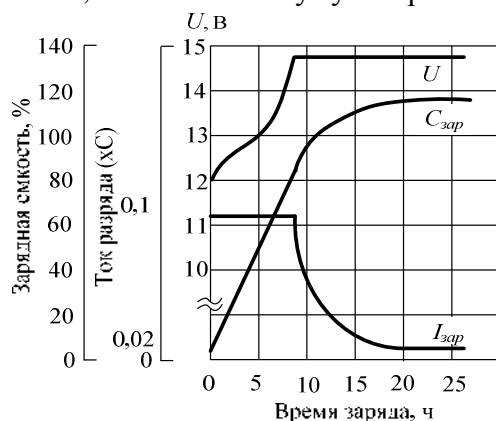


Рис. 1. Зарядные характеристики герметизированной свинцово-кислотной аккумуляторной батареи

На рис. 2 показано изменение параметров свинцово-кислотного герметизированного аккумулятора в зависимости от глубины разряда.

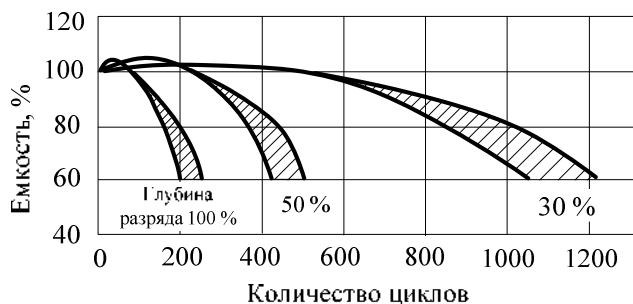


Рис. 2. Зависимость параметров свинцово-кислотного аккумулятора от глубины разряда

Как видно из рис. 2, при глубине разряда 100 %, разрядная ёмкость аккумулятора снижается до 60 % за 200...250 циклов. При циклировании на небольшую глубину (-30 %), разрядная ёмкость аккумулятора уменьшается до 60 % за 1000...1200 зарядо-разрядных циклов.

Обобщая анализ и возможности применения свинцовых аккумуляторов в качестве авиационных, отметим следующее [2].

Преимущества: низкая стоимость.

Недостатки:

- чувствительность к условиям эксплуатации и обслуживания;
- низкая запасаемая энергия, как следствие – большой размер и вес аккумуляторов;

- высокая экологическая опасность;
- большая продолжительность заряда;
- значительное ухудшение характеристик при низких и отрицательных температурах;
- высокая вероятность выхода аккумулятора из строя при глубоком разряде или переразряде.

В соответствии с этим возникает необходимость в поиске решений данных вопросов.

Одним из возможных вариантов является применение относительно нового типа литий-ионных аккумуляторов для формирования авиационных аккумуляторных батарей (ААБ).

При анализе и процессе выбора типа ААБ как источника автономного питания зависит эффективность электротехнической системы в целом, т. е. надежность, возможность применения системы дистанционного управления, ресурс ААБ.

Поэтому был проведен сравнительный анализ основных параметров свинцово-кислотной, никель-кадмиевой, никель-металлгидридной и литий-ионной электрохимической систем [3].

На рис. 3 показаны разрядные характеристики отдельных аккумуляторов Pb, NiCd, NiMh, Li-ионной электрохимических систем при постоянном токе разряда и температуре +20 °С.

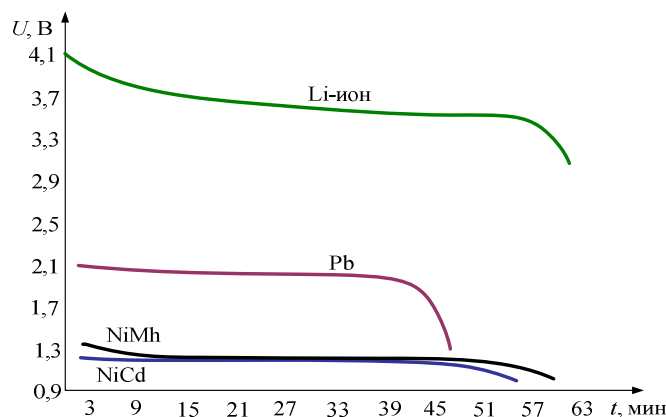


Рис. 3. Разрядные кривые различных электрохимических систем аккумуляторов

Рисунок 4 демонстрирует объемные гистограммы соответствующих разрядных кривых, представленных на рис. 4. Рисунок 4 дает наглядное качественное представление об энергетических свойствах рассматриваемых типов аккумуляторов.

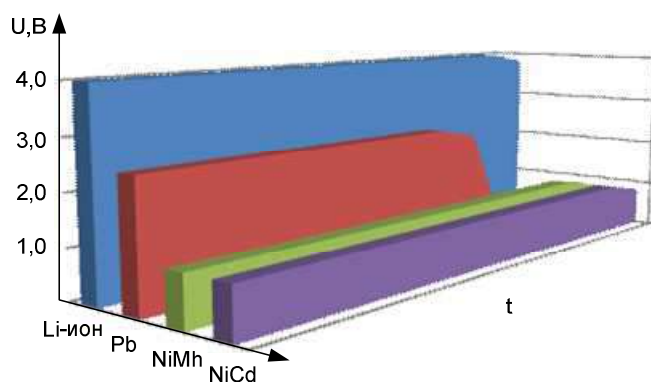


Рис. 4. Качественное представление разрядных кривых различных электрохимических систем аккумуляторов

Как видно из расчёта и гистограмм при одинаковых условиях разряда, энергия Li-ионного аккумулятора, более чем в 2,3 раза превышает разрядную энергию Pb аккумулятора и приблизительно в 3 превышает энергию NiCd и NiMh электрохимических систем.

На рис. 5 представлены весовые характеристики электрохимических систем.

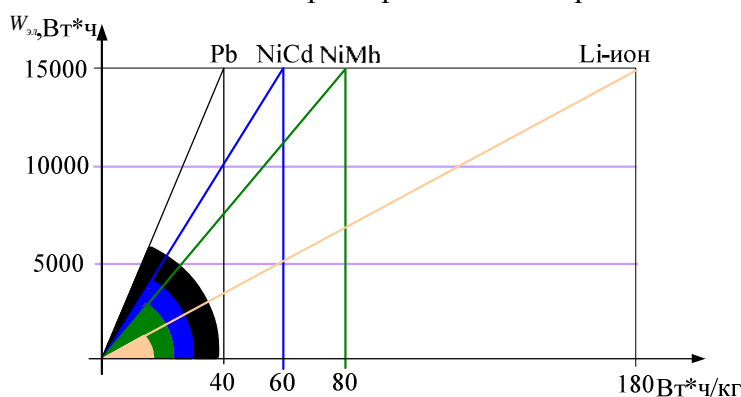


Рис. 5. Весовые показатели различных электрохимических систем аккумуляторов

Качественная оценка массового показателя накопителя, представлена в виде угла наклона соответствующей прямой к оси абсцисс (чем меньше угол, тем меньшую массу имеет аккумуляторная батарея соответствующей электрохимической системы, $W_{эл}$ представлена в масштабе 1:100).

Количественная величина массы накопителя энергии соответствует тангенсу угла наклона прямой. Расчёт показывает, что для обеспечения количества энергии в 15 000 Вт, масса свинцово-кислотной батареи составляет 375 кг, никель-кадмиевой – 250 кг, никель-металлгидридной – 187,5 кг и Li-ионной – 83,3 кг.

Заряд и разряд аккумуляторов проводится стабилизированным током, величина которого соответствует 1С при температуре +20 °С (рис. 6).

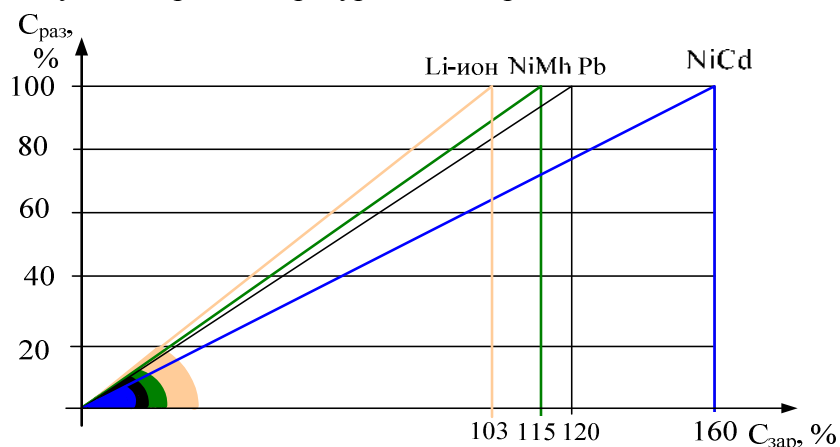


Рис. 6. Эффективность заряда различных электрохимических систем аккумуляторов

Из графиков видно, что наибольшей эффективностью при заряде обладает Li-ионная электрохимическая система, коэффициент полезного действия заряда которой близок к единице.

Так как транспортное средство эксплуатируется при различных температурах окружающей среды, необходимо учитывать влияние температуры аккумулятора на его способность отдавать энергию. При достаточно низких температурах, электрохимическим накопителям свойственно снижение разрядной ёмкости.

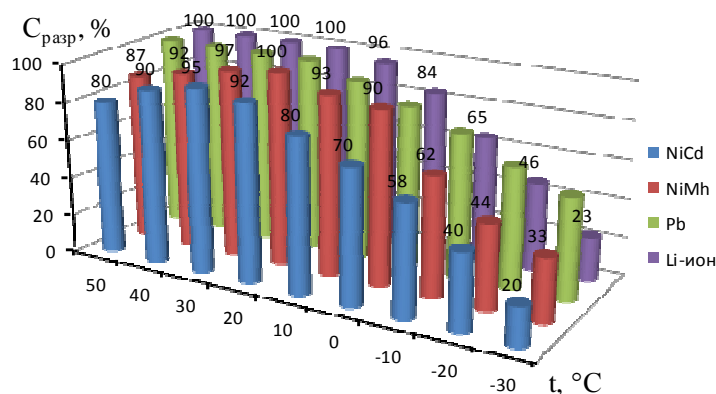


Рис. 7. Объемная гистограмма эффективности разряда различных аккумуляторов при различных температурах

Как видно из рис. 7, при положительных и отрицательных температурах наилучшие разрядные характеристики у Li-ионной и свинцово-кислотной электрохимических систем.

Самая низкая стоимость аккумулятора (0,12 \$/Вт·ч). Li-ионный аккумулятор в призматическом исполнении является наиболее дорогим из представленных систем, стоимость единицы энергии которого на сегодняшний день составляет (1,0 \$/Вт·ч).

На рис. 8 показаны массогабаритные показатели для обеспечения энергией 15000 Вт·ч. По осям координат отложены энергия, масса и объем.

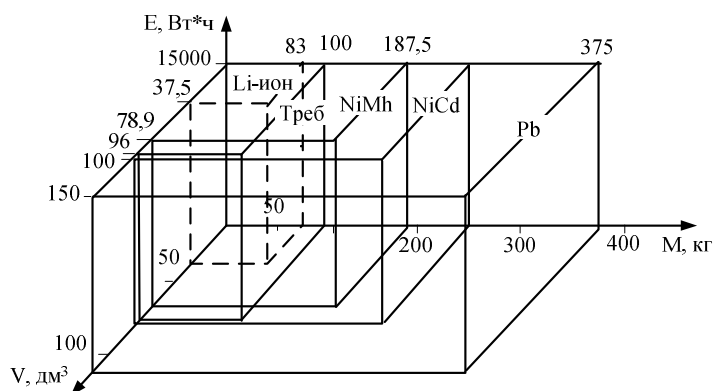


Рис. 8. Массогабаритные показатели аккумуляторных батарей

В настоящее время аккумуляторные батареи, выпускаемые заводом-изготовителем только в сухозаряженном состоянии, имеют срок хранения батарей без эксплуатации не более двух лет (гарантийный срок хранения 1 год). Рациональный уход за аккумулятором продлевает срок его эксплуатации [7].

Только часть энергии, которая поступает расходуется на заряд аккумулятора, другая часть превращается в тепло. Можно ввести понятие КПД процесса зарядки аккумулятора. Это та часть энергии, поступающей от зарядного устройства, которая запасается в аккумуляторе. Значение КПД никогда не бывает 100 %, при одних условиях подзарядки КПД выше, других – ниже. КПД может быть достаточно высоким, что позволяет проводить зарядку большими токами не опасаясь перегрева аккумулятора. Химические реакции, протекающие в NiMH аккумуляторе во время его подзарядки, является экзотермическими, в отличие от NiCd аккумуляторов, где они эндотермические. Это означает, что КПД зарядки NiMH аккумуляторов ниже, и они больше нагреваются. Это требует тщательного контроля процесса зарядки [8].

Степень изношенности аккумулятора влияет на КПД подзарядки. У старого аккумулятора ниже КПД. Для нового аккумулятора КПД не превышает 85 % при условии

подзарядки малым током. Для аккумулятора, который эксплуатируется уже не один год, КПД подзарядки составляет не более 50...60 %. Следует помнить, что при снижении температуры КПД зарядки падает. КПД современных аккумуляторов по емкости равен 0,85. КПД аккумулятора по энергии (отдача аккумулятора) определяется как отношение емкости по энергии при разрядке к емкости заряженного аккумулятора и для современных аккумуляторов составляет 0,68 [3–9].

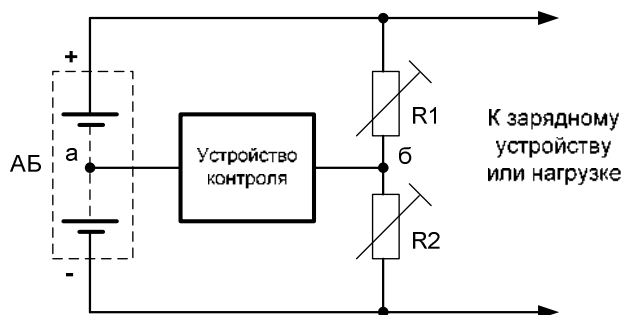


Рис. 9. Электротехнический комплекс контроля состояния авиационных аккумуляторных батарей

С целью выявления неисправностей в авиационных аккумуляторных батареях выполняется постоянный контроль над состоянием их параметров во всех режимах работы с помощью разработанной системы контроля (рис. 9).

Неисправности в аккумуляторной батарее определяют путем сравнения напряжений на двух половинах батареи. Систему контроля выполняют в виде делителя напряжения и устройства контроля разности напряжений между двумя частями батареи аккумуляторов. Делитель напряжения выполняют с помощью последовательно соединенных резисторов, которые подключают к контактам аккумуляторной батареи. Устройство контроля по разнице напряжений подключают между средней точкой аккумуляторной батареи и средней точкой делителя напряжения. Аккумуляторную батарею с устройством контроля подключают к нагрузке или к зарядному устройству.

Процесс выявления неисправностей в аккумуляторной батарее реализуется следующим образом. Устройство контроля разности напряжений на двух половинах аккумуляторной батареи находится между точкой «а» и средней точкой делителя «б» напряжения. Делитель напряжения выполняется последовательно соединенными резисторами R1 и R2, которые подключаются к контактам аккумуляторной батареи («+», «-») (рис. 9) [10].

При неисправности аккумуляторной батареи в любых эксплуатационных режимах напряжение между средней точкой батареи «а» и средней точкой делителя «б» напряжения близкое к нулю.

При неисправности аккумуляторной батареи, например, коротких замыканиях, обрывов внутри отдельных элементов, обрывов внешних соединений элементов батареи, изменения внутренних сопротивлений и сопротивлений межэлементных соединений, изменения ёмкости, переплюсовки элементов и т. д., появляется напряжение, которое будет зафиксировано устройством контроля [11].

Своевременное выявление неисправностей аккумуляторных батарей позволяет ограничить их разряд, увеличить надёжность функционирования электротехнического комплекса летательного аппарата и уменьшить расходы на эксплуатацию.

Выводы и предложения. 1. Сделан анализ особенностей эксплуатации авиационных аккумуляторных батарей в составе бортовых электротехнических комплексов летательных аппаратов.

2. После проведенного сравнительного анализа характеристик можно сделать вывод, что очевидные преимущества практически по всем основным параметрам имеют Li-ионные

аккумуляторы, а накопитель энергии, построенный на базе этих аккумуляторов, соответствует требованиям технического задания на источник энергии тягового электропривода.

3. Предложено для дальнейшей практической реализации разработанный электро-технический комплекс контроля состояния авиационных аккумуляторных батарей, с целью выявления неисправностей в аккумуляторных батареях в составе бортовых комплексов летательных аппаратов и обеспечения постоянного контроля за состоянием их параметров во всех режимах работы.

Список использованных источников

1. Bagotsky V. S. Electrochemical power sources : batteries, fuel cells, and supercapacitors / V. S. Bagotsky, A. M. Skundin, Y. M. Volfkovich. – Pennington: ECS, 2005. – 400 p.

2. *Безпека авіації* / [В. П. Бабак, В. П. Харченко, В. О. Максимов та ін.] ; за ред. В. П. Бабака. – К. : Техніка, 2004. – 583 с.

3. *Руководство по управлению безопасностью полетов* [Электронный ресурс]: Doc 9859 AN/460. / Международная организация гражданской авиации. – Издание второе. – Монреаль, 2009. – 363 с. – Режим з доступу: <http://aviadocs.net/icaodocs/Docs/>.

4. Коптев А. Н. Авиационное и радиоэлектронное оборудование воздушных судов гражданской авиации [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / А. Н. Коптев ; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Электрон. текстовые и граф. дан. (164 Мбайт). – Самара, 2011.

5. Багоцкий В. С. Химические источники тока / В. С. Багоцкий, А. М. Скудин. – М. : Энергоиздат, 1981. – 360 с.

6. Брускин Д. Э. Электроснабжение летательных аппаратов / Д. Э. Брускин, И. М. Синдеев. – М. : Высшая школа, 1988. – 263 с.

7. *О типе и мощности аккумуляторных батарей для системы управления и IGBT преобразователя синхронного тягового двигателя* / И. О. Синчук, О. Е. Мельник, Д. А. Шокаръев, С. Н. Бойко // *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енерго-ефективність»*. Ч. 2. – Х. : Інститут Електродинаміки НАН України, 2012. – С. 87–91.

8. Хеченашвили А. Микропроцессорные системы безопасности химических источников тока / А. Хеченашвили // VI межд. конференция «Фундаментальные проблемы электрохимической энергетики»; Саратов, 5-9 сентября 2005. – Саратов : Изд-во Саратовского университета, 2005. – С. 406–408.

9. *Деклараційний патент на корисну модель № 84633, Україна, H02P9/00. Система керування асинхронним генератором у складі вітроелектротехнічного комплексу* / О. М. Сінчук, Д. А. Михайличенко, С. М. Бойко, М. А. Щербак ; Патентовласник: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського. – № u201305538 ; заявл. 29.04.2013, опубл. 25.10.2013, Бюл. № 20.

10. *Патент України, МПК H01M 10/48 Пристрій для контролю справності тягових акумуляторних батарей* / Сінчук О.М., Сінчук І.О., Гузов Е.С., Сменова Л.В., Петриченко А.А., С.М. Бойко; патент України № 95416. – №u201407090 ; заявл. 23.06.2014 ; опубл. 25.12.2014, Бюл. № 24. – 4 с.

11. *Особенности эксплуатации автономной ветроэнергетической установки в подземных горных выработках железорудных шахт* / О. М. Сінчук, Д. А. Михайличенко, С. М. Бойко, О. М. Городній // *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки»*. – 2013. – № 3 (67). – С. 224–232.

References

1. Bagotsky, V.S., Skundin, A.M., Volfkovich, Y.M. (2005). *Electrochemical power sources: batteries, fuel cells, and supercapacitors*. Pennington: ECS.

2. Babak, V.P. (ed.), Kharchenko, V.P., Maksimov, V.O. et al. (2004). *Bezpeka aviatsiyi [Aviation Safety]*. Kyiv: Tehnika (in Ukrainian).

3. *Rukovodstvo po upravleniyu bezopasnostyu poletov [Safety Management Guide]*: Doc 9859 AN/460 (2009) (2nd ed.). Monreal. Retrieved from <http://aviadocs.net/icaodocs/Docs/>.

4. Koptev, A. N. *Aviatsionnoe i radioelektronnoe oborudovanie vozdushnyih sudov grazhdanskoy aviatsii [Aviation and radio electronic equipment of aircraft of civil aviation]*: Elektron. tekstovyye i graf. dan. (164 Mbayt). Samara, 2011.

5. Bagotskiy, V.S., Skudin, A.M. (1981). *Himicheskie istochniki toka [Chemical current sources]*. Moscow: Energoizdat (in Russian).

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

6. Bruskin, D.E., Sindeev, I.M. (1988). *Elektrosnabzhenie letatelnykh apparatov [Electric power supply of aircraft]*. Moscow: Vysshaya shkola (in Russian).

7. Sinchuk, I.O., Melnik, O.E., Shokarov, D.A., Boyko, S.N. (2012). O tipe i moschnosti akkumulyatornykh batarey dlya sistemy upravleniya i IGBT preobrazovatelya sinhronnogo tyagovogo dvigatelya [About the type and capacity of the battery for the control system and the IGBT converter of the synchronous traction motor]. *TehnIchna Elektrodinamika. Tematichnyy vipusk «Silova elektronika ta energoefektivnist» – Technical electro-dynamics. Thematic issue “Power Electronics and Energy Efficiency”*. Part 2. Kharkiv: Institut elektrodinamiki NAN Ukraini (in Ukrainian).

8. Khechenashvili, A. (2005). Mikroprotsessornyye sistemy bezopasnosti himicheskikh istochnikov toka [Microprocessor safety systems for chemical current sources]. Proceeding from VI Mezhd. Konferentsiya “Fundamentalnyye problemy elektrohimicheskoy energetiki” – VI Int. conference “Fundamental Problems of Electrochemical Energy” (Saratov, September 5-9, 2005). Saratov: Izdatelstvo Saratovskogo universiteta, pp. 406–408 (in Russian).

9. Sinchuk, O.M., Mihaylichenko, D.A., Boyko, S.M., Scherbak, M.A. (2013). *Sistema keruvannya asinhronnim generatorom u skladi vitroelektrotehnichnogo kompleksu [Control system of asynchronous generator in the structure of the wind-electrotechnical complex]*. Deklaratsiyinyy patent na korisnu model № 84633, Ukrayina, H02P9/00.

10. Sinchuk, O.M., Sinchuk, I.O., Guzov, E.S., Smenova, L.V., Petrichenko, A.A., Boyko, S.M. (2014). *Pristriy dlya kontrolyu spravnosti tyagovih akumulyatornih batarey [Device for monitoring the serviceability of traction batteries]*. Patent Ukrayini № 95416.

11. Sinchuk, O. M., Mihaylichenko, D. A., Boyko, S. M., Gorodny, O. M. (2013). Osobennosti ekspluatatsii avtonomnoy vetroenergeticheskoy ustanovki v podzemnykh gornyykh v yirabotkakh zhelezorudnykh shaht [Features of the operation of an autonomous wind power plant in underground mines of iron ore mines]. *Visnik Chernihivskoho derzhavnogo tehnolohichnogo universitetu. Seriya “Tehnichni nauki” – Visnik of Chernihiv State Technological University. Series “Technical Sciences”*, no. 3 (67), pp. 224–232 (in Russian).

UDC 621.311.4.031

Yurii Shmelyov, Serhii Boiko, Oleksiy Gorodny,
Olena Chernikhova, Serhii Vladov

ELECTRICAL ENGINEERING COMPLEX FOR STATUS OF AVIATION BATTERIES

Urgency of the research. On aircrafts, chemical sources of current are widely used. For example, on helicopters, rechargeable batteries used as buffer and emergency sources.

Target setting. In turn, in view of the complex specific operating conditions, it is necessary to monitor the condition of the on-board batteries of aircraft.

Actual scientific researches and issues analysis. A number of publications suggest a solution to this problem by checking the status of on-board batteries at the end of flights, and if possible and after each flight, which in real operating conditions takes time to diagnose and is not always possible.

Uninvestigated parts of general matters defining. Taking into account that leaded, silver-zinc and nickel-cadmium batteries used as on-board storage batteries, and as practice shows, none of the existing systems of chemical sources of current can fully satisfy all the requirements of various fields of application. In each area, one of the systems may have advantages over others. To assess the condition and efficiency of the systems of chemical current sources of aircraft, it is necessary to take into account their characteristics in the process of monitoring by means of an electrotechnical complex for monitoring the state of aviation storage batteries.

The research objective. In this paper, the main purpose of this work is the justification of the need for the application and development of an electrotechnical complex for monitoring the state of aviation batteries.

The statement of basic materials. The change in the physical properties of the ambient air affects the operation of the electrical equipment of the aircraft. The tactical and technical requirements for the equipment of aircrafts are designed taking into account the working conditions of electrical equipment and its purpose, including the following indicators: reliability and reliability of work, weight and dimensions, strength of electrical equipment, chemical resistance of electrical equipment, ease of operation and repair of electrical equipment, economic requirements. Proceeding from this, at the end of the flights, and if possible and after each flight, it is necessary to check the degree of discharge of battery batteries and their state (working capacity). In order to detect malfunctions in aircraft batteries, the monitoring of the status of their parameters in all modes of operation performed with the help of the developed control system. Timely detection of battery failures makes it possible to limit their discharge, increase the reliability of the electrical equipment of the aircraft and reduce operating costs.

Conclusions. The developed electro-technical complex for monitoring the state of aviation batteries have been proposed for further practical implementation in order to identify malfunctions in the battery in the airborne complexes and ensure constant monitoring of the state of their parameters in all operating modes.

Key words: state monitoring system; aviation batteries; charge characteristics.

Fig.: 11. Bibl.: 11.

УДК 621.311.4.031

Юрій Шмельов, Сергій Бойко, Олексій Городній,
Олена Черніхова, Сергій Владов

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИЙ КОМПЛЕКС КОНТРОЛЮ СТАНУ АВІАЦІЙНИХ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ

Проведено аналіз особливостей експлуатації і можливих режимів роботи акумуляторних батарей у складі електротехнічних комплексів літаючих апаратів. Результати порівняльного аналізу характеристик акумуляторних батарей показали очевидні переваги практично за всіма основними параметрами Li-іонних акумуляторів, а накопичувач енергії, побудований на базі цих акумуляторів відповідає вимогам технічного завдання як джерело енергії тягового електропривода. Обґрунтовано необхідність застосування комплексу контролю стану авіаційних батарей. Розроблено і запропоновано для подальшої реалізації електротехнічний комплекс контролю стану авіаційних акумуляторних батарей.

Ключові слова: система контролю стану; авіаційні акумуляторні батареї; зарядні характеристики.

Рис.: 1. Бібл.: 11.

Шмельов Юрій Миколайович – кандидат технічних наук, заступник начальника коледжу з навчальної роботи, викладач кафедри енергозабезпечення і систем управління, Кременчуцький льотний коледж Національного авіаційного університету (вул. Перемоги, 17/6, м. Кременчук, 39605, Україна).

Шмелев Юрій Николаевич – кандидат технічних наук, заступник начальника коледжу по учебной работе, преподаватель кафедры энергообеспечения и систем управления, Кременчугский летный колледж Национального авиационного университета (ул. Победы, 17/6, г. Кременчуг, 39605, Украина).

Shmelyov Yuriy – PhD in Technical Sciences, Deputy College Chief for Curriculum, Teacher of the Department of Energy Supply and Management Systems, Kremenchuk Flight College of National Aviation University (17/6 Peremohy Str., 39605 Kremenchuk, Ukraine).

E-mail: ref.nv.klknau@gmail.com

Бойко Сергій Миколайович – кандидат технічних наук, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського (вул. Першотравнева 20, м. Кременчук, 39600, Україна).

Бойко Сергей Николаевич – кандидат технических наук, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского (ул. Первомайская 20, г. Кременчуг, 39600, Украина).

Boiko Serhii – PhD in Technical Sciences, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University (20 Pershotravneva Str., 39600 Kremenchuk, Ukraine).

E-mail: bsn1987@i.ua

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9778-2202>

Городній Олексій Миколайович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри промислової електроніки, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Городний Алексей Николаевич – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры промышленной электроники, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14035, Украина).

Gorodny Oleksiy – PhD in Technical Sciences, senior lecturer of the Industrial Electronics Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: aleksey.gorodny@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5303-9564>

Web of Science: H-1425-2016

Scopus: ID 55327980200; ID 56338229500; ID 57191829796.

Черніхова Олена Сергіївна – викладач циклової комісії менеджменту організації транспорту, Кременчуцький льотний коледж Національного авіаційного університету (вул. Перемоги, 17/6, м. Кременчук, 39605, Україна).

Чернихова Елена Сергеевна – преподаватель цикловой комиссии менеджмента организации транспорта, Кременчугский летный колледж Национального авиационного университета (вул. Перемоги, 17/6, м. Кременчук, 39605, Украина).

Chernikova Olena – teacher of the Department of Management of the Organization of Transport, Kremenchuk Flight College of National Aviation University (17/6, Peremohy str., Kremenchuk, 39605, Ukraine).

E-mail: nml.nv.klknau@gmail.com

Владов Сергій Ігорович – кандидат технічних наук, завідувач навчально-методичної лабораторії, викладач кафедри енергозабезпечення і систем управління, Кременчуцький льотний коледж Національного авіаційного університету (вул. Перемоги, 17/6, м. Кременчук, 39605, Україна).

Владов Сергей Игоревич – кандидат технических наук, заведующий учебно-методической лаборатории, преподаватель кафедры энергообеспечения и систем управления, Кременчугский летный колледж Национального авиационного университета (ул. Победы, 17/6, г. Кременчуг, 39605, Украина).

Vladov Serhii – PhD in Technical Sciences, Head of Educational-methodical Laboratory, teacher of the Department of Energy Supply and Management Systems, Kremenchuk Flight College of National Aviation University (17/6, Peremohy Str., Kremenchuk, 39605, Ukraine).

E-mail: nml.nv.klknau@gmail.com

Віктор Шевченко, Богдан Пахалюк, Олександр Гусев

ОГЛЯД ОСНОВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ БЕЗДРОТОВОЇ ЗАРЯДКИ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ МАЛОПОТУЖНИХ СИСТЕМ

Актуальність теми дослідження. Розробка нових топологій, методів розрахунку та оптимізації напівпровідникових перетворювачів для систем БПЕ дозволить підвищити передану бездротовим способом електричну енергію, розширити діапазон регулювання частоти, що зменшить витрати часу на підзарядку акумуляторів електротранспорту та підвищить зручність використання систем БПЕ за рахунок зниження чутливості до точного позиціонування приймальних і передавальних елементів, що стане передумовою більш активного впровадження електромобілів та електротранспорту. В умовах різної екологічної, демографічної, економічної ситуації у світі все більшого поширення набуває індивідуальний електротранспорт.

Вирішення поставлених завдань створить передумови для впровадження БПЕ в багатьох сферах суспільства як України, так і світу загалом (приватний транспорт, військова техніка та обладнання, побутова електроніка тощо).

Постановка проблеми. Нині методи бездротової передачі енергії (БПЕ), засновані на явищах електростатичної та електромагнітної індукції, набувають значного поширення в різноманітних застосуваннях. Метод БПЕ сьогодні широко використовується в малопотужних системах – бездротові зарядки мобільних телефонів, бритв, зубних щіток, малопотужних транспортних засобів.

Основні обмеження таких систем полягають у низькій ефективності при великій відстані передачі та відносно великих масогабаритних параметрах елементів, що у свою чергу призводить до високої собівартості систем БПЕ. Останнім часом з'являється все більше споживачів, які потребують передачі безконтактним способом електричної енергії від одиниць кіловат і вище.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз стану досліджень показує, що тематика досліджень, присвячених вдосконаленню систем бездротової зарядки, постійно розширюється і є надзвичайно актуальною, зокрема, за кордоном. Особливо, враховуючи розвиток електромобілів, зростає інтерес до бездротової зарядки транспортних засобів. Також є рішення індуктивних системи передачі енергії для приладів низької напруги середньої та високої потужності.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Якщо статичній та динамічній зарядці електрокарів присвячено чимало статей і розробок, то індивідуальним засобам пересування приділено менше уваги, отже, проектуванню низьковольтної бездротової зарядки для електровелосипедів, електроскутерів, велособілів є перспективним напрямком дослідження. Сучасні дослідження спрямовані саме на досягнення зниження собівартості та підвищення ефективності систем бездротової зарядки подібних транспортних засобів.

Постановка завдання. Основними завданнями є огляд та порівняння існуючих топологій, методів розрахунку та напрямки оптимізації систем БПЕ.

Викладення основного матеріалу. У першій частині статті розглянуто загальні відомості про принципи дії і застосування ємнісного та індуктивного способу бездротової передачі енергії, наведено переваги та недоліки, ефективність. Акцентовано увагу на магнітно-резонансному зв'язку, розглянуто основні компенсаційні топології. Побудовано графіки залежності передавальної функції БПЕ від частоти для послідовно-послідовної схеми резонансу. Особливо представлено ймовірну залежність від відстані між передавачем та приймачем.

У другій частині статті зроблено аналіз існуючих силових напівпровідникових топологій БПЕ на основі індуктивного зв'язку та різних компенсаційних топологій. Спочатку аналізуються індуктивні системи передачі енергії для приладів низької напруги високої потужності. Топології первинних та вторинних dc-dc перетворювачів відбираються та порівнюються з погляду необхідної номінальної потужності та ефективності. Проаналізовано систему БПЕ на основі інвертору струму та компенсаційної резонансної PS-топології для електричних транспортних засобів та пристроїв для заряджання акумулятора. Розглянута цікава стаття, де проаналізовано та порівняно запропонований бортовий зарядний пристрій електричного транспортного засобу на базі імпульсної ланки зі звичайним БЗП. Далі представлено варіант топології та економічно ефективної конструкції антен для передачі бездротової енергії в електричних скутерах. Крім суто схематичних рішень, розглянуто інші рішення у сфері силових електроніки, які поліпшують ефективність бездротової передачі електроенергії. Представлено новий високоефективний планарний підхід до об'єднання всіх магнітних компонентів первинно-паралельного ізольованого підсилюючого перетворювача у структуру форми E-I-E-core (планарний інтегрований магнетик -planar integrated magnetic – PIM).

Висновки. У статті виконаний огляд основних технологій бездротової зарядки накопичувачів енергії для малопотужних систем. Було виявлено, що індуктивний спосіб передачі енергії є найбільш ефективним на цей момент. Водночас слід відзначити, що при збільшенні відстані передачі ефективність значно падає. Покращення геометрії магнітних компонентів є основним напрямком дослідження в цьому напрямку. Основні топологічні рішення схем силових електроніки зводяться до реалізації чотирьох основних способів компенсації для отримання синусоїдальної напруги. Тобто для різних задач обираються різні топології з тими чи іншими модифікаціями, залежно, передусім, від потужності, яку потрібно передати та навантаження. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на зменшення кількості напівпровідників та альтернативним способом реалізації компенсації.

Ключові слова: бездротова передача енергії; магнітно-резонансний зв'язок; компенсаційна топологія; бортовий зарядний пристрій; високочастотний інвертор.

Рис.: 8. Бібл.: 25.

Постановка проблеми. Методи бездротової передачі енергії (БПЕ), засновані на явищах електростатичної та електромагнітної індукції, набувають значного поширення в різноманітних застосуваннях. Метод БПЕ є однією із ключових технологій майбутнього.

ого, хоча і відомий з кінця XIX сторіччя (досліди Н. Тесла), і сьогодні широко використовується в малопотужних системах – бездротові зарядки мобільних телефонів, бритв, зубних щіток, малопотужних транспортних засобів.

Основні обмеження таких систем полягають у низькій ефективності при великій відстані передачі та відносно великих масогабаритних параметрах елементів, що у свою чергу призводить до високої собівартості систем БПЕ. Останнім часом з'являється все більше споживачів, які потребують передачі безконтактним способом електричної енергії від одиниць кіловат і вище, зокрема для підзарядки акумуляторів електромобілів, одночасної підзарядки акумуляторів портативних пристроїв військового застосування (дрони, радіостанції тощо), живлення елементів промислових систем автоматизації та робототехніки.

З іншого боку, вартість акумуляторних батарей є іншою важливою складовою собівартості таких систем. Через складність реалізації високоефективної системи на відносно низьких напругах, дешеві низьковольтні батареї практично не використовуються. Водночас високовольтні батареї є більш складними та дорогими в обслуговуванні.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Аналіз стану досліджень показує, що тематика досліджень, присвячених вдосконаленню систем бездротової зарядки, постійно розширюється і є надзвичайно актуальною, зокрема, за кордоном [1–5]. Особливо, враховуючи розвиток електромобілів, зростає інтерес до бездротової зарядки транспортних засобів. Відомі аналоги таких систем. Разом з тим широкому впровадженню заважає недосконалість технологій та висока собівартість таких систем. Якщо статичній та динамічній зарядці електрокарів присвячено чимало статей і розробок, то індивідуальним засобам пересування приділено менше уваги, отже, проектування низьковольтної бездротової зарядки для електровелосипедів, електроскутерів, велособілів є перспективним напрямком дослідження. Сучасні дослідження спрямовані саме на досягнення зниження собівартості та підвищення ефективності систем бездротової зарядки подібних транспортних засобів.

Мета статті. Основною метою статті є огляд існуючих топологій, методів розрахунку та напрямки оптимізації систем БПЕ.

Загальні відомості про застосування індуктивного та ємнісного способу бездротової передачі електроенергії.

З-поміж основних способів бездротової передачі енергії (мікрохвильове й оптичне випромінювання, методи електричної провідності, електростатичної та електромагнітної індукції) найбільше практичне поширення і застосування отримали методи електростатичної та електромагнітної індукції.

Метод електростатичної індукції. Метод був уперше застосований Н. Теслою для живлення бездротових ламп по повітрю. Електростатичний або ємнісний зв'язок являє собою проходження електроенергії через діелектрик. На практиці це градієнт електричного поля або диференціальна ємність між двома або більше ізольованими клемми, пластинами, електродами або вузлами, що підносяться над провідною поверхнею. Електричне поле створюється за рахунок заряду пластин змінним струмом високої частоти і високого потенціалу. Ємність між двома електродами і живлячим пристроєм утворює різницю потенціалів. Електрична енергія, що передається за допомогою електростатичної індукції, може бути використана у приймальному пристрої, наприклад, такому як бездротові лампи. Тесла продемонстрував бездротове живлення ламп освітлення енергією, переданою змінним електричним полем. У майбутньому планується, що пристрої будуть отримувати енергію з повітря, за допомогою передавального терміналу.

Цей спосіб має більшу відстань передачі, аніж у методі електромагнітної індукції, однак нижчу ефективність і потужність передачі [6]. Переважна більшість робіт вітчизняних учених присвячена БПЕ на основі саме ємнісного зв'язку [7–9].

Метод електромагнітної індукції (індуктивний зв'язок). При бездротовій передачі енергії методом електромагнітної індукції використовується ближнє електромагнітне поле. Завдяки електродинамічній індукції, змінний електричний струм, що протікає через первинну обмотку, створює змінне магнітне поле, яке діє на вторинну обмотку, індукуючи в ній електричний струм. Для досягнення високої ефективності взаємодія має бути досить тісною. При віддаленні вторинної обмотки від первинної все більша частина магнітного поля не досягає вторинної обмотки й індуктивний зв'язок стає все більш неефективним через втрати.

Повітряний трансформатор є найпростішим пристроєм для бездротової передачі енергії. Первинна і вторинна обмотки трансформатора прямо не пов'язані. Передача енергії здійснюється за допомогою процесу, відомого як взаємна індукція. Основною функцією трансформатора є збільшення або зменшення первинної напруги. Основним недоліком цього методу бездротової передачі є дуже невелика відстань його дії. Приймач повинен перебувати в безпосередній близькості до передавача для того, щоб ефективно з ним взаємодіяти.

Найпростіша топологія із чисто індуктивним зв'язком та компенсуючими конденсаторами представлена на рис. 1, а. За допомогою конденсаторів, що утворюють резонансні контури, збільшується ефективність передачі.

Еквівалентні схеми заміщення спарених індуктивностей представлені на рис. 1, б та 1, в. На першій схемі (рис. 1, б) спарені індуктивності представлені через самоіндуктивності L_1 , L_2 та взаємоіндуктивність M . У другому варіанті схеми заміщення індуктивності представлені ідеалізованим трансформатором, індуктивністю намагнічування та індуктивністю розсіювання. При цьому ці параметри напряму виражаються через параметри в попередній схемі. R_1 , R_2 – активні опори, враховують омичні втрати первинного та вторинного кіл; L_1-M , L_2-M – індуктивності розсіювання основного потоку в обмотках первинного та вторинного кіл. Взаємоіндукція виражає індуктивність намагнічування.

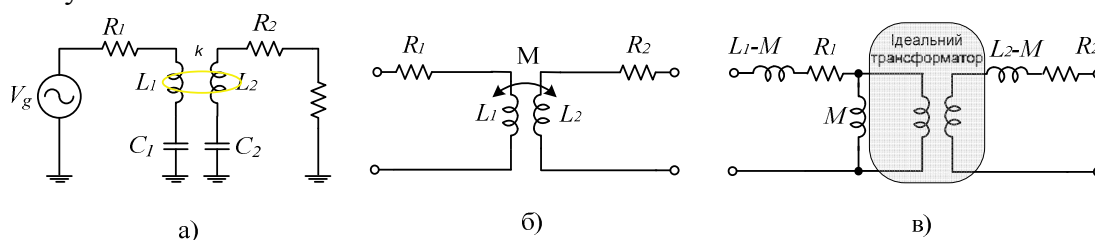


Рис. 1. Резонансний спосіб БПЕ:

а – схема індуктивного резонансного способу БПЕ; б – топологія БПЕ з індуктивним зв'язком; в – схема заміщення спарених індуктивностей

Системи з виключно індуктивним зв'язком мають ефективність значно нижчу за системи із магнітно-резонансним зв'язком. Великий повітряний розрив трансформатора збільшує витік потоку Φ , як наслідок, призводить до вищої індуктивності витіку в порівнянні зі звичайними трансформаторами. Ефективність та потужність ППЕ, як правило, не перевищують 50 % [10]. Використання резонансу дещо збільшує дальність передачі [11]. При резонансній індукції передавач і приймач налаштовані на одну частоту. Таким чином, значна потужність може бути передана між двома взаємно налаштованими LC-ланцюгами з відносно невисоким коефіцієнтом зв'язку k .

Асоціація споживачів електроніки класифікує технології бездротових зарядних пристроїв за величиною коефіцієнта зв'язку контурів [12]. При значенні коефіцієнта зв'язку

до 0,1 система називається слабозв'язаною, а якщо коефіцієнт наближається до 1, то це сильнозв'язана система. Сильнозв'язані системи називаються магнітно-індуктивними, а слабозв'язані – магнітно-резонансними.

Магнітно-резонансна технологія менш критична до взаємного розташування котушок, і з одним передавачем може працювати одразу кілька приймачів, тобто один зарядний пристрій може заряджати кілька пристроїв. Крім того, у магнітно-резонансних системах, з налаштованими в резонанс котушками зменшення ККД при збільшенні відстані між котушками відбувається повільніше в порівнянні з індуктивними системами. Вищеперелічені факти було доведено зокрема у процесі глибокого аналізу в роботі [13]. Ще більша перевага в ефективності магнітно-резонансних систем досягається, коли первинна і вторинна котушка мають різні розміри. У цьому випадку одну первинну котушку можна використовувати для зарядки декількох пристроїв одночасно [14].

Згідно з рекомендаціями стандартів [12], заснованих на технології магнітної індуктивності, резонансна частота вибирається з урахуванням навантаження і може змінюватися в досить широкому діапазоні. У зв'язку з цим ефективна добротність системи відносно низька порівняно з рішеннями на базі технології магнітного резонансу. Оптимальна ефективність системи може бути досягнута тільки на певній резонансній частоті і при оптимальному опорі навантаження. У разі використання магнітно-резонансної технології енергія передається на строго визначеній резонансній частоті, отже, добротність системи вище, але потрібне дуже точне узгодження резонансних частот.

Передавальна і приймальна котушки, як правило, являють собою одношарові соленоїди або плоску спіраль з набором конденсаторів, які дозволяють налаштувати приймальний елемент на частоту передавача.

Існує 4 базові компенсаційні топології (рис. 2), на основі яких створюється переважна більшість напівпровідникових рішень: послідовно-послідовні (SS), послідовно-паралельні (SP), паралельно-послідовні (PS) та паралельно-паралельні (PP).

Під час аналізу застосування існуючих топологій було виявлено, що найменш часто використовується схема із паралельно-послідовним (PS) включенням (рис. 2, з). Як виняток, можна навести випадок при передачі енергії від сонячних панелей, тобто при специфічних вхідних параметрах, які забезпечують ВАХ панелей [15].

Загальна схема на основі PS топології забезпечує м'яке перемикання всіх напівпровідникових пристроїв. Тобто у деяких окремих випадках ця топологія може бути найкращим рішенням.

У паралельно-паралельній топології (PP) індуктивної БПЕ з резонансним перетворювачем (рис. 2, б), конденсатори паралельно розташовані на вході та виході схеми.

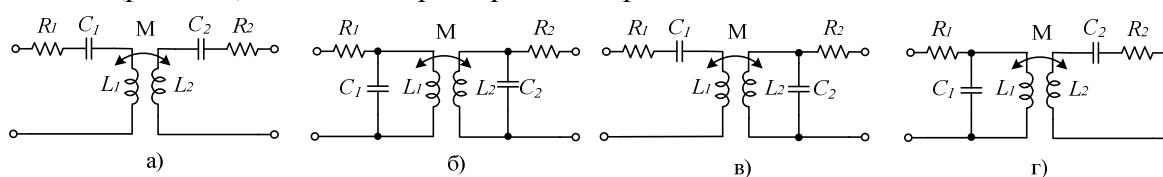


Рис. 2. Компенсаційні топології ППЕ: а – послідовно-послідовна (SS); б – паралельно-паралельна (PP); в – послідовно-паралельна (SP); г – паралельно-послідовна (PS)

Згідно з дослідженнями [16] паралельно-паралельна топологія має дещо більші переваги при значному навантаженні, в інших випадках в послідовно-послідовній топології буде більша ефективність. Сюди ж варто додати, що паралельна топологія на стороні приймача є кращим рішенням при деяких навантаженнях.

У послідовно-послідовній (SS) топології конденсатори послідовно розташовані на первинній та вторинній стороні, як показано на рис. 2, а. Основною метою цієї конфі-

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

гурації є усунення індуктивності витoku [10]. Передана потужність на частоті резонансу не залежить від опору навантаження і ККД на цьому етапі є максимальним.

У [5] описано такі висновки щодо порівнянь топологій. Порівнюючи SS з параметрами SP (рис. 2, в), можна побачити, що вибір топології сильно впливає на вибір первинної ємності. Важливою перевагою послідовно-послідовної топології є те, що первинна ємність не залежить як від коефіцієнта магнітного зв'язку, так і від навантаження. Натомість послідовно-паралельна топологія залежить від коефіцієнта зв'язку і вимагає більшого значення ємності для сильного магнітного зв'язку.

У таких приладах, як зарядні пристрої для акумулятора, навантаження постійно змінюється. Якщо підсилення напруги робочої точки чутливе до значення навантаження, тоді напруга навантаження змінюється протягом процесу заряджання. Порівняння частотного аналізу перетворювачів на основі SS-топології та PP-топології показує, що SS є найкращою топологією для зарядних пристроїв електричних машин [10].

Тобто для різних задач обираються різні топології з тими чи іншими модифікаціями, залежно від потужності, яку потрібно передати в навантаження.

Основне обмеження індуктивної передачі енергії полягає в коефіцієнті магнітного зв'язку, добротності резонансного контуру та ефективності силового перетворювача. Окремо слід відзначити, що ефективність такої системи сильно залежить від частоти резонансного контуру, яка має збігатися з частотою комутації напівпровідникових ключів. Вирішення цієї проблеми зводиться до використання складних систем зворотного зв'язку і налаштування частоти комутації. Саме ці проблеми обмежують широке впровадження таких систем. Відповідно, основні подальші вдосконалення існуючих рішень полягатимуть в оптимізації магнітних компонентів і силового перетворювача електроенергії.

На рис. 3, а наведено приклад залежності передавальної функції БПЕ від частоти для послідовно-послідовної схеми резонансу. Окремо представлена типова залежність індуктивного зв'язку від відстані між передавачем та приймачем (рис. 3, б). З експоненційного характеру залежності можна зробити висновок, що ефективність системи значною мірою залежить від відстані між передавачем та приймачем. Залежність передавальної характеристики від відстані є одним з ключових факторів доцільності синхронізації передавальної і приймальної частин та підстройки частоти.

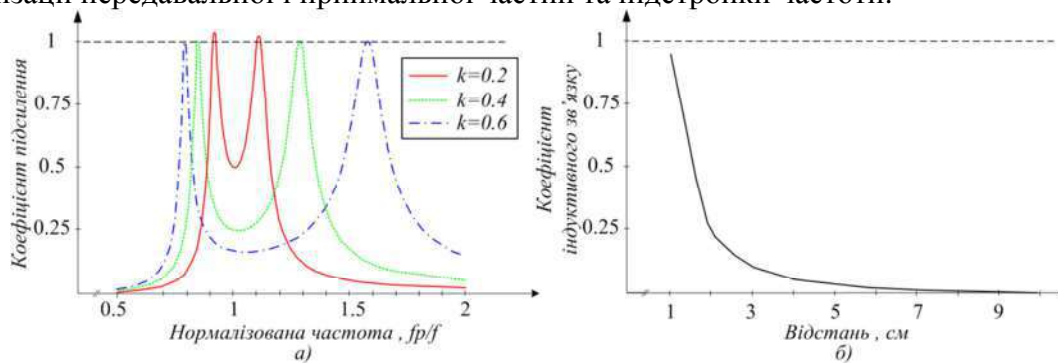


Рис. 3. Залежності: а – передавальної функції БПЕ від частоти;
б – індуктивного зв'язку від відстані

Резонансна електродинамічна індукція застосовується для зарядки акумуляторних батарей портативних пристроїв, таких як портативні комп'ютери і стільникові телефони, медичні імпланти й електромобілі. Техніка локалізованої зарядки використовує вибір відповідної передавальної котушки у структурі масиву багат шарових обмоток. Резонанс використовується як у панелі бездротової зарядки (передавальному контуру), так і в модулі приймача (вбудованого в навантаження) для забезпечення максимальної ефективності передачі енергії. Така техніка передачі підходить універсальним бездротовим зарядним панелям для підзарядки портативної електроніки, такої, наприклад, як мобільні телефони. Техніка прийнята як частина стандарту бездротової зарядки Qi [14].

Зарядка низьковольтних накопичувачів енергії по безпроводному інтерфейсу є одним з останніх технологічних досягнень, що набувають масового характеру. Розвиток технології безпроводної зарядки є одним з пріоритетних напрямків досліджень провідних світових лабораторій із силової електроніки.

У силу більшої мобільності і компактності електровелосипедів, електроскутерів, електромобілів, порівняно із класичною дротовою системою зарядки виникає менше труднощів. Однак багато електромобілів та транспорту із потужністю системи менше 20 кВт (наприклад, підйомники, навантажувачі для внутрішнього промислового транспорту, індивідуальний електротранспорт) працюють від свинцево-кислотних батарей з напругою 12, 24, 48, 60 або 96 В. Через низьку напругу батареї вони характеризуються великими струмами зарядки та розрядження, тому непросто досягти високої ефективності такої системи. При успішному вирішенні цієї проблеми це може допомогти зменшити простір на обслуговування транспортних засобів та підвищити доступність, що важливо, особливо у промисловості.

Аналіз існуючих напівпровідникових топологій бездротової передачі енергії на основі індуктивного зв'язку.

Головним завданням є реалізація однієї з еквівалентних схем (рис. 2). Це можна зробити за допомогою напівпровідникових перетворювачів. Далі представлено декілька силових напівпровідникових топологій БПЕ.

У дослідженнях [17; 18] аналізуються індуктивні системи передачі енергії для приладів низької напруги високої потужності. Тому топології первинних та вторинних dc-dc перетворювачів відбираються та порівнюються з погляду необхідної номінальної потужності та ефективності. Аналіз проводиться для системи БПЕ з вхідною напругою 400 В, напругою акумулятора 24 В та номінальною вихідною потужністю 6 кВт. Схема реалізована на послідовно-послідовній топології БПЕ.

Силова електроніка в системах індуктивної БПЕ повинна виконувати 3 основні функції:

1. Передачі енергії між первинною та вторинною сторонами.
2. Управління передачею енергії під впливом зміни вхідних і вихідних параметрів.
3. Зробити систему максимально ефективною.

На рис. 4, а високочастотний інвертор (ВЧ інвертор) перетворює первинну напругу постійного струму в напругу змінного струму з високою частотою, тим самим забезпечуючи передачу енергії на вторинну сторону. У цій простій конфігурації ВЧ інвертор може також використовуватися для керування вихідною потужністю системи, змінюючи робочий цикл. Проте ефективність такого методу може бути знівельована від високих втрат у ВЧ інверторі внаслідок жорстких умов перемикавання.

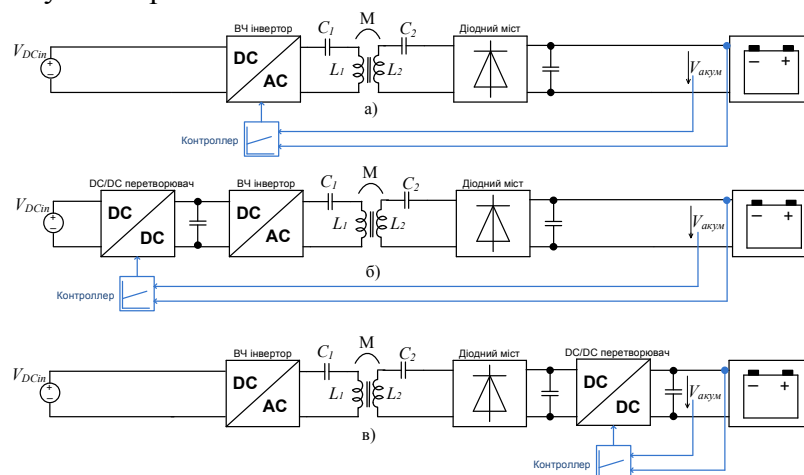


Рис. 4. Послідовні топології зі схемою контролю вихідної потужності:
а – без DC/DC перетворювача; б – із первинним DC/DC перетворювачем;
в – із вторинним DC/DC перетворювачем

Інші варіанти показані на рис. 4, б та 4, в, де додатковий dc-dc перетворювач встановлюється або на первинну сторону, як у [18], або на вторинній стороні [17; 18] для керування передачею енергії. Як наслідок, ВІ може працювати майже з м'яким перемиканням, що підвищує ефективність. Що стосується вибору правильної топології для низької напруги, то третій варіант має деякі помітні переваги. Через те, що напруга системи від'єднана від напруги акумулятора dc-dc перетворювачем, у резонансному ланцюзі та випрямлячі можна уникнути високих струмів у діапазоні струму зарядки (від 200 до 250 А на 6 кВт), що призводить до зниження втрат провідності. Електрична схема показана на рис. 5. Крім того, на відміну від інших топологій, ніякого зв'язку через повітряний зазор для керування вихідною потужністю не потрібно. Через вищенаведені переваги топологія з вторинним перетворенням є перспективним рішенням [17; 18]. Інші варіанти є менш доцільними і доступними через високу складність керування.

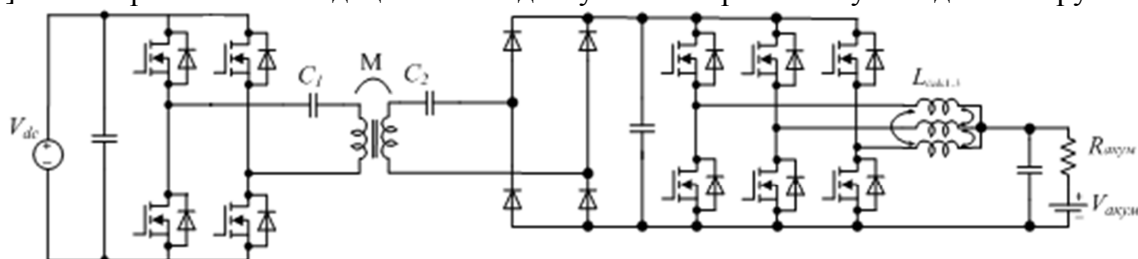


Рис. 5. Схема силової топології для системи ППЕ для низьковольтних високотужних застосувань

ВІ реалізується у повномостовій конфігурації, оскільки це найпоширеніша топологія, що використовується у багатьох рішеннях з найбільшою ефективністю. На вторинній стороні діодний випрямляч використовується для перетворення напруги від змінного струму до постійного струму. Можливий варіант використання топології активного випрямляча. У пристроях з низькою напругою для підвищення ефективності можуть використовуватись багатофазні dc-dc перетворювачі з чергуванням фаз і спареними індуктивностями [10]. Індуктивність визначається так, щоб максимальна пульсація фазового струму становила 30 % від загального номінального вихідного струму.

Показано в багатьох роботах, що топологія з вторинним dc-dc перетворенням має переваги в тому, що вона є більш збалансованою, досягає вищої ефективності та відсутній зв'язок між первинною та вторинною сторонами для керування вихідною потужністю. Також виявлено, що випрямляч та dc-dc перетворювач забезпечують більшість втрат потужності в системі БПЕ. Хоча навіть у такому випадку ефективність між 89,0 і 94,2 % може бути досягнута в будь-якій точці експлуатації для часткового та повного завантаження прототипу, побудованого в лабораторії.

У статті [15] проаналізовано систему БПЕ на основі інвертора струму та компенсаційної резонансної PS-топології для електричних транспортних засобів та пристроїв для заряджання акумулятора. Розроблено лабораторний прототип 420 Вт, максимальна ефективність етапу WPT DC-DC, близька до 90 %, а коефіцієнт зчеплення – 18 %. Вхідна індуктивність L_d на загальній схемі (рис. 6) у цій статті обмежує струм короткого замикання через напівпровідникові прилади та котушки. Це є важливою особливістю цієї топології. Метою послідовних діодів (D1-D2') є запобігання зворотного струму. Наприклад, коли включені транзистори S1 і S2, і якщо напруга на C1 негативна, то C1 буде короткозамкненим через S2'-D2. Однак, якщо вихідна напруга та струм інвертора перебувають у тій же фазі, то немає потреби в цих діодах. Проте на практиці параметри ланцюга і взаємні індуктивності змінюються, отже, коефіцієнт потужності відхиляється від одиниці.

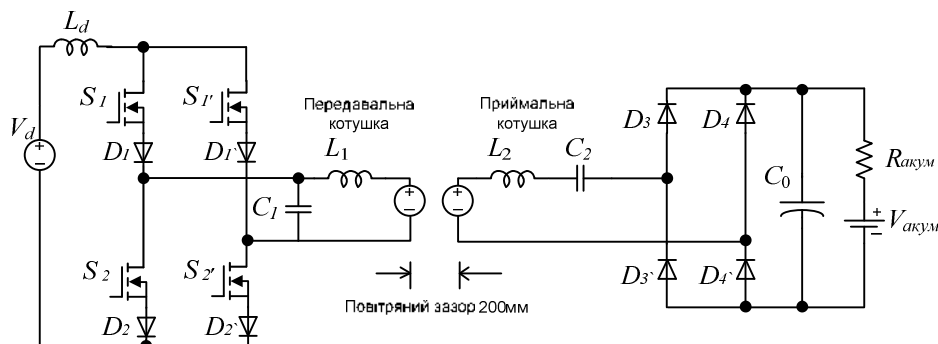


Рис. 6. БПЕ (DC-DC перетворення) із використанням повномостового перетворювача струму

Щодо оптимізації схеми, то було відзначено, що зворотні блокуючі ізольовані вхідні біполярні транзистори (RV-IGBT) могли б усунути використання діодів, що обов'язкові при застосуванні транзисторів MOSFET. Однак нині RV-IGBT в основному тільки розробляються і недоступні широкому колу користувачів. Послідовно з'єднаний конденсатор C_2 потрібен для досягнення бажаного резонансу в котушці приймача. Таким чином, компенсується велике падіння напруги за рахунок індуктивності котушки приймача L_2 .

Здебільшого додаткова індуктивність на вході може бути не найкращим рішенням. Проте в конкретному випадку, при специфічних вхідних параметрах, які забезпечують, наприклад, ВАХ сонячних панелей, ця топологія може бути більш вигідною.

Цікава топологія розглянута у статті [19]. У цій роботі проаналізовано та порівняно запропонований бортовий зарядний пристрій електричного транспортного засобу (БЗП) на базі імпедансної ланки зі звичайним БЗП (рис. 7, б). Завдяки імпедансній ланці, інвертор одночасно регулює вихідну напругу системи без додавання додаткових напівпровідникових перетворювачів (рис. 7, а).

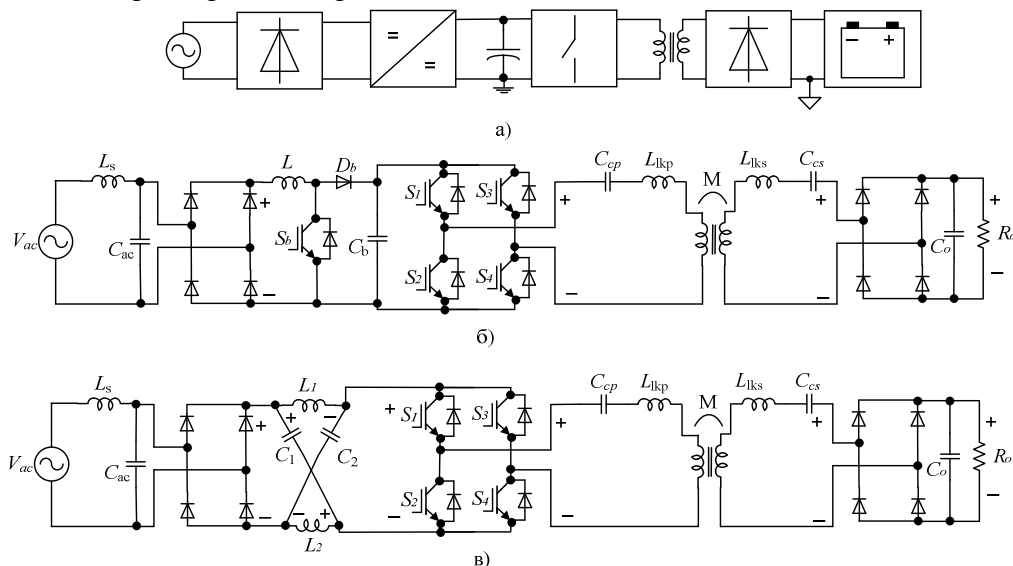


Рис. 7. Схеми бездротового зарядного пристрою: а – структурна схема звичайного БЗП; б – типовий підвищувач перетворювач в БЗП; в – запропонований БЗП на основі імпедансної ланки

Незважаючи на те, що імпедансна ланка зменшує кількість силових напівпровідників у системі, спостерігається збільшення кількості пасивних компонентів порівняно з підвищувачем. Головний недолік цього факту полягає в тому, що пер-

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

винна частина системи може мати більший розмір і вагу. Детальний аналіз та порівняння імпедансних та квазі-імпедансних ланок показано в багатьох статтях [20–23].

Крім того, згідно з [23], конденсатори та напівпровідникові прилади мають більші показники відмов та старіння (відповідно 30 та 21 %) серед усіх компонентів в електронній системі. Традиційний підвищуючий перетворювач має два напівпровідникові пристрої та конденсатор, у той час як перетворювач на основі імпедансної ланки не має додаткових напівпровідникових приладів. Нарешті, додавання імпедансної ланки підвищує надійність системи, оскільки в такій схемі відсутні заборонені стани комутації транзисторів.

При використанні перетворювача з імпедансною ланкою додається одна додаткова контрольна змінна, яка визначає тривалість режиму повної провідності, коли відкриті всі транзистори та використовується для керування вихідної напруги. У порівнянні зі звичайним перетворювачем таке рішення має кращу ефективність для коефіцієнтів підсилення від 1 до 1,34, не вимагає додаткових напівпровідникових пристроїв. Запропонована однорівнева система перетворювача досягла коефіцієнта потужності 0,987 при повному завантаженні та регулюванні вихідної напруги системи до 200 В. Результати експериментів базувалися на прототипі потужністю 1 кВт з 20-сантиметровим повітряним зазором між перетворювачем первинної та вторинної частини.

У розробленій авторами [24] системі представлено економічно ефективна конструкція антен для передачі бездротової енергії в електричних скутерах. Запропоноване рішення може бути застосоване до будь-якого комерційного електричного скутера, самоката, іншого дво- та трьохколісного електротранспорту із живленням 48 В/20 Аг. Використання антени направленої форми дозволило підвищити ефективність передачі енергії. Передаючі котушки встановлюються під шасі скутера. Приймаюча котушка вкладається в нижній шар шасі, де знаходиться повітряний зазор між цими двома котушками – близько 10 см. З метою уніфікації та стандартизації робоча частота становить 85 кГц. Із відповідним джерелом живлення акумулятор можна швидко та зручно заряджати бездротовим способом. Експериментальні результати підтверджують бажану продуктивність та доцільність.

Прототип системи має такі параметри: потужність: 0,8 кВт, ємність батареї 1кВт/год, середня швидкість 40 км/год, напруга 40В, максимальне навантаження 100 кг.

На рис. 8 показана спрощена схема WPT на електричних транспортних засобах (скутерах).

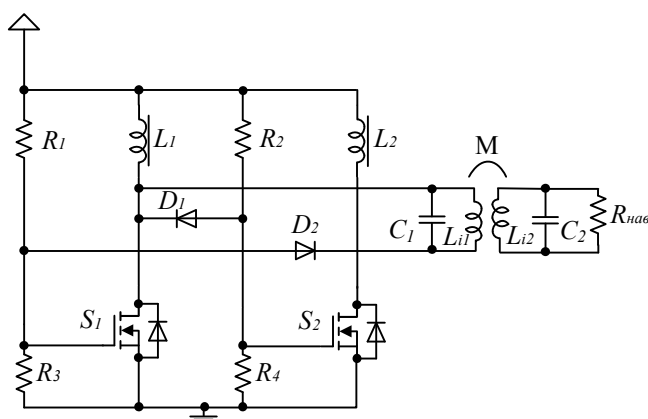


Рис. 8. Спрощена схема системи БПЕ на скутері

Як уже було згадано раніше під час аналізу базових топологій, паралельно-паралельна топологія має дещо більші переваги при значному навантаженні, тому в електроскутері застосовується саме така система бездротової передачі енергії.

Крім суто схемотехнічних рішень, є й інші у сфері силової електроніки, які покращують ефективність бездротової передачі електроенергії. У статті [25] представлено новий високоефективний планарний підхід до об'єднання всіх магнітних компонентів первин-

но-паралельного ізольованого підсилюючого перетворювача в структуру форми E-I-E-core (планарний інтегрований магнетик -planar integrated magnetic - PIM). Оскільки така структура дозволяє трансформаторам і індуктивностям бути електромагнітно розв'язаними, то цей спосіб може бути використаний у багатьох інших ізольованих dc-dc топологіях, де декілька трансформаторів та індуктивностей з'єднуються провідниками.

Всі магнітні компоненти в перетворювачі, в тому числі дві вхідні індуктивності та два трансформатори з первинною паралельною і вторинною послідовною обмоткою, інтегровані в E-I-E-core геометрію, зменшуючи загальний об'єм фериту та втрату в осерді. Перевірка роботи експериментального прототипу 2 кВт підтверджує високу ефективність 95,9 %, яка може бути досягнута при номінальних робочих умовах 1,5 кВт.

Висновки і пропозиції. У цій роботі виконаний огляд основних технологій бездротової зарядки накопичувачів енергії для малопотужних систем. Було виявлено, що індуктивний спосіб передачі енергії є найбільш ефективним на цей момент. Водночас слід відзначити, що при збільшенні відстані передачі ефективність значно падає. Покращення геометрії магнітних компонентів є основним напрямком дослідження в цьому напрямку. Основні топологічні рішення схем силової електроніки зводяться до реалізації чотирьох основних способів компенсації для отримання синусоїдальної напруги. Подальші дослідження можуть бути направлені на зменшення кількості напівпровідників та альтернативним способом реалізації компенсації.

Список використаних джерел

1. R. Bosshard, J.W. Kolar, "Inductive power transfer for electric vehicle charging: Technical challenges and tradeoffs," *IEEE Power Electronics Magazine*, vol. 3, no. 3, pp. 22-30, Nov. 2016.
2. J.-Y. Lee and B.-M. Han, "A Bidirectional Wireless Power Transfer EV Charger Using Self-Resonant PWM", *IEEE Trans. on Ind. Electr.*, VOL. 30, NO. 4, APRIL 2015.
3. Chan T. Rim. Practical Design of Wireless Electric Vehicles: Dynamic & Stationary Charging Technologies. March 2017 .
4. H. Zeng, S. Yang, F. Z. Peng, "Design Consideration and Comparison of Wireless Power Transfer via Harmonic Current for PHEV and EV Wireless Charging", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Year: 2017, Volume: 32, Issue: 8.
5. A. J. Moradewicz, Marian Kazmierkowski "Contactless Energy Transfer System With FPGA-Controlled Resonant Converter" *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol 57, no 9, pp. 3181-3190, 2010.
6. Chenyang Xia, Yuejin Zhou, Juan Zhang and Chaowei Li "Comparison of Power Transfer Characteristics between CPT and IPT System and Mutual Inductance Optimization for IPT System". *Journal Of ComputerS*, Vol. 7, No. 11, November 2012, pp.2734-2741.
7. Приступа А. Л. Экспериментальная установка для исследования тесловских процессов при безконтактной зарядке аккумуляторов / А. Л. Приступа, И. В. Пентегов // Вісник Чернігівського державного технологічного університету: Серія «Технічні науки». – 2012. – № 1 (55). – С. 233–239.
8. Волков И. В. Тесловские процессы в высоковольтных высокочастотных электрических цепях / И. В. Волков, И. В. Пентегов // Технічна електродинаміка: Тем. випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – К. : ІЕД НАНУ, 2000. – Ч. 1. – С. 7–11.
9. Пентегов И. В. О возможности осуществления бесконтактной подзарядки аккумуляторов имплантированных электростимуляторов / И. В. Пентегов, И. В. Волков, А. Л. Приступа // Технічна електродинаміка: Тем. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». – К. : ІЕД НАНУ, 2008. – Ч. 5. – С. 109–113.
10. Mohammad Hassan Ameri, Ali Yazdian Varjani, and Mustafa Mohamadian "A New Maximum Inductive Power Transmission Capacity Tracking Method" *Journal of Power Electronics*, November 2016, Volume 16 Number 6. pp.2202-2211.
11. Как устроена и работает беспроводная зарядка для телефона [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://electrik.info/device/1196-kak-ustroena-i-rabotaet-besprovodnaya-zaryadka-dlya-telefona.html>.
12. Технология беспроводной зарядки: принцип действия, стандарты, производители. [Электронный ресурс] – Режим доступа : <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/doc/70732>.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

13. Benjamin L. Cannon, James F. Hoburg, Daniel D. Stancil "Magnetic Resonant Coupling As a Potential Means for Wireless Power Transfer to Multiple Small Receivers". *IEEE Transactions on Power Electronics* (Volume: 24, Issue: 7, July 2009), pp. 1819–1825.

14. Qi.Wireless power consortium [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.wirelesspowerconsortium.com>.

15. Suvendu Samanta, Akshay Kumar Rathore "Wireless power transfer technology using full-bridge current-fed topology for medium power applications". *IET Power Electronics* (Volume: 9, Issue: 7, 27 2016), pp. 1903–1913 .

16. Ni B, Chung CY and Chan HL. "Design and comparison of parallel and series resonant topology in wireless power transfer". In: Proceedings of 2013 IEEE 8th conference on industrial electronics and applications, Melbourne, VIC, Australia, 19–21 June 2013, pp.1832–1837.

17. Petersen, Marinus; Fuchs, Friedrich W., "Design of a Highly Efficient Inductive Power Transfer (IPT) System for Low Voltage Applications", PCIM Europe 2015; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management; Proceedings of, 19-21 May 2015.

18. Petersen, Marinus; Fuchs, Friedrich W., "Investigation of Power Electronics Topologies for Inductive Power Transfer (IPT) Systems in High Power Low Voltage Applications". Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe), 2015 17th European Conference; Proceedings of, 8–10 Sept 2015.

19. Nomar S. González-Santini, Hulong Zeng, Yaodong Yu, Fang Zheng Peng "Z-Source Resonant Converter With Power Factor Correction for Wireless Power Transfer Applications". *IEEE Transactions on Power Electronics* (Volume: 31, Issue: 11, Nov. 2016), pp. 7691 – 7700.

20. Гусев О. О. Порівняння імпедансних ланок для перетворювачів з джерелом напруги / О. О. Гусев, А. І. Чуб, Д. В. Вінніков // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 3 – С. 25–32.

21. Husev, O., Blaabjerg, F., Clemente, C.R., Cadaval, E.R., Vinnikov, D., Siwakoti, Y., Strzelecki, R.: 'Comparison of the Impedance-Source Networks for Two and Multilevel Buck-Boost Inverter Applications', *IEEE Trans. Power Electron.*, 2016, 31 (11), pp. 7564–7579.

22. Dmitry Panfilov, Oleksandr Husev, Frede Blaabjerg, Janis Zakis, Kamal Khandakji, "Comparison of three-phase three-level voltage source inverter with intermediate dc–dc boost converter and quasi-Z-source inverter", *IET Power Electronics*, 6, pp. 1238–1248, 2016.

23. S. Yang, D. Xiang, A. Bryant, P. Mawby, L. Ran, and P. Tavner, "Condition monitoring for device reliability in power electronic converters: A review", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 11, pp. 2734–2752, Nov. 2010.

24. Jia-Shiun Tsai, Jia-Sheng Hu, Sin-Li Chen and Xiaoliang Huang. "Directional antenna design for wireless power transfer system in electric scooters". *Advances in Mechanical Engineering* 2016, Vol. 8 (2), 1–13.

25. Ouyang Z., Sen G., Thomsen O., and Andersen M. "Analysis and Design of Fully Integrated Planar Magnetics for Primary-Parallel Isolated Boost Converter". *IEEE Transactions on Industrial Electronics* (Volume: 60, Issue: 2, Feb. 2013), pp. 494–508.

References

1. Bosshard, R., Kolar, J.W. (2016). Inductive power transfer for electric vehicle charging: Technical challenges and tradeoffs. *IEEE Power Electronics Magazine*, vol. 3, no. 3, pp. 22–30, Nov. 2016.

2. Lee J.-Y. and Han B.-M. (2015). A Bidirectional Wireless Power Transfer EV Charger Using Self-Resonant PWM. *IEEE Trans. on Ind. Electr.*, vol. 30, no. 4, APRIL 2015.

3. Chan T. Rim. *Practical Design of Wireless Electric Vehicles: Dynamic & Stationary Charging Technologies*. March 2017.

4. H. Zeng, S. Yang, F. Z. Peng (2017). Design Consideration and Comparison of Wireless Power Transfer via Harmonic Current for PHEV and EV Wireless Charging", *IEEE Transactions on Power Electronics*, volume: 32, Issue: 8.

5. Moradewicz, A.J., Marian Kazmierkowski (2010). Contactless Energy Transfer System With FPGA-Controlled Resonant Converter. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 9, pp. 3181–3190.

6. Chenyang Xia, Yuejin Zhou, Juan Zhang and Chaowei Li (2012). Comparison of Power Transfer Characteristics between CPT and IPT System and Mutual Inductance Optimization for IPT System. *Journal Of ComputerS*, vol. 7, no. 11, November 2012, pp. 2734–2741.

7. Prystupa, A. L., Pentehov, I. V. (2012). Eksperymentalna ustanovka dlia doslidzhennia teslivskykh protsesiv pry bezkontaktnei zariadtsi akumulatoriv [Experimental installation for studying the process of storks in contactless charging of accumulators]. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu: Serii: Tekhnichni nauky – Visnyk of Chernihiv State Technological University*, № 1 (55), pp. 233–239 (in Ukrainian).

8. Volkov, I. V., Pentegov, I. V. (2000). Teslovskie processy v vysokovolnykh vysokochastotnykh jelektricheskikh tsepakh [Teslov processes in high-voltage high-frequency electric circuits]. *Tekhnichna elektrodinamika: Tem. vypusk “Problemy suchasnoi elektrotehniki” – Technical electrodynamic. Special issue “The problem of modern electrotechnology”*. Part 1. Kyiv: IED NANU, pp. 7–11 (in Russian).

9. Pentegov, I.V., Volkov, I.V., Pristupa, A.L. (2008). O vozmozhnosti osushhestvleniia beskontaktnoi podzariadki akumulatorov implantirovannykh elektrostimulatorov [On the possibility of carrying out non-contact charging of batteries of implanted electrostimulators]. *Tekhnichna elektrodinamika: Tem. vypusk “Problemy suchasnoi elektrotehniki” – Technical electrodynamic. Special issue “The problem of modern electrotechnology”*. Part 5. Kyiv: IED NANU, pp. 109–113 (in Russian).

10. Mohammad Hassan Ameri, Ali Yazdian Varjani, and Mustafa Mohamadian “A New Maximum Inductive Power Transmission Capacity Tracking Method”. *Journal of Power Electronics*, November 2016, Volume 16, Number 6. pp. 2202–2211.

11. *Kak ustroena i rabotaet besprovodnaia zariadka dlia telefona [How the wireless charging for the phone works and works]*. Retrieved from <http://elektrik.info/device/1196-kak-ustroena-i-rabotaet-besprovodnaya-zaryadka-dlya-telefona.html>.

12. *Tehnologiya besprovodnoi zariadki: printsip deistviia, standarty, proizvoditeli [Wireless charging technology: the principle of operation, standards, manufacturers]*. Retrieved from <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/doc/70732>.

13. Benjamin L. Cannon, James F. Hoburg, Daniel D. Stancil “Magnetic Resonant Coupling As a Potential Means for Wireless Power Transfer to Multiple Small Receivers”. *IEEE Transactions on Power Electronics* (Volume: 24, Issue: 7, July 2009), pp. 1819–1825.

14. *Qi. Wireless power consortium*. Retrieved from <https://www.wirelesspowerconsortium.com>.

15. Suvendu Samanta, Akshay Kumar Rathore “Wireless power transfer technology using full-bridge current-fed topology for medium power applications”. *IET Power Electronics* (Volume: 9, Issue: 7, 27 2016), pp. 1903–1913.

16. Ni B, Chung CY and Chan HL. “Design and comparison of parallel and series resonant topology in wireless power transfer”. In: *Proceedings of 2013 IEEE 8th conference on industrial electronics and applications*, Melbourne, VIC, Australia, 19–21 June 2013, pp. 1832–1837.

17. Petersen, Marinus; Fuchs, Friedrich W., “Design of a Highly Efficient Inductive Power Transfer (IPT) System for Low Voltage Applications”. *PCIM Europe 2015; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management; Proceedings of*, 19–21 May 2015.

18. Petersen, Marinus; Fuchs, Friedrich W., “Investigation of Power Electronics Topologies for Inductive Power Transfer (IPT) Systems in High Power Low Voltage Applications”. *Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe)*, 2015 17th European Conference; Proceedings of, 8–10 Sept 2015.

19. Nomar S. González-Santini, Hulong Zeng, Yaodong Yu, Fang Zheng Peng “Z-Source Resonant Converter With Power Factor Correction for Wireless Power Transfer Applications”. *IEEE Transactions on Power Electronics* (Volume: 31, Issue: 11, Nov. 2016), pp. 7691–7700.

20. Husev, O. O., Chub, A. I., Vinnikov, D. V. (2015). Porivniannia impedansnykh lanok dlia peretvoriuvachiv z dzherelom napruhy [Comparison of Impedance Links for Voltage Converters]. *Tekhnichna elektrodinamika – Technical electrodynamic*, № 3, pp. 25–32 (in Ukrainian).

21. Husev, O., Blaabjerg, F., Clemente, C.R., Cadaval, E.R., Vinnikov, D., Siwakoti, Y., Strzelecki, R. (2016). Comparison of the Impedance-Source Networks for Two and Multilevel Buck-Boost Inverter Applications, *IEEE Trans. Power Electron.*, 31 (11), pp. 7564–7579.

22. Dmitry Panfilov, Oleksandr Husev, Frede Blaabjerg, Janis Zakis, Kamal Khandakji (2016). Comparison of three-phase three-level voltage source inverter with intermediate dc–dc boost converter and quasi-Z-source inverter, *IET Power Electronics*, no. 6, pp. 1238–1248.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

23. S. Yang, D. Xiang, A. Bryant, P. Mawby, L. Ran, and P. Tavner (2010). Condition monitoring for device reliability in power electronic converters: A review, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 11, pp. 2734–2752, Nov. 2010.

24. Jia-Shiun Tsai, Jia-Sheng Hu, Sin-Li Chen and Xiaoliang Huang (2016). Directional antenna design for wireless power transfer system in electric scooters. *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 8 (2), 1–13.

25. Ouyang Z., Sen G., Thomsen O., and Andersen M. (2013). Analysis and Design of Fully Integrated Planar Magnetics for Primary-Parallel Isolated Boost Converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, issue: 2, Feb. 2013, pp. 494–508.

UDC 621.3.08

Viktor Shevchenko, Bohdan Pakhaliuk, Oleksandr Husev

REVIEW THE MAIN TECHNOLOGIES OF THE WIRELESS CHARGING OF ENERGY ACCUMULATORS FOR SMALL-PURCHASING SYSTEMS

Urgency of the research. The development of new topologies, methods for calculation and optimization of semiconductor transducers for WPT systems will allow to increase the electric energy transmitted wirelessly, extend the range of frequency regulation, which will reduce the time spent on recharge of electric vehicles and increase the convenience of using WPT systems by reducing the sensitivity to precise positioning of receiving and transmitting elements, which will become a prerequisite for more active introduction of electric vehicles and electric vehicles. In conditions of different ecological, demographic, economic situation in the world, the individual electric transport is becoming more and more popular.

Solving the set tasks will create preconditions for the implementation of WPT in many spheres of society, both in Ukraine and in the world as a whole (private transport, military equipment and equipment, household electronics, etc.).

Target setting. Now methods of wireless power transfer (WPT), based on the phenomena of electrostatic and electromagnetic induction, are widely used in various applications. WPT method is widely used today in low-power systems - wireless charging of mobile phones, razors, toothbrushes, low-power vehicles.

The main constraints of such systems are low efficiency at high transmission distances and relatively large mass-size parameters of the elements, which in turn leads to high cost of WPT system. Recently, there are more and more consumers who need to transmit contactless method of electric energy from units of kilowatts or higher.

Actual scientific researches and issues analysis. The analysis of the state of research shows that the subjects of research on the improvement of wireless charging systems are constantly expanding and are extremely relevant, in particular, abroad. Especially considering the development of electric vehicles, there is growing interest in wireless charging of vehicles. There is also a solution to the inductive power transmission system for low and high voltage power supplies.

Uninvestigated parts of general matters defining. If static and dynamic charging of electric cars is devoted to many articles and developments, then the individual means of travel are paid less attention, so the design of low-voltage wireless charging for electric bikes, electric scooters, and velomobiles is a promising area of research. Modern research is aimed at achieving lower cost and improving the efficiency of wireless charging systems for such vehicles.

The research objective. The main tasks are to review and compare existing topologies, calculation methods, and optimization of WPT systems.

The statement of basic materials. In the first part of the article general information about principles of operation and application of capacitive and inductive method of wireless transmission of energy are considered, advantages and disadvantages, efficiency are presented. The emphasis is on magnetic resonance communication, the main compensating topologies are considered. Graphs of the dependence of the transfer function of the WPT on the frequency for the serial-serial resonance scheme are constructed. The probable dependence of the distance between the transmitter and receiver is separately presented.

In the second part of the article an analysis of the existing power semiconductor topology WPT based on inductive coupling and various compensating topologies. Initially, inductive energy transmission systems for low voltage power supplies are analyzed. The topologies of primary and secondary dc-dc converters are selected and compared from the point of view of the required nominal power and efficiency. The WPT system based on the current inverter and the compensating resonance PS-topology for electric vehicles and devices for charging the battery are analyzed. An interesting article is considered, which analyzes and compares the proposed onboard electric vehicle charger based on an impedance link with a conventional OBC. The following is a variant of the topology and cost-effective design of antennas for the transmission of wireless energy in electric scooters. In addition to purely circuit design, other solutions in the field of power electronics are considered, which will improve the efficiency of wireless power transmission. A new high-performance planar approach is presented for the integration of all magnetic components of the primary-parallel isolated enhancer converter into the structure of the form E-I-E-core planar integrated magnetic (PIM).

Conclusions. The article gives an overview of the main technologies of wireless charging of energy storage devices for low-power systems. It has been found that the inductive mode of energy transmission is most effective now. At the same time, it should be noted that with increasing transmission distance, efficiency falls significantly. The improvement of the geometry of magnetic components is the main focus of research in this direction. The main topological solutions of power electronics circuits are reduced to the implementation of four main methods of compensation for obtaining sinusoidal voltage. That is, for different tasks, different topologies are selected with those or other modifications, depending, first of all, on the power that needs to be transmitted and the load. Further research may be aimed at reducing the number of semiconductors and alternative ways to realize compensation.

Key words: wireless transmission of energy; magnetic resonance bond; compensating topology; onboard charger; high frequency inverter.

Fig.: 8. **Bibl.:** 25.

УДК 621.3.08

Виктор Шевченко, Богдан Пахалюк, Александр Гусев

ОБЗОР ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ БЕСПРОВОДНОЙ ЗАРЯДКИ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ МАЛОМОЩНЫХ СИСТЕМ

Беспроводная передача энергии является неотъемлемой частью современного мира. Статья посвящена обзору существующих современных решений беспроводных зарядных устройств для маломощных систем. В частности кратко рассмотрены основные виды беспроводной передачи энергии, преимущества и недостатки каждого из методов. Более подробно рассмотрено индуктивный способ передачи как одного из наиболее распространенного и перспективного. Проанализированы основные топологические решения схем силовой электроники. Обсуждены основные проблемы и дальнейшие направления исследований в этой сфере.

Ключевые слова: беспроводная передача энергии; магнитно-резонансная связь; высокочастотный инвертор.

Рис.: 8. **Библ.:** 25.

Шевченко Віктор Олександрович – аспірант ЧНТУ, асистент кафедри біомедичних радіоелектронних апаратів та систем, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Шевченко Виктор Александрович – аспирант ЧНТУ, ассистент кафедры биомедицинских радиоэлектронных аппаратов и систем, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Shevchenko Viktor – Phd student, assistant of Biomedical Radioelectronic Apparatus and Systems Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: shevaip1990@gmail.com

Пахалюк Богдан Петрович – студент ЧНТУ, магістр кафедри промислової електроніки, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Пахалюк Богдан Петрович – студент ЧНТУ, магистр кафедры промышленной электроники, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Pakhaliuk Bohdan – student, master of Industrial Electronics Department, Chernihiv national university of technology (95 Shevchenko Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: bohdan.pakhaliuk@gmail.com

Гусев Александр Александрович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри біомедичних радіоелектронних апаратів та систем, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Гусев Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры биомедицинских радиоэлектронных аппаратов и систем, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Oleksandr Husev – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Biomedical Radioelectronic Apparatus and Systems, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: oleksandr.husev@gmail.com

ORCID: orcid.org/0000-0001-7810-457X

ResearcherID: F-5792-2014

Scopus Author ID: 45861130600

*Oleksiy Krasnozhon, Roman Shevchenko,
Oleg Khomenko, Oleksandr Veligorskyi*

REVIEW OF HIGH STEP-UP DC-AC POWER ELECTRONICS SOLUTIONS WITHOUT GALVANIC ISOLATION

Urgency of the research. Energy storage technologies are heavily related to electric vehicles. The fast charging station together with the wireless power station potentially makes the electric vehicle more attractive and user-friendly.

Target setting. The main problem in this area is the large size and low battery life, as well as the limited loading speed of electric vehicles. It is also important to optimize power density with the greatest possible efficiency.

Actual scientific researches and issues analysis. The analysis of publications shows that a lot of attention has been paid to this topic of research, there are a large number of publications by leading institutes and world-renowned scholars. Therefore, in the current article, a comparison of two main families of non-isolated converters with reference to articles and domestic scientists is also shown. The first family, based on one-step solutions, is presented and classified. Also shown is an analysis of two-stroke converters based on the intermediate DC converter with a high increase.

Uninvestigated parts of general matters defining. Many problems with the power industry should be solved to increase the implementation of technology and accelerate the transition from traditional charging to electric mobile charging stations. In the case of a simplified solution without the use of galvanic isolation and the use of low voltage batteries, the gain of the DC converter of the converter plays a very important role.

The research objective. The main task of this work is to review high-frequency DC converters without galvanic isolation to charge the battery from the network.

The statement of basic materials. In the analysis of solutions based on single-stage dc converters and the review of topologies, it was found that among the several groups of impedance networks most suitable for use are high-gain networks based on magnetic connected inductive components or a transformer. With proper implementation, this will result in an increase in the voltage gain through the rotational factor. The same circuitry based on an inverter with a Z-Source Inverter (ZSI) and a SEPIC converter, even with more modified solutions, is limited in practical implementation and operation. These circuits contain many passive components and have additional losses in semiconductors.

In the review of two-level DC converters with a high degree of amplification without galvanic isolation on the basis of high-frequency DC converters, a review and comparison of several solutions was performed. The most interesting circuit is a switched capacitor bidirectional converter consisting only of semiconductor switches and capacitors. An efficiency ratio ranges from 95 to 98.5 % over the entire download range. The intermediate concept of this solution has become quite popular in recent years, thanks to such benefits as high efficiency over a wide range of loads, reduced conduction losses, high power density.

Conclusions. High step up dc-ac converters are one of the key elements for battery charging from the grid. They provide a flexible power processing interface between energy storage device and the rest of system. Two main families of non-isolated converters are considered. The first family based on single-stage converters can be interesting because of reduced amount of elements. At the same time the complex control is a disadvantage.

Key words: high step up; converter; battery charge.

Fig.: 5. Bibl.: 10.

Problem definition. The topic of energy storage technologies strongly linked with electrical vehicles. The main problem in this field lies in the large size and low lifetime of the batteries along with limited charging speed of the electrical vehicles. The second problem relates only to power electronics issues. This topic is under investigation. The fast charging station along with wireless power station potentially makes an electrical vehicle more attractive and user friendly [1].

At the same time, many power electronics problems should be solved to increase acceptance of the technology and accelerate the transition from traditional to electrical mobility. In case of simplified solution without galvanic isolation and low voltage batteries utilization, the boost factor of dc-ac converter plays a very important role. Another issue lies in power density and efficiency optimization.

The main goal of this paper consists in overview of high gain dc-ac converters without galvanic isolation for storage battery charging from the grid. There are two types of converters that can be underlined. Fig. 1a shows the single-stage dc-ac converter, while the fig. 1b shows the general structure of two-stage the dc-ac converters.

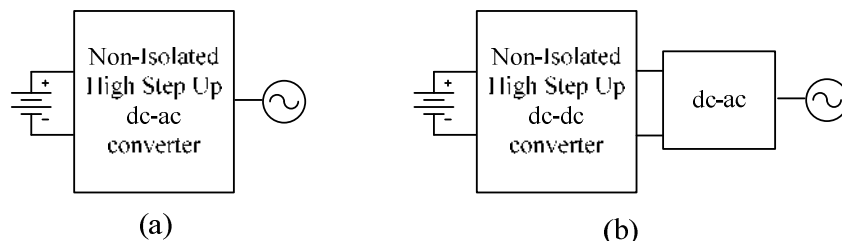


Fig. 1. a) single-stage dc-ac converter b) two stage dc-ac converters

Single-stage dc-ac converters The first solution of single-stage solution is Active Boost Cell (ABC) At the beginning, the buck-boost two-level inverters derived from the SEPIC dc-dc converter have been successfully developed for bidirectional power conversion with special voltage boost circuitry added between the dc source and the inverter circuitry [2]. Since the auxiliary transistors are used in the boost circuit, in order to distinguish this approach from the passive impedance network application it will be called ABC.

Fig. 2a shows conventional Cuk-derived topology for single input voltage source. In this topology, a voltage boost circuit is made up of inductor L_1 , two switch S_1 capacitor C_1 . This boost cell is inserted between the dc source with reversed polarity and inverter. Besides inductive boosting, the turning ON of the switches causes also C_1 to act as a split dc-link capacitive bank for powering the inverter.

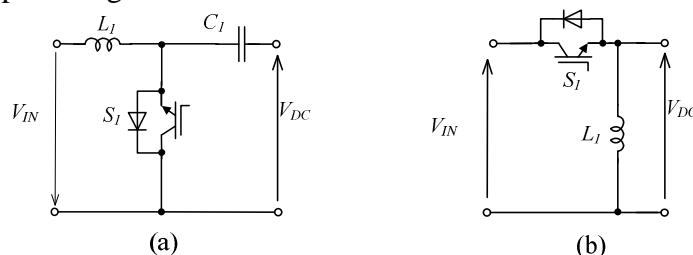


Fig. 2. a) single-stage Cuk converter b) single-stage SEPIC converter

Fig. 2b shows buck-boost SEPIC-derived topologies for single input voltage. In [2] a bidirectional buck-boost rectifier was proposed with a symmetrical passive network and a single dc switch inserted, which was derived from either the Cuk or SEPIC dc-dc converters. The boost-buck concept can be further modified with an unsymmetrical front-end structure for power inversion.

For properly controlling the buck-boost operation, the second state (when both transistors are OFF) should be inserted in the zero intervals because both generate zero line voltages, and therefore a specific modulation scheme is designed and discussed in the following chapters for this circuit.

Z-Source Inverter (ZSI) proposed by F.Z. Peng in 2002 [3]. This unique circuit has different areas of application: energy generation systems with renewables, systems without energy storage and with energy storages, grid connected systems and many other systems. These applications are possible due to the extended regulation range of the input voltage of that converter [4].

Modifications based on the above schemes are shown in Fig. 3 [5]. The most common method is to use a switched inductor, as shown in Fig. 3a. This is derived by replacing the inductor L_2 in the qZSN by one of the switched inductors, shown in Fig. 3a. The second type of modification called capacitor assisted extended boost (CAEB) is shown in Fig. 3b and modified capacitor assisted extended boost (MCAEB) is shown in Fig. 3c. CAEB is derived by adding one diode (D_2), one inductor (L_3) and two capacitors (C_3 and C_4) to the traditional qZSI. MCAEB is derived from the CAEB qZSI by changing the connection points of the capacitors C_2 and C_3

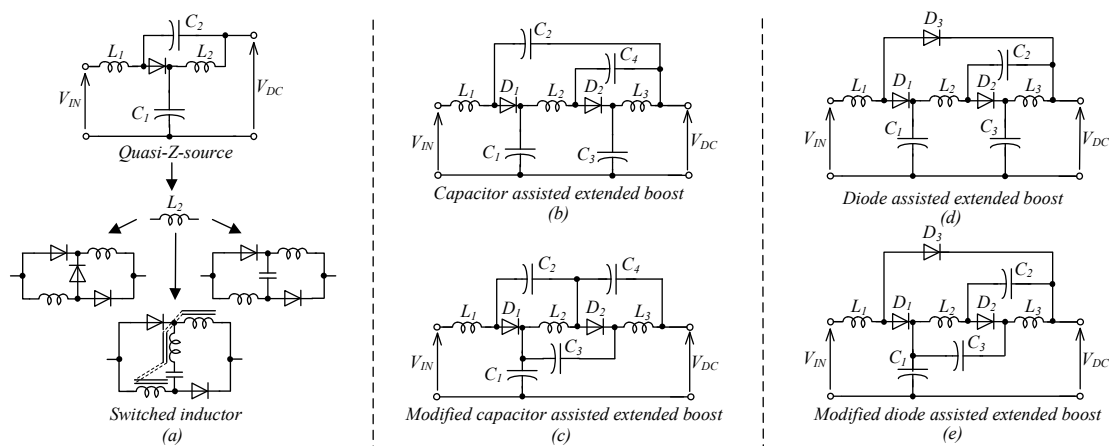


Fig. 3. Impedance network modifications: a) switched inductor; b) capacitor assisted extended boost; c) modified capacitor assisted extended boost; d) diode assisted extended boost; e) modified diode assisted extended boost

The third type of modification called diode assisted extended boost (DAEB) is shown in Fig. 3d, and a modified diode assisted extended boost (MDAEB) is shown in Fig. 3e. DAEB is derived by adding one capacitor (C_3), one inductor (L_3) and two diodes (D_2 and D_3) to the traditional qZSI. MDAEB is derived from the DAEB qZSI by changing the connection points of the capacitor C_3 . These modifications can produce infinite boost. However, this cannot occur in practice due to losses. Out of the modifications, CAEB is preferable, since it requires fewer semiconductor devices. Therefore, the circuit may have lower power losses.

All of these modification types are limited in practical solutions. These schemes contain many passive components and have additional losses in the semiconductors.

Impedance networks can be subdivided into the several groups. The most suitable for high step up application are based on magnetically coupled inductive components or transformer (Fig. 4). Its implementation in the ISN can result in higher voltage boost factor due to the turns ratio. LCCT Z-source circuit is an inductor-capacitor-capacitor-transformer Z-source circuit. LCCT Z-source and quasi-Z-source circuits are shown in Figs. 4a and 4b, respectively. These schemes include a high frequency ideal transformer.

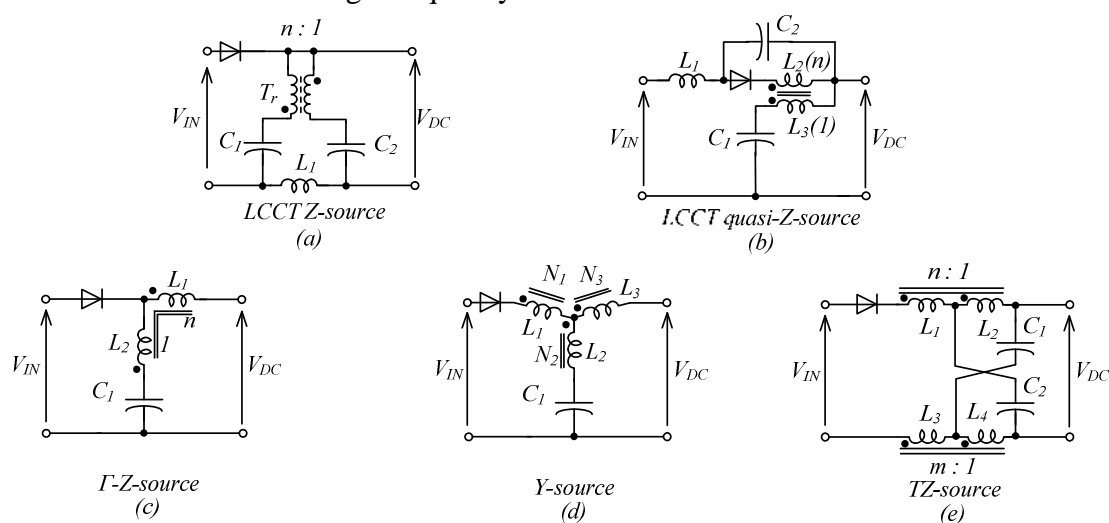


Fig. 4. Impedance networks suitable for high step up application: a) LCCT Z-source; b) LCCT quasi-Z-source; c) Γ -Z-source; d) Y-source; e) TZ-source

Γ -Z-source network contains a transformer. The circuit is shown in Fig. 4c. T-Z-source network scheme contains magnetic components and is shown in Fig. 4d. Finally Y-source network belongs to the schemes with magnetically coupled components is shown in Fig. 4e.

Two-stage dc-ac converters based on the high step up dc-dc converters is the second possible solution [6]. Fig. 5 shows several possible dc-dc converters with high step up capability without galvanic isolation.

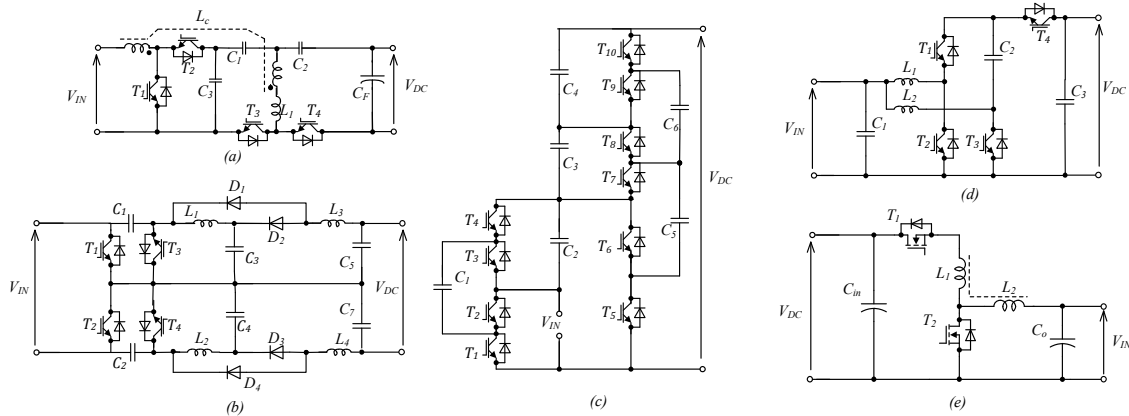


Fig. 5. High step up dc-dc converters:

- a) high step-up/step-down bidirectional dc-dc converter; b) Cuk-based converter;
 c) The switched capacitor bidirectional converter; (d); interleaved charge-pump topology;
 (e) tapped-inductor based converter

In [7] is proposed high step-up/step-down bidirectional dc-dc converter (Fig. 5a) in which the coupled inductor L_c is used. This converter is a combination of the conventional buck-boost and a voltage doublers cell. In some region, it is possible to realize zero voltage switching. In [8] is presented the study and simulations of a new family of symmetrical hybrid multilevel inverters based on Cuk (Fig. 5b) and Zeta converters, that are able to high step up/down voltages. The switched capacitor bidirectional converter proposed in [9] and shown in Fig. 5c is composed of only semiconductor switches and capacitors. The prototype of the converter is presented in the paper, 75 kHz switching frequency is selected, the battery voltage is equal to 20 V, the output voltage is equal to 173 V and overall power is 100 W. The reported efficiency is from 95 to 98.5 % in all load range. Interleaved concept became quite popular in recent years due to such advantages as high efficiency in wide load range, reduced conduction losses, high power density. The interleaved charge-pump topology (Fig. 5d) is analyzed in [10]. It has two times higher conversion ratio over conventional half-bridge topology, but because of schematic limitations duty cycle on switches T_1 and T_4 cannot be smaller than 0.5. Finally, the tapped-inductor based solution is shown in Fig. 5e [6]. It is compatible solution due to the turn's ratio of inductors. It should be noted that as any similar solution it may suffer from voltage and current spikes across semiconductors.

Conclusions. High step up dc-ac converters are one of the key elements for battery charging from the grid. They provide a flexible power processing interface between energy storage device and the rest of system. Two main families of non-isolated converters are considered. The first family based on single-stage converters can be interesting because of reduced amount of elements. At the same time the complex control is a disadvantage.

References

1. Z. Yu, H. Kapels, and K. F. Hoffmann, "High Efficiency Bidirectional DC-DC Converter with Wide Input and Output Voltage Ranges for Battery Systems," in *Renewable Energy and Energy Management; Proceedings of PCIM Europe 2015; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion*, 2015, pp. 1–8.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

2. J. Kikuchi and T. A. Lipo, "Three-phase PWM boost-buck rectifiers with power-regenerating capability," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 38, pp. 1361-1369, Sept./Oct. 2002.
3. Peng F.Z. "Z-source inverter", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Mar./Apr. 2003. V. 39, No. 2. pp. 504–510.
4. Husev, O.O., Chub, A.I., Vinnikov, D.V. (2015). Porivniannia impedansnykh lanok dlia peretvoriuvachiv z dzherelom napruhy [Comparison of impedance links for converters with a voltage source]. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamics*, no. 3, pp. 25–32 (in Ukrainian).
5. Shults, T., Husev, O., Zakis, J., "Overview of impedance source networks for voltage source inverters" In: EDM 2015, pp. 514–519.
6. K. Tytelmaier, O. Husev, O. Veligorskyi, and R. Yershov, "A review of non-isolated bidirectional dc-dc converters for energy storage systems," 2016 II Int. Young Sci. Forum Appl. Phys. Eng., pp. 22–28, 2016.
7. H. Wu, K. Sun, L. Chen, L. Zhu, and Y. Xing, "High Step-Up/Step-Down Soft-Switching Bidirectional DC-DC Converter with Coupled-Inductor and Voltage Matching Control for Energy Storage Systems", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 5, pp. 2892–2903, Maijs 2016.
8. L. C. Miranda, R. R. Sanhueza, G. M. López, S. Fingerhuth, S. A. Mussa, and D. Ruiz-Caballero, "High-gain symmetrical hybrid multilevel DC-AC converters - Single phase circuits," in 2013 Brazilian Power Electronics Conference, 2013, pp. 161–168.
9. S. Xiong and S. C. Tan, "Cascaded High-Voltage-Gain Bidirectional Switched-Capacitor DC-DC Converters for Distributed Energy Resources Applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 2, pp. 1220–1231, Feb. 2017.
10. C.-M. Lai, Y.-C. Lin, D. Lee, "Study and Implementation of a Two-Phase Interleaved Bidirectional DC/DC Converter for Vehicle and DC-Microgrid System," *Energies*, vol. 8, pp. 9969-9991, Sep. 2015.

References (in language original)

1. Z. Yu, H. Kapels, and K. F. Hoffmann, "High Efficiency Bidirectional DC-DC Converter with Wide Input and Output Voltage Ranges for Battery Systems," in *Renewable Energy and Energy Management; Proceedings of PCIM Europe 2015; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion*, 2015, pp. 1–8.
2. J. Kikuchi and T. A. Lipo, "Three-phase PWM boost-buck rectifiers with power-regenerating capability," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 38, pp. 1361-1369, Sept./Oct. 2002.
3. Peng F.Z. "Z-source inverter", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Mar./Apr. 2003. V. 39, No. 2. pp. 504-510.
4. Гусев О. О. Вінніков "Порівняння імпедансних ланок для перетворювачів з джерелом напруги / О. О. Гусев, А. І. Чуб, Д. В. Вінніков // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 3. – С. 25–32.
5. Shults, T., Husev, O., Zakis, J., "Overview of impedance source networks for voltage source inverters" In: EDM 2015, pp 514-519.
6. K. Tytelmaier, O. Husev, O. Veligorskyi, and R. Yershov, "A review of non-isolated bidirectional dc-dc converters for energy storage systems," 2016 II Int. Young Sci. Forum Appl. Phys. Eng., pp. 22–28, 2016.
7. H. Wu, K. Sun, L. Chen, L. Zhu, and Y. Xing, "High Step-Up/Step-Down Soft-Switching Bidirectional DC-DC Converter with Coupled-Inductor and Voltage Matching Control for Energy Storage Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 5, pp. 2892–2903, Maijs 2016.
8. L. C. Miranda, R. R. Sanhueza, G. M. López, S. Fingerhuth, S. A. Mussa, and D. Ruiz-Caballero, "High-gain symmetrical hybrid multilevel DC-AC converters – Single phase circuits", in 2013 Brazilian Power Electronics Conference, 2013, pp. 161–168.
9. S. Xiong and S. C. Tan, "Cascaded High-Voltage-Gain Bidirectional Switched-Capacitor DC-DC Converters for Distributed Energy Resources Applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 2, pp. 1220–1231, Feb. 2017.
10. C.-M. Lai, Y.-C. Lin, D. Lee, "Study and Implementation of a Two-Phase Interleaved Bidirectional DC/DC Converter for Vehicle and DC-Microgrid System," *Energies*, vol. 8, pp. 9969-9991, Sep. 2015.

УДК 621.3.08

Олексій Красножон, Роман Шевченко,
Олег Хоменко, Александр Велигорський

ОГЛЯД DC-AC РІШЕНЬ СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ БЕЗ ГАЛЬВАНІЧНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ З ВИСОКИМ КОЕФІЦІЄНТОМ ПІДСИЛЕННЯ

Актуальність теми дослідження. Технології зберігання енергії сильно пов'язані з електричними транспортними засобами. Станція швидкої зарядки разом із бездротовою станцією передачі енергії потенційно робить електричний транспортний засіб більш привабливим та зручним для користувача.

Постановка проблеми. Основна проблема в цій галузі полягає у великих розмірах та низькому терміні служби батарей, а також обмеженій швидкості завантаження електричних транспортних засобів. Також важлива оптимізація щільності енергії при якомога більшій ефективності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз публікацій показує, що даній тематиці досліджень приділено багато уваги, є значна кількість публікацій провідних інститутів і всесвітньовідомих вчених. Тож у поточній статті показано порівняння двох основних сімейств неізованих перетворювачів із посиланням на статті і вітчизняних вчених також. Представлено і класифіковано перше сімейство, засноване на однотактних рішеннях. Також показано аналіз двохтактних перетворювачів на основі проміжного перетворювача постійного струму з високим підвищенням.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Багато проблем з електроенергетикою має бути вирішено для збільшення впровадження технології та прискорення переходу від традиційної зарядки до електричних мобільних зарядних станцій. У випадку спрощеного рішення без використання гальванічної ізоляції та використання низьковольтних батарей, коефіцієнт підсилення постійного струму перетворювача відіграє дуже важливу роль.

Постановка завдання. Основним завданням цієї роботи є огляд високочастотних перетворювачів постійного струму без гальванічної ізоляції для заряджання акумулятора від мережі.

Викладення основного матеріалу. При аналізі рішень на основі одноступеневих перетворювачів постійного струму і огляді топологій було виявлено, що з-поміж декількох груп імпедансних мереж найбільш придатні для застосування є мережі з високим ступенем підсилення на основі магнітних з'єднаних індуктивних компонентів або трансформатора. При правильній реалізації це призведе до підвищення коефіцієнта підсилення напруги через коефіцієнт повороту. Класичні ж схеми на основі інвертору із імпедансною ланкою та SEPIC перетворювача, навіть із більш модифікованими рішеннями, обмежені при практичній реалізації і експлуатації. Ці схеми містять багато пасивних компонентів і мають додаткові втрати в напівпровідниках.

При огляді дворівневих перетворювачів постійного струму з високим ступенем підсилення без гальванічної ізоляції на основі високочастотних перетворювачів постійного струму проведено огляд і порівняння декількох рішень. Найбільш цікавою схемою є двонаправлений перетворювач зі змінним конденсатором, що складається тільки з напівпровідникових перемикачів та конденсаторів. Показник ефективності становить від 95 до 98,5 % на всьому діапазоні завантаження. Проміжна концепція цього рішення стала досить популярною в останні роки завдяки таким перевагам, як висока ефективність в широкому діапазоні навантажень, зниження втрат провідності, висока щільність потужності.

Висновки. В статті проведено огляд перетворювачів для зарядки акумулятора від мережі, приведено порівняння двох основних сімейств неізованих перетворювачів. Високошвидкісні перетворювачі постійного струму - це один з ключових елементів заряджання акумулятора від мережі. Вони забезпечують гнучкий інтерфейс перетворення енергії між пристроєм зберігання енергії та іншою частиною системи. Розглянуто дві основні групи неізованих перетворювачів. Перша група на базі одноступеневих перетворювачів може бути цікавою через зменшення кількості елементів. У той же час недоліком таких систем є складний контроль.

Ключові слова: високий коефіцієнт підвищення; перетворювач; заряд батареї.

Рис.: 5. Бібл.: 10.

УДК 621.3.08

Алексей Красножон, Роман Шевченко,
Олег Хоменко, Александр Велигорский

ОБЗОР DC-AC РЕШЕНИЙ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ БЕЗ ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ С ВЫСОКИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ УСИЛЕНИЯ

В этой статье рассматриваются преобразователи для зарядки аккумулятора от сети. Показано сравнение двух основных семейств неизолированных преобразователей. Первое семейство, основанное на однотактных решениях, представлено и классифицировано. Также показаны преобразователи второго типа на основе промежуточного преобразователя постоянного тока с высоким повышением. Показаны основные преимущества и недостатки.

Ключевые слова: высокий коэффициент повышения; преобразователь; заряд батареи.

Рис.: 5. Библ.: 10.

Krasnozhon Oleksiy – PhD student, assistant of Biomedical Radioelectronic Apparatus and Systems Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

Красножон Олексій Васильович – аспірант ЧНТУ, асистент кафедри біомедичних радіоелектронних апаратів та систем, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Красножон Алексей Васильевич – аспирант ЧНТУ, ассистент кафедры биомедицинских радиэлектронных аппаратов и систем, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

E-mail: wingcommander2011@gmail.com

Shevchenko Roman – engineer of government project 89/17, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 4027 Chernihiv, Ukraine).

Шевченко Роман Владиславович – інженер держбюджетної теми 89/17, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Шевченко Роман Владиславович – инженер госбюджетной темы 89/17, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

E-mail: shevchenko29@ukr.net

Khomenko Oleg – engineer of government project 89/17, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

Хоменко Олег Борисович – інженер держбюджетної теми 86/16, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Хоменко Олег Борисович – инженер госбюджетной темы 86/16, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

E-mail: olbor13@gmail.com

Veligorskyi Oleksandr – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Biomedical Radioelectronic Apparatus and Systems, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

Велігорський Олександр Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри біомедичних радіоелектронних апаратів та систем, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Велигорский Александр Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры биомедицинских радиэлектронных аппаратов и систем, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

E-mail: alexveligorsky@gmail.com