



LUTSK  
NATIONAL  
TECHNICAL  
UNIVERSITY



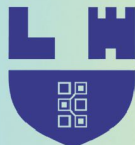
2<sup>nd</sup>

# MATERIALS TECHNOLOGY ENGINEERING 2024

International Conference on  
**Engineering, Materials,  
Technologies, Transport**

May 14-16, 2024 | Lutsk, Ukraine

Materials of the conference



Міністерство освіти і науки України  
Луцький національний технічний університет

**Матеріали та технології  
в інженерії (МТІ-2024)**

Інженерія, матеріали, технології, транспорт:  
Збірник наукових доповідей міжнародної конференції,  
Луцьк, Україна, 14–16 травня 2024 р.

**Materials and Technologies in Engineering (MTE-2024)**

Engineering, Materials, Technologies, Transport:  
Collection of Scientific Reports of the International  
Conference, Lutsk, Ukraine, May 14–16, 2024

Луцьк  
Вежа-Друк  
2024

УДК 621 (06)  
М 34

**Колектив авторів:**

Oleksandr Povstyanoy, Olha Zaleta, Bohdan Valetskyi, Roman Polinkevych

**Матеріали та технології в інженерії (МТІ-2024):** інженерія, матеріали, технології, транспорт: збірник наукових доповідей міжнародної конференції, Луцьк, Україна, 14-16 травня 2024 р. / Упоряд.: Олександр Повстяной, Ольга Залета, Богдан Валецький, Роман Полінкевич. – Луцьк : Вежа-Друк, 2024. – 300 с.

ISBN 978-966-940-566-1

У цьому збірнику представлені наукові доповіді учасників 2-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Матеріали та технології в інженерії» МТІ-2024, яка відбулася 14–16 травня в Луцьку, на базі Луцького національного технічного університету. Цей збірник містить загальні відомості про досвід і поглиблення знань із структури, властивостей, технологій одержання металевих, композиційних, керамічних, полімерних і порошкових матеріалів у техніці. Цього року МТІ-2024 відбулася під егідою проекту ОРТІМА, який спрямований на впровадження ідей та практик відкритої науки в Україні для підвищення якості освітніх послуг. Залучення молодих дослідників різних наукових напрямів до участі в українських наукових конференціях та їх менторство допоможе забезпечити чесний, зрозумілий та прозорий відбір наукових матеріалів із дотриманням єдиних принципів академічної доброчесності.

**УДК 621 (06)**

© МТЕ-2024, 2024

ISBN 978-966-940-566-1

© LNTU, 2024

The main strategic principle of the international and scientific activity of the Lutsk National Technical University is the internationalization of its educational and scientific activity as a basis for integration into the international educational and scientific space and as a means of establishing itself in the international arena.

Lutsk National Technical University annually increases its scientific indicators of efficiency and prestige in international and Ukrainian rankings.

This year, the II International Scientific and Technical Conference "Materials and Technologies in Engineering" MTE-2024 took place under the auspices of the OPTIMA project, which is aimed at implementing the ideas and practices of open science in Ukraine to improve the quality of educational services. The involvement of young researchers in various scientific fields in Ukrainian scientific conferences and their mentoring ensured a fair, clear and transparent selection of materials for MTE-2024 with uniform principles of academic integrity.

The MTE-2024 team, on the basis of domestic and international standards in engineering, provided a platform for discussing advanced, progressive and key achievements, made it possible to exchange information, experience and knowledge about developments in researching the properties of new materials and technologies for their production using computer modeling and information technologies in engineering.

During the work of MTE-2024, the issues of implementing advanced ideas and practices of open science in Ukraine to improve the quality of educational services with the use of information and communication technologies in the scientific and educational world process were considered.

## **MTE-2024 COMMITTEES**

### **STEERING COMMITTEE**

#### **Conference Leader**

Iryna VAKHOVYCH, D.Sc., Professor, Rector of LNTU, Ukraine

#### **Chief Manager**

Oleksandr POVSTYANOY, D.Sc., Professor, LNTU, Ukraine

#### **Leading Manager**

Halyna HERASYMCHUK, Ph.D., Associate Professor, LNTU, Ukraine

#### **Strategic Manager**

Valentyna TKACHUK, D.Sc., Professor, LNTU, Ukraine

#### **Responsible Manager**

Ihor MUROVANYI, Ph.D., Associate Professor, LNTU, Ukraine

#### **Scientific Manager**

Nataliia IMBIROVYCH, Ph.D., Associate Professor, LNTU, Ukraine

### **INTERNATIONAL COMMITTEE**

Professor Krzysztof Jan KURZYDŁOWSKI (Białystok University of Technology, Poland)

Professor Maria Michela DELL'ANNA (Politecnico di Bari, Italy)

Professor Alison Jane McMILLAN (Wrexham Glyndŵr University, United Kingdom)

Professor Michał BEMBENEK (AGH University of Science and Technology, Poland)

Professor Luís Frólén RIBEIRO (Bragança Polytechnic Institute, Portugal)

Professor Ewa PAWŁUSZEWICZ (Białystok University of Technology, Poland)

Professor Roger J. NARAYAN (University of North Carolina and North Carolina State University, USA)

Professor Zhao JUNJUN (Chinese Welding Society, China)

Doctor of Philosophy, Senior Researcher Nicki Lisa COLE (Research Center for Data-Driven Business & Big Data Analytics, Austria)

Doctor of Engineering, Professor Wojciech WODO (Wroclaw University of Technology, Poland)

Open Access Programme Manager Iryna KUCHARA (EIFL, Lithuania)

Professor Joris VEŽYS, (Kaunas University of Technology, Lithuania)

Professor Arvydas PAULIUKAS (Vytautas Magnus University, Lithuania)

## **NATIONAL COMMITTEE**

Gennadii BAGLYUK, Corresponding Member, D.Sc., Institute of Materials Science Problems I.M. Frantsevich National Academy of Sciences, Kiev, Ukraine

Serhiy KLYMENKO, Corresponding Member, D.Sc., Institute of Superhard Materials V.M. Bakul National Academy of Sciences, Kiev, Ukraine

Volodymyr KORZYK, Corresponding member, D.Sn., *E.O. Paton Electric Welding Institute*, Kiev, Ukraine

Olga ZVIRKO, Corresponding member, D.Sn., Physico-Mechanical Institute G.V. Karpenka of the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine

Pavlo ZHEZHNYCH, D.Sn., Professor, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

Viktor MARCHUK, D.Sc., Professor, Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

Petro STUKHLYAK, D.Sc., Professor, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

Vitaii IVANOV, D.Sc., Professor, Sumy State University, Sumy, Ukraine

Vadym STUPNYTSKYI, D.Sc., Professor, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

Boris VORONTSOV, D.Sc., Professor, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kiev, Ukraine

Oleh ONYSKO, D.Sc., Professor, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivska, Ukraine

Maryna STOROZHENKO, D.Sn., Professor, Institute for Problems of Materials Science National Academy of Sciences, Kiev, Ukraine

Oleksandr BEREZKO, Ph.D., Associate Professor, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

Serhii SAPON, Ph.D., Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University, Chernihiv, Ukraine

Volodymyr POSUVAILO, Ph.D., Associate Professor, Physico-Mechanical Institute G.V. Karpenka of the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine

Andrii SLABKYI, Ph.D., Associate Professor, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

Tetyana SELIVONCHYK, Ph.D., Associate Professor, Kovel Industrial and Economic College, Kovel, Ukraine

Oleg HERASYMCHUK, Ph.D., Associate Professor, Technical Applied College LNTU, Ukraine

Oleksandr VASILIEV, Ph.D., Associate Professor, Institute for Problems of Materials Science National Academy of Sciences, Kiev, Ukraine

Tetyana STEPANIUK, Ph.D., Associate Professor, Institute of Mathematics National Academy of Sciences, Kiev, Ukraine

## **ORGANIZATIONAL COMMITTEE**

Rostyslav REDKO, Ph.D., Associate Professor, Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine – General Manager of the Conference

Olga ZALETA, Ph.D., Associate Professor, Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine – Information Manager of the Conference

Taras CHETVERZHUK, Ph.D., Associate Professor, Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine – Event Manager of the Conference

Roman POLINKEVICH, Ph.D., Associate Professor, Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine – Office Manager of the Conference

Bohdan VALETSKYI, Ph.D., Associate Professor, Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine – Brand Manager of the Conference

Vitalii DMYTRUK, Ph.D., Associate Professor, Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine – Settlement Manager of the Conference

Vitalii PUTS, Ph.D., Associate Professor, Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

Dmytro ZAKHARCHUK, Ph.D., Associate Professor, Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

Vasyl ONYSHCHUK, Ph.D., Associate Professor, Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

Viktor SYCHUK, Ph.D., Associate Professor, Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

Oleg ZABOLOTNYI, Ph.D., Associate Professor, Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

Denis RUSAKOV, Assistant, Kovel industrial and economic professional college, Kovel, Ukraine

Inna ANDROSCHUK, Ph.D., Technical Applied College LNTU, Ukraine

Svitlana BUSNIUK, Ph.D., Technical Applied College LNTU, Ukraine

Lyubov MAKARUK, student, Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

CONTENT | 3MCT

Derevyanko Ivan, Plitchenko Serhii <b>Restoration of crystalizers of continuous casting machines of billets.....</b>	15
Diduk I. <b>Effect of temperature and time parameters of aluminium-silicate melts on the elastic modulus of fibres.....</b>	18
Maksymiv Olha, Kyrlyliv Volodymyr, Mokryi Oleh, Kurnat Ivan, Zvirko Olha <b>The effect of surface nanocrystallization on the durability of structural steel.....</b>	23
Protokovilov Igor, Porokhonko Vitalii <b>Ti-Ni Shape Memory Alloy by Magnetically Controlled Electroslag Melting.....</b>	25
Shtofel Olha, Holovko Viktor, Korolenko Danilo <b>Determination of grain orientation of a planar structure using phyton.....</b>	29
Taratuta Kostyantyn, Vostotskyi Serhii <b>Computer modeling of drums of lifting machines and mechanisms.....</b>	32
Tkachuk Valentyna, Topilnytskyi Petro, Imbirovych Nataliia, Vitaliy Tkachuk <b>Current Trends in Biodiesel Fuel Production.....</b>	35
Tsyurulnyk Oleksandr Nykyforchyn Hryhorii, Venhryniuk Oleh, Zvirko Olha <b>Hydrogen effect on fracture toughness of post-operated pipeline steel.....</b>	38
Voloshko S.M., Burmak A.P., Orlov A.K., Voron M.M. <b>Influence of surface treatment on mechanical properties and structure of 3D-printed alloys.....</b>	41
Zvirko Olha, Demianchuk Dmytro, Tsyurulnyk Oleksandr, Bartoshevskyi Denys <b>Influence of hydrogen on deformation aging of low alloy steel during operation.....</b>	43
Артъвома С.В., Бевз Т.І., Бережна О.В., Малигіна С.В., Бережний М.О. <b>Розробка технології відновлення турбінних лопаток з титанового сплаву Ti-6Al-4V.....</b>	46
Базиліук Віктор, Никируй Любомир, Федосов Сергій <b>Застосування термоелектричних властивостей речовин в медицині.....</b>	49



Байдаулетова М.Ж., Міхал Бембенек

**Обґрунтування конструкції сівалки  
з комбінованими сошниками.....** 52

Башев Валерій Федорович, Томіна Анна-Марія Вадимівна,  
Микита Катерина Андріївна, Попіль Олег Ігорович,  
Фокін Владислав Ігорович

**Вплив швидкозагартованого сплаву системи Al-Co  
на структуру надвисокомолекулярного поліетилену.....** 55

Michał Bembenek, Damian Dzienniak, Vasyl Dmytryv,  
Vasyl Banha, Roman Horodniak

**Математична та експериментальна моделі  
витікання дисперсних матеріалів з бункера.....** 58

Божко Тетяна

**Автоматизація вимірювання сил різання  
при механічній обробці матеріалів.....** 62

Буковська Діана, Антоюк Віктор

**Комп'ютерне моделювання початкової  
стадії запуску безпілотного літального апарату.....** 64

Бут Микола Вікторович, Сліпченко Вячеслав Михайлович,  
Коваль Юрій Миколайович, Бублей Ірина Роальдівна,  
Кедровський Сергій Миколайович, Сліпченко Вікторія Миколаївна

**Легковісні функціональні матеріали  
на основі системи Ti-V, легованої алюмінієм та залізом.....** 67

Валецький Богдан Петрович

**Застосування мехатронних модулів  
для автоматизації виробничих процесів.....** 69

Венгринюк Олег, Звірко Ольга

**Експериментально-розрахунковий метод для побудови  
та аналізу істинних діаграм розтягу сталей з урахуванням їх  
структурно-механічного стану та наводнювання.....** 73

Волошин Віталій, Лось Ігор

**Корекція положення деталі в токарних патронах  
з активними затискними кулачками.....** 75

Воронцов Б.С., Лашина Ю.В.

**Аддитивне виробництво для досліджень та освіти.....** 78

Гальчук Тетяна Никифорівна

**Властивості виробів із композицій на основі порошку заліза.....** 80

Герасимчук Г.А., Гулай О.І., Герасимчук О.О.

**Рівень цифрової доступності в Україні  
і її вплив на сталість суспільства.....** 83

Герасимчук Олександр Павлович, Ткачук Оксана Леонідівна,  
Пуць Віталій Степанович, Охремов Андрій Іванович

**Отримання текстильних волокон  
з хвої сосни звичайної за допомогою процесів м'яття..... 86**

Грицай І.С.

**Методика забезпечення сталої роботи  
зубофрезерного верстата при нарізанні  
зубчастих коліс радіально- коловим методом..... 89**

Грицай І.С., Сліпчук А.М.

**Дослідження нестационарних процесів  
при нарізанні зубчастих коліс методом Power skiving..... 92**

Гричук Юрій, Колесніченко Сергій,  
Селютін Юрій, Калашникова Тетяна

**Стратегічний план забезпечення діджиталізації  
закладу вищої освіти будівельного напрямку  
(на прикладі ДонНАБА)..... 95**

Дуань Маньтан, Мосяк Василь Тарасович, Богомол Юрій Іванови

**Структура та властивості керамічних  
композиційних матеріалів  $\text{SiC}-(\text{Ti}_{0.2}\text{Zr}_{0.2}\text{Hf}_{0.2}\text{Nb}_{0.2}\text{Ta}_{0.2})\text{B}_2$ .....98**

Єр'оміна Катерина Андріївна, Томіна Анна-Марія Вадимівна,  
Єр'оменко Олександр Вікторович,  
Волошина Катерина Русланівна, Катков Богдан Романович

**Дослідження впливу режимів експлуатації на  
трибологічні властивості гібридного полімерного композиту..... 102**

Залета Ольга Михайлівна, Валецький Богдан Петрович,

Залета Андрій Олександрович

**Аналіз підходів до моделювання матеріальних  
потоків у гнучких виробничих комплексах..... 104**

Заякін Денис, Мікуліч Олена

**Програмний аналіз пористих матеріалів..... 107**

Зубовецька Наталія Тарасівна

**Предметна область і задачі прогнозування рядів  
динаміки при проектуванні металорізальних верстатів..... 111**

Зяхор Ігор, Гуцин Костянтин, Шило Юрій, Левчук Андрій, Кольцов  
Владислав, Завертанний Мирослав

**Формування з'єднань пресованих профілів  
із високоміцних алюмінієвих сплавів  
при контактному стиковому зварюванні оплавленням..... 114**

Іваницький С.Г., Чувашов Ю.М.

**Вплив параметрів формування неперервних  
базальтових волокон на їх міцність..... 117**

Іващук Олександр, Атаманюк Володимир, Чижович Роман <b>Дослідження гідродинаміки фільтраційного сушіння бурякового жому.....</b>	120
Ілюшенко В.М., Лук'янченко Є.П., Степченко Д.М., Бондаренко А.М. <b>Технологічні можливості отримання високих службових властивостей мідних зварних з'єднань при виготовленні та ремонті вузлів і конструкцій відповідального призначення.....</b>	122
Імбірович Наталія, Повстяной Олександр, Ткачук Валентина, Боярська Інна <b>Перспективність застосування ПЕО покриттів в різних галузях промисловості.....</b>	124
Калініченко Володимир, Мельник Максим <b>Самонавчальна система для автоматизованого визначення енергоефективних режимів токавної обробки на важких верстатах.....</b>	127
Кашуба Назар, Ділай Роман <b>Визначення відносної площі віброобкочування при формуванні регулярного мікрорельєфу на плоских поверхнях.....</b>	130
Кишун Володимир <b>«Чорна скринька» від автовиробників.....</b>	132
Коваль Юрій, Захарчук Дмитро, Ящинський Леонід, Федосов Сергій <b>Особливості ВАХ кристалів <math>n</math>-CdSb при різних рівнях інтенсивності освітлення.....</b>	135
Ковальов В.Д., Клименко Г.П., Васильченко Я.В., Шаповалов М.В., Григоренко Д.М. <b>Оптимізація режимів різання на важких верстатах.....</b>	137
Козулін С.М., Онищенко П.І., Резнік С.А., Ганчук А.В. <b>Однопрохідне електродугове та електрошлакове зварювання низьколегованої сталі 09Г2С товщиною 45 мм.....</b>	141
Коменда Денис, Мікуліч Олена <b>Програмне забезпечення мікро- та структурного аналізу пінистих матеріалів.....</b>	147
Копей Володимир, Пронюк Ігор, Шваб Юліан <b>Python-модуль для логічного виведення фактів з бази нотаток Foam.....</b>	151
Коржик В.М., Стухляк П.Д., Берднікова О.М., Zhao Junjun Джжао Дзюньдзюнь, Тотосько О.В., Стухляк Д.П., Лепіліна К.М. <b>Дослідження екрануючих характеристик металополімерних багатопарових систем.....</b>	154

Кузін О.А., Копилов В.І., Кузін М.О.

**Зернограничне конструювання структури матеріалів  
деталей для експлуатації в умовах контактної взаємодії.....** 157

Кусий Ярослав, Корній Сергій, Личак Олег,  
Дацко Богдан, Климаш Іван

**Контроль параметрів матеріалу алюмінієвих виливків  
в процесі механічного оброблення різанням.....** 160

Лавріненко Валерій, Солод Володимир

**Водневий показник технологічної рідини  
при абразивній обробці, як один з факторів впливу  
на контактні процеси під час обробки.....** 163

Лавріненко Валерій, Рудь Віктор, Ільницька Галина,  
Логінова Ольга, Смоквина Володимир, Зайцева Ірина,  
Тимошенко Вікторія, Старик Сергій, Білорусець Віктор,  
Котинська Людмила

**Дослідження впливу вмісту включень та домішок  
на окислення алмазів з низькою міцністю.....** 166

Латишев Д.В., Молчанов В.Ф.

**Експериментальні дослідження пропускну  
спроможності фільтрувальних сіток.....** 169

Лебедєв Ростислав Валерійович, Скребцов Андрій Андрійович

**Підвищення корозійної тривкості  
біосумісних титанових сплавів.....** 173

Макарук Любов, Повстяной Олександр

**Проектування та виготовлення лопатки  
газотурбінного двигуна з використанням Future CAM.....** 175

Малигін М.О.

**Дослідження процесу автоматизації проектування  
технології виготовлення зварено-литого  
базового вузла станин верстатного обладнання.....** 179

Манохін Андрій, Закієв Вадим, Клименко Сергій,  
Клименко Сергій, Копейкіна Марина

**Механічні властивості поверхневого шару композитів,  
спечених із порошків cBN з CVD-покриттям TiN-TiB<sub>2</sub>.....** 182

Марчук В.І., Тулашвілі Ю.Й., Лук'янчук Ю.А.

**Про можливість використання генеративного  
дизайну під час проектування 3D моделей.....** 184

Матвійчук О.О., Винар В.А., Івашків В.Р.,  
Рацька Н.Б., Василів Х.Б.

**Вплив легування карбідами хрому та молібдену  
на корозійну тривкість мезоструктурних композитів  
системи WC-Ni у хлоридовмісних середовищах.....** 187

Валерій Михайлов, Андрій Шевченко, Світлана Прасол <b>Аналіз властивостей матеріалів електродів для електроконтактної обробки харчових продуктів та середовищ.....</b>	190
Михайлов О.В., Михайлов А.О., Штерн М.Б. <b>Моделювання деформаційної обробки пористих заготовок, матеріал яких містить жорсткі включення.....</b>	193
Набережна Ольга, Головка Світлана <b>Вплив вмісту органічного волокна СУЛЬФОН-Т на технічні характеристики органопластиків.....</b>	196
Немировський Яків, Шепеленко Ігор, Отаманський Валентин <b>Управління формоутворенням осесиметричної заготовки при деформуючому протягуванні зі значними деформаціями.....</b>	198
Нестеров Олександр <b>Штучне закриття тріщин як метод підвищення втомної міцності сталей морських портових конструкцій.....</b>	201
Никируй Любомир, Федосов Сергій, Замуруєва Оксана, Яворський Ростислав, Базилюк Віктор <b>Термоелектричні сенсори в медичній діагностиці.....</b>	204
Носов Д.Г., Макаренко М.В., Шевцов В.Б., Слинько В.С. <b>Розробка функціональної моделі залежності розмірів зварювальної ванни від параметрів дугового автоматичного зварювання під флюсом.....</b>	207
Олійник Н.О., Ільницька Г.Д., Петасюк Г.А., Базалій Г.А., Заболотний С.Д., Рудь В.Д. <b>Дослідження зміни фізико-механічних характеристик порошків синтетичних алмазів, отриманих при їх флотоційному розділенні з попередньою спеціальною підготовкою.....</b>	210
Орехова Т.В., Дороніна О.А. <b>Імплементція практик відкритої науки в процес підготовки сучасних фахівців.....</b>	213
Павлов Олександр Анатолійович, Кобельський Вадим Володимирович <b>Статистичне дослідження модифікованого методу Терстоуна.....</b>	217
Пастернак Сергій <b>Підвищення ефективності механічного оброблення важкооброблюваних матеріалів додатковим підведенням електричної енергії в зону різання.....</b>	220

Пірогов Дмитро, Воронцов Борис	
<b>Вплив швидкості різання при точінні заготовок із титанового сплаву TI-6AL-4V отриманих за технологією xBeam 3D metal printing.....</b>	<b>224</b>
Повстяна Ю.С., Самчук Л.М.	
<b>Важливість м'яких навичок для випускників-інженерів.....</b>	<b>227</b>
Погрелюк Ірина Миколаївна, Посувайло Володимир Миколайович, Ковальчук Ігор Васильович, Данильчук Максим Володимирович	
<b>Дослідження впливу азотування титанового сплаву VT1-0 на фазовий склад та товщину оксидокерамічних покриттів.....</b>	<b>229</b>
Присташ М.С., Присташ С.Ф., Торпаков А.С., Липян Є.В., Сизоненко О.М.	
<b>Використання методів машинного навчання для прогнозування синтезу карбіду під час високовольтної електророзрядної обробки порошку титану у спирті із реалізацією іскрового розряду.....</b>	<b>232</b>
Радіо С.В., Марійчак О.Ю., Арданова Л.І., Гетьман Є.І.	
<b>Прогнозування границь ізоморфних заміщень і термодинамічної стабільності твердих розчинів вольфраматів і молібдатів зі структурою шесліту.....</b>	<b>237</b>
Регей Іван Іванович, Книш Олег Богданович, Михайлів Юрій Юрійович	
<b>Аналітичні дослідження силового навантаження привода натискної плити у штанцювальному пресі.....</b>	<b>240</b>
Редько Н.В., Редько Р.Г.	
<b>Моделювання динаміки пелюсток затискних цапг механізмів затиску багатопшпіндельних токарних автоматів.....</b>	<b>244</b>
Решетило Анатолій, Сичук Віктор	
<b>Покращення режимів плазмової обробки шляхом аналізу продуктів згоряння.....</b>	<b>249</b>
Рябченко Сергій, Бандуренко Михайло, Яровицин Олександр, Фомакін Олександр	
<b>Шліфування наплавлених поверхонь деталей авіаційної техніки абразивним інструментом із хромистого корунду.....</b>	<b>252</b>
Самчук Людмила Михайлівна, Повстяна Юлія Славомірівна	
<b>Металографічне дослідження пористості матеріалу на основі окалини сталі кувально-штампувального виробництва та природнього мінералу – сапоніту.....</b>	<b>255</b>

Сапон Сергій

**Практичні рішення в мотивації**

**здобувачів освіти машинобудівних спеціальностей..... 258**

Свіржевський Костянтин Миколайович,

Заболотний Олег Васильович

**Застосування технологій поверхневого**

**пластичного деформування для**

**підвищення зносостійкості деталей обертання.....260**

Сичук В.А., Сичук А.В.

**Робот Аватар – клон руки сапера..... 264**

Сичук В.А., Лопух В.В.

**Звуковий 3D сканер.....267**

Струк Назар Мирославович, Заболотний Олег Васильович

**Розробка обладнання, інструменту**

**та технології виготовлення паливних брикетів**

**з відходів біосировини природного походження..... 270**

Тесля С.Ю., Степанчук А.М., Тесля М.А.,

Судаков Д.С., Чижська Д.Є.

**Триботехнічні властивості порошкових сплавів Al-15Fe-C..... 274**

Фальченко Ю.В., Петрушинець Л.В., Федорчук В.Є.,

Михайлов Л.В., Новомлинець О.О.

**Дифузійне зварювання в вакуумі мішені**

**для отримання ізотопу  $^{22}\text{Na}$ ..... 277**

Філатов Ю.Д., Бояринцев А.Ю., Сідорко В.І.,

Ковальов С.В., Ковальов В.А., Юрчишин О.Я.

**Полірування деталей оптотехніки.....280**

Філюк Назар Олександрович, Заболотний Олег Васильович

**Розробка обладнання, інструменту**

**та технології виготовлення біокомпозиційних виробів**

**з відходів меблевого виробництва..... 283**

Хітров Ігор, Кононогов Юрій

**Відновлення деталей машин**

**з використанням анаеробних матеріалів..... 286**

Четвержук Т.І., Полінкевич Р.М., Демчук А.В.

**Оцінка критеріїв працездатності**

**шпиндельних вузлів верстатів з опорами кочення.....288**

Чорноіваненко Катерина

**Особливості  $\alpha \rightarrow \gamma$  перекристалізації**

**феритних сплавів заліза при науглецюванні..... 291**

Шимчук Сергій Петрович, Костюнік Руслан Євгенович,

Мартинюк Віктор Леонідович, Перій Олександр Володимирович

**Методи дослідження та забезпечення**

**працездатності підшипників кочення..... 294**

# Restoration of crystalizers of continuous casting machines of billets

Derevyanko Ivan, postgraduate student  
Plitchenko Serhii\*, candidate of technical sciences, docent

Dniprovsky State Technical University,  
Dniprobudiv's'ka St, 2, Kamianske, 51900, Ukraine

\* [plit4enko@ukr.net](mailto:plit4enko@ukr.net)

**Keywords:** plasma surfacing technology, continuous casting machines, abrasive wear, recrystallization temperature.

## 1 Introduction

Technologies of continuous casting of billets are currently one of the most widespread in the world. The vast majority of castings for the needs of the machine-building industry are obtained with the help of continuous casting machines (CCM) [1]. Continuous pouring, in addition to improving the quality of products, improving working conditions, and saving time, provides a significant saving of metal due to the reduction of trimmings and energy spent on heating individual castings.

## 2 Problem's formulation

The main element of CCM is considered to be a crystallizer, in which the process of solidification of the peripheral part of the liquid metal takes place and giving the resulting workpiece a certain geometric shape, ensuring the quality indicators of its surface and internal structure.

In the process of work, crystallizers, in contact with molten metal, can heat up to significant temperatures. Therefore, in order to limit their heating to critical temperatures and intensify heat removal from the working parts, a coolant is used. A significant role in this process is also played by the material of the crystallizer, which, most often, is made of copper or copper-based alloys. Due to its high thermal conductivity, copper ensures the rapid formation of a metal crust on the surface of the ingot. The process of formation of a strong crust is accompanied by providing the workpiece with translational movement, and therefore, the occurrence of significant abrasive wear in the zone of interaction of two surfaces at operating temperatures of 300...400 °C. In turn, the resulting wear of the working surfaces of the crystallizer leads to a change in its initial geometry and, as a result, to the production of products of unsatisfactory quality.



### **3 Presenting main material**

The conducted analysis of the internal walls of the crystallizer shows the unevenness of the wear relative to its height [2]. The upper part is in contact only with the liquid phase of the melt, so the surface is mainly affected by the factor of high temperatures. Already in the lower part, the solidified phase moves, which causes mechanical wear of the walls of the crystallizer, especially at the exit and at the corners of the given profile.

Considering the above, and in order to accelerate the process of crust formation, the material of the crystallizer should have the maximum possible thermal conductivity and provide resistance to high-temperature wear.

Pure copper does not meet the specified operating conditions in terms of its physico-chemical and mechanical properties, so the service life of such crystallizers is short. In view of this, one of the most important tasks in the repair of such crystallizers is not only the restoration of the geometric shape and dimensions of the working surfaces, but also the improvement of their productivity due to the increase of resistance to high temperatures, thermal shocks and resistance to mechanical wear for a longer time.

To restore and strengthen the surface layer of the CCM crystallizer, various methods of surfacing and sputtering are used, but the most effective is plasma-arc surfacing [4].

The essence of the plasma surfacing technology is to apply a layer of filler metal to the surface to be restored with the help of a compressed arc – plasma. The high concentration of thermal energy in the plasma jet, the stability of the arc discharge, the possibility of separately adjusting the degree of heating of the main and filler materials provide advantages of plasma surfacing over other types, especially in cases where the filler material differs in composition and properties from the main one. A small input of heat into the processed part ensures small deformations and thermal effects on the structure of the base, small allowances for further mechanical processing.

The high concentration of thermal energy of the arc allows you to deposit even thin layers with a thickness of 0.3 mm both on a large area and on a certain area of the surface of the product of high quality and without overflows, and also ensures minimal mixing of the base metal with the deposited metal, which ensures high properties of the deposited layer.

Another advantage of plasma surfacing is the use of wires, rods, loose powder materials, etc. as additive material. The above makes it possible to obtain surfacing layers with the required chemical composition depending on the introduced modifiers and alloying additives. Due to doping, the surface layer acquires new properties with the possibility of changing them in the desired direction.

When choosing alloying additives, it is necessary to take into account the effect of strengthening components and their amount on thermal conductivity. The total

content of alloying elements in alloys of high thermal conductivity should not exceed 5%. Chromium is considered the main strengthening element for copper, which at the same time reduces thermal conductivity within acceptable limits [3]. The addition of silver also strengthens the copper alloy and characterizes it with the highest values of thermal conductivity.

Another rather important characteristic of the material of the working surfaces of the crystallizer is the temperature of the recrystallization process, which in copper occurs at rather low temperatures (about 200 °C). This process leads to a weakening of the material, which is expressed in an increase in the size of the grains of the microstructure and, as a result, a decrease in the hardness value. Zirconium, titanium, and hafnium increase the recrystallization temperature of copper the most. Nickel also significantly strengthens copper, at the same time it does not change the properties of its plasticity and impact strength, increases the indicators of heat resistance, modulus of elasticity and reduces the coefficient of linear expansion.

The best combination of strength and thermal conductivity properties is achieved when copper is alloyed with several elements. For example, chromium zirconium bronze in terms of mechanical properties and heat resistance significantly exceeds chrome bronze BrH. At the same time, the thermal conductivity of the alloys is practically the same.

The thickness of the coating also plays a role in determining its final properties. To ensure high values of thermal conductivity of the wall of the crystallizer, it is necessary to have the smallest possible coating thickness.

## 4 Conclusions

The use of plasma surfacing technology with the use of complex alloyed additive materials will save expensive copper due to the reduction of chipping operations and preserve the thermal conductivity of the crystallizer wall due to partial strengthening. This technology will make it possible to restore and strengthen the worn surface of the crystallizer without preliminary mechanical treatment of the surface.

## References

1. Luoyang Wanfeng Industrial Furnace Co., Ltd Homepage. <https://www.wanf-furnace.com>, last accessed 2024/01/21.
2. Romana, G., David, J., Švec, P.: Modelling the crystallizer's mold state depending on its wear. *Acta Metallurgica Slovaca* 4, 129–137 (2014).
3. Li, M., Zinkle, S. J.: Physical and mechanical properties of copper and copper alloys. *Comprehensive Nuclear Materials* 4, 667-690 (2012).
4. Biryuchenko, D.O.: Methods of restoration and strengthening of copper plates of MBLZ crystallizers. *Special metallurgy: yesterday, today, tomorrow*, 1, 74-86 (2015).

# **Effect of temperature and time parameters of aluminium-silicate melts on the elastic modulus of fibres**

Diduk I., Ph.D.

Institute for Problems of Materials Science, National Academy of Science,  
3, Akademika Krzhizhanovskoho Str., Kyiv, 03142, Ukraine  
[diduk2@gmail.com](mailto:diduk2@gmail.com)

**Keywords:** alumina-silicate melts, fibres, modulus of elasticity

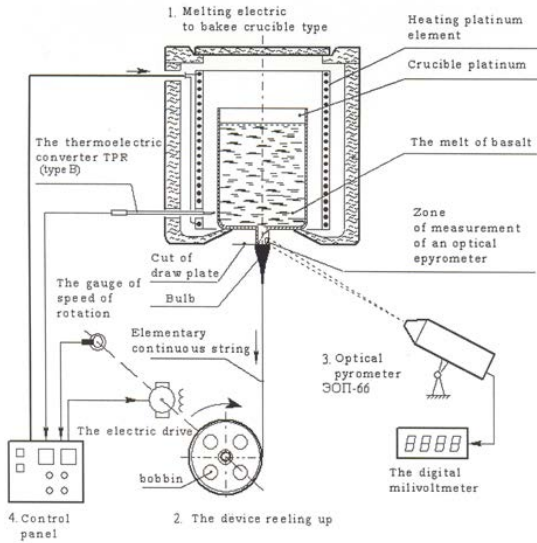
## **1 Introduction**

Expansion of the range of composite materials with fibre fillers, especially for structural purposes, requires high strength and modulus of elasticity. Production of fibres with specified properties remains an important scientific and technical task. Basalt continuous fibres (BCF) produced from rocks occupy an intermediate position in these parameters and are between alumina-magnesia high-modulus and glass fibres of type E [1-2].

The study purpose is to determine the dependence of elastic properties of fibres from temperature and time of melt production, which directly affect their properties [3], in particular the homogeneity of melts and homogeneity of glasses and fibres produced from them [4-5], which further have an influence on the structure and physical and mechanical properties of fibres [6].

## **1 Materials and methods**

Aluminosilicate fibres of various chemical compositions produced from melts of natural raw materials, rocks, and nonmetallic minerals were used as materials for the study, both in a single component form and in certain ratios in accordance with the requirements for chemical and mineralogical composition presented in [7-9], such that the resulting melt had a viscosity in the range of 50-200 dPa·s at a temperature of 1450 °C, crystallisation ability and fibre formation interval, which allows producing continuous and coarse fibres by forming a fibre filament from a melt stream. Fibres were produced on a single-filament laboratory stand, the scheme of which is shown in Fig. 1.



**Fig. 1.** Technological scheme of the universal stand

The universal stand is a laboratory system for studying fibre formation in the process of continuous drawing of fibres from basalt or aluminosilicate melts and provides for the maintenance of the set temperature from 100 to 1500 °C with an accuracy of + 1 °C, the melt level from 10 to 60 mm and the device rotation speed from 1 to 1000 m/min for winding single fibres with a diameter of 5 to 300 µm. The temperature of the melt in the high-temperature furnace was controlled by means of a TPR (B), which is located at the lower edge of the crucible with the melt, in the air space of the furnace without contact with the melt and crucible. The diameter of the fibre of a given size was produced by changing the speed of rotation of the device for winding and, accordingly, drawing the fibre. The diameter of the die ranged from 1.6 to 2.4 mm, depending on the viscosity characteristics of the aluminosilicate melt.

The modulus of elasticity was determined by two methods, the absolute elongation method and the ultrasonic wave transmission method. The first method was used to study the dependence of the elastic properties of the fibre on its diameter. After determining the optimal fibre diameter, the second method was used to determine the dependence of the fibre elastic modulus on the temperature and holding time of the melt during their production. The non-destructive testing method was used to determine the sound propagation velocity  $C$  in fibres with a diameter of  $30 \pm 1.0 \mu\text{m}$  using an acoustic installation. To calculate the elastic modulus, the density of the

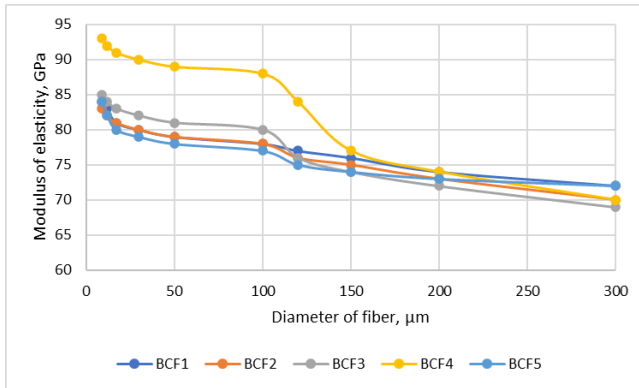
fibres was also determined by the weight method. The modulus of elasticity **E** was calculated by the formula:

$$E = \rho C^2, \tag{1}$$

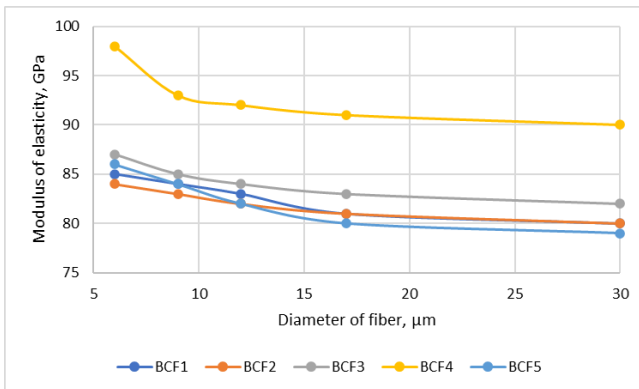
where  $\rho$  – the fibre density,  $\text{kg/m}^3$ ;  
 $C$  – sound transmission speed,  $\text{m/s}$ .

## 2 Results and discussion

To determine the dependence of the elastic modulus on the fibre diameter, aluminosilicate fibres from rocks of different compositions and synthesised from a mixture of natural non-metallic minerals with the amount of  $\text{SiO}_2$  ranging from 46 to 58 % (wt. %) were used. The results are shown in Fig. 2-3.



**Fig. 2.** Dependence of elastic modulus on fibre (continuous and coarse) diameter in the range from 9 to 300  $\mu\text{m}$



**Fig. 3.** Dependence of elastic modulus on continuous fibre diameter

in the range from 6 to 30  $\mu\text{m}$

When determining the dependence of the elastic modulus on the diameter for five samples of fibres of different compositions obtained from basalt and similar rocks, it was found that there is a tendency to increase it with a decrease in diameter up to 25 %, but for fibres with a diameter of 9 to 30  $\mu\text{m}$ , the absolute values have a deviation of no more than 2-3 %. Based on the results of the obtained dependence of the elastic modulus on the diameter, to determine the effect of temperature and melt holding time, laboratory samples of aluminosilicate fibres of 15 different compositions with a diameter of 30+1  $\mu\text{m}$  were made and the absolute values of the elastic modulus were determined. When determining the effect of temperature, it was found that the discrepancy between the data, both in one and the other direction, is insignificant, mainly 1-2 %, for some fibre samples up to 6 %. However, with an increase in the melt holding time, an increase in the elastic modulus by 5-6 % is observed.

### **3 Conclusion**

The modulus of elasticity of aluminium-silicate fibres depends on the chemical composition and diameter of the fibres. With an increase in diameter from 6  $\mu\text{m}$  to 300  $\mu\text{m}$ , the elastic modulus decreases by up to 25 %. For fibres with a diameter of 9 to 30 microns, this decrease is insignificant and is within 2-3 %. The temperature at which fibres are produced within the fibre formation interval for different compositions is characterised by both an increase and a decrease in the elastic modulus, and no clear dependence was found. The melt holding time affects the melt homogeneity and texture of the fibres, which improves the elastic modulus, but only slightly, by 2-3 %. Thus, in order to obtain fibres with higher elastic properties, it is necessary to use fibres of smaller diameter and hold the melt until it reaches a homogeneous condition.

### **References**

1. Dzhigiris D.D. Basics of production of basalt fibres and products / D.D. Dzhigiris, M.F. Makhova. M: Teploenergetik, 2002.- 411 p.
2. Lazoryak B.I. Glass fibres / B.I. Lazoryak, S.I. Gutnikov, A.N. Seleznev.
3. Chuvashov Y.M., Yashchenko O.M., Trofimova T.P., Diduk I.I., Rybalka E.O., Koshelenko N.I., Bozhko V.I. On some properties of melts and glasses of basic igneous rocks of basalt-like composition / Scientific notes: LSTU.-2009.- No. 2.-Vol. 24.- P.342-346.
4. Diduk I.I., Chuvashov Y.M., Yashchenko O.M., Skoryk M.A. Investigation of the surface structure of fibres from rocks of basic glasses of basalt type and silicate systems / Modern problems of physical material science: edited by academician V.V. Skorokhod.- 2012.- P.180-185.

5. Diduk I. The effect of chemical composition on properties of rock melts / I.Diduk, G.A. Bagliuk // *Machines, Technologies, Materials.* – 2/2016.- P.15-18.
6. S.G.Ivanitsky, Yu. Koshelenko Influence of conditions and parameters of basalt non-permeable fibres formation on their strength and surface condition / "Uspih Materialoznavstvo" 2021, No. 3, 86-92.
7. Bocharova, I.N. Rocks as one-component raw materials for the production of basalt fibres / Bocharova, I.N., Gorbachev, G.F., Gritsak, A.S., Mironenko, N.P. // *Rocks as one-component raw materials for the production of basalt fibres / Collection of reports of the International scientific and technical seminar "New materials and tools" - Kiev, 2005.- P.3-8.*
8. [Electronic resource]. Access mode: <http://www.bavoma.com>.
9. Gorbachev G.F., Bocharova I.N., Diduk I.I., Ivanitsky S.G., Koshelenko N.I. Features of formation of continuous basalt fibres and their properties / *Collection of reports of the International scientific and technical seminar "New materials and tools".- Kiev, 2005.- P.8-19.*

# The effect of surface nanocrystallization on the durability of structural steel

Olha Maksymiv<sup>[0000-0002-2461-8994]</sup>, PhD, Senior Researcher  
Volodymyr Kyryliv<sup>[0000-0002-8785-5284]</sup>, PhD, Senior Researcher  
Oleh Mokryi<sup>[0000-0002-2977-1605]</sup>, DSc, Assoc. Prof.; Ivan Kurnat<sup>[0000-0003-4323-2752]</sup>  
Olha Zvirko<sup>[0000-0002-6973-6804]</sup>, DSc, Prof., Corr. Member of the NASU

Karpenko Physico-Mechanical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
5, Naukova St., Lviv 79060, Ukraine  
okyryliv@yahoo.com

**Keywords:** Steel; nanocrystalline structure; frictional treatment.

## 1 Introduction

The damage of the machineries working under action of high contact loads and corrosive environments often starts from the surface. Therefore, the development of the surface modification technologies for improvement of physical and mechanical properties of steels is an actual issue [1, 2]. The most widely used for obtaining surface nanocrystalline structure (NCS) on metals are methods using severe plastic deformation [1–3].

In this paper, the influence of the surface NCS, obtained on the alloy structural steel by frictional treatment (FT) on the contact durability in oil and tap water is investigated.

## 2 Experimental, Results and Analysis

Cylindrical specimens of 10 mm in diameter and a length of working part 50 mm made of the alloy structural steel were investigated. The chemical composition of the steel is as follows, mass. %: 0.2 C; 0.9 Cr; 3 Ni; 0.4 Mn; 0.3 Si; 0.01 S; 0.01 P; Fe: balance. A series of specimens were tested: i) after FT in different technological fluids (TF: air, aqueous emulsol solution, and mineral oil); ii) after cementation, quenching and tempering at 150°C; iii) after cementation, quenching and tempering at 150°C and following FT. FT was performed on modernized turning machine using a tool made of 40X steel. The FT regime was as follows: rotational velocity of tool – 60 m/s, rotational frequency of specimen – 3.83 s<sup>-1</sup>, treatment time – 15 s, cutting depth – 0.4 mm (pressure in the friction contact zone 0.8 GPa). The contact durability was studied using double-disk scheme of the contact loading and a specimen rotational frequency of 250 Hz under working loads on specimen of 4000 MPa. The industrial oil and tap water were used as test environments.



The depth of the strengthened surface layer with NCS substantially affects the contact fatigue resistance, since buckling of the surface layer under that type of load. The depth of strengthened layer is the smallest after FT in aqueous TF associated with the higher speed of specimens' cooling in aqueous TF compared with the oil TF and air. The highest depth (150  $\mu\text{m}$ ) and microhardness (9.8 GPa) were received at FT in the oil TF.

The contact fatigue durability of the alloy steel with surface NCS was improved in comparison with that of the steel after cementation with further quenching and low-tempering. It is essentially higher for specimens tested in oil than in tap water. The specimens with surface NCS generated by FT in different TF are characterised by higher contact durability in approximately 2 times in the industrial oil compared with specimens without NCS; specimens tested in tap water had significantly higher contact durability just after FT in air, whereas specimens after FT in other TF had contact durability almost the same as after cementation and heat treatment.

## References

1. Nykyforchyn, H., Kyrlyiv, V., Maksymiv, O., Zvirko, O.: Mechanical fabrication methods of nanostructured surfaces. In: Aliofkhazraei, M., Ali, N. Chipara, M., et al (eds.), Handbook of modern coating technologies. Fabrication methods and functional properties, pp. 25–67. Elsevier, Amsterdam (2021).
2. Olugbade, T.O., Lu J.: Literature review on the mechanical properties of materials after surface mechanical attrition treatment (SMAT). Nano Materials Science 2, 3–31 (2020).
3. Yurkova, A., Byakova, A., Belots'ki, A., Milman, Y., Dub, S.: Mechanical behavior of nanostructured iron fabricated by severe plastic deformation under diffusion flow of nitrogen. Materials Science Forum 503–504, 645–650 (2006).

# **Ti-Ni Shape Memory Alloy by Magnetically Controlled Electroslag Melting**

Igor Protokovilov, Doctor of Engineering, Senior Researcher  
Vitalii Porokhonko, PhD, Senior Researcher

The E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine,  
11 Kazymyr Malevych Str., Kyiv, 03150, Ukraine

**Key words:** Ti-Ni, shape memory alloy, electroslag melting, magnetic field, ingot.

## **1 Introduction**

Alloys based on the Ti-53.5÷57.0 Ni wt.% system (nickel titanium, nitinol) are functional materials with unique properties - shape memory effect and superelasticity. These properties, combined with high strength and corrosion resistance characteristics, low density, high biocompatibility and low elastic modulus, determine the effectiveness of their use for the manufacture of medical instruments and implants, temperature sensors, thermo-mechanical devices, connecting couplings, etc [1-2].

In the production of Ti-Ni based alloys, there is an acute problem of ensuring a strictly specified chemical composition of the metal with high homogeneity. This is due to the fact that the complex of nitinol characteristics, primarily the transition temperatures, strongly depends on the chemical and phase composition of the alloy. Therefore, Ti-Ni alloys are subject to high requirements for the accuracy of the chemical composition (deviation in component content up to 0.2÷0.3%). This requires the need to use a complex technological process to produce Ti-Ni ingots with repeated, in some cases up to 3- or 4-fold, remelting [3-4].

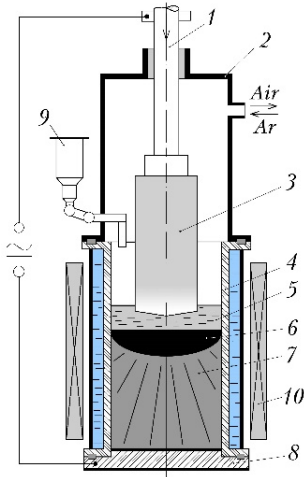
Despite intensive work in this area, the task of ensuring chemical and structural homogeneity in the production of Ti-Ni system alloys remains relevant.

## **2 Magnetically-controlled Electroslag Melting**

The new magnetically-controlled electroslag melting (MEM) process is carried out in a chamber-type electroslag furnace in an inert gas atmosphere, which minimizes the interaction of the metal with air gases (Fig. 1). Melting is carried out in a copper water-cooled crystallizer. As a consumable electrode, an electrode pressed from the charge mixture (titanium sponge and alloying components) is used.

The main distinguishing feature of the MEM process is the electromagnetic effect on the liquid metal pool, which makes it possible to obtain alloys with high chemical homogeneity of the metal and a fine-grained structure [5-7].

Ingots of Ti-55Ni (wt.%) alloy with a diameter of 65 and 100 mm were melted using the MEM method. The initial components were sponge titanium grade TG-90 and nickel grade NP-2. Consumable electrodes were manufactured by pressing. Oxygen-free flux AN-T4 was used. The resulting ingots were subjected to re-melting, which is due to the peculiarities of melting of the pressed electrode, characterized by instability of the melting current.



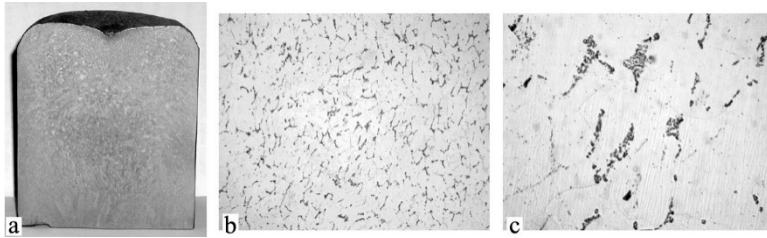
**Fig. 1.** Schematic diagram of MEM process: 1 - electrode feed rod; 2 - furnace chamber; 3 - consumable electrode; 4 - water cooled mold; 5 - slag pool; 6 - metal pool; 7 - ingot; 8 - bottom plate; 9 - bulk feed hopper, 10 - electromagnetic system.

### 3 Results and discussion

The resulting ingots are characterized by high quality of side surface formation (Fig. 2a). The macrostructure of the metal is dense, without pores, cracks, slag inclusions and other defects of metallurgical origin (Fig. 3a). It is uniform across the entire section and consisting of globular equiaxed grains.



**Fig. 2.** Ti-55Ni ingot (a) and plates and wire made from it (b, c)



**Fig. 3.** Macrostructure of the longitudinal section of a Ti-55Ni ingot (a) and microstructure after deformation and heat treatment (b, c)

The results of the chemical analysis of the smelted metal are shown in Table 1. The deviation of the titanium and nickel content across the section of the ingot does not exceed 0.2%, which indicates the high chemical homogeneity of the cast metal.

**Table 1.** Chemical composition of Ti-55Ni ingot by MEM technology.

Location		Content, weight %								
		Ti	Ni	Al	Fe	Si	Cu	O	N	H
Top	Centre	44,68	54,72	0,12	0,035	0,020	0,032			
	1/2R	44,75	54,67	0,14	0,024	0,015	0,030			not determined
	Edge	44,78	54,54	0,14	0,042	0,028	0,030			
Middle	Centre	44,80	54,64	0,14	0,032	0,032	0,056			
	1/2R	44,80	54,53	0,12	0,030	0,050	0,028	0,09	0,016	0,002
	Edge	44,62	54,78	0,12	0,030	0,032	0,040			
Bottom	Centre	44,63	54,78	0,12	0,067	0,026	0,046			
	1/2R	44,70	54,72	0,12	0,100	0,040	0,052			not determined
	Edge	44,65	54,78	0,12	0,095	0,035	0,030			

Plates with a thickness of 0.5...15 mm and wire with a diameter of 0.3...1.2 mm were made from the molten ingots (Fig. 2 b,c). Optical metallography of the deformed metal showed the absence of internal defects (Fig. 3 b,c). The microstructure of the metal is finely dispersed, which is caused by a large degree of deformation. Grains have a globular shape with a typical size of 5...8  $\mu\text{m}$ .

Studies of the functional properties of the resulting wire showed a pronounced shape memory effect. Dilatometric studies have made it possible to identify the characteristic points of martensite and austenite start temperatures, which are  $M_s=55^{\circ}\text{C}$ ,  $A_s=85^{\circ}\text{C}$ . These data correlate well with literature data for an alloy of this chemical composition.

Thus, the conducted studies showed the high effectiveness of using the developed MEM technology to obtain ingots of Ti-Ni alloy with a shape memory effect.

## References

1. G.B. Kauffman, I. Mayo. The Story of Nitinol: The Serendipitous Discovery of the Memory Metal and Its Applications. *Chem. Educator*. 1997. Issue 2. P. 1–21. <https://doi.org/10.1007/s00897970111a>
2. K. Otsuka, X. Ren. Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys. *Progress in Materials Science*. 2005. Vol. 50. no. 5. P. 511–678. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2004.10.001>
3. D. Hodgson, S. Russell. Nitinol melting, manufacture and fabrication. *Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies*. 2000. no. 9(2). P. 61–65. <https://doi.org/10.3109/13645700009063051>
4. R. Steegmüller, J. Ulmer, M. Quellmalz, et al. Analysis of New Nitinol Ingot Qualities. *Journal of Materials Engineering and Perform*. 2014. no. 23. P. 2450–2456. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-1054-0>
5. Ya.Yu. Kompan, I.V. Protokovilov, V.N. Moiseev. High-strength and heat-resistant titanium alloys with intermetallics produced by MEM technology. *Problemy Spetsial'noj Elektrometallugii*. 2004. no. 2, P. 2-6.
6. Protokovilov, A. T. Nazarchuk, D. A. Petrov, V. B. Porokhonko. Technological and metallurgical peculiarities of melting of titanium alloy ingots in chamber-type electroslag furnaces. *Electrometallurgy Today (Sovremennaya Elektrometallurgiya)*. 2018, no. 2, P. 45-51. <https://doi.org/10.15407/sem2018.02.06>
7. Ya. Kompan, I. Protokovilov, Y. Fautrelle, Yu. Gelfgat and A. Bojarevics. Magnetically controlled electroslag melting of titanium alloys. *Magnetohydrodynamics*. 2010. Vol. 46. no. 3. P. 317–324

# Determination of grain orientation of a planar structure using phyton

Shtofel Olha<sup>1,2</sup>, Holovko Viktor<sup>2</sup>, Korolenko Danilo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute,  
11 Kazymyr Malevycha St., 03150 Kyiv, Ukraine.

<sup>2</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,  
37 Beresteyskyi ave., 03056 Kyiv, Ukraine.  
o.shtof@gmail.com

**Keywords:** microstructure, morphology, properties, orientation, grains.

## 1 Introduction

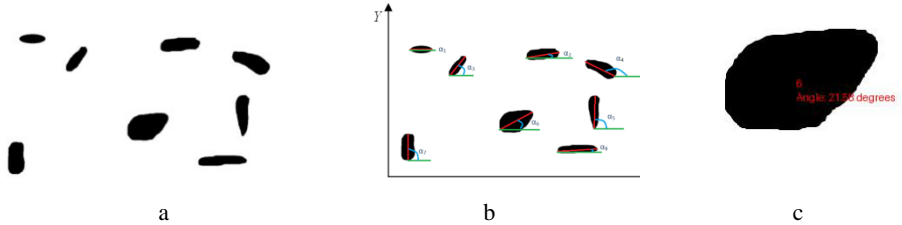
The microstructure directly visible in the plane of the cut only indirectly characterizes the bulk structure of alloys. The most complete description of the structure can be provided by means of series or distribution curves. The basis for studying microstructure is its morphology, which combines the study of shapes, structures and composition of metal materials. The basis of morphology is the understanding that the properties and characteristics of metals will depend on their morphology, i.e., on their external and internal structure, as well as on the components of which they are composed. The main objects of study of metal morphology are metal crystals. The study of metal morphology allows us to understand what factors and conditions affect the formation of the crystal structure, as well as how it can be changed and controlled. The shape and morphology of a metal play a key role in determining its properties and behavior under various operating conditions. They can affect the strength, ductility, fatigue strength, and other mechanical characteristics of a metal [1, 2].

The orientation of the structure significantly affects the mechanical properties [3]. In the case of grain orientation in the longitudinal direction, i.e., during deformation along the crystallographic planes (001), which characterize the direction of grain growth during crystallization, the ductility, as well as short-term and long-term strength of the alloy, increase. The orientation of the grains in the direction of maximum stresses eliminates the presence of transverse grain boundaries, so the development of cracks along the boundaries in the longitudinal grain orientation is more difficult than in the transverse or equilibrium structure. In the absence of a predominant grain orientation, the magnitude of stress inhomogeneity is to some extent characterized by the ratio of the maximum and minimum values of the elastic modulus.

## 2 Description of the work

The paper shows a solution to the problem of finding the angle of inclination of crystallites/grains, calculating their sizes on the example of a model; the connection with the fractal parameter and mechanical properties of the distribution by orientation angles of the real structure.

The model contains several objects of an arbitrary elongated shape (Fig. 1a), which will subsequently play the role of crystallites/grains on a flat structure. The task is to determine the orientation of the grains by finding the angle of inclination of each object to the selected axis, in this case, to the X-axis (Fig. 1b).



**Fig. 1.** Grain model on the grind (a) with grain orientation (b) and angle of inclination to the axis (c)

The program, written in python with the use of artificial intelligence, is designed to analyze objects of various geometries in the input image and consists of: image processing, object (crystallite) detection, calculation of crystallite parameters, and generation of data files.

Further data processing allows to build distributions of orientation angles on a flat structure based on the number of grains with these angles, analyze the fractional values and corresponding physical and mechanical characteristics, and compare the fractal dimension of image gaps.

## 3 Results of the analysis of a real sample

As an example, we took Sample 1 with mechanical characteristics shown in Table 1 and fractal parameters in Table 2.

**Table 1.** Mechanical properties of Sample 1 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

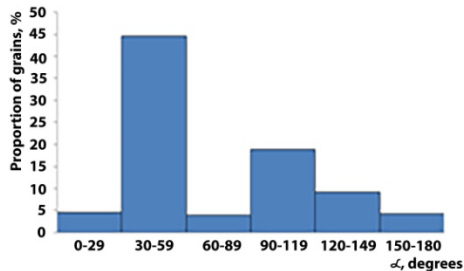
$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$	$\psi$	KCV, $\text{J}/\text{cm}^2$ at $T, ^\circ\text{C}$			
MPa		%		+ 20	0	- 20	- 40
728	621	17	54	82	58	50	36

**Table 2.** Fractional characteristics of the sample components [4].

	$D_b$	$D_l$	$D_i$	$\Delta$	$\Sigma$	S
Sample 1	0,5487	1,426	0,9196	0,3965	1,067	0,4084

Fractal parameters are indicated:  $D_b$  - branched bainite;  $D_1$  - branched grain boundaries;  $D_i$  - branched non-metallic inclusions;  $\Delta$  - branched zones with an increased dislocation content; and  $\Sigma$  - the sum of all cases when the distance to the neighboring inclusion is less than  $5R$ ;  $S$  - resistance to brittle fracture.

The resulting data distribution provides information on the approximate analysis of grain orientation on a flat structure (Fig. 2), because there are a number of factors that affect the quality and reliability of the data, depending primarily on the quality of the original image itself and the quality of its preparation for analysis.



**Fig. 2.** Histogram of the percentage of crystallites/grains on a flat structure, taking into account the angle of their inclination to the horizontal axis.

## References

1. Zhuravel I. M., Maksymovych V. M. Quantitative analysis of grain orientation and elongation in metallographic images using Hough transforms, *Scientific Bulletin of the National Technical University of Ukraine*, 2018, vol. 28, no. 5 DOI: 10.15421/40280528
2. I.S. Gakh, B.O. Zaderiy, G.V. Zvyagintseva, A.V. Zavdoveev, Y.V. Oliynyk Crystallographic and dimensional characteristics of weld structure elements of single crystals of heat-resistant nickel alloys, *Journal of Automatic Welding*, No. 9, 2023, pp. 3-10 DOI: 10.37434/as2023.09.01
3. K. A. Yushchenko, B. A. Zadery, I. S. Gakh, A. V. Zviagintseva, O. O. Fomakin, and A. V. Zavdoveev, *Welding of Single Crystals of Heat-Resistant Nickel Alloys as Innovations of Power Gas Turbines*, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 43, No. 10: 1401-1415 (2021) (in Ukrainian), DOI: 10.15407/mfint.43.10.1401.
4. Golovko V.V., Krasikov I.V., Krasikova I.E., Shtofel O.O. Application of multifractal parameterization in the problems of metallurgy on the example of the study of non-metallic inclusions 9th International Scientific and Practical Conference “Theoretical and Experimental Research in Modern Technologies of Materials Science and Engineering” May 29 - June 01, 2023 | LNTU, Lutsk, Ukraine



# **Computer modeling of drums of lifting machines and mechanisms**

Taratuta Kostyantyn, Ph.D., Associate Professor  
Vostotskyi Serhii, Researcher

Zaporizhzhia National University,  
str. Zhukovsky, 66, Zaporizhzhia, 69600, Ukraine  
taratutazp@gmail.com

**Keywords:** modeling, drum, designing.

## **1 Introduction**

Skip winches have large dimensions and a significant number of transmission elements. At the moment, modernization of automatic control systems for skip winches of blast furnaces is widely carried out by using modern converting units and non-contact displacement sensors, but the designs themselves have remained unchanged. The main trends in the design of modern lifting mechanisms are the desire to reduce the size and increase productivity.

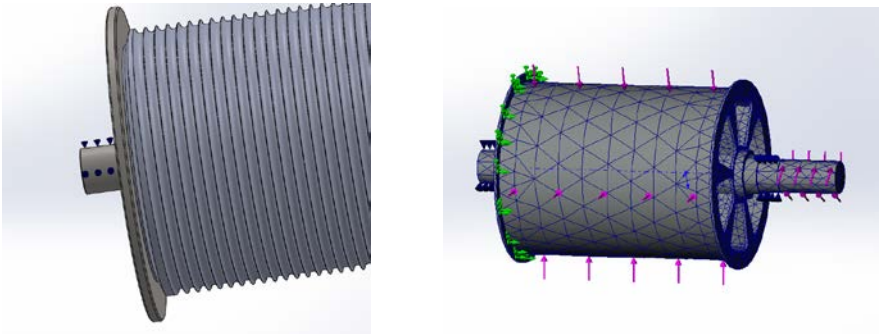
## **2 Simulation results**

In the course of the current study, the load capacity of the proposed structure was determined under the action of a non-linear load. In the course of studying the drum of the skip winch, we will determine ways to improve the design.

Cylindrical drums, which are smooth or grooved, have become the most common. Drums with grooves are used on the skip winch. The design sequence of the drum includes several stages: selection of the nominal diameter and length, determination of the depth and length of the threaded section, determination of other geometric parameters (thickness of the cylindrical part, diameter of the axis, etc.). The specified parameters are selected according to recommendations, taking into account the largest static tension of the rope. Further calculation is carried out in order to check the strength of the drum and axle. The stability of the cylindrical wall of the drum is also determined, the axis is checked for bending, and the calculation of the knot for attaching the rope to the drum is carried out.

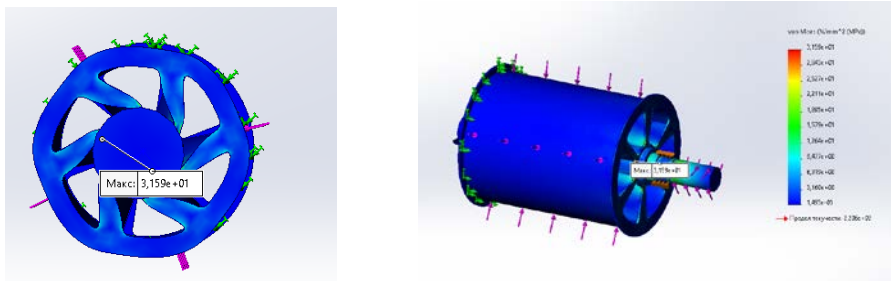
Also, when designing the drum, the angles of the rope exit from the drum should be taken into account. The angles of the rope must be minimal. The angles of the rope can be reduced, for example, by reducing the length and increasing the diameter of the drum or by increasing the distance between the blocks and the drum. In case of multi-layer winding, the angles of descent of the rope near the rim

of the drum should be more than  $0.5^\circ$  to prevent tangling of the rope turns (see Fig. 1).



**Fig. 3.** Spatial 3D model of the skip winch drum

The design was carried out in the SolidWorks system. This CAD system makes it possible to carry out static stress analysis, dynamic analysis, thermal analysis, and optimize the design parameters of the model. The analysis of the obtained graphs shows the presence of a significant margin of strength and the distribution of Von Mises stresses in the drum at nominal loads within the limits of permissible values. The analysis of the obtained results shows that the proposed design of the drum and the parameters of the axis correspond to the permissible values of stresses (see Fig. 2).



**Fig. 2.** Conditional view of the 3D model of the drum and stress distribution diagrams under the action of critical loads

### 3 Conclusions

Compared to traditional methods, computer-aided design has the following advantages: fast model creation and editing; the use of various materials, sizes and configurations without the need to manufacture physical prototypes; identifying problems in the early stages; time reduction. Also, computer design systems allow

the integration of developed models into the automated system of technological preparation for production.

## **References**

1. Design, modification and analysis of 3 ton electrical overhead travelling crane rope drum. February 2021. IOP Conference Series Materials Science and Engineering 1057(1):012025. DOI: 10.1088/1757-899X/1057/1/012025

# Current Trends in Biodiesel Fuel Production

Valentyna Tkachuk<sup>1</sup>, Dr. Sni, professor  
Petro Topilnytskyi<sup>2</sup>, Ph.D., associate professor  
Nataliia Imbriovych<sup>1</sup>, Ph.D., associate professor  
Vitaliy Tkachuk<sup>1</sup>, graduate student

<sup>1</sup>Lutsk National Technical University,  
75 Lvivska St., Lutsk 43018, Ukraine

<sup>2</sup>Lviv Polytechnic National University,  
12 Stepana Bandera Str., Lviv, Ukraine  
[v.tkachuk@lntu.edu.ua](mailto:v.tkachuk@lntu.edu.ua)

**Key words:** biomass, biodiesel fuel, biocomponents, environment.

## 1 INTRODUCTION

Diesel biofuels have become progressively widespread abroad in the latest years. A number of Western European countries are experiencing an increase in production of diesel fuel from vegetable raw materials. It is observed in Germany, France, as well as in the United States, Brazil, and Malaysia [1]. The European countries focus on production of diesel biofuels from rapeseed oil, encompassing from rapeseed grown in Ukraine. In the United States and Brazil the production of biodiesel from soybean oil is promoted. The Southeast Asian countries prefer production from palm oil [2].

## 2 RESULTS

A mixture of complex methyl esters obtained from rapeseed oil (MERO) is used as 100% diesel fuel in tractors operating in Austria. In France, they used a mixture of diesel fuel with 5% MERO. The soybean oil-based methyl esters are used as a 100% non-fuel or as a 20% addition to petroleum fuel in the USA. Regrettably, this problem is more theoretical in nature in Ukraine because of the absence of data about results of a study of the mass use of bio-components for diesel fuel.

In our previous research, we optimized the composition of mixed fuel based on petroleum diesel fuel, as well as biocomponents such as isobutyl ester and methyl ester of rapeseed oil, and we also analyzed their indicators of performance properties [3] The advantages of using such mixed fuels with respect to fossil fuel were: *i*) raise of cetane number (when this indicator is higher, the level of noise and smoke during engine operation is lower); *ii*) possibility of tuning values of density and viscosity, while ensuring the pumping of fuel through the car's fuel system and its anti-wear properties; *iii*) improvement of lubricating features of the fuel, thus

preserving car engine from consumption; *iv*) decreasing of the sulfur content in the obtained fuels with biocomponents, therefore improving their environmental properties; *v*) modifying the flash point. in a closed crucible, lowering the limit temperature of filterability. Another advantage of fuel modification of adding rape oil methyl and isopropyl esters is the improvement of the value indicator of washing ability.

A number of research works [4-5] are devoted to the improvement of oxidative stability and cold fluidity by the partial hydrogenation of biodiesel method. In addition, hydrogenation can lead to an increase in cetane number. It is a crucial fuel property corresponding to the ignition quality. After moderate hydrogenation of unsaturated FAMES, we can raise the ignition performance of fuel to a more satisfactory level.

A recent review paper summarizes the improvements in terms of the production, cold flow properties, oxidation stability as well as catalytic material for the hydrogenation process, and feedstock for the production concerning the ways to reduce trans-isomers in hydrogenated biodiesel [6].

Some investigations have been devoted to the inspection of the technologies and biofuel types produced [7-9]. Current state of execution shows a predominance of studies for biodiesel production through transesterification.

### 3 CONCLUSIONS

However, it is important to note that The European Parliament has approved new CO<sub>2</sub> emission targets for new passenger cars and light commercial vehicles.

The new legislation sets a path to zero CO<sub>2</sub> emissions in 2035. In effect, this will lead to a ban on the sale of new vehicles with internal combustion engines in 2035 and make the European Union the first fully electric region in the world. Interim emission reduction targets for 2030 are set at 55% for passenger cars and 50% for commercial vehicles from 2021.

### REFERENCES

1. P.C. Lau, T.L. Kwong, K.F. Yung: Effective heterogeneous transition metal glycerolates catalysts for one-step biodiesel production from low grade non-refined Jatropha oil and crude aqueous bioethanol/ In: Sci. Rep. 6 (2016) 23822, <https://doi.org/10.1038/srep23822>.
2. Energy Efficiency & Renewable Energy, Biofuel Basics-Biofuel BasicsBioenergy Technologies Office. Available online: <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/biofuel-basics> (accessed on 5 October 2022).
3. A.B. Vipper, A.Yu. Yevdokimov Diesel fuels based on vegetable raw materials abroad (2004). In: Oil Refining and Petrochemistry, vol 6. P.11-14.
4. B. Prebo, A.Thurlo Pearson Improving the production of biodiesel in the United States (2011). In: Oil and Gas Technologies, vol. 3. P.85-87.

5. Merezko N., Tkachuk V., Komakha V., Rechun O., Kovalska L. Optimization of Diesel Fuel Composition with Bio-Component and functional Additives. In: Lecture Notes in Mechanical Engineering. (2021).DOI: [10.1007/978-3-030-77823-1\\_35](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77823-1_35)
6. Tang H, Salley SO, Simon Ng KY. Fuel properties and precipitate formation at low temperature in soy-, cottonseed-, and poultry fat-based biodiesel blends. Fuel 2008;87:3006–17. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.04.030>.
7. Natthida, N., Nattapong, T., Apanee, L. Partial hydrogenation of palm oil-derived biodiesel over Pd/C catalysts. Int J Adv Sci Eng Tech 2016; 4:195–200. [http://www.iraj.in/journal/journal\\_file/journal\\_pdf/6-291-1477121491195-200.pdf](http://www.iraj.in/journal/journal_file/journal_pdf/6-291-1477121491195-200.pdf).
8. Kapila, Salley Steven O, Ng Simon KY. Effects of partial hydrogenation, epoxidation, and hydroxylation on the fuel properties of fatty acid methyl esters. Fuel Process Technol 2009;90:1292–9. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.06.013>.
9. Dell'Anna, M.M., Tkachuk, V., Rechun, O., Golodyuk, G. (2024). The Use of Biocomponents and Additives to Improve the Quality and Safety of Diesel Fuels. In: Boichenko, S., Zaporozhets, A., Yakovlieva, A., Shkilniuk, I. (eds) Modern Technologies in Energy and Transport. Studies in Systems, Decision and Control, vol 510. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-44351-0\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-031-44351-0_10).

# Hydrogen effect on fracture toughness of post-operated pipeline steel

Oleksandr Tsyurulnyk<sup>[0000-0001-9038-966X]</sup>, Hryhoriy Nykyforchyn<sup>[0000-0003-1012-2901]</sup>  
Oleh Venhryniuk<sup>[0000-0001-6531-5300]</sup>, Olha Zvirko<sup>[0000-0002-6973-6804]</sup>

Karpenko Physico-Mechanical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
5, Naukova St., Lviv 79060, Ukraine  
olha.zvirko@gmail.com

**Keywords:** pipe steel, hydrogen embrittlement, fracture toughness, *J*-integral method.

## 1 Introduction

Transportation of hydrogen by the existing natural gas pipelines increases a failure risk due to hydrogen embrittlement of pipeline steels, considered as one of the most dangerous factors compromising the structural integrity [1–3]. Fracture toughness is one of the mechanical indicators, most sensitive to steel embrittlement [4]. For pipeline steels, *J*-integral method is favoured [4–6] due to their high ductility.

In the research, the hydrogen influence on the fracture toughness of the pipeline steel after 38 years of operation on natural gas transmission pipeline was assessed in order to evaluate the sensitivity to hydrogen embrittlement.

## 2 Experimental, Results and Analysis

A series of specimens were tested: i) in post-operated state; ii) after preliminary electrochemical hydrogen (PEH) charging with the use of the following parameters: the specimens were pre-charged in an aqueous H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution (pH1) with adding 10 g/l thiourea at a current density 0.05 mA/cm<sup>2</sup> for 50 hours. The 17H1S (Ukrainian code, equivalent to API 5L X52 strength grade) low-alloyed pipeline steel after 38 years of operation was investigated. The specimens were cut from the real pipe made of 17H1S steel with outer diameter  $D = 1220$  mm and wall thickness  $t = 12$  mm. The basic mechanical properties meet the requirements imposed on pipe steels: ultimate strength  $\sigma_{UTS} = 570$  MPa; yield strength  $\sigma_Y = 390$  MPa; reduction in area  $RA = 68\%$ , elongation at rupture 25%; impact toughness  $KCV = 103$  J/cm<sup>2</sup>.

Fracture toughness of the specimens was determined using the *J*-integral method according to ASTM standard E 1820. Single-edge notched beam specimens (SENB) with dimensions of 4x15 mm and pre-existing fatigue cracks were subjected to three-point bending (span between supports 60 mm) in air at room temperature using the test displacement rate  $v = 0.5$  mm/min. Fracture toughness

values,  $J_{0,2}$  index, for an effective crack growth of 0.2 mm, were calculated from the  $J-\Delta a$ . Additionally, the  $J_0$  level at the initiation of static crack growth from the fatigue crack tip was determined, allowing for a comparison of the sensitivity of the  $J$ -integral parameters to hydrogen embrittlement based on the different criteria for assessing the critical value,  $J_{0,2}$  and  $J_0$ . Table 1 summarizes the mechanical properties of the 17H1S steel in different treated states.

**Table 1.** Critical values of the  $J$ -integral determined for the 38-year operated 17H1S pipeline steel

Steel state	$J_{0,2}$ [N/mm]	$J_0$ , N/mm	$(J_{0,2} - J_0)/0.2$ [N/mm <sup>2</sup> ]
Without pre-treatment	108	75	165
Preliminary hydrogen-charged	59	38	105

The comparison for non-hydrogenated and hydrogen pre-charged specimens showed a significant manifestation of hydrogen embrittlement by the decrease in the critical  $J_{0,2}$  value. The obtained estimates may result from both particularly intensive metal hydrogen charging and increased sensitivity of the post-operated steel to hydrogen embrittlement, revealed through fracture mechanics approaches. In general, the  $J$ -integral method is particularly effective in identifying embrittling factors in the mechanical behaviour of ductile steels, including operational embrittlement of pipeline steels.

### 3 Acknowledgements



The research has been financially supported by the National Research Foundation of Ukraine under the Project No. 2022.01/0099 (grant agreement No 06/0099 on March 01, 2024).

### References

1. Nykyforchyn, H., Unigovskyi, L., Zvirko, O., Tsyruynyk, O., Krechkovska, H.: Pipeline durability and integrity issues at hydrogen transport via natural gas distribution network. *Procedia Structural Integrity* 33 (C), 646–651 (2021).
2. Campari, A., Ustolin, F., Alvaro, A., Paltrinieri, N.: A review on hydrogen embrittlement and risk-based inspection of hydrogen technologies. *International Journal of Hydrogen Energy* 48(90), 35316–35346 (2023).
3. Hoschke, J., Chowdhury, M. F. W., Venezuela, J., Atrens, A.: A review of hydrogen embrittlement in gas transmission pipeline steels. *Corrosion Reviews* 41(3), 277–317 (2023).



4. Zvirko, O.I., Nykyforchyn, H.M., Tsyurulnyk, O.T., Voloshyn, V.A., Venhrynyuk, O.I.: In-service degradation of structural steels under cyclic loading. *Materials Science* 58(2), 222–228 (2022).
5. Cabrini, M., Sinigaglia, E., Spinelli, C., Tarenzi, M., Testa, C., Bolzoni, F.M.: Hydrogen embrittlement evaluation of micro alloyed steels by means of J-integral curve. *Materials* 12: 1843, 1–17 (2019).
6. Kyriakopoulou, H.P., Karmiris-Obratanski, P., Tazedakis, A.S., Daniolos, N.M., Dourdounis, E.C., Manolakos, D.E., Pantelis, D.: Investigation of hydrogen embrittlement susceptibility and fracture toughness drop after in situ hydrogen cathodic charging for an X65 pipeline steel. *Micromachines* 11: 20, 1–20 (2020).

## **Influence of surface treatment on mechanical properties and structure of 3D-printed alloys**

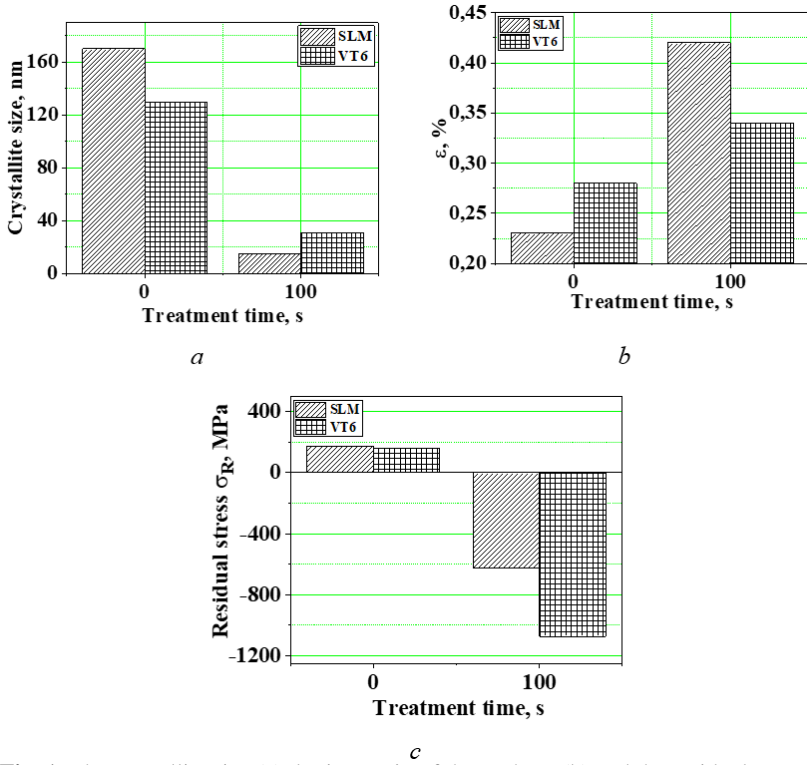
S.M. Voloshko<sup>1</sup>, A.P. Burmak<sup>1</sup>, A.K. Orlov<sup>1</sup>, M.M. Voron<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,  
35 Polytechnic St., UA-03056 Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>Physico-Technological Institute of Metals and Alloys, NAS of Ukraine,  
34/1 Academician Vernadsky Blvd., UA-03142, Kyiv, Ukraine  
burmak.andrii@ill.kpi.ua

**Keywords:** Additive technologies, 3D-printing, Ultrasonic Impact Treatment Surface Strengthening

The mechanical characteristics, phase composition, macroscopic residual stresses and surface topography of the Ti-6Al-4V alloy produced by different technologies - selective laser melting (SLM) [1] of powder and traditional hot rolling (VT6) were studied. Ultrasonic impact treatment (UIT) in an inert environment was used to modify the surface of samples of various types. In the initial state, the SLM sample, which consists of the hexagonal  $\alpha$ -phase, has a slightly higher (1.3 times) microhardness (HV) value than that of the hot-rolled VT6 bar, for which, in addition to the  $\alpha$ -phase, the presence of the cubic  $\beta$ -phase (18%) was observed. After UIT, an increase in the value of HV<sub>100</sub> by 1.6–1.8 times was registered, regardless of the alloy production method. Data obtained by the nanoindentation method satisfactorily agree with this result - the instrumental hardness, HIT, increases by 1.4–1.5 times [2]. Among the reasons for hardening (the hardness increase) recorded for both types of studied alloys, a high level of compressive stresses of the 1st kind plays a decisive role in the case of UIT-treated hot-rolled samples of VT6 (fig.1). The increase in microhardness of the UIT-treated SLM samples occurs to a greater extent due to the deformational refinement of the grain/subgrain structure (down to 15 nm) and a significant dislocation density, which causes the lattice microstrain in acicular martensite, which was formed at the SLM process due to the high cooling rate [3].



**Fig. 1.** The crystallite size (a), lattice strain of the  $\alpha$ -phase (b) and the residual stress (c) for samples of hot-rolled VT6 and SLM-Ti6Al4V alloys in the initial state and after UIT in an inert medium

## References

1. Additive laser technology. – 2024. <https://alt-print.com/aircraft-industry>
2. Palinkas I., Pekez J., Desnica E., Rajic A., Nedelcu D., Materiale plastice, 2022, Vol. 58, No 4, pp. 238-249 [in English]. <http://dx.doi.org/10.37358/MP.21.4.5549>
3. Moon S.K., Tan Y.E., Hwang J., Yoon Y., International journal of precision engineering and manufacturing-green technology, 2014, Vol. 1, pp. 223-228 [in English]. <https://doi.org/10.1007/s40684-014-0028-x>

# **Influence of hydrogen on deformation aging of low alloy steel during operation**

Olha Zvirko<sup>[0000-0002-6973-6804]</sup>, Dmytro Demianchuk  
Oleksandr Tsyrylnyk<sup>[0000-0001-9038-966X]</sup>, Denys Bartoshevskiy

Karpenko Physico-Mechanical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
5, Naukova St., Lviv 79060, Ukraine  
olha.zvirko@gmail.com

**Keywords:** Steel, Deformation aging, Hydrogen, Embrittlement, Residual stress.

## **1 Introduction**

Deformation aging of steels consists in the fixation of carbon and nitrogen atoms on dislocations, known as the formation of Cottrell clouds. This complicates the plastic deformation of the metal, which causes its embrittlement [1–3]. The standard DSTU 9166:2021 regulates the procedure of deformation aging of steels in laboratory. Deformation aging involves two main steps: first, the plastic deformation of the metal, which activates sources of dislocation generation, and second, moderate and relatively short-term heating of the deformed metal to facilitate the diffusion of interstitial atoms such as carbon and nitrogen to dislocations to form atmospheres around them.

It is well-known that electrolytic hydrogen charging of steels lead to internal stresses [4, 5]. It was assumed that the internal stresses induced by hydrogen charging could reach such a high level as to cause microplastic deformation at certain local microstructural sites, accompanied by the generation of dislocations. These localized areas within the metal serve as traps for hydrogen and contributes to the accumulation of high pressure molecular hydrogen in them. Therefore, the hydrogenation of steels can serve as a source of dislocation generation even without the previous plastic deformation at the macroscale. This is one of the necessary conditions for implementing the deformation aging. However, the requirement for subsequent heating of the metal after hydrogen charging remains the same. In the presented paper, this assumption was confirmed experimentally using the low-alloyed pipeline steel 17H1S.

## **2 Experimental, Results and Analysis**

A series of specimens were tested: in as-delivered state; after low-temperature tempering for 1 hour at 250 °C (LTT250); after in-laboratory preliminary electrochemical hydrogen (PEH) charging followed by low-temperature tempering

for 1 hour at 250 °C (PEH + LTT250). PEH charging of specimens was carried at a current density 50 mA/cm<sup>2</sup> for 100 hours in an aqueous H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution (pH2.0) with adding 2 g/l thiourea. All specimens were cut out from the pipe longitudinally oriented relative to the pipe axis. Basic mechanical characteristics, as well as resistance to stress corrosion cracking (SCC), were determined by tension tests of cylindrical specimens with a diameter and a gauge length of 5 mm and 25 mm, respectively. The strain rate was  $3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  and  $3 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$  in air and NS4 test solution, respectively. Charpy impact toughness (KCV) and fracture toughness by the J-integral method (standard ASTM E 813) were also determined. Table 1 summarizes the mechanical properties of the 17H1S steel in different treated states.

The low-temperature tempering (LTT250) had no significant effect on the mechanical behaviour of the investigated steel. Combining PEH with low-temperature tempering for 1 hour at 250 °C according to the (PEH + LTT250) regime, while not affecting the strength, plasticity, and impact toughness of the steel, slightly reduced its fracture toughness (by approximately 10%) and noticeably decreased its SCC resistance (the reduction in area RA reduced from 69% to 53%).

**Table 2.** Mechanical properties and SCC resistance of the studied pipeline steel 17H1S in different states

Steel state	Ultimate strength $\sigma_{UTS}$ [MPa]	Yield strength $\sigma_{YS}$ [MPa]	Reduction in area RA [%]	Impact toughness KCV [J/cm <sup>2</sup> ]	Fracture toughness $J_{0.2}$ [N/mm]
As-delivered state	531	428	71	129	322
LTT250	535	433	72	125	330
PEH + LTT250	533	435	74	131	286

It was revealed that the mechanical characteristics at a macro-scale, such as plasticity and impact toughness, are not sensitive to hydrogen-induced strain aging. Furthermore, fracture toughness, which is characteristic of a meso-scale, determined by J-integral method, is more sensitive to hydrogen. However, the most efficient method among all the methods used was resistance to SCC, which is considered a micro-scale characteristic. The microfractographic analysis revealed the signs of embrittlement for SCC testing. The embrittlement features correspond to the well-known regularity of the dominance of the intergranular pathways for hydrogen diffusion in low-alloy steels.

## References

1. Vodopivec, F.: Strain ageing of structural steels. *Metalurgija* 43(3), 143–148 (2004).
2. Tsyul'nyk, O.T., Kret, N.V., Voloshyn, V.A., Zvirko, O.I.: A procedure of laboratory degradation of structural steels. *Materials Science* 53 (5), 674–683 (2018).

3. Yang, Y., Zhang, B., Wang, Y., Jiang, Z., Li, K.: Mechanical behaviors and constitutive model of structural steel influenced by strain aging. *Journal of Constructional Steel Research* 192, 107211 (2022).
4. Tiegel, M.C., Martin, M.L., Lehmberg, A.K., Deutges, M., Borchers, C., Kirchheim, R.: Crack and blister initiation and growth in purified iron due to hydrogen loading. *Acta Materialia* 115, 24–34 (2016).
5. Mogilny, G.S., Shyvaniuk, V. N., Teus, S.M., Ivaskevich, L.M., Gavriljuk, V.G.: On a mechanism for enhanced hydrogen flux along grain boundaries in metals. *Acta Materialia* 194, 516–521 (2020).

# Розробка технології відновлення турбінних лопаток з титанового сплаву Ti-6Al-4V

Артьовома С.В.<sup>1</sup>, кандидат технічних наук, начальник ЦЗЛ

Бевз Т.І.<sup>1</sup>, начальник лабораторії МіТО

Бережна О.В.<sup>2</sup>, доктор технічних наук, доцент

Малигіна С.В.<sup>2</sup>, кандидат технічних наук, доцент

Бережний М.О.<sup>2</sup>, аспірант

<sup>1</sup> АТ “Українські енергетичні машини”,  
пр. Героїв Харкова, 199, Харків, 61037, Україна

<sup>2</sup> Донбаська державна машинобудівна академія,  
вул. Федьковича, 9, Тернопіль, 46000, Україна  
[elena.kassova07@gmail.com](mailto:elena.kassova07@gmail.com)

**Ключові слова:** зварювання TIG; турбінні лопатки; титановий сплав; зношені поверхні.

## 1 Вступ

Однією з найважливіших проблем експлуатації турбінного обладнання є ушкодження робочих лопаток ступенів низького тиску в результаті ерозійного зносу [1, 2]. Дослідження [3-5] свідчать, що найнебезпечнішими є утворення кратерів та щілиноподібних ушкоджень, що утворюються на робочих лопатках п'ятої ступені турбіни. У зв'язку з цим економічно виправданим є відновлювальне наплавлення титанових робочих лопаток ступенів низького тиску турбін атомних електростанцій, беручи до уваги високу вартість основного металу деталей.

## 2 Методика проведення досліджень

Дослідження технологічної зварюваності при дуговому відновлювальному наплавленні на зразках з титанового сплаву Ti-6Al-4V проводили з використанням наступних вихідних матеріалів: основний метал зразків – титановий сплав Ti-6Al-4V з відходів виготовлення штатних лопаток; присадковий матеріал трьох типів (титановий пруток марки BÖHLER ERTi2-IG Ø2,0мм; зварювальний дріт марки BT-1-00 Ø2,0 мм; титановий пруток 2×1,5 марки Ti-6Al-4V з відходів при виготовленні штатних лопаток); захисний газ-аргон газоподібний вищого гатунку (ДСТУ EN ISO 14175:2014); вольфрамові електроди, що не плавляться, марки WITSTAR WS-2 Ø2,4 (ДСТУ EN ISO 6848:2015).

Технологія відновлення зношених ділянок бандажів лопаток включала попередню підготовку, дугове наплавлення з припуском та подальшу механічну обробку відновленої ділянки. В рамках роботи проведено

дослідження механічних характеристик (замір твердості, визначення ударної в'язкості), а також аналіз макроструктури наплавлених зразків та дослідження їх мікроструктури. Для контролю макроструктури було виготовлено три поперечних темплети, на кожному з яких наплавлені по 3 ділянки з одним типом присадкового матеріалу. Контроль макроструктури темплетів проводили методом холодного травління. Випробування на твердість наплавленого шару проводили за методом Брінелля (ДСТУ EN ISO 6506-1:2019). В якості індентора використовували шарики діаметром 5 мм з навантаженням 750 кг.

Визначення мікротвердості різних ділянок наплавлених зразків здійснювали за методом Віккерса з використанням навантаження 100 г, вдавнення алмазного індентору з кутом при вершині  $136^\circ$  (ДСТУ ISO 6507-1:2007). Випробування на ударний вигин здійснювали за методикою Шарпі (ДСТУ ISO 148-1:2022) на зразках з U-подібним надрізом. Випробування проводили як для наплавленого металу, так і для основного металу зразків. При цьому у першому випадку надріз виконували у наплавленому металі, у другому випадку – в основному металі.

### **3 Аналіз одержаних результатів**

Результати проведених досліджень на ударний вигин свідчать про більш високі показники ударної в'язкості в зоні наплавленого металу порівняно з основним металом для зразків, наплавлених зварювальним дротом марки ВТ-1-00, та для зразків, наплавлених титановим прутком марки Ti-6Al-4V, а саме  $47 \text{ Дж/см}^2$  та  $46 \text{ Дж/см}^2$ , відповідно. Причому ударна в'язкість основного металу цих зразків складає, відповідно,  $44 \text{ Дж/см}^2$  та  $37 \text{ Дж/см}^2$ . Найнижчий показник ударної в'язкості одержано в наплавленому шарі, нанесеному титановим прутком марки BÖHLER ERTi2-IG – близько  $42 \text{ Дж/см}^2$ , що нижче ударної в'язкості основного металу зразка –  $48 \text{ Дж/см}^2$ . Проте результати вимірювання твердості наплавленого шару, свідчать про те, що всі три типи досліджуваних матеріалів при обраній технології відновлення забезпечують однаковий рівень механічних характеристик за показником твердості, а саме 341 HB.

Крім того проведені дослідження макро- та мікроструктури наплавлених зразків свідчать про те, що дугове напавлення титановим прутком BÖHLER ERTi2-IG  $\varnothing 2.0$  мм дозволяє одержати більш рівномірну структуру по перетину зразку. В результаті замірювання мікротвердості для зразків, наплавлених таким типом присадкового матеріалу, одержані значення одного порядку для всіх зон зварного з'єднання, що свідчить про відсутність напружень, які утворюються при формуванні структури в процесі напавлення.

Результати проведених досліджень технології відновлення зношеної поверхні бандажів робочих лопаток з титанового сплаву Ti-6Al-4V для



турбінного обладнання атомної електростанції показали достатньо хорошу зварюваність всіх використовуваних присадкових матеріалів. Всі три типи присадкових матеріалів, а саме титановий пруток марки BÖHLER ERTi2-IG Ø2.0мм, тип ERTi2 за AWS A5.6 (EN ISO 24034:2020); зварювальний дріт марки BT-1-00 Ø 2.0 мм; титановий пруток 2×1.5 марки Ti-6Al-4V, забезпечують необхідні показники механічних характеристик та відсутність зони підкалювання на межі сплавлення основного та наплавленого металу. Таке плавне перетворення структури по перетину наплавлених зразків дозволяє виключити з технологічного процесу операцію післязварювальної термічної обробки та одержати необхідний комплекс механічних властивостей. Проте найбільш рівномірною макро- та мікроструктура по перетину наплавленого зразку з показниками мікротвердості одного порядку для всіх ділянок спостерігається при використанні в якості присадкового матеріалу титанового прутка марки BÖHLER ERTi2-IG. Незважаючи на більш низькі показники ударної в'язкості в наплавленому шарі порівняно з наплавленням двома іншими присадковими матеріалами, результати мікроструктурних досліджень наплавленого зразку дозволяють рекомендувати при відновленні поверхонь деталей з титанового сплаву Ti-6Al-4V в якості присадкового матеріалу для дугового наплавлення неплавким електродом в середовищі аргону титановий пруток марки BÖHLER ERTi2-IG Ø2.0мм, тип ERTi2 за AWS A5.16-04.

## Список посилань

1. Ahmad M. Experimental assessment of droplet impact erosion resistance of steam turbine blade materials / M. Ahmad, M. Casey, N. Sürken // *Wear*. – 267 (9-10). – 2009. – PP. 1605-1618. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.06.012>
2. Hamed A. A. Turbine Blade Surface Deterioration by Erosion / A. A. Hamed, W. Tabakoff, R. B. Rivir, K. Das, P. Arora // *Journal of Turbomachinery*. – 127(3). – 2005. – PP. 445–452. <https://doi.org/10.1115/1.1860376>
3. Vorobiov Yu.S. Vibration Features of Titanium Alloy Blades with Erosive Damages / Yu.S. Vorobiov, N.Yu. Ovcharova, A.S. Olkhovskiy, O.V. Makhnenko, V.M. Torop, O.Ye. Hoptkalo // *Journal of Mechanical Engineering – Problemy Mashynobuduvannia*. – 21(4). – 2018. – PP.13-21. <https://doi.org/10.15407/pmach2018.04.013>
4. Torop V.M. Results of studying the causes for cracking in titanium alloy blades of steam turbines of K-1000-60/3000 TYPE / V.M. Torop, O.V. Makhnenko, G.Yu. Saprykina, E.E. Goptkalo // *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*. – 2. – 2018. – PP. 3-15. <https://doi.org/10.15407/tdnk2018.02.01>
5. Vorobiov Yu. Vibration of Titanium Blades of Turbomachines for Nuclear Power Plants with Erosive Damage / Yu. Vorobiov, O. Makhnenko, N. Ovcharova, A. Olkhovskiy // *Theoretical, Applied and Experimental Mechanics*. – 8. – 2019. – PP. 334-340. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-21894-2\\_61](https://doi.org/10.1007/978-3-030-21894-2_61)

# Застосування термоелектричних властивостей речовин в медицині

Базиліук Віктор<sup>1</sup>, Никируй Любомир<sup>2</sup>[0000-0002-3754-0348]  
Федосов Сергій<sup>3</sup>[0000-0003-3457-8911]

<sup>1</sup> Луцький медичний інститут, вул. Лесі Українки, 2, Луцьк, 43016, Україна

<sup>2</sup> Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,  
вул. Шевченка, 57, Івано-Франківськ, 76018, Україна

<sup>3</sup> Луцький національний технічний університет,  
вул. Львівська, 75, Луцьк, 43018, Україна  
fedosov.serhiy@gmail.com

**Ключові слова:** термоелектрики, медицина, сенсори.

## 1 Вступ

Шкіра є органом людського тіла, яка представляє діагностичний інтерфейс, насичений життєво важливими біологічними сигналами від внутрішніх органів, кровоносних судин, м'язів і дерми/епідермісу. М'які, гнучкі та розтяжні електронні пристрої створюють нову платформу для взаємодії з м'якими тканинами для роботизованого зворотного зв'язку та контролю, регенеративної медицини і постійного моніторингу здоров'я.

## 2 Результати досліджень

У першій частині [1] розглядаються матеріали, стратегії проектування та системи живлення, що використовуються в програмній електроніці, представлено огляд застосування цих пристроїв у кардіології, дерматології, електрофізіології та діагностиці поту з наголосом на тому, як ці системи можуть замінити звичайні клінічні інструменти. Огляд завершується поглядом на поточні виклики та можливості для майбутніх напрямків досліджень у сфері моніторингу здоров'я переносних пристроїв.

Застосування матеріалів, що розтягуються, і матеріалів, що самовідновлюються, включає, але не обмежується цим, електроніку, дисплеї, енергетику, навколишнє середовище та медицину. Хоча більшість органічних матеріалів, як правило, можна зробити гнучкими, такі матеріали не розтягуються, що є ключовою механічною властивістю, необхідною для реалізації застосувань електронної шкіри для протезування, штучного інтелекту, систем робототехніки, персонального моніторингу здоров'я, біосумісності та зв'язку. пристроїв. Публікація [2] охоплює деякі з

найновіших досягнень у розтяжних і самовідновлюваних полімерах і пристроях для електронної шкіри (E-skin). Авторами досліджено матеріали, які використовуються в різних компонентах електронних пристроїв, розглянуто останні досягнення в розтяжних і самовідновлювальних провідниках, напівпровідниках і підкладках. Наголошується на деяких ключових технологіях, нещодавно розроблених у розтяжних сенсорах на органічній основі, сонячних елементах, світлодіодах та електронних пристроях із самовідновленням.

Терагерцове випромінювання використовується в різних сферах – від безпеки до медицини. Однак чутливе виявлення терагерцевого випромінювання при кімнатній температурі, як відомо, складно. У [3] продемонстровано графеновий термоелектричний терагерцевий фотодетектор із чутливістю понад  $10 \text{ ВВт}^{-1}$  ( $700 \text{ ВВт}^{-1}$ ) за кімнатної температури та еквівалентною потужністю шуму менше  $1100 \text{ пВтГц}^{-1/2}$  ( $20 \text{ пВтГц}^{-1/2}$ ), що відноситься до інциденту (поглинається) потужність. Проста модель відповіді, включаючи контактні асиметрії (опір, роботу виходу та закріплення енергії Фермі), відтворює якісні характеристики даних і вказує на те, що можливе покращення чутливості на порядок.

Біопаливні клітини на основі ферментів, імплантовані в живих омарів або розроблені як рідинні системи, що імітують кровообіг людини, використовувалися у [4] для живлення електронних пристроїв. Два омари з імплантованими біопаливними осередками, з'єднаними послідовно, змогли генерувати напругу холостого ходу ( $V_{oc}$ ) до 1,2 В. Рідинна система, що складається з п'яти клітин, наповнених розчином людської сироватки, з'єднаних послідовно, генерувала  $V_{oc}$  приблизно 3 В і могла жити кардіостимулятором. Стабільна робота кардіостимулятора була досягнута завдяки системі, яка точно імітує фізіологічні умови людини, характерні для нормальної та патофізіологічної концентрації глюкози, зі швидкістю рідини, типовою для кровообігу під час відпочинку або виконання фізичних вправ. У той час як омари-кіборги демонструють модель системи з можливими майбутніми військовими, національною безпекою та моніторингом навколишнього середовища, система, що активує кардіостимулятор, представляє практичність для біомедичних застосувань. Перша демонстрація кардіостимулятора, що активується фізіологічно виробленою електричною енергією, показує перспективу для майбутніх електронних імплантованих медичних пристроїв, що живляться від електрики, отриманої від людського тіла.

Гнучкі датчики тиску, які можна носити, мають першочергове значення для розвитку персоналізованої медицини та електронної шкіри. Однак підготовка одноразових датчиків тиску все ще стикається з нагальними проблемами. У роботі [5] автори розробили повністю паперовий п'єзорезистивний (АРВР) датчик тиску за допомогою простого, економічно ефективного та екологічно чистого методу. Датчик тиску базувався на

цигарковому папері, покритому срібними нанодропами (AgNWs) як сенсорним матеріалом, наноцелюлозному папері (NCP) як нижній підкладці для друкувальних електродів і NCP як верхньому інкапсулюючому шарі. Датчик тиску APBP показав високу чутливість  $1,5 \text{ кПа}^{-1}$  в діапазоні 0,03–30,2 кПа і зберіг відмінні характеристики в згинальному стані. Крім того, датчик APBP був встановлений на шкірі людини для моніторингу фізіологічних сигналів (таких як артеріальний серцевий пульс і вимова в горлі) і успішно застосований як м'яка електронна шкіра для реагування на зовнішній тиск. Завдяки використанню звичайного цигаркового паперу, NCP, AgNWs і лише електропровідних наносрібних чорнил, датчик тиску має такі переваги, як низька вартість, легкість виготовлення та швидка підготовка, і його можна легко утилізувати шляхом спалювання.

## Список посилань

1. Liu Y., Pharr M., Salvatore G.A. Lab-on-Skin: A Review of Flexible and Stretchable Electronics for Wearable Health Monitoring. *ACS Nano*. 2017. Vol. 11, № 10. P. 9614–9635.
2. Benight S.J., Wang C., Tok J.B.H., Bao Z. Stretchable and self-healing polymers and devices for electronic skin. *Progress in Polymer Science*. 2013. Vol. 38, № 12. P. 1961–1977.
3. Cai X., Sushkov A.B., Suess R.J., ...Drew H.D., Fuhrer M.S. Sensitive room-temperature terahertz detection via the photothermoelectric effect in graphene. *Nature Nanotechnology*. 2014. Vol. 9, № 10. P. 814–819.
4. MacVittie K., Halámek J., Halámková L., ...Lobel R., Katz E. From cyborg lobsters to a pacemaker powered by implantable biofuel cells. *Energy and Environmental Science*. 2013. Vol. 6, № 1. P. 81–86.
5. Gao L., Zhu C., Li L., ...Yu H.-D., Huang W. All Paper-Based Flexible and Wearable Piezoresistive Pressure Sensor. *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2019. Vol. 11, № 28. P. 25034–25042.

## **Обґрунтування конструкції сівалки з комбінованими сошниками**

<sup>1</sup> Байдаулетова М.Ж., магістр  
<sup>2</sup> Міхал Бембенек, д.т.н., професор AGH

<sup>1</sup> Казахський Агротехнічний Дослідницький Університет ім. С.Сейфулліна,

<sup>2</sup> AGH Університет у Кракові, Польща,  
[bembenek@agh.edu.pl](mailto:bembenek@agh.edu.pl)

Ключові слова: сівалка, посівні комплекси, дискові та анкерні сошники, стерня, тяговий опір, посів.

Із застосуванням нових цифрових технологій сільськогосподарські машини виходять на новий рівень розвитку.

Багато сучасних виробників сільськогосподарських машин приділяють велику увагу підвищенню ефективності роботи посівних машин шляхом удосконалення конструкції, що відповідають агротехнічним вимогам. Важливим завданням підвищення якості посіву зернових культур є зниження тягового опору та підвищення рівномірності глибини загорання насіння.

В даний час лідерами з розробки та виробництва такої посівної техніки у світі є фірми «John Deere (США), "Amazone", "Horsch", "Accord" (Німеччина), "Morris", "Flexi - Coil" (Канада), "RÖTTINGER" (Австрія) та ін.

Проте сівалки з ЦВС вищезгаданих фірм не адаптовані до ґрунтово-кліматичних умов Казахстану.

У зв'язку з цим існує необхідність створення високопродуктивної та адаптованої до ґрунтово-кліматичних умов Північного Казахстану сівалки, що забезпечує рівномірну глибину загорання насіння зернових культур.

У північному Казахстані, де умови для сільського господарства можуть бути досить складними через кліматичні особливості для прямого посіву зернових культур, таких як пшениця, овес, ячмінь та інші, рекомендується використовувати сівалки з комбінованими сошниками. Ці сівалки забезпечують більш ефективний та рівномірний розподіл насіння ґрунту, що сприяє кращому схожості та розвитку рослин.

Комбіновані сошники дозволяють здійснювати одночасно кілька операцій, таких як розпушування ґрунту, добриво, посів насіння та ущільнення землі. Це суттєво скорочує час та трудовитрати на проведення цих робіт, а також підвищує якість сільськогосподарських робіт.

Розроблено сівалку з комбінованими сошниками для прямого посіву зернових культур, що забезпечує рівномірну глибину загорання насіння та знижує тяговий опір сошникової групи. Будуть отримані аналітичні вирази,

що визначають основні оптимальні параметри групи сошникової зернової сівалки для прямого висіву.

З метою забезпечення оптимальної глибини загортання насіння та туків без додаткового збільшення маси сівалки, а також запобігання забиванню міжсошникового простору ґрунтом та поживними залишками пропонується експериментальне встановлення сівалки з дисковими та анкерними сошниками. Сошники на експериментальній сівалці встановлені, в три ряди, причому, на першому та третьому рядах встановлені анкерні, а на другому дискові сошники, рисунок 1.



**Рис. 1.** Експериментальна сівалка із комбінованими сошниками для прямого посіву

Застосування пропонованого винаходу дозволить на 25-30% знизити вагу сівалки прямого посіву, на 35-45% підвищити коефіцієнт надійності виконання технологічного процесу та на 30-35% підвищити продуктивність сівалки.

## **Список посилань**

1. Rafael Sobroza Becker, Airton dos Santos Alonço, Tiago Rodrigo Franceto, Dauto Pivetta Carpes, Bruno Christiano Correa Ruiz Zart, Antonio Robson Moreira. «Operational performance of crop residue cutting discs in the no-tillage system» AgricEngInt: CIGR Journal
2. Sagadat Turebayeva, Aigul Zhapparova, Akbota Yerkin, Khairnisa Aisakulova, Gainiya Yesseyeva, Anuarbek Bissembayev i Elmira Saljnikov 2, 12, 111. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010111>

3. Neeraj Kumar1, CP Sawant, RK Sharma, RS Chhokar, PS Tiwari, Dushyant Singh, AK Roul, SC Tripathi, SC Gill1 i GP Singh1 in Soil Bin» Journal of Scientific & Industrial Research Vol. 80, September 2021, pp. 739-749
4. Акшалов До., Mainel Т., Клишбеков Т., Баяхметов Д., Тайшухер Ж., Неліс Д., Лесь С. Сівалки для прямого посіву «Citan Z» та «Condor 12001». Досвід випробування та використання на рівні господарств у Північному Казахстані. Шортанди: - НВЦЗГ ім. А.І. Бараєва, 2011. - 32 с .
5. Aduov MA, Kapov SN, Nukusheva SA, Components of coulter tractive resistance for subsoil throwing o seeds planting // *Life Sci J.* -2014. -11 (5s): P . 67-71.
6. Aduov MA, Kapov SN, Nukusheva SA, Т. е . С.Сейфулліна. - Астана, - 2013. - №3 (78) . - 3. 76-85.
7. Aduov MA, Matyushkov MI Nukusheva SA Planters для ресурсів-залишення кронів cultivation технології в умовах Northern Kazakhstan // III International Scientific Congress. сільськогосподарські машини. 22-25 June - Varna, Bulgaria: Proceedings, 2015. - Vol 3. - P .35-36.
8. Mesik I., I. Sestak, Z., Kisis, A., Zgorelesand A. Jurisik. Спосіб ізоляції ґрунтовки базується на циркулярній виробничому апараті // III International Scientific Congress.Agricultural Machinery. 22-25 червня. - Varna , Bulgaria: - Proceedings. - 2015. - Vol 3. - P. 16-18.

# **Вплив швидкозагартованого сплаву системи Al-Co на структуру надвисокомолекулярного поліетилену**

Башев Валерій Федорович, д.ф.-м.н., професор  
Томіна Анна-Марія Вадимівна, к.т.н.  
Микита Катерина Андріївна  
Попіль Олег Ігорович  
Фокін Владислав Ігорович

Дніпровський державний технічний університет,  
вул. Дніпробудівська, 2, Кам'янське, 51918, Україна  
an.mtomina@gmail.com

**Ключові слова:** металополімери, швидкозагартований бінарний сплав, дифрактограма

## **1 Вступ**

Полімерні композиційні матеріали (ПКМ) сьогодні стали невід'ємною і постійно зростаючою частиною багатьох галузей промисловості. Серед великого різноманіття наповнювачів (Нп) для ПКМ триботехнічного призначення можна виділити порошки металів і сплавів. Відомо, що використання алюмінієвої бронзи, диселеніду молібдену, порошоків сплаву на основі міді, карбонільного нікелю, алюмінію, самофлюсуючого сплаву ПР-Н65Х25СЗРЗ, сплаву системи Ti-Al-V, оксиду цирконію, магнію, цинку, як Нп, дозволяє створити металополімери (МП) із достатньо високою зносостійкістю, твердістю, теплопровідністю [1-8]. Враховуючи зазначене, дана робота спрямована на розробку та дослідження нових МП із поліпшеними показниками трибологічних властивостей.

## **2 Об'єкти та методи досліджень**

Для створення нового МП обрали надвисокомолекулярний поліетілен (НВМПЕ) (виробник Jiujiang Zhongke Xinxing New Material Co.,Ltd., Китай), який характеризується високими показниками корозійних, демфуючих і трибологічних властивостей.

В якості металевого Нп для НВМПЕ були обрані швидкозагартовані з рідкого стану ( $v_{\text{охол}} \sim 10^6$  К/с) дрібні зразки сплаву Al-10 мас.%Co, компоненти якої характеризуються високими антикорозійними властивостями. Діаграма стану Al-Co з боку алюмінію характеризується практично нульовою розчинністю Co у решітці алюмінію, однак швидке гартування з розплаву сплавів Al-Co призводить до формування у структурі загартованих зразків

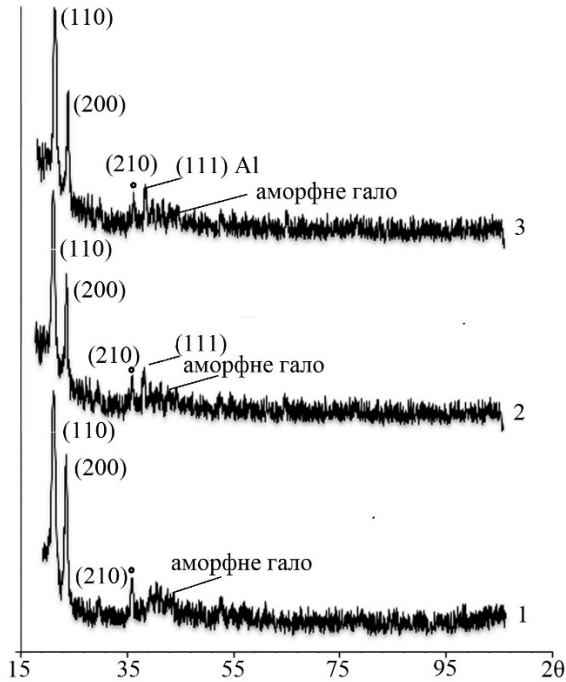


однофазного сильнопересиченого твердого розчину заміщення з суттєво підвищеними механічними характеристиками, з-за високої пружної деформації решітки, викликаною різницею в атомних радіусах алюмінію і кобальту.

Рентгеноструктурні дослідження НВМПЕ та МП на його основі здійснювали на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-2.0 у монохромному мідному  $K\alpha$ -випромінюванні. Виготовлення зразків здійснювали методом компресійного пресування [9].

### 3 Результати

Із даних, наведених на рис.1 видно, що дифрактограми досліджених зразків складаються із суміші орторомбічної фази ( $a=0,7446$  нм,  $b=0,4980$  нм,  $c=0,2476$  нм), (площини (110), (200), (210)) аморфного гало для чистого НВМПЕ (1) і кристалічних ліній пересиченого ГЦК-твердого розчину на основі алюмінію (площина (111); (2,3)).



**Рис. 1.** Дифрактограми НВМПЕ (1) та металополімерів на його основі, що містять 10 (2) та 25 (3) мас.% сплаву Al-10 мас.%Co

Дослідження зразків показали суттєве (у ~2 рази) підвищення абразивної зносостійкості розроблених металополімерів.

## **Список посилань**

1. Атифрикційна металополімерна композиція: пат. 17852 А Україна: F16C 33/04 (2006.01) / Б.О. Веселов, В.В. Ковбасенко, О.І. Міхеєв, О.В. Олексюк. – 94023271; заявл. 07.02.1994; опуб. 31.10.1997, Бюл. №5 – 2 с.
2. Поліуретанова композиція: пат. 101050 Україна: C08L 75/04 (2006.01). / В.М. Анісімов. – а 2011 02954; заявл. 14.03.2011; опуб. 25.02.2013, Бюл. №4 – 5 с.
3. Полімерна композиція: пат. 92212 Україна: (2014.01): C08L 77/00 / О.І. Буря, К.А. Єршоміна, О.Б. Лисенко, О.І. Попіль, Ю.В. Чуйкова. – u 2014 00658; заявл. 23.01.2014; опубл. 11.08.2014, Бюл. №15. – 4 с.
4. Полімерні композити на основі термопластичних в'язучих / Буря О.І. [та ін.] – Дніпро: Середняк Т.К., 2019. – 239 с.
5. Буря О.І. Вплив самофлюсуючого сплаву на зносостійкість металополімерів / О.І. Буря, К.А. Єршоміна //«Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем – 2018»: матеріали VIII Міжнар. наук.-практ. конф., [Чернігів], 10–12 трав. 2018 р. / Чернігівський національний технологічний університет [та ін.]; відп. за вип.: Єрошенко А.М. – Чернігів, 2018. – С. 149–150.
6. Kanaga Karupiah K.S. Friction and wear behavior of ultra-high molecular weight polyethylene as a function of polymer crystallinity / Kanaga Karupiah K.S., Bruck A.L., Sundararajan S., Wang J., Lin Z., Xu Z.-H., Li X. // Acta Biomater. – 2008. – Vol. 4. – P. 1401–1410.
7. Muzamil Hussain Ultra-High-Molecular-Weight-Polyethylene (UHMWPE) as a Promising Polymer Material for Biomedical Applications: A Concise Review / Muzamil Hussain, Rizwan Ali Naqvi, Naseem Abbas, Shahzad Masood Khan, Saad Nawaz, Arif Hussain, Nida Zahra, Muhammad Waqas Khalid // Polymers (Basel). 2020. – Vol.12, no.2. P. 323.
8. Burya A.I. The effect of various metallic filling materials on the wear resistance of aromatic-polyamide-based composite materials / A.I. Burya, Ye.A. Yeriomina // Journal of Friction and Wear. – 2016. – Vol. 37, no.2. – P. 151–154.
9. Tomina A.-M.V. The dependence of the abrasive wear resistance of ultra-high-molecular-weight polyethylene on the content of mineral fillers with needle-like structure / A.-M.V. Tomina, O.V. Yeromenko // Functional Materials. – 2023. Vol.30, no.3. – P. 403–406.

# Математична та експериментальна моделі витікання дисперсних матеріалів з бункера

Michał Bembenek<sup>1</sup>, д.т.н., професор AGH; Damian Dzienniak<sup>1</sup>, к.т.н.  
Vasyl Dmytriv<sup>2</sup>, д.т.н., професор, Vasyl Banha<sup>2</sup>, к.т.н., доцент  
Roman Horodniak<sup>2</sup>, к.т.н.

<sup>1</sup> Department of Manufacturing Systems, AGH University of Krakow,  
30-059 Kraków, Poland,  
[bembenek@agh.edu.pl](mailto:bembenek@agh.edu.pl)

<sup>2</sup> Department of Design Machine and Automotive Engineering,  
Lviv Polytechnic National University, 79013 Lviv, Ukraine  
[vasyl.t.dmytriv@lpnu.ua](mailto:vasyl.t.dmytriv@lpnu.ua)

**Ключові слова:** бункер, тиск, модель, продуктивність, експеримент.

## 1 Постановка проблеми

Продуктивність витікання дисперсних матеріалів з бункера дозатора повинна бути вищою за продуктивність дозувального робочого органу. Найширшого розповсюдження набули бункери з круглим і прямокутним поперечними перерізами. Тому метою даної дослідницької роботи було розроблення математичної моделі витікання дисперсних матеріалів з бункера дозатора та дослідження впливу конструктивних параметрів на продуктивність.

## 2 Аналіз літературних джерел

Останнім часом було проведено багато експериментальних досліджень для аналізу напружень на стінки бункера [1 - 3]. Застосовано дискретні методи у двох і трьох вимірах. Досліджували заповнення та розвантаження під дією сили тяжіння в бункері застосувавши моделювання ньютонівської динаміки дискретних елементів [4], методом симуляції дискретних елементів визначали сили тиску та зсуву, які діють на стінку бункера [5], вплив матеріалів і конструкції бункера на процес його вивантаження [6]. Метод дискретних елементів використовувався для кількісного дослідження швидкості та розподілу тиску і напружень у потоці середовища в бункері [7 - 11].

Для врахування максимальної кількості показників в експериментальних дослідженнях застосовують метод критеріальних залежностей, які поєднують ряд параметрів [12], по аналогії з іншими системами механіки [13, 14]. Критерієм перевірки теоретичної моделі є планований експеримент [15].

### 3 Результати дослідження

На основі другого закону Ньютона розроблена модель дії сил на елементарний об'єм висотою  $dx$ . Розв'язуючи диференціальне рівняння і визначаючи сталу інтегрування за граничних умов, при  $x = 0, p = 0$ , формула для знаходження тиску у довільному перерізі вертикального циліндричного бункера має вигляд

$$p = \frac{\rho \cdot (g - a) \cdot D}{8 \cdot f \cdot tg\beta} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{8 \cdot f \cdot tg\beta}{D} \cdot x} \right),$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя ковзання комбікорму об стінки бункера;  $D$  – діаметр насадки випускної горловини бункера, м;  $\rho$  – густина матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;  $\beta$  – кут упакування частини дисперсного матеріалу, град;  $a$  – прискорення руху елементарного об'єму матеріалу, м/с<sup>2</sup>.

Для моделювання швидкості руху дисперсного матеріалу в бункері запишемо диференціальне рівняння руху елементарного об'єму:

$$\rho \cdot S(x) \cdot dx \cdot \frac{dS}{dt} = p \cdot S(x) - (p + dp) \cdot (S(x) + dS) + dG - 2p \cdot tg(\beta + \psi) \cdot h(x) \cdot dx,$$

де  $\frac{dS}{dt}$  – прискорення руху елементарного об'єму дисперсного матеріалу масою  $dm$ , м/с;  $dS$  – приріст площі поперечного перерізу елементарного об'єму дисперсного матеріалу, м;  $dG$  – вага елементарного об'єму дисперсного матеріалу, Н;  $h(x) = tg(\alpha + \varphi) \cdot \pi \cdot d(x)$  – для бункера круглого перерізу;  $h(x) = 2 \cdot (tg(\alpha_1 + \varphi) \cdot b(x) + tg(\alpha_2 + \varphi) \cdot a(x))$  – для бункера прямокутного перерізу;  $\varphi, \psi$  – кути зовнішнього та внутрішнього тертя дисперсного матеріалу, град.

Продуктивність випускної горловини бункера в кінцевому варіанта буде

$$Q_{\text{вип}} = \sqrt{\frac{[p_0 + W_1(x)] \cdot Z_5(x) + \rho \cdot g \cdot Z_4(x)}{Z_6(x) + W_2(x)}},$$

де  $W_1(x) = \frac{\left( p_0 + \rho \cdot g \int_0^x Z(y) \cdot dy \right)}{Z(x)}$ , Па;  $W_2(x) = -\frac{1}{\rho \cdot Z(x)} \cdot \int_0^x \frac{Z(y)}{S^3(y)} \cdot dS(y) \cdot dy$ , (кг·м)<sup>-1</sup>;

$$Z_4(x) = \frac{H_0}{K_0 - 1} \cdot \left( \left( \frac{H_0}{H_0 - x} \right)^{K_0 - 1} - 1 \right), \text{ М; } Z_5(x) = \left( \frac{H_0}{H_0 - x} \right)^{-K_0};$$

$$H_0 = \frac{D_0}{2 \operatorname{tg} \alpha} - \text{висота повного конуса, м}; \quad K_0 = 2 \left( \frac{2 \operatorname{tg}(\psi + \beta) \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)}{\operatorname{tg} \alpha} - 1 \right);$$

$$Z_6(x) = \frac{2H_0^{-4}}{\rho \cdot (K_0 + 4) \cdot \pi^2 \cdot \operatorname{tg}^4 \alpha} \times \left( \left( \frac{H_0}{H_0 - x} \right)^{K_0 + 4} - 1 \right) (\text{кг} \cdot \text{м})^{-1}.$$

Отриманий аналітичний вираз дозволяє моделювати продуктивність витікання з бункера різної форми поперечного перерізу залежно від його конструктивних розмірів. Продуктивність бункера  $Q_{\text{вун}}$  дозатора дисперсних матеріалів залежно від діаметра його насадки  $D$  зростає майже прямолінійно. Зі збільшенням діаметра насадок випускної горловини  $D$  в межах  $D = 0,1 \dots 0,16$  м продуктивність бункера  $Q_{\text{вун}}$  дозатора збільшується в межах  $Q_{\text{вун}} = 3,12 \dots 14,31$  кг/с.

Результати експерименту показали відповідність між теоретичною моделлю і експериментальною залежністю. Різниця в значеннях продуктивності не перевищувала 4,5%.

## Список посилань

1. Chou, C. S., Tzeng, C.Y., Smid, J., Kuo, J. T., & Hsiau, S. S. 21–24, (2000, May). *Experimental study of moving granular bed: Wall stress measurement*. 14th ASCE Engineering Mechanics Division Conference, Austin, TX.
2. Longhi, E., Easwar, N., & Menon, N. (2002). Large force fluctuations in a flowing granular medium. *Physical Review Letters*, 89, 045501. 10.1103/PhysRevLett.89.045501
3. Chen, J. F., Rotter, J. M., Ooi, J. Y., & Zhong, Z. (2006). Correlation between flow pattern and wall pressures in a full scale silo. *Engineering Structures*, V29, 2308–2320.
4. Langston, P. A., Tüzün, U., et al. (1995). Discrete element simulation of granular flow in 2D and 3D hoppers: Dependence of discharge rate and wall stress on particle interactions. *Chemical Engineering Science*, 50, 967–987. 10.1016/0009-2509(94)00467-6
5. Ristow, G. H., & Herrmann, H. J. (1995). Forces on the walls and stagnation zones in a hopper filled with granular material. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 213, 474–481. 10.1016/0378-4371(94)00249-S
6. Cleary, P. W., & Sawley, M. L. (2002). DEM modelling of industrial granular flows: 3D case studies and the effect of particle shape on hopper discharge. *Applied Mathematical Modelling*, 26, 89–111. 10.1016/S0307-904X(01)00050-6
7. Zhu, H., & Yu, A. (2003). A numerical study of the stress distribution in hopper flow. *China Particology*, 1, 57–63. 10.1016/S1672-2515(07)60109-2
8. Landry, J. W., Grest, G. S., et al. (2004). Discrete element simulations of stress distributions in silos: Crossover from two to three dimensions. *Powder Technology*, 139, 233–239. 10.1016/j.powtec.2003.10.016

9. Masson, S., & Martinez, J. (2000). Effect of particle mechanical properties on silo flow and stresses from distinct element simulations. *Powder Technology*, *109*, 164–178. 10.1016/S0032-5910(99)00234-X
10. Goda, T. J., & Ebert, F. (2005). Three-dimensional discrete element simulations in hoppers and silos. *Powder Technology*, *158*, 58–68. 10.1016/j.powtec.2005.04.019
11. Yang, S. C., & Hsiau, S. S. (2001). The simulation and experimental study of granular materials discharged from a silo with the placement of inserts. *Powder Technology*, *120*, 244–255. 10.1016/S0032-5910(01)00277-7
12. Dmytriv, V.T.; Dmytriv, I.V.; Horodetskyi, I.M.; Horodniak, R.V.; Dmytriv, T.V. (2021). Method of theory of dimensions in experimental research of systems and processes. *INMATEH - Agricultural Engineering*, *65*(3), 233–240. [10.35633/INMATEH-65-24](https://doi.org/10.35633/INMATEH-65-24)
13. Dmytriv, V.T., Dmytriv, I.V., Horodetskyi, I.M., Yatsunskyi, P.P. Adaptive cyber-physical system of the milk production process. *INMATEH - Agricultural Engineering* 2020, *61*(2), 199-208. DOI: 10.35633/INMATEH-61-22
14. Dmytriv, V.T., Dmytriv, I.V., Yatsunskyi, P.P. Experimental pulse generator combined with the milking machine collector. *INMATEH - Agricultural Engineering* 2019, *59*(3), 219-226. DOI: 10.35633/INMATEH-59-24
15. Dmytriv, V.; Bembenek, M.; Banha, V.; Dmytriv, I.; Dzienniak, D.; Nurkusheva, S. (2024). Modeling of the Efficiency of the Centrifugal Conical Disk Dispenser of Bulk Materials. *Materials*, *17*, 1815. <https://doi.org/10.3390/ma17081815>

## **Автоматизація вимірювання сил різання при механічній обробці матеріалів**

Тетяна Божко к.т.н., доц.

Луцький національний технічний університет,  
вул. Львівська, 75, Луцьк, 43018, Україна  
[T\\_bozhko@ukr.net](mailto:T_bozhko@ukr.net)

**Ключові слова:** сили різання, динамометр.

При високих вимогах до просторових відхилень та взаємного розташування поверхонь деталей, шорсткості поверхонь, необхідно застосовувати додаткову обробку матеріалів. Процес різання супроводжується не тільки тепловим впливом, але й дією значних силових факторів [1]. Силові явища викликають фазові та структурні зміни в поверхневому шарі деталі, а це спонукає до їх дослідження.

Відомий пристрій для вимірювання температури і зусиль у зоні різання, який складається з корпусу із закріпленим різальним інструментом та вбудованою термопарою, електрично-з'єднаними відвідними проводами, а хвостовик корпусу має можливість взаємодії з динамометром [2]. Недоліком пристрою є неможливість проведення заміру сил різання по трьох координатах і те, що не здійснюється автоматизована фіксація показів.

Найбільше використання знайшло спеціальне пристосування для вимірювання сил різання при токарній обробці, яке складається з корпусу, в який встановлено рухому кулясту муфту, в якій закріплюється різець та опори. На кожній з граней опори закріплено оптоволоконний провідник, який є плечем інтерферометра. Провідники закріплені на гранях і вимірюють силу за однією з координат шляхом проходження променя світла через деформований провідник. Вимірювання проводиться за трьома координатами трьома парами провідників. Недоліком цього пристосування є складність налагодження пристрою, імовірність недостатньо точного відображення показів із-за можливості заломлення світлового потоку та трудомісткість розрахункових операцій [3].

На кафедрі прикладної механіки та мехатроніки ЛНТУ вдосконалена конструкція пристосування для вимірювання сил різання при токарній обробці, яка полягає у підвищенні точності вимірювання пристроєм, можливості отримання миттєвого фіксованого результату без теоретичних розрахунків.

У тензометричному токарному динамометрі до корпусу зварюванням приєднані стояки, до яких прикріплені пружні елементи у вигляді пластинок з напаяними тензометричними датчиками. Навантажувальний механізм, який

виконує функцію опори, через різцетримач з'єднаний з корпусом за допомогою кульок, які слугують шарнірами, що мінімізують тертя при русі механізму, який має здатність вільно переміщуватись за трьома координатами з можливістю деформації пластинок. Вимірювання радіальної складової сили різання здійснюється від різцетримача через гвинт з кулькою шляхом деформування пластинки, на якій напаяні тензометричні датчики. Для передачі вертикальної та осьової сили різання застосований такий же метод. Зазори між кульками та пластинками регулюються шляхом загвинчування або вигвинчування гвинта.

При обробці деталі різець разом із різцетримачем на кульках повертається на невеликий кут і тим самим тисне через болт з кулькою на пластинку з напаяними тензометричними датчиками, деформуючи його разом із тензометричними датчиками.

Вимірювання відбувається наступним чином: на пластинці з обох сторін наклеєні два тензометричні датчики, що з'єднані за напівмостовою схемою. При деформуванні пластинок один датчик сприймає навантаження на стиск, інший – на розтяг. При згині датчика комп'ютер, до якого приєднані датчики, через аналогово-цифровий перетворювач за допомогою спеціально розробленої програми сприймає зміну опору з обох датчиків та визначає середнє значення їх показів. Пластинки з попередньо протаровані відповідно до сили, яку вони будуть сприймати. При роботі час, протягом якого відбувається фіксація, градується від 30 секунд до 20 хвилин. Частота, з якою програма записує покази, від 0,5 секунди. По завершенні зняття замірів на екран виводиться число вимірів, яке було вибране користувачем та середнє арифметичне сили різання по кожній з координат. Процес вимірювання сили, зняття та фіксації показів повністю автоматизований.

## Список посилань

1. Основи теорії різання матеріалів: Підручник для вищ. навч. закладів / М.П. Мазур, Ю.М. Внуков, В.Л. Доброскок, В.О. Залога, Ю.К. Новосьолов, Ф.Я. Якубов; під заг. ред. М.П. Мазура. - Львів: Новий Світ-2000, 2009. - 422 с.
2. Динамические характеристики тензометрических измерительных систем для прочностных испытаний [електронний ресурс] // Инженерное бюро авиационного института. – Режим доступу до інтернет-сторінки: <http://inburo.com.ua/ru/pages/58/>
3. Пристосування для вимірювання сил різання при токарній обробці. Патент на корисну модель. <https://uapatents.com/3-64256-pristosuvannya-dlya-vimiryuvannya-sil-rizannya-pri-tokarnijj-obrobci.html>



# Комп'ютерне моделювання початкової стадії запуску безпілотного літального апарату

Буковська Діана, аспірант  
Антоюк Віктор, доктор технічних наук, професор

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
Берестейський проспект, 37, Київ, 03056, Україна

**Ключові слова:** безпілотні літальні апарати, пускові установки, комп'ютерне моделювання, стадії запуску.

## 1 Вступ

Комп'ютерне моделювання стадій запуску безпілотного літального апарату (БЛА) є критично важливим етапом розробки та впровадження в виробництво готових комплексів. На цій стадії розробник має враховувати безліч важливих факторів, які впливають на стартову траєкторію польоту, врівноваження літального об'єкту, безпеку у використанні, надійність виробу тощо.

Існує ряд методів моделювання початкової стадії пуску БЛА: комп'ютерна симуляція (застосовують для симуляції польоту, програми враховують швидкість вітру, температуру, вагу виробу тощо), фізичні моделі та прототипи (створення прототипів для тестування, використовують для перевірки врівноваженого стану об'єкту), аналіз структурних властивостей БЛА (дозволяє виконати оцінку міцності та стійкості конструкції під час пуску та в процесі польоту), моделювання управління та навігації (дозволяє забезпечити ефективне управління БЛА на етапах проведення перших випробувань)[1-3].

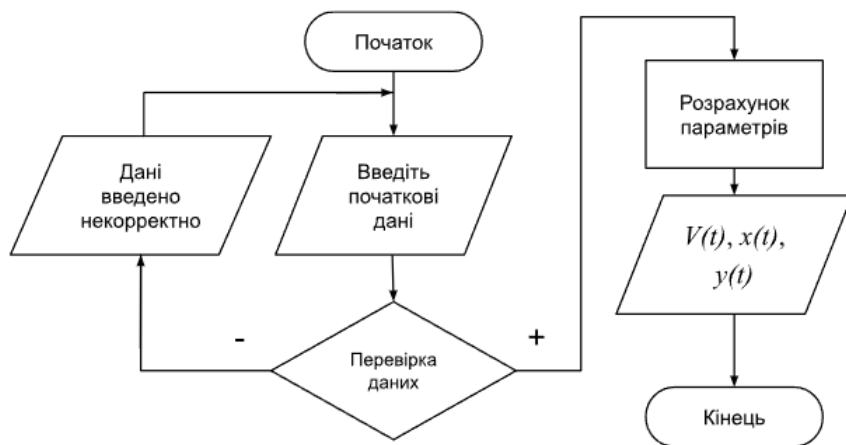
Наведені методи скорочують час на проектування та дозволяють врахувати додаткові фактори, які впливають на процес запуску без використання дороговартісних прототипів. Для початкового етапу проектування важливим етапом є комп'ютерне моделювання першої стадії запуску. На цьому етапі важливо визначити тип літального об'єкту, тип запуску, різновид пускової установки.

## 2 Алгоритм роботи комп'ютерно-інтегрованої системи для розрахунку першої стадії пуску

Під час польоту на об'єкт діють зовнішні сили, які впливають на траєкторію польоту БЛА. Для того щоб літальний об'єкт перебував в стійкому стані потрібно зрівноважити всі сили які діють на виріб.

На першій стадії пуску БЛА з пускової установки катапультного типу виріб виконує рух по направляючій під дією сили тяги стартового двигуна. Важливими параметрами для розрахунку траєкторії руху на цьому етапі є: центр мас виробу, розміщення бугелів, кут нахилу а також розподіл сил, які діють на цей виріб.

В результаті аналізу стартової системи координат запуску БЛА розроблено алгоритм комп'ютерно-інтегрованої системи (див. Fig. 2) для розрахунку вихідних параметрів першої стадії пуску, а саме: швидкості виробу і координат розташування.



**Рис. 4.** Алгоритм роботи комп'ютерно-інтегрованої системи для розрахунку першої стадії пуску

Для реалізації програми потрібно ввести початкові дані: значення сил тертя, сили нормальної реакції опори, швидкість руху БЛА, довжину направляючої, відстань до першої пари бугелів, кут запуску, розташування центр мас, масу БЛА, тип стартового двигуна. Після введення значень проводить перевірка на коректність введених даних. Якщо всі вхідні параметри введено вірно переходимо до розрахунку швидкості польоту виробу після сходу з направляючої а також координат руху. Розрахунки проводимо на інтервалі часу  $[0, \tau]$ . При початкових умовах момент часу беремо за 0, при завершенні першої стадії пуску момент часу -  $\tau$ . Для

розрахунку вихідних параметрів використовуємо формули для визначення маси виробу в процесі руху, для розрахунку сумарного значення сил тертя бугелів, для визначення швидкості на певній висоті, число Маха [4].

### **3 Висновки**

В роботі запропоновано алгоритм розрахунку параметрів виробу після сходу з направляючої для запуску БЛА вагою до 50 кг з пускової установки катапультного типу. Наведений алгоритм комп'ютерно-інтегрованої системи запуску БЛА призведе до значного скорочення часу на проектування, а також пришвидшить процес впровадження комплексу для безпілотних літальних апаратів в серійне виробництво.

### **Список посилань**

1. Буковська Д.В., Антонюк В.С. Особливості пускових установок для безпілотних літальних апаратів // Збірник праць XIX Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених "Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні"; 20-21 грудня 2023 р. – К.: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – С. 86-88.
2. Шумаков М. В. Програмний застосунок симулювання польоту дрону з використанням Unreal Engine. 2023.
3. Успенський, Валерій; Гардер, Сергій. Розробка та комп'ютерна реалізація моделі руху та алгоритмів управління гібридного мультикоптера. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Динаміка та міцність машин, 2022, 1: 94-106.
4. Теоретична механіка. Посібник для практичних занять / [В.М. Булгаков, В.В. Бурака, В.С. Лукач та ін.] – К: «техніка», 2002 – 511 с.

## **Легковісні функціональні матеріали на основі системи Ti-V, легованої алюмінієм та залізом**

Бут Микола Вікторович<sup>1</sup>, студент  
Сліпченко Вячеслав Михайлович<sup>2</sup>  
Коваль Юрій Миколайович<sup>2</sup>, д.т.н., професор, чл.-кор.НАНУ  
Бублей Ірина Роальдівна<sup>2</sup>, к.ф.-м.н.  
Кедровський Сергій Миколайович<sup>2</sup>, к.ф.-м.н.  
Сліпченко Вікторія Миколаївна<sup>2</sup>, к.т.н.

<sup>1</sup> Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського",  
Берестейський проспект, 37, Київ, 03056, Україна

<sup>2</sup> Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України,  
бульв. Вернадського, 36, Київ, 03142, Україна  
butmikola@gmail.com

**Ключові слова:** функціональні матеріали, сплави на основі титану, мартенситне перетворення, легковісні матеріали.

Серед великої кількості функціональних матеріалів з особливими фізико-механічними властивостями (ефектом пам'яті форми (ЕПФ), надпружністю, аномально високою демпфуючою здатністю) тільки дві металічні системи: Ti-Ni та Cu-Al-X (X – Ni, Mn) знайшли достатньо широке практичне використання [1]. Проте вирішення нових завдань та проблем авіатехніки і космічної промисловості потребує розробки та освоєння нових легких металевих композицій із подібними властивостями. В даний час у світі цей напрям активно розвивається у сферу індустрії легких сплавів з пам'яттю форми.

Сплави на основі Ti-V-Al можуть бути чудовими кандидатами для легковісних функціональних сплавів. Перш за все, вони мають відносно низьку густину, яка становить  $\sim 4,5 \text{ г/см}^3$ , близьку до чистого титану. Це набагато менше, ніж щільність сплаву на основі NiTi ( $\sim 6,7 \text{ г/см}^3$ ). По-друге, сплав Ti-V-Al має чудову холодну оброблюваність. Під час холодної прокатки можна отримати зменшення товщини понад 90%. Та відомо про наявність ЕПФ в сплавах даної системи [2]. Проте функціональні характеристики сплавів потрійної системи Ti-V-Al нестабільні, є роботи щодо їх покращення через легування Cu, Co, Fe [3].

Ідея наших досліджень полягає в отриманні сучасних вітчизняних легких функціональних титанових сплавів, які володіють дієвими параметрами мартенситного перетворення (МП) в необхідному температурному діапазоні,

високим рівнем відновлення форми, ефективними надпружними або демпфуючими властивостями, в залежності від цілей використання.

В рамках даного дослідження було проаналізовано вплив особливостей електронної концентрації на МП в сплавах систем Ti-V та їх взаємозв'язок з функціональними властивостями. Розроблено композиції сплавів на основі системи Ti-V, легованих Al та Fe. Проведені нами початкові дослідження сплавів Ti-V-Al, легованих Fe вже визначили наявність мартенситного перетворення та ЕПФ в температурному діапазоні від  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $-150^{\circ}\text{C}$ , причому концентрація валентних електронів становить  $\sim 4,18$  ел./ат. Вироблення нових сплавів з меншою концентрацією валентних електронів дозволить підвищити температури МП до того температурного діапазону, який потрібен для практичного використання таких сплавів.

## Список посилань

1. Коваль Ю.Н., Лободюк В.А. Деформационные и релаксационные явления при превращениях мартенситного типа. – К. Наукова думка, 2010. – 287 с.
2. Z.Y. Yang, X.H. Zheng, W. Cai, Martensitic transformation and shape memory effect of Ti-V-Al lightweight high temperature shape memory alloys, *Scr. Mater.* 99 (2015), pp. 97-100.
3. Semra Ergen. The effect of indentation temperature and load on mechanical characterization and transformation behavior of high temperature Ti-V-Al-Cu shape memory alloy. *Materials Chemistry and Physics*, V. 268, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124757>.

# Застосування мехатронних модулів для автоматизації виробничих процесів

Валецький Богдан Петрович, канд. техн. наук, доцент

Луцький національний технічний університет,  
вул. Львівська, 75, Луцьк, 43018, Україна,  
b.valetsky@gmail.com

**Ключові слова:** технологічна машина, промисловий робот, автоматизація

## 1 Вступ

Автоматизація виробничих процесів є складним і багатограним процесом однак для дискретного виробництва вона розвинена менше, внаслідок різноманіття виробів та операцій, підвищених вимог до точності операцій. На даних виробництвах застосовується багато ручної праці. Для дискретного виробництва характерне велика кількість варіантів автоматизації операцій, що відрізняються послідовністю, затратами і ефективністю. Їх поєднання вимагає формального опису алгоритмів керування устаткуванням та розробкою моделі організації виробництва.

У реальних задачах частіше за все спостерігається поєднання дискретного та потокового виробництва, що називають безперервно-дискретним виробництвом. Крім того, методи автоматизації дискретного виробництва все частіше застосовують до автоматизації безперервного виробництва.

Фактори, від яких залежить автоматизація дискретних виробничих процесів [1-2]: технічні характеристики деталей (форма, розміри, маса, матеріал, фізико-механічні властивості тощо); виробнича програма; частота переналагодження; вид технологічного процесу; вид проведеної операції; тип робочої зони верстата; тривалість технологічних операцій; санітарно-гігієнічні вимоги.

Важливу роль в автоматизації дискретних процесів відіграють різноманітні промислові роботи в комплексі з технологічними агрегатами, на яких реалізується технологічний процес. Основне їх призначення пов'язане з переміщенням деталей, зняттям т.п., забезпечення виконання технологічного завдання. Різноманітність технічних рішень багато в чому визначається функціональним призначенням, вимогами до швидкості та якості рухів, зовнішнього середовища, в якому здійснюється їх робота, вимогами до поведінки робота [2]. На рис. 1 показана принципова структурна схема промислового робота (ПР).

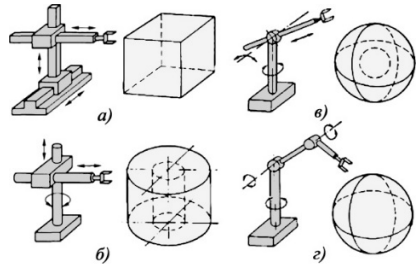
До основних параметрів промислових роботів відносяться: мобільність, вантажопідйомність, кількість ступенів свободи, точність позиціонування,

робоча зона та ін. Робоча зона характеризує простір, який займають виконавчі органи робота під час виконання всіх необхідних переміщень.

Ефективність використання промислових роботів значною мірою залежить від правильного вибору структурної кінематичної схеми робота, яка визначає кінематику його основних рухів у просторі.



**Рис. 1.** Загальна структурна схема промислового робота



**Рис. 2.** Геометрія зон обслуговування промислових роботів, що працюють у різних системах координат: а - прямокутна; б – циліндрична; в - сферична; г – кутова

До основних рухів відносяться всі маніпуляційні рухи ПР, що визначають задану точку в робочому просторі, до локальних рухів - рухи захвату (орієнтовні рухи робочого органу і обертання зап'ястя) [3]. Глобальні рухи збільшують об'єм робочої зони робота.

Залежно від обраної структурно-кінематичної схеми робота, його рухома частина може здійснювати переміщення у прямокутній (плоскій і просторовій) і криволінійній (циліндричній та сферичній або кутовій) системах координат, які визначають форму робочої зони ПР (рис. 2).

## 2 Виклад основного матеріалу. Результати досліджень

Під робочим об'ємом технологічного агрегату розуміють частину його робочого простору, куди рука ПР входить, встановлює, знімає з монтажних основ і виймає заготовки або оброблені частини. При аналізі робоча зона ТМ представлена в системі координат  $Oxyz$ .

З точки зору ефективного забезпечення ТМ заготовками і деталями необхідно, щоб робоча площа ПР була більше робочої площі ТМ, тобто для покриття робочої зони ТМ.

У випадку циліндричної робочої зони об'єм визначається за формулою:

$$V = (R^2 - r^2) \frac{\varphi}{360} H,$$

де:  $R$  – максимальний радіус витягнутої руки робота;

$r$  – радіус, наявний у вихідному положенні механічної руки;

$\varphi$  – кут повороту колони;

H – вертикальний хід механічної руки.

Для прямокутної робочої зони:

$$V = X \cdot Y \cdot Z,$$

де: X, Y, Z – максимальні значення переміщень за окремими координатами.

$$ЕРП = РЗ_{ТМ} \cap РЗ_{ПР}$$

де: ЕРП – ефективна робоча площа при сумісній роботі ТМ і ПР;

РЗ<sub>ТМ</sub> – робоча зона ТЕС; РЗ<sub>ПР</sub> – робоча зона ПР;

У більшості випадків ЕРП = РЗ<sub>ТМ</sub>.

Тим не менш, в деяких випадках можливо, що ефективна робоча площа ПР буде набагато меншою, ніж РЗ<sub>ТМ</sub>, навіть якщо вона плоска. Це типово при подачі циліндричних деталей.

**Таблиця 2 – Робочі зони ПР і ТМ**

№	ПР	Тип робочої зони	ТМ	Тип зони
1	ПР <sub>пр.х</sub>	прямокутник – горизонтальний (S <sub>x</sub> ; S <sub>y</sub> )	Токарний (ТК)	циліндр
2	ПР <sub>пр.в</sub>	прямокутник – вертикальний (S <sub>x</sub> ; S <sub>z</sub> )	Стругальний (Ст)	паралелепіпед
3	ПР <sub>к.х</sub>	частина кола – горизонтальна (S <sub>x</sub> ; φ <sub>z</sub> )	Центри обробки (ЦО)	паралелепіпед
4	ПР <sub>к.в</sub>	частина кола – вертикальна (S <sub>z</sub> ; φ <sub>x</sub> )	Фрезерувальний (Фр)	паралелепіпед
5	ПР <sub>ц</sub>	Циліндр (S <sub>x</sub> ; S <sub>z</sub> ; φ <sub>z</sub> )	Круглошліфувальний (КШ)	Циліндр/ площина
6	ПР <sub>п</sub>	Паралелепіпед (S <sub>x</sub> ; S <sub>y</sub> ; S <sub>z</sub> )	Плоскошліфування (ПШ)	паралелепіпед
7	ПР <sub>сф</sub>	Сфера ( S <sub>x</sub> ; φ <sub>y</sub> ; φ <sub>z</sub> )	Відрізні (Вр)	паралелепіпед
8	ПР <sub>тор</sub>	Тор (φ <sub>x</sub> ; φ <sub>y</sub> ; φ <sub>z</sub> )	Преси ( Пр )	паралелепіпед

У таблиці 2 наведено можливі типи робочих зон для ПР і різних груп технологічних агрегатів, а в таблиці 3 - можливість суміщення робочих зон ПР і ТМ.

**Таблиця 3 – Сумісність робочих зон ТЕ і ПР**

ПР/ТМ	ТК	Ст	ЦО	Фр	КШ	ПШ	Вр	Пр
ПР <sub>пр.х</sub>	□	□	□	□	□	■	□	□
ПР <sub>пр.в</sub>	□	□	□	□	□	□	■	□
ПР <sub>к.х</sub>	□	□	□	□	□	■		□
ПР <sub>к.в</sub>	□	□	□	□	□	□	■	□
ПР <sub>ц</sub>	■	■	■	■	■	■	□	■
ПР <sub>п</sub>	■	□	□	■	■	■	■	■
ПР <sub>сф</sub>	■	■	■	■	■	□	■	□
ПР <sub>тор</sub>	■	■	■	■	□	□	□	□

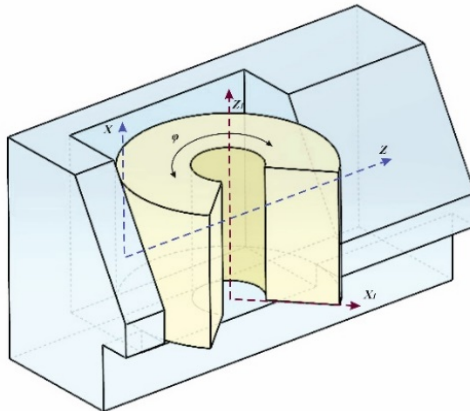
■ - рекомендовано

□ – можливо



На рис. 3 показано сумісність робочих зон токарного верстата ТЕ та PR з кінематичною структурою 2Т+1R, що забезпечує робочу зону, яка є частиною циліндра.

При виборі ПР для побудови роботизованих технологічних модулів (РТМ) та ін. систем слід звернути увагу на такі критерії: тип ТМ та допоміжного обладнання; обсяг і вид робочої зони; кінематична структура ПР; мінімальний і максимальний робочі ходи; швидкість лінійного і кутового переміщення; прискорення; вантажопідйомність; точність позиціонування; тип приводу; мобільність тощо.



**Рис. 3.** Сумісність робочих зон токарного верстата і ПР

Розглянуто особливості кінематичних структур робочих зон ТЕ та ПР.

Виділено основні параметри промислових роботів і технологічних вузлів, що впливають на їх спільну роботу.

Проведено аналіз сумісності робочих зон технологічних агрегатів і промислових роботів при їх спільній роботі та надано рекомендації щодо їх вибору.

## Список посилань

1. Обладнання автоматизованого виробництва: підручник / В.М. Бочков, Р.І. Сілін; за ред. Р.І. Сіліна; М-во освіти і науки України, Нац. ун-т «Львів. політехніка», Хмельниц. Нац. ун-т. — Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2015. — 404 с. : іл. — Бібліогр.: с. 401 (20 назв). — ISBN 978-617-607-780-0
2. Орловський Б.В. Мехатроніка в галузевому машинобудуванні [Електронний ресурс]: навчальний посібник / Б. В. Орловський. — К.: КНУТД. — 2018. — 416 с.
3. Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementations [Book Review], in *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 12, no. 3, pp. 110-110, Sept. 2005, doi: 10.1109/MRA.2005.1511878.

## **Експериментально-розрахунковий метод для побудови та аналізу істинних діаграм розтягу сталей з урахуванням їх структурно-механічного стану та наводнювання**

Олег Венгринюк <sup>[0000-0001-6531-5300]</sup>

Ольга Звірко <sup>[0000-0002-6973-6804]</sup>, докт. техн. наук, проф., член-кор. НАН України

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка Національної академії наук України,  
вул. Наукова, 5, м. Львів, 79060, Україна  
olehvenhryniuk@gmail.com

**Ключові слова:** сталь, деградація, водень, механічна поведінка.

Важливим аспектом у розвитку водневої енергетики є транспортування водню існуючою мережею газопроводів [1, 2]. Зважаючи на відомий окрихчувальний вплив водню на сталь [3–5], необхідно оцінити ризик можливої втрати роботоздатності газопроводів за таких умов. Водень з боку внутрішньої поверхні труби може адсорбуватися та проникати у сталь в результаті як дисоціації транспортованого водню, так і його електрохімічного виділення внаслідок корозії через наявність у газі вологи. Газопроводи під час тривалої експлуатації можуть зазнати експлуатаційної деградації трубних сталей [6]. Як наслідок, найістотніше знижується опір крихкому руйнуванню, що посилює ризик важко контрольованого раптового руйнування. Для дослідження механічної поведінки трубних сталей з урахуванням особливостей їх мікроструктурної експлуатаційної деградації та деструктивної дії водню важливим є встановлення істинних механічних властивостей сталей та визначення локального напружено-деформованого стану в околі дефектів.

У механіці руйнування розроблено теоретичні та експериментальні підходи, які дають змогу прямо чи опосередковано вирішити цю задачу. Зокрема, ефективним підходом є побудова істинних діаграм деформування [7, 8].

Розроблено концепцію методу побудови та аналізу істинних діаграм розтягу сталей з урахуванням їх поточного структурно-механічного стану та наводнювання. Вона ґрунтується на експериментальному визначенні в умовах розтягу зразків залежності «істинні напруження – істинна деформація» для встановлення істинних механічних властивостей *сталей* (істинної міцності та істинної пластичності). Діаграми розтягу сталей отримують експериментальним методом, на їх основі з урахуванням розрахованих фактичного нетто-перерізу та напружень у момент руйнування

зразка, будують діаграми «істинні напруження – істинна деформація» з визначенням складових пластичності (рівномірного та нерівномірного видовження). Беручи до уваги те, що руйнування відбувається в околі концентраторів напружень, доцільним є визначення локального напружено-деформованого стану. Критичний рівень деформації визначається вимірюванням розміру деформованих зерен фериту в безпосередній близькості до площини руйнування зразка. Метод спрямований на дослідження механічної поведінки трубних сталей, беручи до уваги особливості їх мікроструктурної експлуатаційної деградації, а також деструктивну дію водню.



**Робота виконана за фінансової грантової підтримки проекту № 2022.01/0099 Національним фондом досліджень України.**

## **Список посилань**

1. Haeseldonckx D. The use of the natural-gas pipeline infrastructure for hydrogen transport in a changing market structure / D. Haeseldonckx, W. D'haeseleer // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2007. – 32, № 10–11. – P. 1381–1386.
2. Pipeline durability and integrity issues at hydrogen transport via natural gas distribution network / H. Nykyforchyn, L. Unigovskiyi, O. Zvirko et al. // *Procedia Struct. Integr.* – 2021. – 33. – P. 646–651.
3. Pluvinaige G. Effects of hydrogen addition on design, maintenance and surveillance of gas networks / G. Pluvinaige, L. Toth, J. Capelle // *Processes*. – 2021. – 9, № 7. – P. 1–23.
4. A review on hydrogen embrittlement and risk-based inspection of hydrogen technologies / A. Campari, F. Ustolin, A. Alvaro, N. Paltrinieri // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2023. – 48, N 90. – P. 35316 – 35346.
5. A review of hydrogen embrittlement in gas transmission pipeline steels / J. Hoschke, M. F. W. Chowdhury, J. Venezuela, A. Atrens // *Corros. Rev.* – 2023. – 41, № 3. – P. 277–317.
6. In-service degradation of structural steels under cyclic loading / O. I. Zvirko, H. M. Nykyforchyn, O. T. Tsyryllyk et al. // *Mater. Sci.* – 2022. – 58, № 2. – P. 222 – 228.
7. Choung J. M. Study on true stress correlation from tensile test / J. M. Choung, S. R. Cho // *J. Mech. Sci. Technol.* – 2008. – Vol. 22, № 6. – P. 1039–1051.
8. Assessment of operational degradation of pipeline steels / H. Nykyforchyn, O. Zvirko, I. Dzioba et al. // *Materials*. – 2021. – Vol. 14, № 12. – 3247.

# **Корекція положення деталі в токарних патронах з активними затискними кулачками**

Волошин Віталій, кандидат технічних наук, доцент  
Лось Ігор, аспірант

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя,  
вул. Руська, 56, Тернопіль, 46001, Україна  
voloshyn@tk.te.ua

**Ключові слова:** токарний патрон, активний затискний кулачок, зона деформації, точність центрування, деталь.

## **1 Актуальність дослідження**

Задача підвищення технічного рівня сучасних токарних верстатів з ЧПК в умовах багатоменклатурного виробництва, високошвидкісної і прецизійної обробки деталей вимагає покращення характеристик їх основних механізмів та вузлів, одними із яких є механізми затиску. Для забезпечення високої точності токарної обробки та уникнення браку на чистових операціях потрібне точне позиціонування деталі в затискному пристрої. Проте при затиску деталі виникають похибки базування та закріплення, які приводять до зміщення осі оброблюваної поверхні відносно осі поверхні затиску [1]. Тому забезпечення точного позиціонування деталі в процесі затиску шляхом наділення пристроїв затиску для токарної обробки активними системами корекції є актуальною науково-практичною задачею.

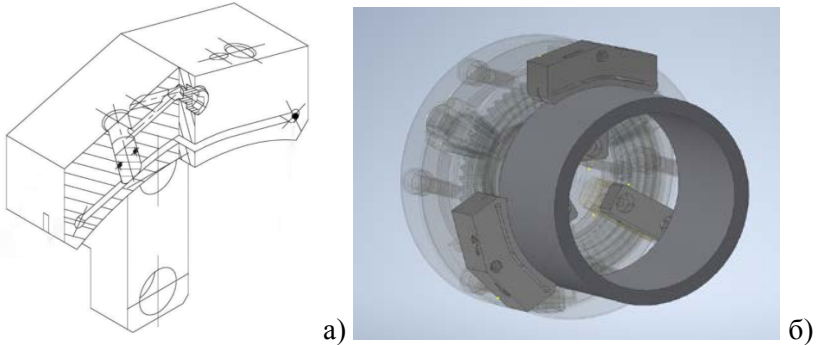
## **2 Аналіз літературних джерел**

На сьогоднішній день проводиться багато досліджень в області розробки і застосування адаптивних систем у металорізальних верстатах, за допомогою яких можна компенсувати квазістатичні деформації їх елементів та вузлів, забезпечити активне демпфування коливань, підвищувати жорсткість системи, створювати і регулювати в процесі роботи зазори (натяги) системи, забезпечувати компенсацію зношування інструмента та ін. [2]. В результаті аналізу проведених наукових досліджень [3-5] та патентної інформації розглянуто перспективні напрямки застосування адаптивних структур у системах затиску заготовок автоматизованих токарних та шліфувальних верстатів. Серед них виділено перспективу використання активних затискних елементів для забезпечення точного центрування оброблюваної деталі та корекції її положення після затиску.

### 3 Результати дослідження

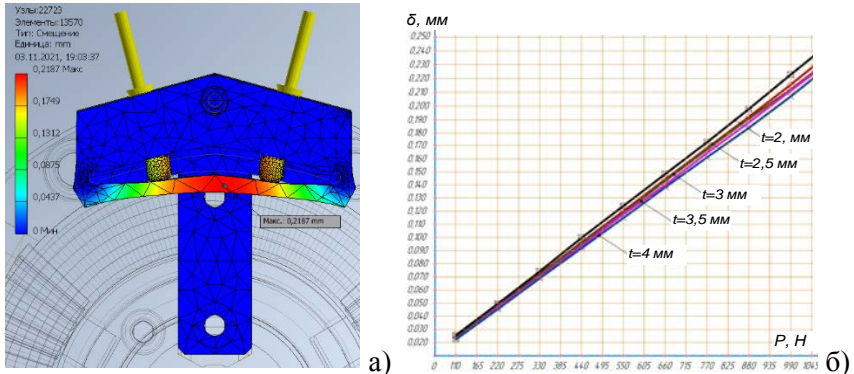
Робота присвячена дослідженню активних затискних кулачків токарних патронів для забезпечення точного центрування оброблюваної деталі та корекції її положення.

З використанням принципу навмисного введення в конструкцію затискних елементів зон деформації [4] синтезована конструкція активного затискного кулачка для затиску деталей з циліндричними базовими поверхнями (рис.1), який містить переміщувану затискну секцію та керовані гідравлічним середовищем плунжери, які з нею взаємодіють [6].



**Рис. 5.** Конструкція активного затискного кулачка (а) та токарний патрон, оснащений активними затискними кулачками (б)

Проведені дослідження з використанням CAD/CAE-системи активного затискного кулачка, на основі яких визначено переміщення та еквівалентні напруження, значення яких розраховувалися по гіпотезі енергії зміни форми Ріхарда Фон Мізеса. За результатами дослідження встановлено, що місця концентрації максимальних еквівалентних напружень знаходяться в зоні твердотільних шарнірів активного затискного кулачка, а затискна секція при силових навантаженнях від плунжерів в діапазоні 100...1000 Н працює в зоні пружних деформацій. Отримані величини максимальних зміщень затискної секції при тих самих силових навантаженнях та товщинах стінки затискної секції  $t$  від 4 до 2 мм становлять 0,022...0,235 мм (рис.2), що дозволяють забезпечити потрібну точність центрування заготовок з циліндричними базовими поверхнями.



**Рис. 2.** Картина деформацій затискної секції кулачка (а) та графічні залежності максимальних переміщень затискної секції  $\delta$  від зусилля на плунжерах  $P$  (б)

Також запропоновано спосіб суміщення осі деталі та шпинделя, який полягає у визначенні положення осі шпинделя і положення попередньо затиснутої в активних кулачках токарного патрона деталі, після чого переміщенням затискних секцій активних кулачків забезпечується суміщення осі деталі з віссю шпинделя. Виведено залежності для визначення модуля вектора відстані від центру шпинделя до центру деталі та його кутового положення, а також величин підналаджувальних переміщень затискних секцій кожного активного кулачка в радіальному напрямку.

## Список посилань

1. Технологічне оснащення для високоефективної обробки деталей на токарних верстатах: Монографія/ Кузнєцов Ю.М., [та ін.]. – К.: – Тернопіль: Терно-граф, 2011. – 692 с.
2. Brecher C. Machine Tools Production Systems 3. Mechatronic Systems, Control and Automation/ C. Brecher, M. Weck. – Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022. – 697p.
3. Denkena B. Investigation of a fine positioning method in lathes using an active clamping chuck/ B. Denkena, L. Hülsemeyer// Euspen's 15th International Conference & Exhibition, Leuven, Belgium, June 2015. – 2015. – pp. 245-246
4. Lutsiv I. Adaptation of lathe chucks clamping elements to the clamping surface/ I. Lutsiv, V. Voloshyn, R. Bytsa// Machines, Technologies, Materials. International journal. – 2015– Issue 12. – pp. 64-67.
5. Lutsiv I. Computer simulation of clamping jaws with elastic compensating links for thin-walled parts clamping/ I. Lutsiv, V. Voloshyn, I. Los // Professional studies: Theory and Practice. – 2021 – №9(24) – pp. 70-74.
6. Затискний кулачок з адаптивними властивостями для затиску тонкостінних циліндричних деталей: пат. 155505 Україна: В23В31/10 / В.Н. Волошин, І.Г. Лось – № u 2023 03561; заявл. 24.07.2023; опубл. 06.03.2024, Бюл. №10. – 4 с.

## **Адитивне виробництво для досліджень та освіти**

Воронцов Б.С., д.т.н., професор  
Лашина Ю.В., к.т.н., доцент

Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського",  
Берестейський проспект, 37, м.Київ-56, 03056, Україна  
[vorontsov@gmail.com](mailto:vorontsov@gmail.com)

**Ключові слова:** проект в сфері освіти, адитивне виробництво.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» приступив до виконання проекту в сфері освіти «ADMIRE – Адитивне виробництво для досліджень та освіти» (ADMIRE – Additive Manufacturing for Research and Education) в межах Програми сусідства Балтійського моря Шведського інституту (SI Baltic Sea Neighbourhood Programme). Початок проекту 1 березня 2024 року, завершення 28 лютого 2026 року.

Метою проекту є підтримка українських аспірантів та молодих дослідників у галузі адитивного виробництва (АВ) в їх професійному розвитку через включення їх до міжнародного середовища досліджень і розробок.

Завдання Проекту:

1. Дослідження галузей промисловості та академічних установ, залучених до розвитку та впровадження АВ в країнах Балтійського регіону та Україні.
2. Панельна зустріч 1 в Карлстадському університеті. Будуть представлені дослідження галузі, а також рекомендації для молодих дослідників, викладачів і компаній. Підсумок зустрічі буде опубліковано в першому інформаційному бюлетені.
3. Семінари для аспірантів. Молодих дослідників запросять представити свої дослідження на регулярному семінарі аспірантів в Карлстадському університеті. Мета – знайти спільні теми досліджень та з'єднати молодих спеціалістів із потенційними партнерами.
4. Мобільність молодих дослідників. Вони залишаться в Карлстадському університеті, відвідають шведські компанії та інші університетські групи. Навчальні заходи включатимуть виїзний лабораторний практикум, наставницькі заняття, проекти.
5. Панельна зустріч 2 у Варшаві, Польща. Порядок денний цієї зустрічі стосуватиметься трансформації освіти в галузі АВ в Україні, вдосконалення навчальних планів, розробки спільних програм та співпраці викладачів. Результати буде опубліковано в другому інформаційному бюлетені.

6. Спеціальна подія на Swedish Production Symposium 2024 в University West буде присвячена українській промисловості та дослідженням в галузі АВ.

7. Комунікації з відповідними колегами в державних установах.



**Рис. 6.** В Карлстадському університеті

Очікувані результати:

1. Підвищення рівня знань усіх цільових груп щодо поточної ситуації стосовно розвитку та впровадження адитивного виробництва в освіті, наукових дослідженнях та промисловості України та Швеції

2. Встановлення професійних контактів між зацікавленими сторонами з різних цільових груп в Україні та Швеції

3. Розроблення рекомендацій для освіти, наукових досліджень та промисловості у сфері адитивного виробництва

4. Поглиблення знань молодих дослідників з кількох аспектів технологій адитивного виробництва Для організації виконання Проєкту.



# Властивості виробів із композицій на основі порошку заліза

Гальчук Тетяна Никифорівна, кандидат технічних наук, доцент

Луцький національний технічний університет,  
вул. Потебні, 56, Луцьк, 43000, Україна  
[t.halchuk@lntu.edu.ua](mailto:t.halchuk@lntu.edu.ua)

**Ключові слова:** порошковий композит, технологічні параметри, пористість, спечений виріб, густина, тиск пресування, фізико-механічні властивості.

## 1 Вступ

Багато машинобудівних підприємств у сучасних економічних умовах прагнуть безвідходного виробництва, розширення номенклатури виробів, що виготовляються та підвищення якості готової продукції з найменшими капітальними вкладеннями. Це відноситься і до виробництва виробів на основі порошків заліза, які мають унікальні властивості і широко використовуються в усіх галузях промисловості та транспорті [1]. Аналіз номенклатури деталей, що випускаються та застосовуються на різних підприємствах України, показав наявність великої групи виробів, перспективних для виготовлення із металевих порошків. Внаслідок важких умов експлуатації порошкові вироби повинні наближатися за властивостями до виробів, отриманих із литої сталі. Крім того, інтенсифікація технологічних процесів, підвищення потужності та швидкохідності машин та механізмів викликає необхідність застосування більш міцних деталей і в тих галузях, у яких деталі застосовуються вже тривалий час. Необхідність вирішення цих питань свідчить про доцільність проведення подальших досліджень, спрямованих на оптимізації параметрів процесу виготовлення порошкових виробів та вдосконалення їх властивостей міцності.

## 2 Методика досліджень

Для виготовлення виробів на основі залізного порошку використовували такі матеріали: порошок заліза ПЖРВ-3.200.28 ДЕСТ 9849-86; порошок графітовий ГК-1 ДЕСТ 17022-81; порошок міді ПМ-1 ДЕСТ 4960-2017.

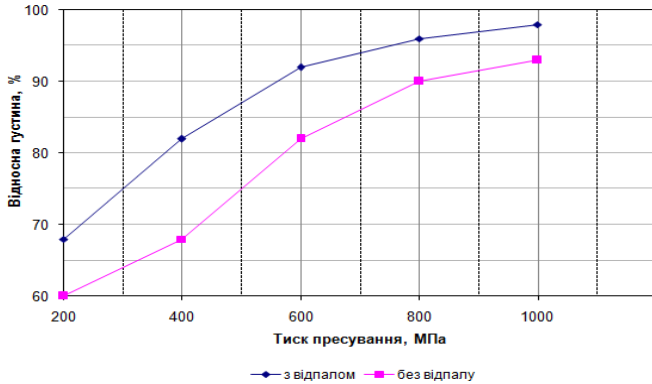
Суміш початкових порошків перемішували у барабанному млині з ексцентричною віссю обертання протягом 1 години. Змішувач має невисоку частоту обертання осі ( $50 \dots 70 \text{ с}^{-1}$ ), що забезпечує незначний вплив на зміну гранулометричного складу компонентів. Для дослідження було виготовлено

зразки із ПЖРВ-3.200.28 та ПЖРВ – (1,3) ГК – (3) ПМ. Зразки розміром  $\varnothing 40 \times 10$  мм пресували на гідравлічному пресі при тиску 200...800 МПа. Для одержання коректних даних виготовляли по 3 зразки для кожного значення питомого тиску. Зразки спікали в металевих коробках, заповнених  $Al_2O_3$ , в електропечі опору неперервної дії в атмосфері водню. Температура спікання 1140...1160 °С. Час спікання складав 1 годину з моменту встановлення заданої температури.

Механічні характеристики визначалися стандартними методами [2].

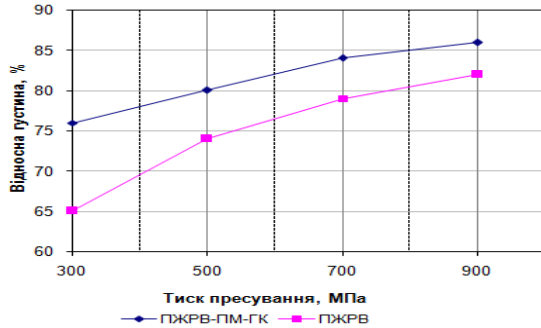
### 3 Результати

В результаті проведених експериментів встановлено, що по мірі зростання кисню в порошковому композиті до 1,3% помітно зростає пористість і становить 27,2%. Після спікання відзначається незадовільна мікроструктура, що пов'язано із втратами (вигоранням) вуглецю. Для зниження вмісту кисню залізний порошок відновлювали не окремо, а в суміші із мідним. Відновлена суміш порошків має кращі показники пресуємості, а саме відносну густина пресовки (рис. 1).



**Рис. 1.** Вплив відпапу композиту ПЖРВ – (3) ПМ на пресуємість

Введення у порошкову суміш графіту, що є твердою змазкою, ефективно впливає на ущільнення під час пресування (рис. 2).



**Рис. 2.** Порівняльні характеристики результатів пресування заготовок із порошкового композиту та залізного порошку в стані постачання

Спечені зразки у захисному водневому середовищі мають достатньо високі фізико-механічні властивості (табл. 1).

**Таблиця 1.** Фізико-механічні властивості зразків ПЖРВ – (1,3) ГК – (3) ПМ

Температура спікання, °С	Пористість, %	Границя міцності, кгс/мм <sup>2</sup>	Деформація, %	Твердість <i>HV</i> , кгс/мм <sup>2</sup>
1120	15,8	25,8	3,5	80,5
1140	16,1	26,3	3,6	81,9
1160	16,4	26,7	3,6	83,4

## 4 Висновки

Механічні властивості виробів на базі порошку заліза підвищуються введенням міді та графіту, регулюються тиском пресування. Експериментально перевірено на композиті ПЖРВ – (1,3) ГК – (3) ПМ, що по мірі зростання в ньому кисню (до 1,3%) пористість зразка зростає майже 1,5 рази. Для досягнення оптимальних технологічних та фізико-механічних властивостей порошкових виробів на основі заліза запропоновано відновлення залізного порошку в суміші із мідним. В результаті показники пресуємості у 10...15% вищі ніж для ПЖРВ.

## Список посилань

1. Morakotjinda, M., Krataitong, R., Wila P. et al., Sintered Fe-Cu-C materials. Chiang Mai Journal of Science, vol. 35(2), 258–265(2008).
2. Гальчук Т.Н., Рудь В.Д. Використання відходів машинобудівного виробництва для виготовлення деталей триботехнічного призначення: монографія- Луцьк: РВВ ЛНТУ, 214 (2013).

## **Рівень цифрової доступності в Україні і її вплив на сталість суспільства**

Герасимчук Г.А.<sup>1</sup>, кандидат технічних наук, доцент  
Гулай О.І.<sup>1</sup>, доктор педагогічних наук, професор  
<sup>2</sup>Герасимчук О.О., кандидат технічних наук, доцент

<sup>1</sup>Луцький національний технічний університет,  
вул. Львівська, 75, Луцьк, 43018, Україна

<sup>2</sup>Технічний фаховий коледж ЛНТУ, вул. Колякіна, 5,  
Луцьк, 43023, Україна  
h.herasimchuk@lntu.edu.ua

**Ключові слова:** цифрова доступність, цифрові послуги, сталість суспільства

### **1 Вступ**

У сучасному цифровому світі цифрова доступність стає ключовою темою з різними аспектами впливу та значення. Рівень цифрової доступності, тобто можливість громадян користуватися цифровими технологіями та послугами, має значний вплив на сталість суспільства. В умовах повномасштабної війни цифрові трансформації економіки відіграють ключову роль у нарощуванні технологічних переваг і є вирішальними чинниками забезпечення стійкості, а також просування України до членства в ЄС.

### **2 Вплив цифрової доступності на суспільство**

Зростання рівня цифрової доступності дозволяє суспільству використовувати цифрові технології для покращення ефективності та продуктивності. Наприклад, цифрові інструменти для управління бізнесом можуть сприяти оптимізації процесів та збільшенню прибутковості підприємств.

Цифрова доступність впливає на доступність освіти та навчання. Цифрова освіта в умовах війни для тисяч українських дітей залишається єдиною можливістю доступу до знань. В Україні започатковано Device Coalition — об'єднання найбільших світових виробників комп'ютерної техніки, міжнародних донорів та НУО під патронатом Міністерства освіти України. Device Coalition працює над постачанням в Україну сучасних цифрових пристроїв для покращення доступу до навчання. Близько 330 тис. дітей та 68 тис. вчителів у 10 регіонах України потребують цифрових пристроїв для забезпечення онлайн-навчання, через неможливість регулярного навчання офлайн [1].

Зростання цифрової доступності може сприяти розвитку ринку праці шляхом створення нових робочих місць у сфері інформаційних технологій та цифрової економіки.

Цифрові технології можуть покращувати якість життя громадян шляхом забезпечення доступу до онлайн-послуг у таких сферах, як охорона здоров'я, соціальна підтримка, банківські послуги та багато інших.

Висока цифрова доступність сприяє економічному зростанню, оскільки створює умови для розвитку інноваційних технологічних рішень, підтримує конкурентоспроможність підприємств та сприяє розвитку цифрової економіки.

### **3 Розвиток цифрової доступності в Україні**

Попри російську військову агресію, Україна продовжує свій шлях до Європейського Союзу, зокрема, шляхом гармонізації українського законодавства з ЄС.

2 березня 2024 року набув чинності Закон України «Про цифровий контент та цифрові послуги, покликаний вдосконалити українське законодавство та гармонізувати його положення з Директивою Європейського Парламенту і Ради (ЄС) № 2019/770 від 20 травня 2019 року [2].

13 квітня 2024 року уряд схвалив концепцію Державної цільової науково-технічної програми з використання технологій штучного інтелекту в пріоритетних галузях економіки на період до 2026 року [3]. Програма є комплексним підходом до визначення основних завдань щодо розвитку технологій штучного інтелекту (ШІ) та заходів, спрямованих на стимулювання впровадження технологій ШІ з урахуванням потреб у пріоритетних галузях економіки. Упровадження заходів Програми сприятиме підвищенню економічного потенціалу України та зміцненню позицій держави на світовому ринку.

Останнім часом в Україні значна кількість державних послуг стала доступною в електронному форматі. Протягом цих років ми звикли до того, що інформацію можна швидко знайти онлайн, а для багатьох послуг достатньо лише смартфона. На веб-порталах чи у мобільних додатках ми можемо реєструвати дітей, сплачувати податки, брати участь в опитуваннях, отримувати фінансову допомогу та реєструвати бізнес.

Однак, хоча українське суспільство активно розвивається в цифровому напрямку, існують певні виклики, пов'язані з недостатністю інфраструктури та цифрової грамотності, які потребують уваги та інвестицій для подальшого зростання цифрової доступності.

## **Список посилань**

1. Цифрова освіта. Забезпечення доступу до навчання під час повномасштабної війни.. – Укрінформ. – URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-presshall/3826580-miznarodna-pidtrimka-ukrainskoi-skilnoi-osviti.html>
2. Про цифровий контент та цифрові послуги: Закон України від 10.08.2023 № 3321-IX.  
URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3321-20#Text> (дата звернення: 26.04.2024 р.)
3. Про схвалення Концепції Державної цільової науково-технічної програми з використання технологій штучного інтелекту в пріоритетних галузях економіки на період до 2026 року: розпорядження Кабінету Міністрів України від 13 квітня 2024 р. № 320-р. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-skhvalennia-kontseptsiiderzhavnoi-tsil...>

# **Отримання текстильних волокон з хвої сосни звичайної за допомогою процесів м'яття**

Герасимчук Олександр Павлович, к.т.н., доцент  
Ткачук Оксана Леонідівна, к.т.н., доцент  
Пуць Віталій Степанович, к.т.н., доцент  
Охремів Андрій Іванович, аспірант

Луцький національний технічний університет,  
вул. Львівська, 75, Луцьк, 43018, Україна  
alex\_gop\_ukr@ukr.net

**Ключові слова:** сосна звичайна, хвоя сосни звичайної, хвойна лапка, текстильне волокно, м'яття.

## **1 Вступ**

Сосна звичайна (*Pinus sylvestris*) становить приблизно 27% загальної площі лісового покриву України та характерна для її північної та західної частини.

Крім деревини сосни звичайної, яка є цінним будівельним матеріалом, побічним продуктом рубок різних видів є крони дерев – хвойна лапка. На сьогодні в Україні частина хвойної лапки палиться на місцях лісозаготівлі, частина переробляється на тріску, частина утилізується в процесі гниття.

Наявні унікальні технології переробки хвойної лапки, зокрема виробництво хвойного екстракту та ефірної олії у філії Маневицьке лісове господарство Поліського Офісу ДП «Ліси України [1], а також використання хвої сосни звичайної для отримання целюлози та нанонелюлози [2, 3].

## **2 Огляд літератури за темою дослідження**

Перспективним напрямком переробки хвойної лапки є отримання з хвої текстильних волокон, які є екологічно чистими, нешкідливими для здоров'я людини, біорозкладаються, мають природні кольори та текстуру.

Крім традиційних способів отримання натуральних текстильних волокон рослинного походження з бавовни, льону, коноплі, проводяться дослідження щодо їх отримання зі шкіри бананів [4], кокосової шкаралупи [5], хвойної лапки [3, 7]. Концепція виробництва текстильних волокон з хвої «Forest Wool/Pine needle fiber» отримала міжнародну нагороду Green Product Award [6].

Виробництво текстильних волокон з хвої потребує розробки технологій збирання хвойної лапки [7] та технологій її переробки на текстильне волокно з хвої [8].

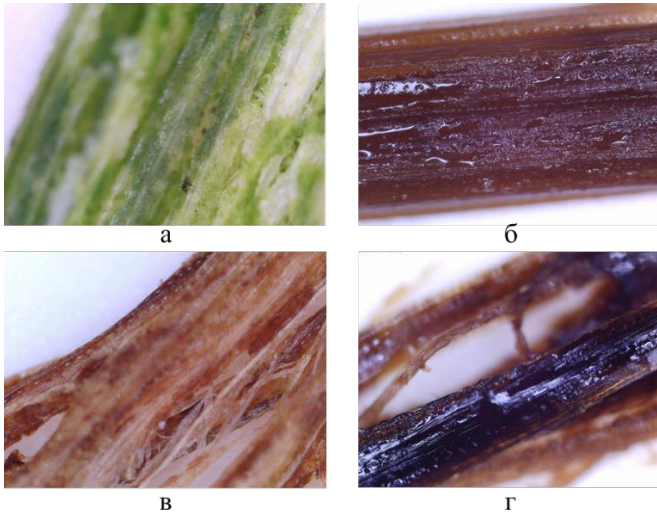
### 3 Результати дослідження

Текстильні волокна з хвої можна отримати біологічним, механічним, хімічним способом або їх поєднанням. Важливо, щоб спосіб містив мінімальну кількість операцій, був екологічно безпечним, енергоефективним, швидким.

Нами проведені дослідження з отримання текстильного волокна хвої хімічним способом з використанням гідроксиду натрію та підібрана оптимальні параметри процесу: концентрація гідроксиду натрію 70 г/л, температура 100 °С, тривалість – 40 хв. [8].

Анатомічно листок хвої складається з трьох основних елементів: епідермісу, мезофілу та пучків провідних тканин. Руйнування епідермісу пришивдшує потрапляння хімічних речовин та відділення технічних волокон. Це можливо з використанням процесів плющення чи м'яття.

Плющення хвої або отриманого волокна передбачає його прокатування під значним тисом між гладкими валами. М'яття передбачає прокатування хвої або волокна між рифленими валами. Використання м'яття хвої дає змогу скоротити тривалість отримання волокна, за інших рівних умов (див. рис. 1).



**Рис. 7.** Зображення хвої в мікроскоп після обробки:

а – механічна обробка (м'яття), б – хімічна обробка (NaOH),

в – хімічна обробка після механічної, г – механічна обробка після хімічної

Аналіз якості отриманого волокна, в тому числі мікроструктури цифровим мікроскопом Levenhuk (DXT 90) дає змогу зробити висновок, що



пришвидшення отримання хвої та підвищення якості волокна можливе за рахунок попереднього механічного впливу на хвою (м'яття хвої).

## Список посилань

1. У Маневичах виготовляють хвойний екстракт за унікальною технологією. URL: <https://manevychi.rayon.in.ua/news/341951-u-manevichah-vigotovliaiut-hvoiiii-ekstrakt-za-unikalnoi-u-tehnologieiu> (Дата звернення: 25.04.2024).
2. Rana, A., Guleria, S., Gupta, V. K., & Thakur, V. K. (2022). Cellulosic Pine Needles-Based Biorefinery for a Circular Bioeconomy. *Bioresource Technology*, 367, 128255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128255> (Дата звернення: 25.04.2024).
3. Ткачук О., & Герасимчук О. (2021). Стан та перспективи застосування деревної целюлози для виробництва хімічних волокон. IX Ukrainian-Polish Scientific Dialogues: Conference Proceedings. International Scientific Conference, 20-23 October 2021, Khmelnytskyi, Ukraine, pp. 204-205.
4. Ernest, E. M., & Peter, A. C. (2022). Application of selected chemical modification agents on banana fibre for enhanced composite production. *Cleaner Materials*, 5. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100131> (Дата звернення: 25.04.2024)
5. Brahmakumar, M., Pavithran, C., & Pillai, R.M. (2005). Coconut fibre reinforced polyethylene composites: effect of natural waxy surface layer of the fibre on fibre/matrix interfacial bonding and strength of composites. *Composites Science and Technology*, Volume 65, Issues 3–4, Pages 563-569. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.09.020> (Дата звернення: 25.04.2024).
6. Forest Wool/Pine needle fiber. URL: <https://www.gp-award.com/en/produkte/Forest-Wool> (Дата звернення: 26.04.2024)
7. Ткачук, О. Л., Герасимчук, О. П., & Резнікова, В. В. (2022). Пневмотермічний спосіб отримання хвої для виготовлення текстильних волокон. *Сільськогосподарські машини*, 48, 67-73. DOI: <https://doi.org/10.36910/acm.vi48.842> (Дата звернення: 26.04.2024).
8. Tkachuk, O.L., & Gerasymchuk, O.P. (2023). Perspective technologies of obtaining natural textile fibers from pine needles. Якість та безпечність товарів: матеріали VII міжнародної науково-практичної конференції, Луцьк, 28 квітня 2023 року. Луцьк: Вежа-Друк, 2023. С. 183-185. URL: [https://drive.google.com/file/d/1rADR7tuZmsrwRRmnqYIV\\_ynN9AXXu6kr/view](https://drive.google.com/file/d/1rADR7tuZmsrwRRmnqYIV_ynN9AXXu6kr/view) (Дата звернення: 26.04.2024).

# Методика забезпечення сталої роботи зубофрезерного верстата при нарізанні зубчастих коліс радіально- коловим методом

Грицай І.Є., д.т.н., проф.

Національний університет “Львівська політехніка”,  
вул. С.Бандери,12, Львів,79013, Україна  
ihor.y.hrytsai@lpnu.ua

**Ключові слова:** зубонарізання, радіально-коловий метод, дискова фреза, динамічна система, перехідні процеси, коливання, сталість.

## 1 Вступ

Зубчасті колеса та передачі є і залишаються невідмінними компонентами сучасних механізмів і машин, а їх технології постійно розвиваються та удосконалюються. Серед сучасних методів нарізання зубчастих коліс обкочувальний радіально-коловий метод (РКМ), який розробляють у Львівській політехніці є висоефективним та найуніверсальнішим серед усіх відомих методів зубооброблення [1]. Разом з тим, його перевага - простий і дешевий різальний інструмент - тонка дискова фреза є елементом, який може обмежувати потенційні переваги цього методу внаслідок її недостатньої жорсткості та загрози виникнення коливань і вібрацій під час роботи на інтенсивних режимах.

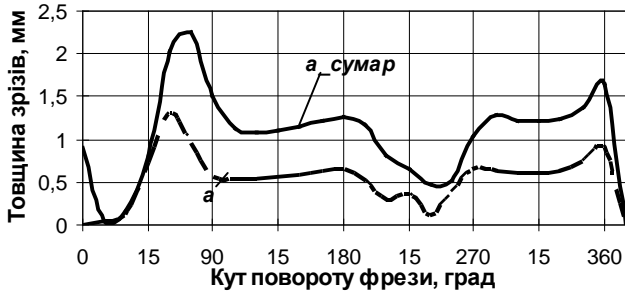
## 2 Результати досліджень

Для дослідження умов виникнення вібрацій використано результати моделювання процесу різання та визначення параметрів зрізів дискової фрези в РКМ [1], а також програму Simulink Matlab. Відповідно до положень теорії автоматичного регулювання рівняння перехідних процесів представлені в операторній формі.

Динамічний процес формування сили різання  $P$  по товщині зрізу  $a$  є неколивним з постійною часу  $T_p$ , його величина визначена з допомогою системи Deform 2D для процесу за РКМ (межа міцності заготовки на зсув 325 МПа, передній кут інструменту  $7,5^0$ , швидкість різання 100 м/хв.). Передавальна функція процесу різання в операторній формі має вид:

$$W = \frac{P}{a} = \frac{K}{1 + T_p p}$$

Відповідно до базових положень динаміки верстатів скачок товщини зрізу (1,3 мм, рис.1) зумовлює виникнення автоколивань у верстаті. Періодична зміна параметрів зрізів, зокрема, сумарної товщини стружки викликає періодичні коливання сили різання, яка діє на верстат.



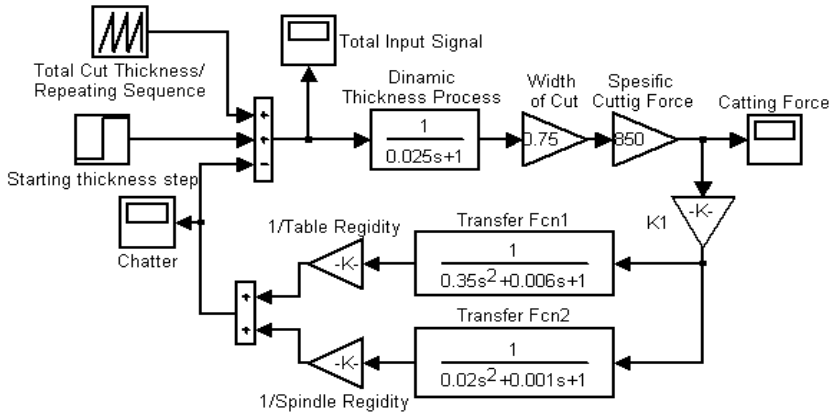
**Рис. 1.** Графік зміни товщини зрізів по куту повороту фрези в однозубому різанні (*a*) та сумарної товщини в багатозубому різанні (*a\_сум*)

Пружну систему верстата прийнято двохмасовою, з приведенням мас до стола верстата і інструментального шпинделя. Динамічна характеристика ланок верстата, в яких виникають гармонічні коливання описується залежністю:

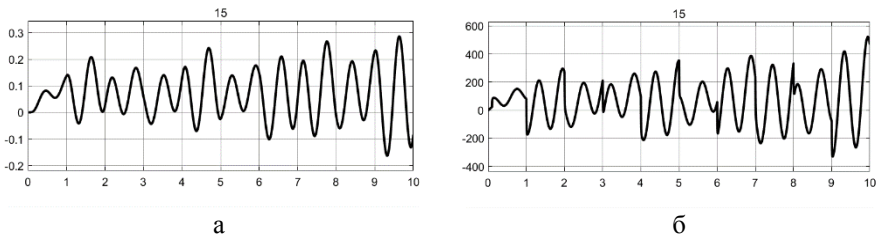
$$W_i = \frac{y}{P} = \frac{K}{T_m^2 p^2 + T_d p + 1},$$

Аргументами обох гармонічних функцій, які характеризують коливання стола і шпинделя є інерційні сталі  $T_{m1}$  і  $T_{m2}$  та постійні часу розсіювання  $T_{d1}$  і  $T_{d2}$ . Параметри операторних рівнянь коливань ланок зубофрезерного верстата мод.5E32 – приведені маси, домінуючі власні частоти і коефіцієнти розсіювання енергії були визначені експериментально та розраховані аналітично. Окремо встановлено жорсткість дискової фрези, як найслабшої ланки шпиндельного вузла. Схема пружної системи верстата з процесом різання наведена на рис.2.

Для заданих параметрів (*фреза*: товщина 2 мм; діаметр 31,82 мм; кількість зубців 24; *колесо*: модуль 2,5 мм; ексцентриситет 1,82 мм; кількість зубців 36) були підібрані граничні значення швидкості (38 м/хв.) і осьової подачі (0,75 мм/об.), за яких верстат зберігає сталість. Перевищення значення подачі понад цю величину викликає розхитування пружної системи (рис.3). Дослідження дали змогу встановити для даних початкових умов максимально допустиме значення подачі, яка забезпечить роботу на межі сталості верстата і максимальну продуктивність, а гранична швидкість і частота обертання фрези встановлювалася з умови необхідної стійкості інструменту.



**Рис. 2.** Схема динамічної системи зубофрезерного верстата з процесом різання



**Рис. 3.** Нестабіль в пружній системі верстата по коливаннях (а) та силі різання (б)

### 3 Висновки

Розроблена графо-аналітична модель недеформованої стружки та розрахунку параметрів зрізів в процесі нарізання зубчастих коліс радіально-коловим методом в поєднанні з системою Deform2D та програмою Simulink Matlab дали змогу розробити методику вибору граничних параметрів процесу зубонарізання з умови забезпечення стійкого безвібраційного оброблення та мінімального часу на виконання операції.

### Список посилань

1. Ihor E. Hrytsay. Sinusoidal Gears and Alternative Method of Tooth Generation. In: Advances in Gear Theory and Gear Cutting Tool Design, Springer, 2022, pp. 233-254. DOI:10.1007/978-3-030-92262-7\_8.

# Дослідження нестационарних процесів при нарізанні зубчастих коліс методом Power skiving

Грицай І.Є., д.т.н., проф.  
Сліпчук А.М., к.т.н., доцент

Національний університет “Львівська політехніка”,  
вул. С.Бандери,12, Львів,79013, Україна  
ihor.y.hrytsai@lpnu.ua

**Ключові слова:** power skiving, врзання, проходи, моделювання, нестационарність, сила різання, зміна операції, ефективність.

## 1 Вступ

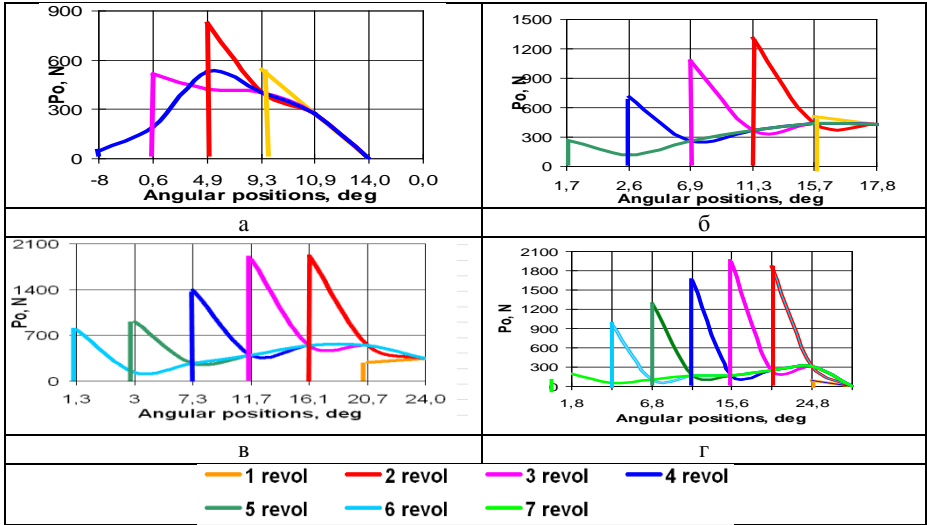
Протягом останніх років у виготовленні зубчастих коліс набуває все ширшого застосування метод Power skiving, що зумовлене його значними перевагами у порівнянні з традиційними методами зубонарізання: велика швидкість різання, малий час допоміжних переходів, висока продуктивність і якість зубчастих коліс. Проте, незважаючи на інтенсивні наукові дослідження цієї технології провідними фірмами та науковими установами, існують ряд проблем, які потребують поглибленого аналізу та вирішення для покращення технології цього методу. Однією з таких проблем є особливості початку процесу нарізання зубчастих коліс, на етапі врзання.

## 2 Виклад основного матеріалу. Результати досліджень

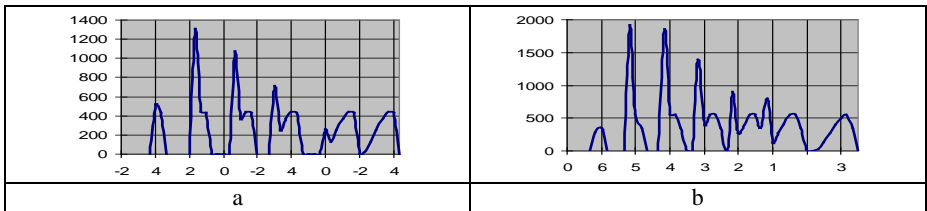
Вирішення цієї задачі, яке стало можливим на основі розробленої авторами методики моделювання об’ємної недеформованої стружки та її практичного використання для розрахунку і прогнозування параметрів зрізів та сил різання при нарізанні зубчастих коліс методом Power skiving [1,2] показало наступне. При виготовленні зубчастих коліс стадія врзання, на відміну від усталеного різання, є нестационарним процесом, що супроводжуються інтенсивними ударними навантаженнями, які виникають в момент перших контактів чашкового різця з торцем заготовки зубчастого колеса. На цій стадії починають формуватися впадини і бокові поверхні зубців колеса. Результати моделювання сили різання по проходах врзання показано на рис.1 – рис.3 (модуль 2,5 мм; кількість зубців: колеса 33, різця 24; осьова подача 0,75 мм/об.; швидкість різання 190 м/хв.; кількість проходів чотири, глибина різання по проходах: 0,5m, 1m 1,5m та 2m).

Розрахунки велися для головної складової сили різання  $P_o$ , яка за напрямком збігається з вектором швидкості різання; моделювалися сили

однозубчастого рис.1 і багатозубого (сумарного) різання (рис.2) на другому і третьому проходах врізання.



**Рис. 1.** Сила  $P_o$  при врізанні в одній впадині на послідовних обертах інструменту по проходах а – прохід 1; б – прохід 2; в – прохід 3; г – прохід 4



**Рис. 2.** Графіки зміни сили  $P_o$  при врізанні в одній впадині в часі різання на другому (а) і третьому (б) проходах

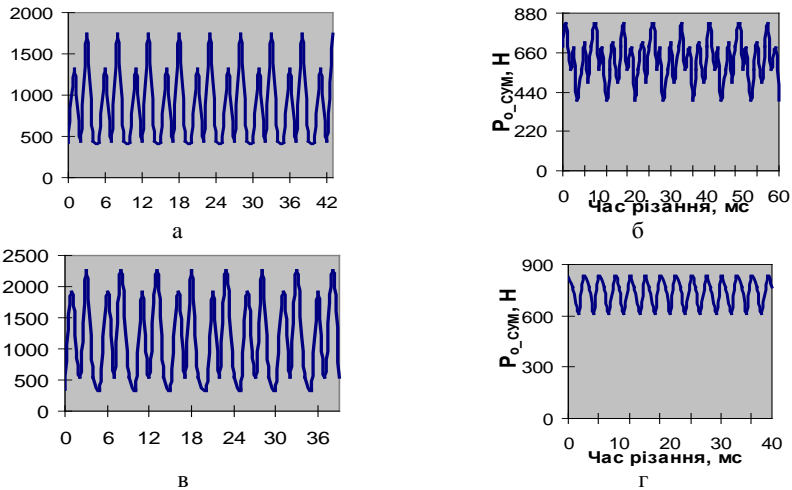
Для порівняння на рис.4 наведені сили на цих же проходах в умовах стаціонарного різання, після завершення врізання.

### 3 Висновки

Результати дослідження показали, що на перших обертах різця під час врізання зубець інструменту в момент контакту з колесом зазнає інтенсивних ударів, сила різання зростає стрибкоподібно, а її величина у 2,5 – 3 рази більша за її значення при усталеному різанні. Сила сумарного (багатозубого)

неперервного різання має гармонічний характер з великим коливанням амплітуди і значним середнім (квазістатичним) значенням.

Для усунення піків сили, які викликають значні удари навантаження на верстат та інструмент на практиці використовують багатопрхідне різання з малою глибиною різання на багаточисельних послідовних проходах, але на кожному проході ріжуть на повну ширину зубчастого вінця. Разом з тим, цю схему доцільно використовувати тільки на довжині шляху врізання, яка порівняно з шириною колеса є обмеженою (особливо, якщо нарізати колеса пакетом з декількох деталей), а вже після завершення стадії врізання виконувати різання за один або два проходи на всю ширину вінця. Така зміна структури операції дасть змогу значно скоротити витрати часу, підвищити продуктивність, збільшити стійкість інструментів і витрати без впливу на точність процесу.



**Рис.3.** Сили неперервного різання на другому оберті в другому та третьому проходах під час врізання (а, в) та в процесі стаціонарного різання (б, г) на цих проходах

## Список посилань

1. Hrytsay, I., Stupnytskyy, V., & Topchii, V. (2019). Improved method of gear hobbing computer aided simulation. *Archive of mechanical engineering*, 66(4), 475-494.
2. Hrytsay, I., Slipchuk, A., M. Bosansky. (2023). Justification of the choice of parameters for the gear power skiving operation based on computer simulation. *Strojnícky časopis – Journal of mechanical engineering*. Volume 73, Issue 2. P. 33 – 44 DOI: <https://doi.org/10.2478/scjme-2023-0020>

# **Стратегічний план забезпечення діджиталізації закладу вищої освіти будівельного напрямку (на прикладі ДонНАБА)**

Юрій Грицук, к.т.н., доцент  
Сергій Колесніченко, д.т.н., професор  
Юрій Селютін, к.т.н., доцент  
Тетяна Калашникова, ст. викладач

Донбаська національна академія будівництва і архітектури,  
(тимчасово) вул. Карпатська, 15, Івано-Франківськ, 76019, Україна  
ccit@donnaba.edu.ua

**Ключові слова:** стратегія, діджиталізація, цифровізація, програмне забезпечення, заклад вищої освіти

## **1 Розробка стратегічного плану забезпечення діджиталізації**

### **1.1 Комплексне ступеневе комп'ютерне навчання**

Донбаська національна академія будівництва і архітектури (ДонНАБА) є вже двічі переміщеним навчальним закладом (в 2014 році та в 2022 році), в якому активно здійснюється робота щодо впровадження дистанційної освіти [1 - 3]. І пошук програмних засобів, які б забезпечили здобувачам повноцінну освіту, є на поточний момент актуальною задачею відділу інформаційних технологій академії. Використання сучасних онлайн-платформ (Moodle, Microsoft365 тощо) дозволило організувати навчання, а використання платформ для навчання – наповнити його максимальною реалістичністю в умовах онлайн.

З початку формування ІТ-інфраструктури в ДонНАБА була покладена ідея комплексного ступеневого комп'ютерного навчання [1]. Як зазначено в роботі [2] вона «забезпечує можливість сучасному інженеру-будівельнику вирішувати наступний комплекс завдань: професійні, що спрямовані на виконання поставлених перед фахівцем-професіоналом завдань діяльності; соціально-виробничі, що пов'язані з діяльністю фахівця у сфері виробничих відносин у трудовому колективі (наприклад, інтерактивне або комунікативне спілкування і т.п.); соціально-побутові, що виникають у повсякденному житті та пов'язані з домашнім господарством, відпочинком, родинним спілкуванням, фізичним і культурним розвитком, тощо і можуть впливати на якість виконання фахівцем професійних і соціально-виробничих завдань»

### **1.2 Розробка стратегічного плану**

Розробка стратегічного плану цифровізації почалась із визначення основних потреб і пріоритетів роботи ДонНАБА як державного закладу вищої освіти.

Головними пріоритетами було визначено:



- Якісна підготовка фахівців за напрямками та освітньо-професійними програмами для можливості отримання першого робочого місця за фахом;
- Надання кваліфікованих сучасних освітніх, наукових, консультаційних послуг фахівцям у будівельній галузі, архітектурі, містобудуванні, екології та автомобільного транспорту. Економічний та управлінський супровід будівництва і міського господарства.
- Інтеграція у світовий освітній простір.
- Забезпечення якісних побутових умов, можливостей самостійної роботи студентів. Розвиток студентського самоврядування.

У відповідності до визначених пріоритетів, як пріоритетні було визначено наступні блоки для застосування цифрових технологій:

1. Діджиталізація освітнього процесу.
2. Діджиталізація адміністрування ДонНАБА.
3. Зворотній зв'язок із випускниками, фахівцями у галузях за напрямками освітньо-професійних програм.
4. Надання послуг з науково-технічного супроводу, консультаційних послуг, проектної діяльності, експертизи для промислових підприємств.
5. Надання освітніх послуг з підвищення кваліфікації та спеціалізованого навчання.
6. Спільна робота з розробки сучасних цифрових курсів і технологій із європейськими університетами-партнерами.
7. Застосування цифрових технологій у міжнародних фондах, грантових програмах.
8. Застосування цифрових технологій на території кампусу (у гуртожитку, у відокремленому структурному підрозділі – ДЖКК ДонНАБА тощо).

### **1.3 Цифрові ресурси та інструменти**

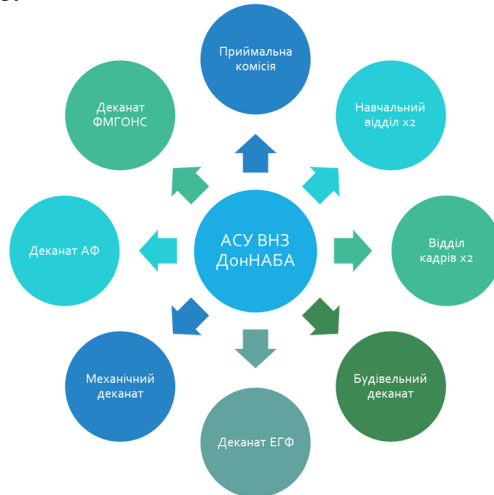
Для забезпечення навчального процесу академія використовує хмарні служби від Microsoft та Google

Основним сервісом обрано платформу Microsoft365 на базі якої розгорнуто корпоративну пошту та щільно інтегровано в навчальний процес службу MS Teams, за допомогою якої проводяться усі онлайн-заняття в академії. Здобувачі можуть в календарі бачити свій розклад і приєднуватися до онлайн-занять.

Дистанційний навчальний процес забезпечується сумісним використанням платформ Moodle та Teams, тобто плюси однієї доповнюються позитивними моментами іншої.

Автоматизована система управління побудована на основі комерційного програмного забезпечення АСУ ВНЗ (див. Fig. 2). В локальній версії вона поєднувала усі зацікавлені підрозділи, але, у зв'язку з дистанційним

форматом роботи вона працює в обмеженому варіанті, виконуючи тільки найнеобхідніші функції.



**Рис. 8.** Впровадження програмного забезпечення АСУ ВНЗ в роботу ДонНАБА

Здобувачі ДонНАБА мають право на отримання десктопних версій ліцензійного програмного забезпечення Microsoft (Windows, Office365 Pro, Visio, Project), Autodesk (AutoCAD, 3DMax, Revit etc), ArhiCAD тощо. В академії активно використовуються можливості надані Міністерством освіти і науки України (доступ до платформи масових відкритих онлайн-курсів Coursera, Udemu, платформи віртуальних симуляцій Labster).

## Список посилань

1. Грицук Ю.В. Комплексна ступенева система ІТ-підготовки інженера-будівельника / Ю.В. Грицук, Д.В. Гуляк // САПР Allplan у архітектурі і будівництві // Матеріали семінару Міжнародного науково-практичного фестивалю (м. Київ, 22-26 квітня 2013 року). – К: НАУ, 2013. – С.32–34.
2. Грицук Ю.В. Проблеми організації дистанційного навчання в умовах карантину в Донбаській національній академії будівництва і архітектури // Кухаренко В.М., Бондаренко В.В. Екстрене дистанційне навчання в Україні: Монографія / За ред. В.М. Кухаренка, В.В. Бондаренка – Харків: Вид-во КП «Міська друкарня», 2020. – 409 с. – С. 176 – 184.
3. Колесніченко С.В. Особливості застосування дистанційного навчання у технічному закладі вищої освіти (на прикладі ДонНАБА) / С.В. Колесніченко // Збірник наукових праць за матеріалами II Міжн. науково-практичної конференції «Вища технічна освіта XXI століття: виклики, проблеми, перспективи», 14–15 грудня 2023 р. – м. Краматорськ – м. Івано-Франківськ: ДонНАБА. 2023. – 340 с. – С. 316 – 321.

# Структура та властивості керамічних композиційних матеріалів $\text{SiC}-(\text{Ti}_{0.2}\text{Zr}_{0.2}\text{Hf}_{0.2}\text{Nb}_{0.2}\text{Ta}_{0.2})\text{B}_2$

Дуань Маньтан<sup>1</sup>, аспірант  
Мосяк Василь Тарасович<sup>1</sup>, магістрант  
Богомол Юрій Іванович<sup>1</sup>, доктор технічних наук, професор

<sup>1</sup>Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського",  
вул. Берестейський проспект (Перемоги), 37, Київ, 03056, Україна  
[ubohomol@iff.kpi.ua](mailto:ubohomol@iff.kpi.ua), [duanmantang@gmail.com](mailto:duanmantang@gmail.com), [v.mosyak@gmail.com](mailto:v.mosyak@gmail.com)

**Ключові слова:** керамічні композитні матеріали, карбід кремнію (SiC), високоентропійні бориди, структура, властивості, процес ущільнення.

## 1 Вступ

Карбід кремнію (SiC) має унікальні властивості, такі як: висока твердість, низький коефіцієнт термічного розширення, відмінна хімічна стійкість та стійкість до термічного удару. Однак, через сильні ковалентні зв'язки Si-C та низький коефіцієнт дифузії, цей матеріал вимагає високої температури для спікання і утруднює процес ущільнення. Показник в'язкості руйнування виробів SiC загалом низький, що обмежує їх використання в промисловості. В'язкість руйнування керамічних виробів SiC без добавок зазвичай варіюється в межах від 2,5 до 3 МПа·м<sup>1/2</sup> [1]. Однак збільшення в'язкості руйнування часто супроводжується зниженням твердості. Додавання перехідних металевих диборидів як зміцнюючих фаз у керамічних виробках SiC допомагає подолати компроміс між зменшенням твердості і збільшенням в'язкості руйнування [1].

Як новий клас керамічних матеріалів, високоентропійні бориди (ВЕБ), виготовлені за тим самим процесом, здебільшого виявляють вищу твердість та стійкість до окиснення порівняно з п'ятьма індивідуальними боридами, які їх складають [2]. У цьому дослідженні ми використовували метод іскроплазмового спікання для виготовлення кераміки SiC-ВЕБ і досліджували фазовий склад, мікроструктуру та механічні властивості кераміки SiC-ВЕБ спеченої за різних температур.

## 2 Виготовлення зразків та їх дослідження. Методика досліджень

Комерційні порошки SiC і металеві бориди були взяті в співвідношенні 60 моль% SiC та 40 моль%  $(\text{Ti}_{0.2}\text{Zr}_{0.2}\text{Nb}_{0.2}\text{Ta}_{0.2}\text{Hf}_{0.2})\text{B}_2$ . Порошки були перемішані та просіяні 15 разів (300 меш), після чого висушені протягом 10 годин при температурі 100 °С у вакуумі. Порошки засипають у графітову форму, швидкість нагрівання 100 °С/хв а охолодження 150 °С/хв. Тиск підвищується до 50 МПа при 800 °С, потім підтримується на рівні 50 МПа і знижується до 20 МПа під час охолодження. Середовище спікання знаходиться в стані вакууму.

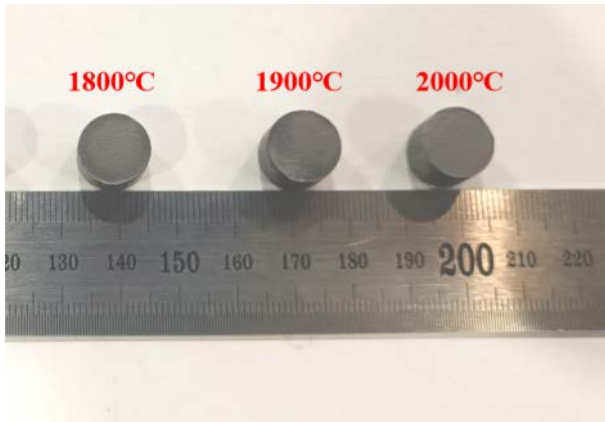
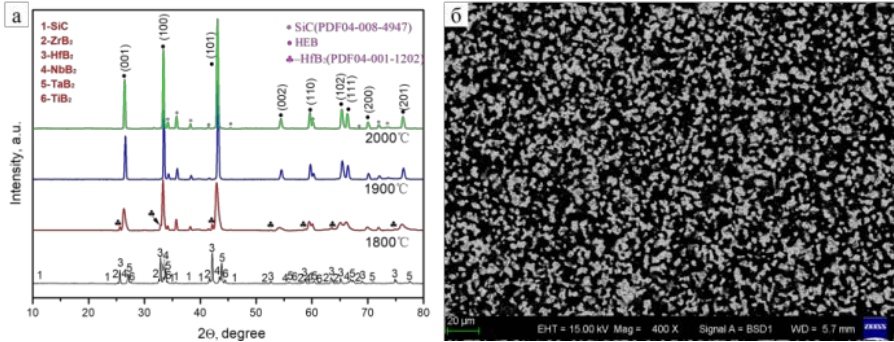


Рис. 1. Загальний вигляд зразків SiC-БЕБ при різних температурах спікання.

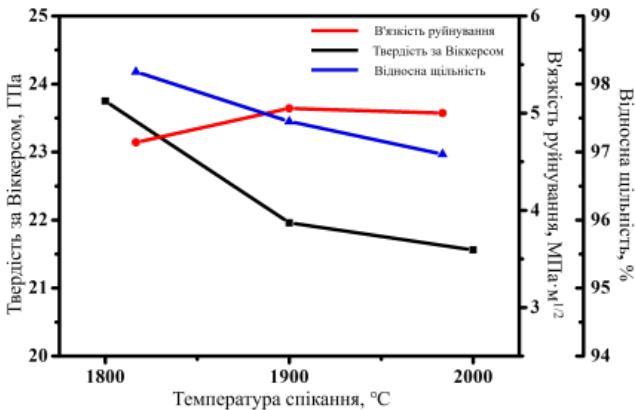
## 3 Результати

На рисунку 2а показано фазовий склад керамічних композитів SiC-БЕБ при різних температурах спікання (1800 °С, 1900 °С, 2000 °С) структури типу  $\text{AlB}_2$  (гексагональна, просторова група  $\text{P6}/\text{mmm}$ , № 191,  $Z=1$ ) та фази SiC (стандарт PDF 04-008-4979). Фази типу  $\text{AlB}_2$  відповідали дифракційними пікам (001), (100), (101), (002), (110), (102), (200), (201) та (210) високоентропійного бориду  $(\text{Hf}_{0.2}\text{Zr}_{0.2}\text{Ta}_{0.2}\text{Nb}_{0.2}\text{Ti}_{0.2})\text{B}_2$ , про який повідомляв Гільд та ін. [2]. Це доводить, що фаза типу  $\text{AlB}_2$  є високоентропійною фазою. Як показано на рисунку 2б. Зразок в основному розділений на дві частини: сіро-біла фаза - високоентропійний борид, а чорна фаза - SiC.



**Рис. 2.** а-Рентгенівські дифрактограми зразків SiC-БЕБ, отриманого при різних температурах спікання. Фази: 1-SiC, 2-ZrB<sub>2</sub>, 3-HfB<sub>2</sub>, 4-NbB<sub>2</sub>, 5-TaB<sub>2</sub>, 6-TiB<sub>2</sub>. б-Мікροструктура зразків, виготовлених при температурі спікання 2000 °С.

SiC-БЕБ керамічні композитні матеріали демонструють зміни у відносній щільності, твердості та в'язкості руйнування зі зміною температури спікання (Рис.3.). Вони відзначаються високою відносною щільністю, яка в усіх випадках перевищує 97%. При температурі спікання 1800 °С складає 23,75 ГПа, проте зі збільшенням температури спікання спостерігається зниження відносної щільності і твердості. Ця тенденція пояснюється зростанням розміру зерен високоентропійних боридів за високих температур спікання. Крім того, в'язкість руйнування SiC-БЕБ керамічних композитів збільшується зі зростанням температури спікання, досягаючи максимального значення 5,1 МПа·м<sup>1/2</sup>. Це може бути наслідком спільної дії другої фази та високоентропійного зміцнення.



**Рис. 3.** Відносна щільність, твердість і в'язкість руйнування керамічних композитів SiC-БЕБ за різних температур спікання.

## **4 Висновки**

У цьому дослідженні використовувалися комерційні порошки SiC та індивідуальні бориди як вихідні матеріали для виготовлення керамічних матеріалів за допомогою технології іскроплазмового спікання при температурах 1800°C, 1900°C та 2000°C, що забезпечило високу відносну щільність понад 97%. Матеріали SiC-ВЕБ складаються переважно з двох фаз: фази SiC та високоентропійних боридів. Спечена при температурі 1800°C, кераміка SiC-ВЕБ виявила твердість на рівні 23,75 ГПа. При підвищенні температури спікання до 2000°C, кераміка SiC-ВЕБ показала в'язкість руйнування 5,1 МПа·м<sup>1/2</sup>. Зниження відносної щільності та твердості при підвищенні температури спікання пояснюється зростанням розміру зерен. Підвищення в'язкості руйнування пов'язане з механізмами впливу другої фази та високоентропійного зміцнення.

## **Список посилань**

1. King D. S. Silicon carbide–titanium diboride ceramic composites [Електронний ресурс] / Derek S. King, William G. Fahrenholtz, Greg E. Hilmas // Journal of the European Ceramic Society. – 2013. – Vol. 33, no. 15-16. – P. 2943–2951.
2. High-Entropy Metal Diborides: A New Class of High-Entropy Materials and a New Type of Ultrahigh Temperature Ceramics [Електронний ресурс] / Joshua Gild [та ін.] // Scientific Reports. – 2016. – Vol. 6, no. 1.

# Дослідження впливу режимів експлуатації на трибологічні властивості гібридного полімерного композиту

Срьоміна Катерина Андріївна, к.т.н.  
Томіна Анна-Марія Вадимівна, к.т.н.  
Срьоменко Олександр Вікторович  
Волошина Катерина Русланівна  
Катков Богдан Романович

Дніпровський державний технічний університет,  
вул. Дніпробудівська, 2, Кам'янське, 51918, Україна  
an.mtomina@gmail.com

**Ключові слова:** гібридний полімерний композиційний матеріал, математичні моделі, трибологічні властивості

## 1 Вступ

Сьогодні гібридні полімерні композиційні матеріали (ГПКМ) активно використовують у вузлах тертя сучасної техніки. Відомо [1-3], що вироби з ГПКМ, які містять суміш волокнистого та порошкового наповнювача, характеризуються високими показниками ударної в'язкості, теплопровідності, жорсткості, зносо- та термічної стійкості. Спрогнозувати умови ефективної працездатності виробів із ГПКМ дозволяє використання методів математичного планування, які в свою чергу, дозволяють не лише аналізувати вплив різних параметрів на характеристики матеріалу, але й передбачати його поведінку в різних умовах експлуатації. Тому, у роботі розглянуто вплив навантаження та швидкості ковзання на інтенсивність лінійного зношування ( $I_h$ ) та коефіцієнт тертя ( $f$ ) ГПКМ.

## 2 Об'єкти та методи досліджень

Для створення ГПКМ як полімерна матриця був обраний політетрафторетилен (ПТФЕ), який характеризується стабільністю експлуатації під впливом низьких (73 К) та високих (533 К) температур, розчинників, кислот і лугів, сонячних променів. Як армуючі матеріали для ПТФЕ використали дискретне базальтоне волокно (БВ) і порошок ливарного приховано кристалічного графіту марки ГЛС, при наступному співвідношенні компонентів: 70 мас.% (ПТФЕ), 15 мас.% (БВ), 15 мас.% (ГЛС). БВ надає ГПКМ високу міцність, а ГЛС самозмащувальну здатність.

ГПКМ виготовляли методом компресійного пресування за методикою наведеною у роботі [4].

Встановлення впливу навантаження та швидкості ковзання на трибологічні властивості ГПКМ, які змінювалися від 0,5 до 1,5 МПа та 1 до 2 м/с відповідно (крок варіювання в обох випадках складав 0,5), здійснювали на машині тертя СМЦ-2 за схемою «диск-колодка» в умовах тертя без змащення. Контртілом обрано сталь 45 (45-48 HRC,  $R_a=0,32$  мкм).

Математичні моделі знаходили за допомогою ортогонального композиційного планування другого порядку ступені 3<sup>2</sup>, яка більш детально наведена у роботі [5].

### 3 Результати

У ході досліджень та аналізу результатів випробувань були отримані математичні моделі, що прогнозують трибологічні властивості розробленого ГПКМ залежно від швидкості ковзання та навантаження та мають наступний вигляд:

$$I_h = (1,724 P^2 - 20,20 v^2 + 35,44 P \cdot v + 28,6 v - 22,808 P + 15,514) \cdot 10^{-10}$$

$$f = 0,48 P^2 - 0,04 v^2 + 0,02 P \cdot v + 0,16 v - 0,91 \cdot P + 0,75$$

Математичні моделі, що були отримані в процесі проведених досліджень дозволяють не лише аналізувати вплив окремих параметрів на зношування та тертя різних деталей виготовлених з розробленого ГПКМ, а й прогнозують їхню довговічність при роботі у вузлах тертя сучасної сільськогосподарської, гірничорудної та автомобільної техніки за різних значень навантажень та швидкостей ковзання.

### Список посилань

1. Полімерні композити на основі термопластичних в'язучих / Бура О.І. [та ін.] – Дніпро: Середняк Т.К., 2019. – 239 с.
2. Hai Nguyen Mechanical properties of hybrid polymer composite / Hai Nguyen, Wael Zatar, Hiroshi Mutsuyoshi // Hybrid Polymer Composite Materials. Properties and Characterisation. – 2017. – P.83–113.
3. Berladir K.V. Designing and examining polytetrafluoroethylene composites for tribotechnical purposes with activated ingredients / K.V. Berladir, V.A. Sviderskiy // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – no. 6. – P. 14–21.
4. Yeromenko O. Effect of discrete basalt fiber on operational properties of polytetrafluoroethylene /O. Yeromenko, A-M. Tomina, I. Rula // Problems of tribology. 2022. – Vol.27, no. 4/106. – P. 39-44.
5. Yeromenko O.V. Supply of operation modes on tribological power to basaltoplastics based on polytetrafluoroethylene / O.V. Yeromenko, Ye.A. Yeriomina, A.-M.V. Tomina // Mathematical Modeling. – 2023. – Vol. 49, no. 1. – P. 48–55.



# **Аналіз підходів до моделювання матеріальних потоків у гнучких виробничих комплексах**

Залета Ольга Михайлівна, к.т.н., доцент  
Валецький Богдан Петрович, к.т.н., доцент  
Залета Андрій Олександрович, аспірант

Луцький національний технічний університет,  
вул. Львівська, 75, Луцьк, 43018, Україна  
o.zaleta@lutsk-ntu.com.ua

**Ключові слова:** виробничий комплекс, модель, система, процес.

## **1 Вступ**

Створення і впровадження в експлуатацію автоматизованих верстатних комплексів потребує значних капіталовкладень. У зв'язку з цим повинні бути використані всі можливості для збільшення завантаженості верстатів (за рахунок скорочення простоювань): оптимізація технологічного процесу обробки деталей, раціональна організація обслуговування та вдосконалена підготовка виробництва. Для вирішення таких завдань можуть бути успішно залучені засоби і методи комп'ютерного моделювання.

## **2 Виклад основного матеріалу. Результати досліджень**

База знань та експертна оболонка для проведення машинного експерименту функціонування гнучких виробничих комплексів (ГВК) є основними елементами системи структурного моделювання, створення якої складається з: накопичення знань; створення бази знань та бази правил; створення експертної оболонки та організації логічного виходу для створення керуючих впливів на відповідні виконавчі механізми структурної моделі ГВК [1].

Наявність у складі ГВК єдиної автоматизованої транспортно-накопичувальної системи (АТНС) і автоматизованої системи організаційно-технологічного керування дозволяє включати у сферу керування як основне устаткування, так і служби забезпечення виробництва. Це дозволяє перейти від технологічного маршруту виготовлення деталей до виробничого маршруту виконання замовлення [2].

У математичній моделі автоматизованої системи організаційно-технологічного керування мають бути відображені взаємозв'язки між компонентами ГВК (обладнанням, центральним автоматизованим складом та накопичувачами для безперебійної роботи верстатів). Необхідна деталізація виробничого процесу на основі математичної моделі визначається

призначенням відповідної системи керування. Наприклад, у системі керування транспортуючим обладнанням окремою операцією є кожне переміщення вантажів, у системі централізованого керування верстатами – кожна команда керуючої програми з центральної системи керування на верстат і т.д. Таким чином, деталізацію виробничого процесу можна виконувати у межах системи організаційно-технологічного керування ГВК [3].

Метод імітаційного комп'ютерного моделювання дозволяє дослідити в широкому інтервалі варіювання вхідні параметри та так само визначити структуру виробничої системи і її технічні характеристики. В основу імітаційної моделі покладено наступні принципи:

- принцип системності, який передбачає, що імітаційна модель включає набір агрегатів  $A_1, \dots, A_n$  (елементи моделі), де  $A_i = (x_{i1}, \dots, x_{ik}; z_{i1}, \dots, z_{il}; y_{i1}, \dots, y_{mk}); x_{i1}, \dots, x_{ik}; z_{i1}, \dots, z_{il}; y_{i1}, \dots, y_{mk}$  – параметри, що визначають відповідно стан входів, режим функціонування та стан виходів елементів моделі;

- принцип подійності, тобто стан виробничої системи оцінюється лише у критичні моменти часу, коли відбуваються суттєві зміни; у моделі використовується математична імітація імовірнісного характеру низки параметрів з різними законами розподілу (рівномірним, нормальним, експоненціальним та ін.), результати моделювання носять імовірнісний характер і вимагають статистичної інтерпретації. Модель будується за принципом сукупності універсального «ядра» та структурно-орієнтованих модулів, що дозволяє моделювати різні варіанти структур виробничих систем, не змінюючи «ядра», а лише додаючи нові модулі. Така імітаційна модель може бути використана при багатоваріантному проектуванні із врахуванням специфічних особливостей конкретного виробництва [4].

Наступним методом є моделювання транспортної системи в ГВК у рамках припущень, прийнятих у системі оптимізації його функціонування та структури. В основу цієї імітаційної системи покладено універсальну дворівневу модель ГВК: нижній її рівень – це модель функціонування підструктури обладнання, включаючи модель системи керування підструктурою; верхній рівень – модель функціонування транспортної системи ГВК. Транспортна система складається з трьох основних компонентів: транспортних засобів, транспортної мережі та системи управління матеріальними потоками. Транспортний засіб має бути описаний як підструктура обладнання. Тож транспортна мережа ГВК являє собою граф, вузли якого – пункти відправлення та призначення, а дуги відповідають відріzkам шляху між вузлами. Система керування матеріальними потоками в імітаційній моделі є набором евристичних правил переваги (пріоритетів). Ця система передбачає, що компонування і планування ГВК, що входять до системи, відоме [5].

Також має місце застосування методики створення математичних моделей процесів обробки деталей в ГВК з дискретною дією [6], яка передбачає:

- формування списків вихідних даних і результатів моделювання, визначення форм відображення вхідної та вихідної інформації;
- розробку принципів, що забезпечують можливість безконфліктного проходження деталей через дискретну виробничу систему, і побудова на їх основі схеми ГВК у вигляді графа;
- визначення для кожного відгалуження отриманої схеми (графа або сукупності графів, що мають загальну вершину) умов дозволу переходу деталей між окремими одиницями обладнання ГВК;
- визначення параметрів стану обладнання ГВК і порядку зміни станів, що дозволяють реалізовувати дискретно-подійну схему імітації обробки деталей;
- визначення варіантів структури ГВК, близьких до основного, і доповнення сукупності характеристик, розробленої на попередніх етапах;
- розробку керуючої програми.

### **3 Висновки**

Моделювання матеріальних потоків у гнучких виробничих комплексах має багатоваріантний характер. Вибір методу моделювання залежить від призначення та структурного складу виробничого комплексу, рівня складності його транспортно-накопичувальної системи та ступеню їх автоматизації, а також від мережі логістичних зв'язків між обладнанням в межах виробництва. Залежно від обраного методу, модель ГВК може забезпечити можливість прогнозувати та узгоджувати матеріальні потоки, керувати ними, оптимізувати виробничий процес на рівні вхідних і вихідних параметрів обладнання.

### **Список посилань**

1. Дудюк Д.Л., Мазепа С.С., Мисик М.М. Гнучке автоматизоване виробництво і роботизовані комплекси: навч. посіб. Львів: «Магнолія 2006», 2008. 278 с.
2. Пуховський Є.С. Проектування гнучких виробничих систем машинобудування: навч. посіб. Ч. 1. Київ: НТУУ «КПІ», 2017. 286 с.
3. Синеглазов В.М., Сергеев І.Ю. Автоматизація технологічних процесів: навч. посіб. Київ: НАУ, 2015. 444 с.
4. Стеценко І.В. Моделювання систем: навч. посіб. Черкаси: ЧДТУ, 2010. 399 с.
5. Бахрушин В.С. Математичні основи моделювання систем: навч. посіб. Запоріжжя: КПУ, 2009. 224 с.
6. Павленко П.М., Філоненко С. Ф., Чередніков О. М., Трейтяк В. В. Математичне моделювання систем і процесів: навч. посіб. Київ: НАУ, 2017. 392 с.

# Програмний аналіз пористих матеріалів

Денис Заякін, аспірант  
Олена Мікуліч, д.т.н., професор

Луцький національний технічний університет,  
вул. Львівська, 75, Луцьк, 43018, Україна  
[denis.zayakin@gmail.com](mailto:denis.zayakin@gmail.com), [shypra@ukr.net](mailto:shypra@ukr.net)

**Ключові слова:** пористі матеріали, програмне забезпечення, площа, аналіз, архітектура.

## 1 Вступ

У сучасній індустрії пористі матеріали знайшли значне застосування, оскільки їх специфічні властивості дозволяють вирішити різні важливі задачі у різних сферах, від будівництва до медицини. Експериментальні дослідження показують [1], що одним із ключових аспектів для даного класу матеріалів є визначення їх механічних, фізичних та інших характеристик, таких як пористість, структурна неоднорідність, що істотно впливають на поведінку цих матеріалів при експлуатації.

Не завжди є можливість проведення експериментальних досліджень у лабораторних умовах за використання спеціального обладнання, тому ця робота присвячена розробці програмного забезпечення, що дозволяло б на основі фотознімків структури матеріалу визначати його пористість та досліджувати структурну неоднорідність.

У роботі представлено дослідження можливостей ранньої версії програмного забезпечення, спрямованого на вирішення вище описаних завдань. Цей програмний продукт має потенціал для подальшого розвитку та розширення своїх функцій, що дозволить вдосконалити процес аналізу пористих матеріалів.

## 2 Опис програмного рішення

Програма для знаходження площі зображення по виділеній зоні розроблена на мові програмування Swift з використанням архітектурного патерну MVVM (Model-View-ViewModel). Цей патерн дозволяє чітко розділити логіку програми, графічний інтерфейс та управління даними, що сприяє покращенню розширюваності та підтримки програми.

Програма має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, який дозволяє користувачеві легко вибирати зону на зображенні, а також змінювати її

розмір. Наявність таких можливостей дозволяє точно визначити площу обраної зони та забезпечує зручність у користуванні програмою.

Розглянемо на вже існуючі можливості програми. Вибір зони на зображенні пористого пінобетону (рис. 1) дозволить визначити його пористість та властивості матеріалу.

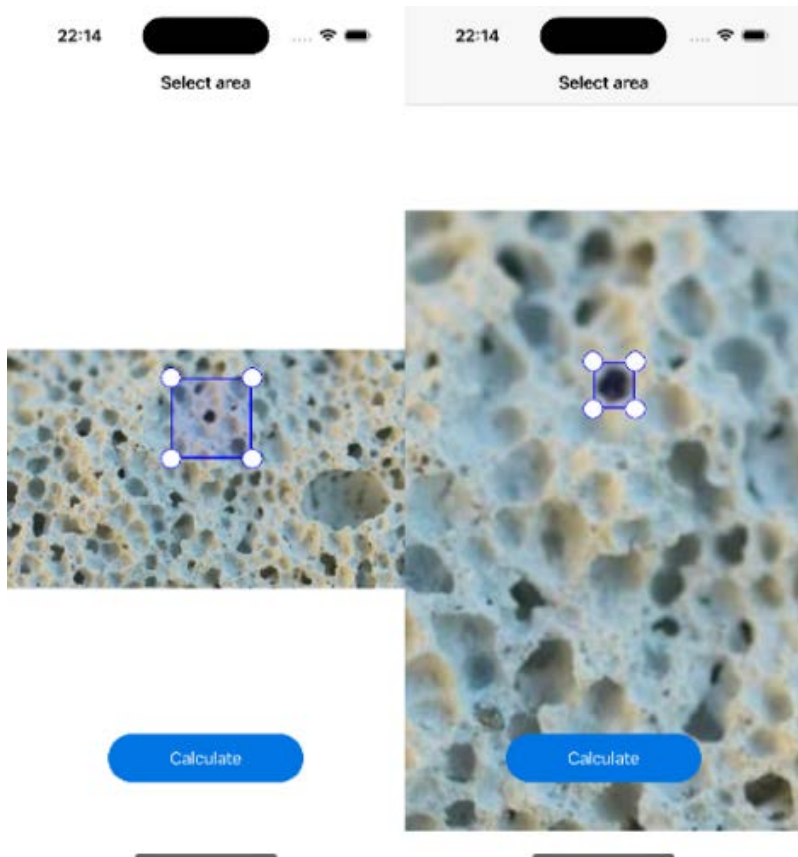


Рис. 9. Вибір зони

Можливість зміни розміру вибраної зони дозволить користувачеві точніше визначити площу, що досліджується.

Екран з розрахунком розміру всього зображення надасть користувачеві загальний огляд та контроль за обробкою даних.

Користуючись екраном з розрахунком вибраної зони (рис. 2), користувач може отримати детальну інформацію про площу обраної зони, що дозволяє більш точно аналізувати області зображення.

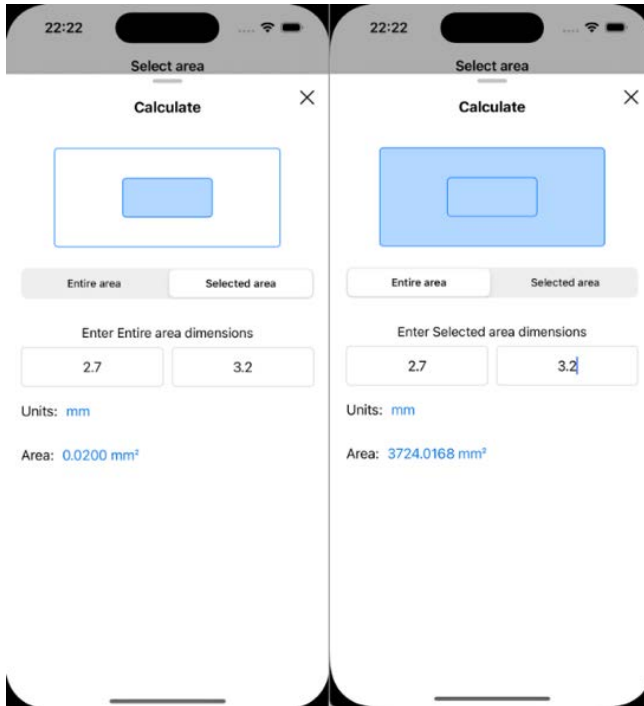


Рис. 2. Розрахунок площі

### 3 Методика розрахунку пористості

У літературі відомо декілька підходів для визначення пористості матеріалів у лабораторних умовах. В одному з них для визначення пористості необхідно мати знати справжню густину матеріалу зразка та власне густину пористого матеріалу [2]:

$$P = \left(1 - \frac{\rho_v}{\rho_t}\right) \cdot 100\%,$$

тут  $\rho_t$  — густина суцільного матеріалу зразка,  $\rho_v = \frac{m}{V}$  — густина пористого матеріалу,  $m$  та  $V$  — маса та об'єм зразка з порами.

Крім того, при визначенні пористості використовують величину відносної об'ємної частки  $V_V$  [2]:

$$P = (1 - V_V) \cdot 100\%,$$

де величина відносної об'ємної частки визначається як відношення об'єму матриці до загального об'єму зразка:

Обидва підходи дозволяють з достатньою точністю у лабораторних умовах визначити пористість матеріалу за використання спеціального обладнання.

Для розрахунку пористості матеріалів без використання лабораторних умов розроблене програмне забезпечення, яке дозволяє проводити аналіз на основі фотознімків структури матеріалу. При аналізі структури у цьому програмному продукті застосовується поєднання геометричних та статистичні підходів при розрахунку.

В додатку враховується ряд методів, які дозволяють визначити розмір пор у зображеннях. Рання версія додатку вже використовує деякі з цих методик, але планується їх оптимізація та подальше розширення: більше форм для вибору зони, визначення щільності пор, зберігання та експорт результатів, конвертація в інші величини.

## **4 Корисність програмного додатка**

Цей додаток виявиться надзвичайно корисним для архітекторів, інженерів та будівельників, які регулярно працюють з архітектурними об'єктами та матеріалами. Здійснення швидких та точних розрахунків площі за виділеною зоною спростить процес проектування та роботи з матеріалами, забезпечуючи ефективне використання ресурсів та високу якість результату.

## **5 Висновки**

Розроблена програма на основі мови програмування Swift та архітектурного патерну MVVM є потужним інструментом для аналізу архітектурних об'єктів та матеріалів. Її можливості знаходження площі за виділеною зоною разом із методиками розрахунку пористості роблять її незамінним помічником для фахівців у галузі архітектури та будівництва. Подальший розвиток та вдосконалення додатку враховуватимуть потреби користувачів і забезпечать його більшу ефективність та корисність.

## **Список посилань**

1. Wypych, G.: Handbook of Foaming and Blowing Agents; ChemTec Publishing: Toronto, ON, Canada, 2007.
2. Carolis, S., Putignano, C., Soria L., Carbonen G.: Effect of porosity and pore size distribution on elastic modulus of foams. International Journal of Mechanical Sciences, 261, 1, 2024, 108661.

# Предметна область і задачі прогнозування рядів динаміки при проектуванні металорізальних верстатів

Зубовецька Наталія Тарасівна, к.т.н., доцент

Луцький національний технічний університет,  
вул. Львівська, 75, Луцьк, 43018, Україна

**Ключові слова:** металорізальний верстат, прогнозування, метод екстраполяції

## 1 Вступ

Металорізальні верстати (МРВ) відносяться до систем, для яких характерна велика інертність (зміни в тенденції їх розвитку не можуть бути здійснені миттєво). МРВ є об'єктом, який описується як кількісними даними (числові значення техніко-економічних показників в ретроспективному періоді), так і не кількісними (описовою інформацією). Він є складним об'єктом, що потребує для свого опису врахування одночасного впливу декількох змінних, які є детермінованими і стохастичними параметрами, що характеризуються різною довжиною часового ряду (одне значення, короткий часовий ряд, довгий часовий ряд) [1].

Існує багато методів прогнозування, одним з яких є метод прямої екстраполяції. Використання методу прямої екстраполяції для прогнозування МРВ можливе за таких умов: закон (тенденція розвитку металорізального верстату), який знайдений на відомому проміжку часу, не зміниться і поза ним в певних межах; самі параметри якісно не змінюються.

## 2 Виклад основного матеріалу. Результати досліджень

Наочну область складає так зване технологічне прогнозування. Його необхідність зумовив стрімкий розвиток технологій, які постійно відбуваються у сучасній промисловості.

Технологічне прогнозування має значення в першу чергу для підготовки стратегії досліджень і розробок (стратегічного плану НДОКР). Технологічні прогнози знаходять свій вираз у рішеннях про те, на яких технологіях і якому устаткуванні повинна зосередитися фірма і від яких технологій відмовитися.

Технологічні прогнози знаходять своє застосування також у короткостроковому плануванні для оцінки використовуваної технології. Використовуючи технологічні прогнози, можна визначити можливості поточної технології, її використання, і необхідність в терміновій зміні технології.



Технічне прогнозування має найбільш важливе значення для фірм, які є технологічними лідерами в галузі і націлені на подальше зростання. Менш важлива участь в технологічному прогнозуванні для компаній, орієнтованих на виживання. Разом з тим виживання величезного числа сучасних українських верстатобудівних підприємств пов'язане в першу чергу з переорієнтацією виробництва і пристосуванням його до ринкового попиту. А така переорієнтація практично неможлива без технологічної перебудови, переходу до нових, прогресивних способів виробництва верстатів.

Результати технологічного прогнозування впливають на формування нових поглядів, загалом управлінському мисленні, надають поштовх на підготовку різних функціональних стратегій фірми, наприклад стратегії маркетингу. Це стратегія, що полягає в підготовці споживачів до майбутніх змін, ознайомленні і навчанні потенційних покупців нових верстатів.

Як показує досвід ринкової економіки [2], технологічне прогнозування найчастіше застосовується в комп'ютерній, телекомунікаційній, машинобудівній, нафтохімічній і транспортній галузях.

Технологічне прогнозування широко використовує методи, що склалися загалом в економічному прогнозуванні, особливо [3]:

- метод підготовки сценаріїв;
- метод Дельфі;
- методи екстраполяції трендів і деякі інші.

Разом з тим для технологічного прогнозування характерні деякі специфічні методи, серед них:

- морфологічний аналіз;
- аналіз перехресного впливу.

На схемі (рис. 1) представлено взаємозв'язок методів технологічного прогнозування і підготовки стратегічного плану підприємства.

Великою популярністю у фірм, що займаються технологічним прогнозуванням, користуються сценарії. Широко відомі сценарії, розроблені для фірм, що працюють в галузях:

- гена інженерія;
- системи телекомунікацій;
- машинобудування;
- техніка і технології для фармацевтичної промисловості і багато інших.

Другим напрямком і областю застосування прогнозування розвитку подій у часі є передбачення очікуваних результатів експериментів у динаміці металорізальних верстатів і устаткуванні. Достовірний прогноз при проведенні досліджень, що пов'язані з можливістю втрати вартісних зразків і оснастки, здатний зберегти багато часу і коштів для досягнення наукових результатів. Найбільш ефективними при цьому є методи екстраполяції трендів.

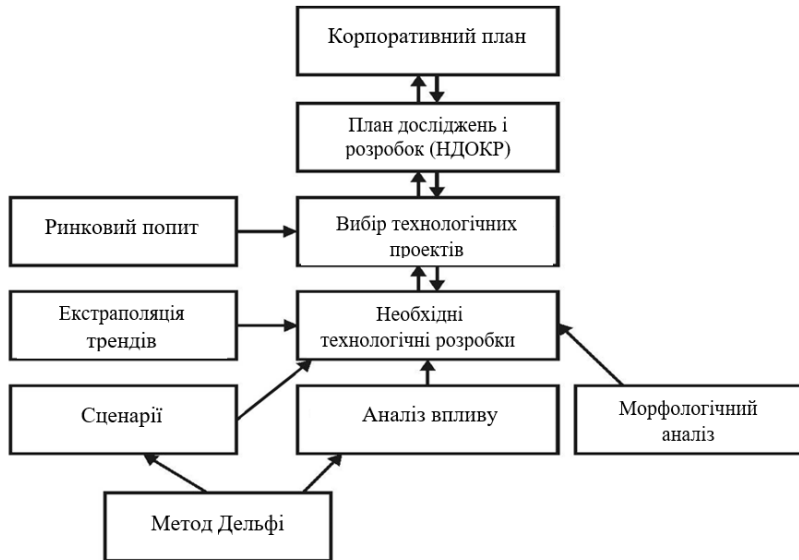


Рис. 1. Технологічне прогнозування і підготовка стратегічного плану

### 3 Висновки

Таким чином при прогнозуванні параметричної надійності МРВ важливим етапом є формування бази (банку) початкових даних, від якості яких залежить достовірність прогнозу. Існують достовірні математичні моделі і методики прогнозування (методом багатовимірної лінійної екстраполяції) розвитку і оцінки параметричної надійності МРВ, які можна автоматизувати.

### Список посилань

1. Четвержук Т.І., Полінкевич Р.М., Редько Р.Г., Залета О.М., Скляров Р.А., Статистичне моделювання технічних характеристик металорізальних верстатів. Міжвузівський збірник наукових праць «Наукові нотатки» за галузями знань «Фізикоматематичні науки» та «Технічні науки», Випуск 71, Луцьк, 2021, № 71. – 363 с. – С. 322-329.
2. Зубовецька Н.Т. Програма прогнозування і управління коінтегрованими динамічними економічними процесами на підставі кібернетичного підходу / Н.Т. Зубовецька, О.А. Бундак // Вісник Університету «Україна». Серія: Інформатика, обчислювальна техніка та кібернетика. – № 1 (22), 2019. – С. 295-305.
3. Кузнецов Ю.М., Скляров Р.А. Прогнозування розвитку технічних систем: Під ред. Ю.М. Кузнецова. — ТОВ «ЗПОК» — ПП «ГНОЗИС», 2004. — 323 с.

# **Формування з'єднань пресованих профілів із високоміцних алюмінієвих сплавів при контактному стиковому зварюванні оплавленням**

Зяхор Ігор, к.т.н., Гушин Костянтин, Шило Юрій, Левчук Андрій,  
Кольцов Владислав, Завертанний Мирослав

Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України,  
вул. Казимира Малевича, 11, Київ, 03150, Україна  
[zyakhor2@ukr.net](mailto:zyakhor2@ukr.net)

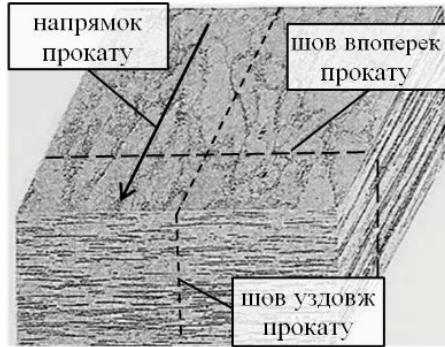
**Ключові слова:** алюмінієвий сплав, структурна неоднорідність, нагрів опором, оплавлення, зварне з'єднання.

## **1 Вступ**

Ефективною технологією виготовлення силових елементів літальних апаратів (стрингери, обичайки, шпангоути) з алюмінієвих сплавів є контактне стикове зварювання оплавленням (КСЗО) [1, 2]. Отримання якісних з'єднань із заданими властивостями залежить від багатьох чинників, зокрема структурної неоднорідності основного металу (ОМ) заготовок, термічного та деформаційного циклів зварювання. При КСЗО заготовок товщиною більше 12 мм необхідно виконувати попередній підігрів опором, що обумовлює суттєве збільшення енергоємності процесу зварювання та ширини зони термічного впливу (ЗТВ) з'єднань. В роботі досліджували формування з'єднань сплавів 2219 і 6061 при КСЗО, а також ефективність попереднього підігріву опором при використанні проміжної комбінованої вставки.

## **2 Результати досліджень**

При дослідженні структурної неоднорідності та дефектності основного металу пресованих профілів із алюмінієвих сплавів 2219 і 6061 визначали вплив цих факторів, а також параметрів попередньої термічної обробки пресованих профілів на механічні властивості ОМ та зварних з'єднань у різних напрямках (рис. 1). Оцінку анізотропії властивостей в різних напрямках (по довжині, ширині і товщині) виконували з використанням методу, що базується на використанні теорії ортогонального ізотропного тіла. Встановлено, що після зміцнюючої термічної обробки дисперсійно-зміцнених алюмінієвих сплавів анізотропія суттєво зростає. Зокрема, для штучно зістарених сплавів – особливо значна анізотропія межі текучості, а для штучно зістарених – анізотропія пластичності.



**Рис. 10.** Схема розташування ліній прокату у зразках сплаву 2219-T87 при КСЗО

Дослідженнями особливостей структурно-фазових перетворень основного металу у зоні термомеханічної впливу (ЗТМВ) при КСЗО сплавів 2219 і 6061 встановлено причини утворення у зоні з'єднання локальних зон пониженої в'язкості. Значна зміна текстури металу у площині з'єднання і ЗТМВ (рис. 2), переорієнтація скупчень надлишкових фаз ОМ є основними причинами зниження показників пластичності і в'язкості з'єднань.



**Рис. 2.** Структура з'єднання зразків сплаву 2219-T87 товщиною  $\delta = 15$  мм:  
а - шов впоперек прокату, б - шов уздовж прокату

Досліджували можливість підвищення ефективності попереднього підігріву опором при КСЗО алюмінієвих сплавів за рахунок інтенсифікації та локалізації процесу тепловиділення в зоні контакту заготовок. Запропоновано технологічну концепцію КСЗО з використанням комбінованої проміжної вставки із шарів матеріалів з високим електричним опором та високою теплопровідністю. Встановлено суттєве зростання градієнта температурного поля в деталях при нагріванні опором через комбіновану проміжну вставку, що підтверджує ефективність запропонованої технологічної концепції КСЗО. Встановлено, що при КСЗО з підігрівом опором через проміжну вставку забезпечується формування бездефектних зварних з'єднань.

### **3 Висновки**

1. Значна зміна текстури металу у зоні з'єднань сплавів 2219 і 6061 при КСЗО, переорієнтація скупчень надлишкових фаз ОМ у ЗТМВ є основними причинами зниження показників пластичності і в'язкості з'єднань.
2. Встановлено суттєве зростання градієнта температурного поля в деталях при нагріванні опором через проміжну вставку, що підтверджує ефективність запропонованої технологічної концепції КСЗО з використанням комбінованої проміжної вставки із шарів матеріалів з високим електричним опором та високою теплопровідністю.

### **Список посилань**

1. Кучук-Яценко, С.И. Особенности контактной стыковой сварки высокопрочного алюминиевого сплава 2219 [Текст] / С.И. Кучук-Яценко, П.Н. Четвертко, Л.А. Семенов, С.М. Самотрясов, К.В.Гущин // Автоматическая сварка. – 2010. – № 3. – С. 9 – 12.
2. Лобанов Л.М. Наука про матеріали: досягнення та перспективи. У 2-х т. Т.2 [Текст] / Л.М. Лобанов, С.И. Кучук-Яценко, К.В. Гущин – Київ: Академперіодика, 2018. – 395 с.
3. Гущин К.В., Зяхор І.В., Самотрясов С.М. та ін. (2022) Особливості попереднього нагріву опором при контактному стиковому зварюванні оплавленням товстостінних деталей з алюмінієвих сплавів. - Автоматичне зварювання, № 10, С. 22-28. <https://doi.org/10.37434/as2021.08.07>

## Вплив параметрів формування неперервних базальтових волокон на їх міцність

Іваницький С.Г., к.т.н.  
Чувашов Ю.М., к.х.н., с.н.с.

Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України,  
вул. Омеляна Прицака, 3, Київ, 03142, Україна  
svan7775@ukr.net

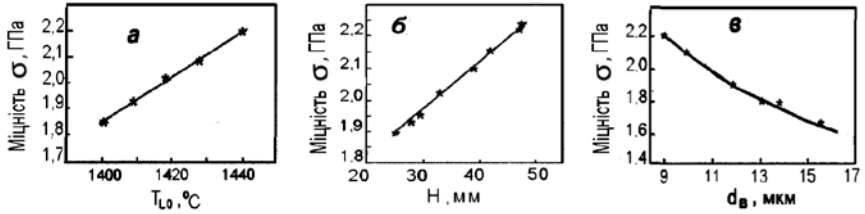
**Ключові слова:** міцність волокна, швидкість охолодження розплаву, область склування

В останній час велика увага приділяється до базальтових неперервних волокон (БНВ), які за комплексом фізико-хімічних показників перевершують аналогічні скловолкна. Це обумовлює перспективність широкого використання базальтоволокнистих виробів в різних галузях [1]. В композиційних матеріалах БНВ використовуються як армуючий компонент, що забезпечує їх високі механічні характеристики. Враховуючи це, проблема підвищення міцності БНВ, а відповідно і композитів на їх основі, є дуже важливою і актуальною [1-2].

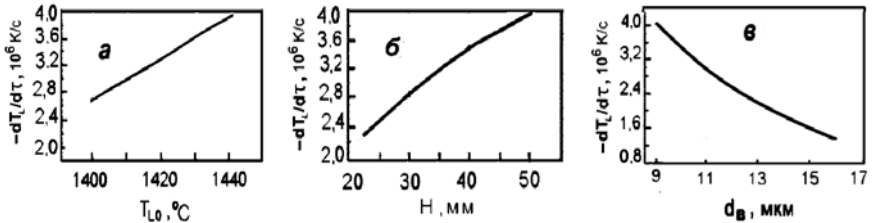
В [1-3] проаналізовано вплив різноманітних факторів на величину міцності базальтових волокон. Одними з головних впливів на цей важливий показник є умови та параметри процесу формування БНВ. Процес волокноутворення супроводжується складними фізико-хімічними явищами у розплаві, зокрема склуванням та кристалізацією. При високих швидкостях охолодження, завдяки різкому зростанню в'язкості базальтового розплаву відбувається перевага склоутворення над кристалізацією. Це дозволяє отримувати волокна з меншою кількістю дефектів і, відповідно, з високими характеристиками міцності.

Проведено комплексні дослідження. Експериментально визначено міцність волокон  $\sigma$ , отриманих на однофільєрному живильнику при різних умовах. Теоретичні дослідження впливу параметрів формування та розрахунки швидкості охолодження розплава виконувались з використанням математичного моделювання [3]. Область склування визначалась за допомогою методики, основи якої представлено в [4].

На рис. 1 представлено експериментальні дані міцності базальтових волокон, одержаних при різних параметрах формування. На рис. 2 показано розраховані швидкості охолодження в області склування в залежності від тих же параметрів.



**Рис. 1.** Залежності міцності базальтового волокна  $\sigma$  від параметрів формування:  
 а - температури вироблення  $T_{10}$  (при  $H = 50$  мм, діаметрі волокна  $d_g = 9$  мкм);  
 б - рівня розплаву  $H$  (при  $T_{10} = 1440^\circ\text{C}$ ,  $d_g = 9$  мкм);  
 в - діаметра волокна  $d_g$  (при  $T_{10} = 1440^\circ\text{C}$  та  $H = 50$  мм).



**Рис. 2.** Залежності швидкості охолодження  $-dT_l/dt$  в області склування від тих же параметрів формування волокон, відповідно, що і на рис. 1.

На основі порівняння наведених на рис. 1 та 2 даних слідуює, що при збільшенні температури вироблення  $T_{10}$  та рівня розплаву в живильнику  $H$  збільшується міцність волокна  $\sigma$  та швидкість охолодження розплаву  $-dT_l/dt$  в області склування.

Якщо врахувати, що при постійних значеннях температури вироблення  $T_{10}$  та рівня розплаву в живильнику  $H$  діаметр волокна  $d_g$  обернено пропорційний швидкості витягування волокон, міцність волокна на рис. 1-в та швидкість охолодження  $-dT_l/dt$  на рис. 2-в збільшуються при зниженні діаметра волокна  $d_g$  та, відповідно, при зростанні швидкості витягування.

Таким чином, з цього витікає, що в усьому інтервалі температур вироблення волокон, при різних значеннях рівня розплаву в живильнику та зміні швидкості витягування, збільшення швидкості охолодження в області склування сприяє підвищенню міцності волокон.

Результати проведених комплексних досліджень показали, що на показники міцності БНВ впливають умови та режими формування волокон. Властивості розплаву, в першу чергу в'язкість та кристалізаційна здатність,

які обумовлені хімічним складом базальту, визначають умови формування та інтервал вироблення волокон [3].

Величина міцності неперервного базальтового волокна пропорційна швидкості охолодження розплаву в області склування при отриманні волокон.

Для отримання волокон заданого діаметру з високою міцністю необхідно обирати режими з найбільшою температурою вироблення та при високих рівнях розплаву в живильнику. При цих умовах волокноутворення відбувається з високою швидкістю охолодження в зоні склування, що забезпечує мінімальну кількість дефектів в волокнах та їх високу міцність.

### **Список посилань.**

1. Цибуля Ю.Л. Високотемпературні фільтрувальні і композиційні матеріали на основі неперервних волокон з базальтових гірських порід: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.23.05. Київ, 2003. 24 с.
2. Gorbachev, G.F., Ivanitskii, S.G., Sergeev, V.P. (2001). Studying the thermophysical and mechanical properties of basalt fibers used as reinforcement of structural materials. *Promyshl. Teplotekhn.*, 23 (4-5), 146-148.
3. Иваницкий С.Г., Штерн М.Б., Чувашов Ю.Н. Влияние кристаллизационных свойств базальтовых расплавов при формировании непрерывных волокон на их прочностные характеристики. Наукові нотатки Луцького державного університету. Міжвузівський збірник. -ЛДТУ. -Луцьк. -2017. - Вип.58. с.174-178.
4. Ivanitskii, S.G. (2016). Estimation of the glass transition region of basalt melts during the drawing of continuous fibers. *Sovremennyye problemy fizicheskogo materialovedeniya*, 25, 151-156.



# Дослідження гідродинаміки фільтраційного сушіння бурякового жому

Олександр Івашук, Володимир Атаманюк, Роман Чижович

Національний університет “Львівська політехніка”,  
79013, Львів, Україна  
oleksandr.s.ivashchuk@lpnu.ua

**Ключові слова:** біомаса, буряковий жом, фільтраційне сушіння, гідродинаміка, CFD.

## 1 Вступ

Вторинне використання рослинної біомаси є одним з важливих напрямків досліджень, спрямованих не тільки на пошук нових способів її застосування, але й на вдосконалення та оптимізацію існуючих. Одним з рослинних відходів є буряковий жом, який є побічним продуктом промислового виробництва цукру. Цей матеріал характеризується високим вмістом вологи (~85% мас.) і потребує попереднього осушення для збільшення терміну зберігання та вторинного використання [1].

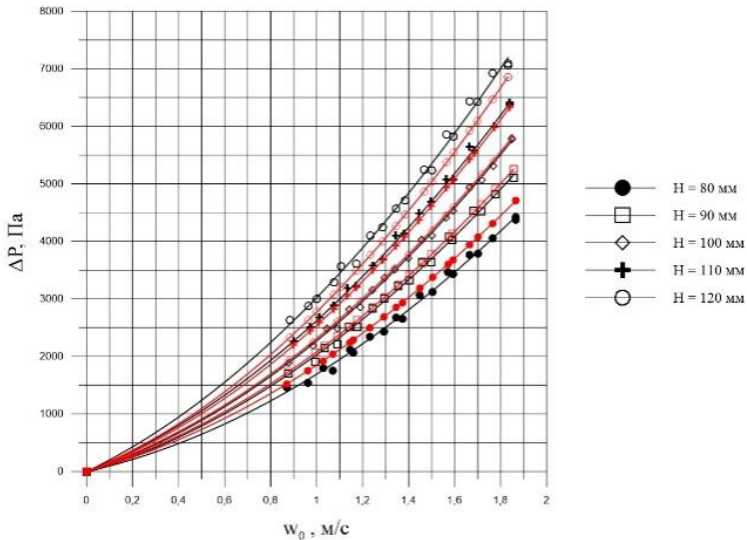
## 2 Експериментальна частина

Для визначення оптимальних параметрів сушіння важливим є вивчення гідродинаміки руху теплового агенту через дисперсний шар осушеного бурякового жому. Досліджено вплив фіктивної швидкості  $w_0$  теплового агенту на опір досліджуваного матеріалу  $\Delta P$  за промислово доцільних висот шару  $H = 80 \div 120$  мм [2]. На основі отриманих експериментальних даних гідродинаміки руху теплового агенту через стаціонарний шар дисперсного матеріалу визначено коефіцієнти в'язкого  $1/\alpha$  та інерційного  $C_2$  опорів, які використано для проведення комп'ютерного моделювання досліджуваного процесу в програмному пакеті ANSYS Fluent 2022 R2, за методикою [3].

## 3 Результати

Отримані результати моделювання було порівняно із попередньо отриманими експериментальним шляхом у вигляді графічних залежностей зображених на рис. 1. Усереднене значення відносної похибки за усіма експериментальними точками становить 4,09 %. Досліджено, що зменшення

кроку висот до 5 мм у досліджуваному проміжку  $H = 90 \div 110$  мм призводить до зменшення значення похибки до 2,19 %.



**Рис. 1.** Графічне порівняння отриманих значень моделювання (— червоні лінії) гідравлічного опору з експериментальними (— чорні лінії) ( $T = 19$  °C,  $H = 80 \div 120$  мм,  $w_0 = 0,86 \div 1,86$  м/с).

## Список посилань

1. Marzo, C., Díaz, A. B., Caro, I., Blandino, A. Status and perspectives in bioethanol production from Sugar Beet. *Bioethanol Production from Food Crops*, 61–79 (2019). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813766-6.00004-7>
2. Ivashchuk, O., Atamanyuk, V., Chyzhovych, R., Manastyrska, V., Barabakh, S., Hnativ, Z. Kinetic regularities of the filtration drying of Barley Brewer’s spent grain. *Chemistry & Chemical Technology*, 18(1), 66–75 (2024). <https://doi.org/10.23939/chcht18.01.066>
3. Ivashchuk, O., Chyzhovych, R., Atamanyuk, V. Simulation of the thermal agent movement hydrodynamics through the stationary layer of the alcohol distillery stillage. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9, 100566 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100566>

## **Технологічні можливості отримання високих службових властивостей мідних зварних з'єднань при виготовленні та ремонті вузлів і конструкцій відповідального призначення**

Ілюшенко В.М., канд. техн. наук, ст. наук. співр.  
Лук'янченко Є.П., наук. співр.  
Степченко Д.М., зав. групи  
Бондаренко А.М., зав. групи

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,  
вул. Казимира Малевича, 11, Київ, 03150, Україна  
rwi\_37@ukr.net

**Ключові слова:** мідь, зварні з'єднання, зварювальні дроти, електро-, теплопровідність.

Завдяки особливим технічним властивостям, високій електро- і теплопровідності, високим показникам пластичності, міцності та корозійній стійкості, мідь широко використовується в різних галузях промисловості та будівництва. Як конструкційний матеріал для зварних металоконструкцій найбільше застосування мідь знаходить в хімічному та енергетичному машинобудуванні, а також в металургійній промисловості при виготовленні різного роду енергетичних агрегатів та теплообмінних апаратів.

Слід зазначити, що сучасні методи зварювання завдяки застосуванню науково обґрунтованих технологічних та металургійних прийомів гарантують отримання якісних зварних швів за такими показниками як міцність та щільність. В той же час, вимога необхідності забезпечення високої тепло- та електропровідності зварних з'єднань потребує особливого підходу до вибору як методу зварювання, так і в першу чергу зварювальних матеріалів, які суттєво впливають на теплофізичні властивості міді.

Проведені експериментальні дослідження показали, що кращі результати за фізичними властивостями мідних зварних швів отримуються при зварюванні під флюсом електродними дротами із міді М1 або М0. Враховуючи, що в практиці зварювального виробництва автоматичне зварювання під флюсом знаходить обмежене застосування, а в основному використовуються процеси зварювання в захисних газах, приведено аналіз новітніх розробок в галузі мідних зварювальних матеріалів для процесів TIG та MIG/MAG.

Показано, що дроти серійного виробництва марок МНЖКТ 5-1-0,2-0,2 та БрКМц 3-1 надмірно легують метал шва і тим самим не забезпечують необхідних теплофізичних властивостей зварних з'єднань ( $\leq 30-35\%$  від міді).

Для зварювання в захисних газах як плавким так і неплавким електродами інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона в співпраці з рядом інших організацій розроблені спеціальні низьколеговані зварювальні дроти марок СвМЛЮ,2; СвМЛХМг; СвМЛАКБ; СвМЛМГБ; СвМБМг [1,2].

Введення в склад дротів таких ефективних розкислювачів як бор, літій, магній та ін. в незначній кількості (десяті долі відсотків) забезпечує необхідні зварювально-технологічні властивості дротів та високі показники електро- та теплопровідності виконаних ними зварних з'єднань ( $\geq 85-95\%$ ).

В зв'язку зі складністю виготовлення дротів суцільного перерізу (плавлення в вакуумних печах, складний цикл прокатки та волочіння до малого діаметру) більш доступним присадним матеріалом для TIG-процесу є метало-порошковий дріт марки МПДАНМ-1 (ТУ ІЕЗ).

Розроблені технології зварювання та наплавлення міді із застосуванням приведених зварювальних матеріалів дають можливість суттєво поліпшити якість зварних швів, забезпечити необхідний рівень їх службових властивостей. Розроблений метало-порошковий дріт пройшов промислово перевірку при виготовленні та ремонті зварних вузлів та конструкцій в електротехнічній та металургійній промисловості виготовлених з міді.

## **Список посилань**

1. Люшенко В.М., Лук'яненко Є.П. Зварювання і наплавлення міді і мідних сплавів. Київ.: Міжнародна асоціація «Зварювання», 2013. 396 с.
2. Люшенко В.М., Аношин В.О., Майданчук Т.Б., Лук'яненко Є.П. Ефективність застосування нових зварювальних матеріалів при зварюванні та наплавленні міді і її сплавів (обзор). Автоматичне зварювання. № 6-7, 2014, с. 83-86.

# Перспективність застосування ПЕО покриттів в різних галузях промисловості

Наталія Імбірович, к.т.н., доцент  
Олександр Повстяной, д.т.н., професор  
Валентина Ткачук, д.т.н., професор  
Інна Боярська, к.т.н., доцент

Луцький національний технічний університет,  
вул. Львівська, 75, Луцьк, 43018, Україна  
n.imbirovych@lntu.edu.ua

**Ключові слова:** захисні покриття, оксидні фази, біосумісність, зносостійкість, корозійна стійкість, пористість.

## 1 Вступ

Розвиток сучасної промисловості направлений на розробку нових технологій синтезу біоматеріалів. Одним із найбільш перспективних підходів у сучасному матеріалознавстві є модифікування поверхні функціональних матеріалів з метою надання їм нового комплексу фізико-механічних та хімічних властивостей. Широко використовуваним матеріалом в промисловості є титан та його сплави через його здатність утворювати на поверхні за нормальних умов захисну плівку. Проте, титан хімічно дуже активний і тому має здатність забезпечувати лише корозійну стійкість в агресивних середовищах, так як механічні властивості природної оксидної плівки не високі і під дією навантаження вона легко руйнується. В результаті контактна поверхня реагує з корозійним середовищем і призводить до передчасного виходу з ладу деталей, виготовлених з таких матеріалів. Тому актуальним завданням є пошук та застосування поверхневих методів обробки деталей, які б підвищили основні фізико-механічні та корозійностійкі властивості титанових сплавів.

Перспективними для експлуатаційного захисту металів є керамікоподібні структури, які утворюють покриття, отримані синтезом у електролітній плазмі іскрових розрядів. Технологія нанесення таких покриттів має назву плазмоелектролітне оксидування (ПЕО) та є новою технологією інтенсивної анодної обробки металів [1].

## 2 Методологія нанесення покриттів

Основним обладнанням для ПЕО є установка ІМПЕЛОМ, яка складається з джерела живлення та електролітної ванни (див. рис. 1).



**Рис. 1.** Установка для синтезу покриттів методом ПЕО (ІМПЕЛІОМ-1):  
1 - силовий блок; 2 - електролітна ванна; 3 - холодильне устаткування

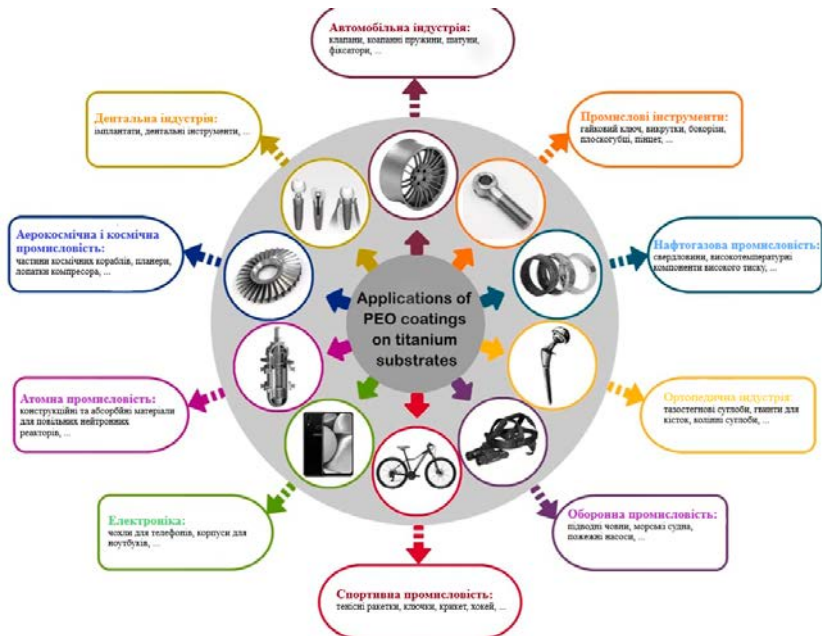
Зразок слугує анодом, а електролітна ванна – катодом. Густина струму становила  $10...30 \text{ A/дм}^2$ , а співвідношення катодного до анодного струмів змінювалось у діапазоні від 1 до 2. За допомогою вольтметрів і амперметрів реєстрували залежність у часі амплітудних значень анодної ( $U_a$ ) і катодної ( $U_k$ ) напруги і значення струмів.

Для нанесення покриття зразок, занурений в електролітне середовище на глибину  $30...50 \text{ мм}$ , під'єднують до джерела струму. Основні параметри процесу ПЕО: густина струмів, час синтезу та склад електроліту. Густина струму – це основний параметр, який потрібно контролювати в процесі плазмоелектролітного оксидування.

### **3 Результати і обговорення**

Перспективи використання плазмоелектролітного оксидування в низці галузей є обіцяючими через його унікальні властивості та переваги. В даний час плазмові електролітичні технології, як прогрес традиційного анодування до вищих напруг, дозволяють синтезувати на поверхні металів оксидних керамічних покриттів для вирішення зростаючого попиту на стійкість до корозії та ерозії, біосумісність та інші бажані властивості поверхні [2]. На рис. 2 показано застосування ПЕО покриттів на титанових підкладках у різних галузях промисловості.

Плазмоелектролітне оксидування, відоме також як мікродугове оксидування (МДО) поширюється на всі вентильні метали, а останнім часом і на деякі інші метали та їх сплави [3].



**Рис. 2.** Застосування ПЕО покриттів на титанових підкладках у різних галузях промисловості

Технології ПЕО дають змогу підвищувати зносостійкість деталей в  $\approx 6$  разів, корозійну стійкість на 3 порядки, ефективно для машинобудування, так як підвищує термін експлуатації деталей. Завдяки зміні робочих параметрів виявляється можливим регулювати розмір та кількість пор, змінювати хімічний склад покриття, що дає змогу впливати на біосумісність синтезованого матеріалу.

## Список посилань

1. N. Xiang, R.G. Song, B. Xiang, H. Li, Z.X. Wang, C. Wang, A study on photocatalytic activity of micro-arc oxidation TiO<sub>2</sub> films and Ag /MAO-TiO<sub>2</sub> composite films, Appl. Surf. Sci. 347 (2015) 454–460.
2. H. Fakhr Nabavi, M. Aliofkhaezraei, Morphology, composition and electrochemical properties of bioactive-TiO<sub>2</sub>/HA on cp-Ti and Ti6Al4V substrates fabricated by alkali treatment of hybrid plasma electrolytic oxidation process (estimation of porosity from EIS results), Surf. Coat. Technol. 375 (2019) 266–291.
3. P. Pesode, S. Barve, Surface modification of titanium and titanium alloy by plasma electrolytic oxidation process for biomedical applications: a review, Mater. Today: Proc. (2020).

## Самонавчальна система для автоматизованого визначення енергоефективних режимів токарної обробки на важких верстатах

Володимир Калініченко, кандидат технічних наук, доцент  
Максим Мельник, кандидат технічних наук, доцент

Донбаська державна машинобудівна академія,  
вул. Академічна, 72, м. Краматорськ, 84313, Україна,  
вул. Руська, 56, м. Тернопіль, 46001, Україна  
kww\_74-5@i.ua

**Ключові слова:** токарна обробка, важкі верстати, енергоефективні режими токарної обробки, діагностика, самонавчальна система.

Гострота проблеми підвищення енергоефективності високоенерговитратних процесів токарної обробки на важких верстатах зумовлює актуальність розробки методів та систем автоматизованого визначення енергоефективних режимів (ЕЕР) такої обробки. Моделі для автоматизованого розрахунку ЕЕР мають будуватися на використанні критеріїв оптимізації, пов'язаних з величиною енерговитрат при різанні. Такі енергетичні критерії оптимізації представлені, зокрема, у роботах [1–3]. Специфічною особливістю токарної обробки на важких верстатах є суттєва відмінність реальних умов обробки від нормативних, що зумовлено слабопрогнозованим впливом значної кількості чинників на процес різання (ПР). Для зазначених процесів токарної обробки часто відсутні нормативні дані, необхідні для розрахунку ЕЕР. Тому при визначенні ЕЕР токарної обробки на важких верстатах мають враховуватися результати аналізу об'єктивних даних діагностики ПР.

Авторами у [4] обґрунтовані принципові підходи до вирішення задачі автоматизованого визначення ЕЕР токарної обробки на важких верстатах за результатами аналізу даних діагностики ПР. Послідовність визначення ЕЕР має передбачати автоматизований розрахунок режимів за формулами моделі оптимізації ПР за критерієм мінімальних питомих енерговитрат у зоні різання, аналіз даних діагностики реальних ПР та подальшу корекцію розрахункових формул для визначення ЕЕР за результатами цього аналізу.

Цільова функція запропонованої у [4] оптимізаційної моделі (ОМ) має загальний вигляд:  $e = \min\{f(x, \omega) | x \in D\}$ , де  $e$  – питома енергомісткість різання;  $x, \omega$  – відповідно керовані та постійні вхідні параметри ОМ;  $D$  – область припустимих значень керованих параметрів ОМ. У якості керованих параметрів ОМ визначено частоту  $n$  обертання шпинделю верстата та подачу  $S$ , що задаються програмою ЧПК; інші параметри ПР враховуються як вхідні

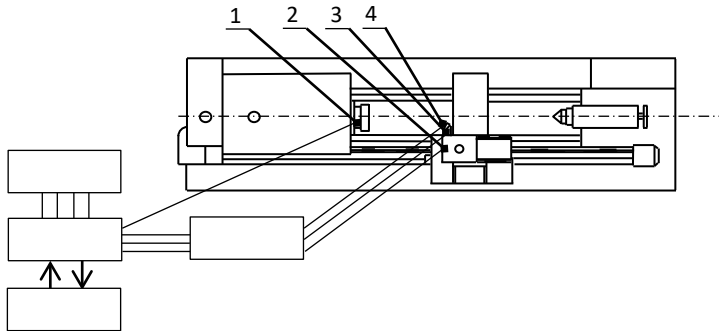


та приймають фіксовані значення для  $i$ -го випадку обробки. Область  $D$  визначають обмеженнями за стійкістю різця та міцністю різальної пластини.

При розробці виразів ОМ та формул для розрахунку енергоєфективних значень подачі  $S_e$  та частоти  $n_e$  обертання шпинделю використовуються коефіцієнти та показники ступеня у ступеневих залежностях  $P_z = f(v, S, t)$  та  $v = f(T, S, t)$ , де  $P_z$  – тангенціальна сила різання,  $v$  – швидкість різання;  $t$  – глибина різання;  $T$  – період стійкості різця. Розрахункові алгоритми ОМ дозволяють вирахувати значення  $S_e$  та  $n_e$ .

Успішна реалізація ОМ потребує точних даних про реальні значення  $n$  та  $P_z$ . Втім, вплив динамічних процесів у зоні обробки спричиняє відмінність реальних  $n$  та  $P_z$  від розрахункових. Реальні значення  $n$  та  $P_z$  визначаються під час діагностики ПР. Для кожного  $i$ -го випадку обробки  $P_z$  визначають як суму постійної складової  $P_{z_{\text{пост}_i}}$  та змінної складової  $P_{z_{\text{зм}_i}}$ , залежної від амплітуди  $A_{a_i}$  віброприскорення вершини різця [4]. Аналіз даних діагностики ПР передбачає отримання регресійних залежностей функцій відгуку  $\ln P_z$  та  $\ln v$  від режимів різання та інших вхідних параметрів ОМ для вибірки з  $N$  діагностованих випадків обробки з наступним уточненням значень коефіцієнтів та показників ступеня у залежностях  $P_z = f(v, S, t)$  та  $v = f(T, S, t)$  і відповідною корекцією формул для визначення  $S_e$  та  $n_e$ .

З метою реалізації наведеної послідовності дій авторами у роботі [4] запропонована самонавчальна система (СНС) для автоматизованого визначення ЕЕР токарної обробки на важких верстатах з ЧПК. Функціональна схема СНС наведена на рис. 1. До пам'яті обчислювального пристрою (ОП) СНС за допомогою панелі оператора (ПО) вводять передбачені алгоритмом ОМ формули для розрахунку  $S_e$  та  $n_e$  та значення необхідних вхідних параметрів ОМ. Коефіцієнти та показники ступеня у використовуваних ступеневих залежностях  $P_z = f(v, S, t)$  та  $v = f(T, S, t)$  визначаються за даними бази знань (БЗ) СНС і теж вводяться до ОП СНС. Збирання даних діагностики ПР забезпечується діагностичними засобами СНС. Для кожного  $i$ -го випадку обробки контроль реальної частоти  $n_i$  обертання шпинделю здійснює інкрементальний енкадер 1; вимірювання  $P_{z_{\text{пост}_i}}$  – тензометричний динамометр 2; контроль  $A_{a_i}$  – датчик віброприскорення 3. За відсутності рекомендацій нормативів режимів різання при розробці формул ОМ можуть бути використані залежності  $P_z = f(v, S, t)$  та  $v = f(T, S, t)$ , отримані для умов обробки, що відповідають оптимальній температурі  $\Theta_{\text{різ}_{\text{опт}}}$  різання. Тому СНС передбачає контроль температури  $\Theta_{\text{різ}_i}$  різання для  $i$ -го випадку обробки природньою термопарою 4 з можливістю обробки результатів діагностики температурних параметрів ПР у ОП СНС. Діагностичний сигнал цифрового формату від інкрементального енодера 1 передається до ОП СНС безпосередньо; інші (аналогові) сигнали – після перетворення їх аналогово-цифровим перетворювачем (АЦП) на цифрові.



**Рис. 1.** Функціональна схема самонавчальної системи [4]  
 (ОП СНС – обчислювальний пристрій самонавчальної системи; ПЧПК – пристрій числового програмного керування; ПО – панель оператора; АЦП – аналогово-цифровий перетворювач; 1 – інкрементальний енкодер; 2 – тензометричний динамометр; 3 – датчик віброприскорення; 4 – природня термопара)

Очікуваним ефектом від впровадження СНС є: підвищення рівня автоматизації керування верстатом та надійності технологічної системи за рахунок впровадження сучасних засобів діагностики ПР та автоматизованого розрахунку ЕЕР обробки; зниження трудомісткості технологічної підготовки виробництва за рахунок автоматизації процедур визначення ЕЕР; створення можливості проведення досліджень енергоефективності обробки у режимі реальної виробничої ситуації з поступовим накопиченням БЗ про обробку.

## Список посилань

1. Яровой, Ю. В. Обоснование технологического процесса механической обработки на основе энергетических критериев: дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Ю. В. Яровой; Одесский нац. политехнический университет. – Одесса, 2014. – 192 с.
2. Yarovyı, Y., Yarova, I. (2020). Energy Criterion for Metal Machining Methods. In: Ivanov, V. et al. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. – pp. 378–387. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6\\_38](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_38).
3. Schudeleit, T., Züst, S., Wegener, K.: Methods for evaluation of energy efficiency of machine tools. *Energy* 93, 1964–1970 (2015).
4. Калініченко, В. В. Автоматизоване визначення енергоефективних режимів токарної обробки на важких верстатах за результатами аналізу даних діагностики процесу різання / В. В. Калініченко, М. С. Мельник // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник наукових праць (за галузями знань «Фізико-математичні науки» та «Технічні науки»). – Луцьк: Луцький національний технічний університет, 2023. – Випуск 76. – С. 108–117.

# Визначення відносної площі віброобкочування при формуванні регулярного мікрорельєфу на плоских поверхнях

Назар Кашуба, Роман Ділай

Відокремлений структурний підрозділ «Тернопільський фаховий коледж»  
Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя,  
вул. генерала Мирона Тарнавського, 7, Тернопіль, 46004, Україна  
nazaryxa9@gmail.com

**Ключові слова:** віброобкочування, регулярний мікрорельєф, відносна площа, еквідистанта.

## 1 Актуальність дослідження

Одним із методів підвищення експлуатаційних властивостей деталей машин, якості їх контактуючих поверхонь, шорсткості, твердості, зносостійкості є створення віброобкочуванням на цих поверхнях тертя регулярного мікрорельєфа. Серед найголовніших критеріїв регулярного мікрорельєфу, який забезпечує підвищення зносостійкості контактуючої поверхні є ступінь перекриття, що визначається відносною площею віброобкочування, визначення та дослідження впливу різних чинників віброобкочування на яку є актуальною задачею.

## 2 Аналіз літературних джерел

Проаналізовані наукові дослідження присвячені процесу формування регулярних мікрорельєфів методом віброобкочування на робочих поверхнях деталей машин [1], зокрема питанню визначення відносної площі віброобкочування  $F_g$  і її впливу на якісні показники цих поверхонь, а саме зносостійкість.

У відповідності до проаналізованих досліджень відзначено, що із різних математичних моделей і підходів розрахунку  $F_g$  найбільше використання отримала модель, яка передбачає наступні допущення: величиною напливів на краях канавок нехтують; спотворення форми і розмірів канавки, пов'язані з відпружинюванням оброблюваного металу не враховують; проекція відпечатка при проникненні деформуючого елемента кульки близька до круга.

### 3 Результати дослідження

Нами встановлено, що у випадку, коли канавку подають у вигляді кривої виду  $y_{1,2} = kx \pm r$ , де  $r$  - половина ширини канавки, площа канавки значно відрізняється від площі канавки сформованої еквідистантами,  $k$  - кутовий коефіцієнт зигзагоподібної траєкторії центра кульки, яка описується рівнянням  $y = f(x) = kx$ .

Аналіз існуючих даних показав, що на даний час не існує одностайної думки про вплив відносної площі віброобробочування  $F_g$  на зносостійкість віброобробочених поверхонь.

Тому висвітлення питання, щодо визначення відносної площі віброобробочування для різних типів регулярних і частково регулярних мікрорельєфів [1] є актуальною задачею.

Запропонований метод для отримання залежностей для опису верхньої і нижньої еквідистант, суть якого у наступному.

Використавши умову перпендикулярності  $k_1 \cdot k_2 = -1$ , де  $k_2$  - кутовий коефіцієнт прямої перпендикулярної до дотичної кутового коефіцієнту зигзагоподібної траєкторії центра кульки і відклавши на цій прямій відрізки величиною, яка дорівнює половині ширини канавки -  $r$ , отримаємо точки, яка належать еквідистантам.

Відносна площа віброобробочування на одному кроку  $t_k = S/n$ , де  $S$  - поздовжня подача (мм/хв),  $n$  - частота осциляцій (об/хв),  $t_k$  - крок проекції траєкторії центру кульки (мм) синусоїди виразиться залежністю

$$F_g = \frac{F_k}{t_k \cdot (A + 2 \cdot r)} \cdot 100\% .$$

Отримана залежність для визначення  $F_g$  може

бути використана для встановлення елементів режиму віброобробочування і аналізу їх впливу на величину  $F_g$ .

На основі запропонованої методики буде досліджено вплив елементів віброобробочування на відносну площу віброобробоченої поверхні для інших типів регулярних мікрорельєфів.

### Список посилань

1. Кривий П.Д. До питання визначення відносної площі віброобробочування на плоских поверхнях при формуванні синусоїдального типу мікрорельєфу / Кривий П.Д., Кашуба Н.П., Михайлишин М.С., Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя, 2012-с.95.

## «Чорна скринька» від автовиробників

Володимир Кищун, к. е. н., доцент

Луцький національний технічний університет,  
вул. Львівська, 75, Луцьк, 43018, Україна  
[kyschun52@ukr.net](mailto:kyschun52@ukr.net)

**Ключові слова:** OICA, автомобіль, конструкційна безпека, обов'язкова система безпеки, реєстратор даних про аварії, дефайн впровадження систем.

### 1 Вступ

Міжнародна організація виробників автомобілів OICA ([фр.](#) Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles) заснована в 1919 році є всесвітнім об'єднанням 38 національних асоціацій автомобільної промисловості. Вона координує взаємодію між виробниками, а також низкою міжнародних автосалонів. Через асоціації OICA представляє майже всіх автовиробників у світі (від України Укравтопром) та є офіційно акредитованим їх представником в Організації Об'єднаних Націй. Організація бере активну участь у роботі Всесвітнього Форуму ЄЕК ООН щодо погодження правил у галузі транспортних засобів (WP.29) та його різних робочих груп [1].

Глобальна автомобільна промисловість, яку представляє OICA, турбується про підвищення безпеки дорожнього руху (БДР) у світі. Натомість, дорожня безпека є складним явищем, «міксом» різних факторів і зацікавлених сторін, які взаємодіють між собою. Тому OICA застерігає, що не може безпосередньо впливати на всі параметри, залучені до безпеки руху, а її пряма відповідальність обмежується лише конструкційною безпекою транспортних засобів.

Засвідчивши цей факт, OICA опублікувала меморандум з нагоди 2-ї Глобальної конференції високого рівня з дорожньої безпеки [1]. У цьому документі OICA закликала уряди країн світу надати автовиробникам рівні конкурентні умови шляхом встановлення обов'язкових мінімальних вимог до показників безпеки для нових автомобілів, що продаються на їх території.

### 2 Результати досліджень

Конструкція автомобілів, що знаходяться в експлуатації, є одним з важливих факторів БДР. Сучасні автомобілі набагато безпечніші за випущені раніше. У схожих аварійних умовах водій, пасажир, інші учасники дорожнього руху значно ефективніше захищені сучасними автомобілями порівняно із старішими моделями.

Це поліпшення зобов'язане різним інноваційними технологіями, які призвели до змін конструкції – від структури автомобіля загалом до специфічних систем захисту водія та пасажирів. Сучасні автомобілі не тільки мають набагато кращі характеристики безпеки у разі аварії, вони також суттєво краще оснащені для того, щоб взагалі уникнути аварії. Завдяки досягненням технології запобігання зіткнень зростає здатність автомобілів ефективно гальмувати, зберігати рядність руху та забезпечувати якісне освітлення дорожнього полотна, що допомагає знизити ризик аварії.

OICA вважає, що прямою відповідальністю автовиробників є забезпечення належної конструкції та технічних характеристик автомобілів, тому організація наголошує на необхідності встановлення відповідного законодавства у тих регіонах, де таке законодавство ще не впроваджене або потребує удосконалення. OICA також висунуло свої пропозиції та рекомендації урядам різних країн щодо типу законодавства, яке мало би бути прийняте, а також окреслило часові рамки з урахуванням технічних, комерційних чи інших стримуючих факторів, які треба взяти до уваги.

Одним із перших відгукнувся Європейський парламент, який у 2019 році затвердив список з 11 обов'язкових систем безпеки для нових автомобілів. Починаючи з 2021 року (за іншими даними – з 2022), необхідно було впровадити: системи автономного екстреного гальмування і утримання рядності руху, систему моніторингу втоми та сонливості водія, систему антиалкогольного блокування, автоматичний сигнал аварійної зупинки, інтелектуальну систему підтримки швидкості (круїз-контроль), камеру заднього виду або парктронік, захист водія та пасажирів від бокового удару та збільшення зони безпеки при ударі головою пішохода/велосипедиста [2].

Застосування цих систем допомогло б врятувати більше 7 тисяч життів та запобігти майже 39 тисячам серйозних травм на дорогах упродовж наступних дев'яти років після початку дії закону. Зокрема, тільки система автоматичного екстреного гальмування сприяла б зниженню кількості аварій на 38%. А від обов'язкового оснащення автомобілів камерами заднього виду очікують збереження мінімум 100 людських життів щорічно [2].

У переліку 11 систем передбачався також реєстратор даних про аварії (Event accident data recorder) – своєрідна «чорна скринька». Згідно з відповідним регламентом Європейської комісії, він мав стати обов'язковим вже з 6 липня 2022 року для усіх нових моделей авто, що проходять процедуру реєстрації. На разі триває так званий перехідний період. Однак з липня 2024 року кожен легковий автомобіль класу M1, що вміщає до восьми пасажирів, а також комерційний класу N1, зокрема пікапи та фургони з масою не більше 3500 кг, вироблені в Європейському Союзі, мають бути обов'язково оснащені такими реєстраторами [3].

Перелік даних, що фіксуватимуть пристрої, регулюється спеціальними правилами і містить 15 позицій:

- швидкість;

- ступінь відкриття дросельної заслінки;
- обороти двигуна;
- використання системи ABS;
- кут нахилу автомобіля;
- робота системи стабілізації колії;
- активація подушки безпеки;
- положення передніх сидінь;
- ступінь використання гальма;
- положення керма;
- стан використання ременів безпеки;
- робочий стан круїз-контролю;
- зміни поздовжньої та поперечної швидкості;
- індикатор стану системи вимірювання тиску в шинах;
- стан активних систем допомоги водієві [4].

Запис даних починається тільки за 5 секунд до можливої дорожньо-транспортної пригоди чи події і закінчується через 0,3 секунди після неї. Результати передаються лише компетентним органам для встановлення причини інциденту, що унеможливорює ризик доступу до них стороннім особам. Системи збору і зберігання даних вбудована у блок керування подушками безпеки і не може бути вимкнена. Реєстратор автоматично активується при спрацюванні подушок безпеки та переднатягувачів ременів безпеки.

За оцінками експертів Євросоюзу, встановлення електронних систем безпеки, та наявність «чорної скриньки», вартість якої складає близько 70...80 євро, впродовж 15 років врятує життя до 25 тис. людей [4].

Безперечно, збільшення рівня обов'язкового оснащення призведе до зростання цін базових моделей. Однак частина названих систем вже зараз входить у «бюджетну» специфікацію багатьох моделей, а інші системи активно розробляються та удосконалюються. Тому збільшення вартості автомобілів передбачається не суттєвим.

## **Список посилань**

1. OICA manifesto on global road safety-final-2019-10-28. URL: <https://www.oica.net/oica-manifesto-on-global-road-safety-final-2019-10-18/>.
2. Кишун В.А. Від систем допомоги водію до автопілотів. Тези XV міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту» 24-26 жовтня 2022 року. – Житомир: Житомирська політехніка, 2022. – С. 59–61.
3. Aleksandr V.B Європі нові автомобілі почнуть оснащувати «чорними ящиками». URL: <https://vnedorozhnik.net.ua/autonews/v-evropi-novi-avtomobili-pochnut-osnashhuvaty-chornymy-yashhykamy>.
4. «Чорні скриньки» для автомобілів у Польщі стануть обов'язковими вже за 2 тижні. URL: <https://aquila24.pl/23779/>.

# Особливості ВАХ кристалів *n*-CdSb при різних рівнях інтенсивності освітлення

Коваль Юрій<sup>[0000-0002-4570-8024]</sup>, Захарчук Дмитро<sup>[0000-0002-1988-5027]</sup>  
Яцинський Леонід<sup>[0000-0003-3018-3904]</sup>, Федосов Сергій<sup>[0000-0003-3457-8911]</sup>

Луцький національний технічний університет,  
вул. Львівська, 75, Луцьк, 43018, Україна  
fedosov.serhiy@gmail.com

**Ключові слова:** кристали *n*-CdSb, вольт-амперні характеристика, освітлення.

## 1 Вступ

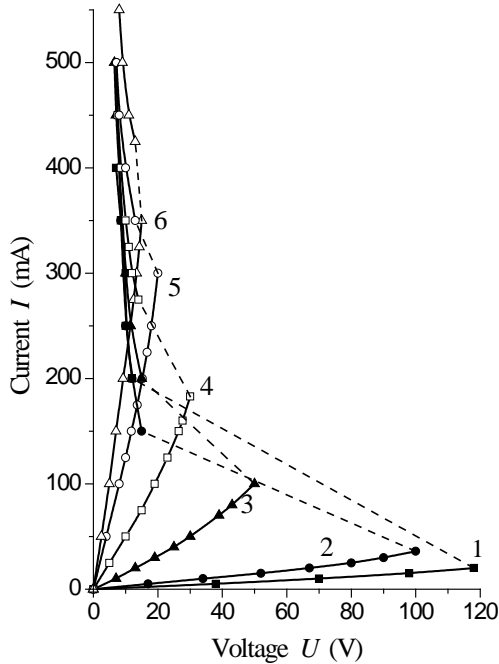
Наявність у кристалах антимоніду кадмію (*CdSb*) аномального кута між лініями зв'язків  $\theta = 62^\circ 15'$ , що значно відрізняється від кута тетраедричного зв'язку ( $\theta = 109^\circ$ ), призводить до знаходження в «напруженому стані» бездомішкового матеріалу, а це неминуче сприяє утворенню дефектів і появі характерних для *CdSb* властивостей [1]. Легування *CdSb* домішками *B*, *Si*, *S*, *Zn*, *As*, *Br*, *Te*, *Ge*, в яких значення середнього валентного радіуса є меншим ніж в атомах *Cd* та *Sb*, призводить до деформації зв'язків в ґратці заміщеними атомами домішки в напрямку наближення їх до правильних тетраедричних, що «зміцнює» решітку і зменшує концентрацію дефектів.

## 2 Результати досліджень

Вольт-амперні характеристики (ВАХ) є одним з потужних методів комплексних досліджень фізичних властивостей напівпровідникових матеріалів і може надати важливі результати для оцінки параметрів при створенні та застосуванні пристроїв на їх основі.

Вивчення ВАХ проводилося у кристалах *n*-CdSb, легуваних до концентрації активної домішки  $N_{Te} = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  [2]. При температурі  $T = 78 \text{ К}$  знято ВАХ при різних рівнях інтенсивності освітлення. За одержаними експериментальними даними розраховано залежності сили струму від прикладеної напруги електричного поля  $I = f(U)$  (рис. 1). Характер зміни ВАХ при різних рівнях інтенсивності освітлення мав S-подібну форму, що є результатом ефекту лавиноподібного перемикавання з високоомного в низькоомний стан кристалів *CdSb*<Te> при зростанні прикладеної напруги. Наявність внутрішніх електричних полів між шарами росту було виявлено у роботах [3-4] при дослідженнях кінетичних ефектів у монокристалах антимоніду кадмію за різних фізико-активних впливів.





**Рис. 11.** Залежності струму від напруги  $I = f(U)$  для кристалів  $n\text{-CdSb}\langle\text{Te}\rangle$  ( $T = 77 \text{ K}$ ) при різних рівнях освітлення, відн.од.: 1 – 0; 2 – 0,25; 3 – 0,5; 4 – 1; 5 – 2; 6 – 4

У залежності від прикладеної напруги  $U$  і струму  $I$ , що протікає через кристал  $n\text{-CdSb}$ , можна виділити кілька ділянок S-подібної ВАХ (рис. 1):

крива ВАХ на ділянці, обмежена інтервалом прикладеної напруги  $0 \div U_{BO}$  (нижня гілка), відповідає високому опору (високоомний стан) матеріалу. Збільшення напруги мало впливає на струм, поки не буде досягнута напруга перемикання (пробою)  $U_{BO}$ , при значенні струму  $I_L$ , який протікає при цьому через зразок (струм перемикання);

крива ВАХ на ділянці (позначена пунктиром), від значень  $U_{BO}$  і  $I_L$  до значень  $U_H$  і  $I_H$ , відповідає переключенню матеріалу з високоомного у низькоомний стан (нестійка область) ( $I_L > I_H$ ). У процесі перемикання у низькоомний стан незначне збільшення струму супроводжується швидким зменшенням напруги на зразку. Так як крива має S-подібну форму, то опір зразка негативний;

крива ВАХ від значень  $U_H$  і  $I_H$  і вище відповідає низькоомному стану.

На рис. 1 показані ВАХ при різних рівнях інтенсивності освітлення ( $I/I_0 = 0$ ;  $I/I_0 > 0$ ;  $I/I_0 \gg 0$ ). Чим більша інтенсивність освітлення, тим при

меншій напрузі  $U_{BO}$  відбувається перемикання зразка в низькоомний стан. Для неосвітлених зразків (темнова провідність) (криві 1 рис. 1), зростання прикладених напруг відбувається до значень, при яких Джоулева теплота, що виділяється на зразках, стає достатньою для іонізації донорного рівня телуру  $E_C - 0,12$  еВ. При цьому відбувається лавиноподібний перехід електронів у зону провідності, що приводить до стрибка струму [5].

Із зростанням рівня інтенсивності освітлення (залежності 2-6 рис. 1), виявлено зменшення граничних величин прикладеної напруги електричного поля, що пов'язано [5] із зростаючою фотоіонізацією домішкового рівня телуру. Зростання фотоструму дозволяє досягнути необхідного для розігріву зразка значення струму при менших електричних полях.

Змінюючи інтенсивність освітлення на кристал  $n$ -CdSb<Te>, можна регулювати значення напруги вмикання  $U_{BO}$ . Цю важливу керуючу властивість демонструє його ВАХ, яка наведена на рис. 1.

## Список посилань

1. Manik O.N., Yeremenko O.I. Solid Solutions of Cadmium and Zinc Antimonides. Chemical Bond (Review). *Physics and Chemistry of Solid State*. 2008. Vol. 9, № 3. P. 454–465.
2. Fedosov S., Zakharchuk D., Zamurujeva O., Koval Yu. Fermi Level in  $n$ -CdSb Crystals with Defect Deep Energy Levels. *Naukovi Notatki*. 2023. № 75. P. 180–185.
3. Коваль Ю., Ящинський Л., Федосов С. Ефект перемикання в кристалах CdSb, легованих Те. *Вісн. Львів. ун-ту. Сер. фізична*. 2006. № 39. С. 268–272.
4. Федосов А.В., Коваль Ю.В., Ящинський Л.В., Федосов С.А., Захарчук Д.А. Дослідження кінетичних ефектів в монокристалах антимоніду кадмію при різних фізико-активних впливах. *Нові технології*. 2008. № 2(20). С. 158–163.
5. Доскоц В.П., Панкевич З.В., Раренко И.М., Семенов А.К., Федосов А.В. Температурно-электрическая неустойчивость в монокристаллах антимонида кадмия. *Изв. высш. учеб. завед. Физика*. 1989. № 4. С. 108–109.

## Оптимізація режимів різання на важких верстатах

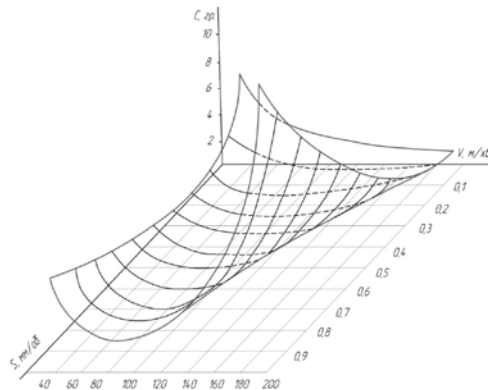
Ковальов В.Д., Клименко Г.П., Васильченко Я.В.,  
Шаповалов М.В., Григоренко Д.М.

Донбаська державна машинобудівна академія,  
вул. Академічна, 72, Краматорськ, 84313, Україна  
[wasilchenko.ua@gmail.com](mailto:wasilchenko.ua@gmail.com)

**Keywords:** важкий верстат, різальний інструмент, оптимізація.

Широке впровадження нових конструкційних і інструментальних матеріалів, високопродуктивного обладнання з ЧПУ та адаптивних систем управління, передбачає застосування сучасного підходу до проектування технологічних систем. Вимоги, що пред'являються до високоефективної металообробки, припускають раціональну експлуатацію дорогого устаткування, програмного забезпечення та ріжучого інструменту. У зв'язку з цим задачам оптимізації та управлінню процесом різання приділяється велика увага.

Сучасний підхід до вирішення задачі вибору оптимальних умов різання ґрунтується на використанні методів математичного програмування. Відповідно до цього підходу постановка задачі оптимізації режимів різання полягає в тім, щоб за даними вимогами до виготовленої деталі та відомими параметрами технологічної системи необхідно знайти параметри процесу різання, що забезпечують екстремальне значення критерію оптимальності технологічного процесу. На рис.1 представлена залежність технологічної собівартості оброблення від швидкості різання та подачі при роботі твердосплавним інструментом.



**Рис. 12.** Залежність технологічної собівартості оброблення від швидкості різання та подачі

Статистичні дослідження показали, що 45% ріжучого інструменту (PI) при роботі на важких верстатах виходить із ладу в результаті поломок. Тому необхідно враховувати ймовірність руйнування та рівень надійності різального інструменту. Для цього в роботі [1] визначено цільові функції та стійкісну залежність інструменту з урахуванням цих параметрів. При цьому прийнято, що період стійкості твердосплавних інструментів на важких верстатах розподілявся за законом Вейбулла з параметрами  $a$  та  $b$ , а в якості економічного критерію оптимальності приймаються приведені витрати, які залежать не тільки від традиційних параметрів, а також від ймовірності руйнування інструменту  $q$ , від кількості періодів стійкості інструмента  $K$  та від рівня надійності  $\gamma$  PI.

Зі збільшенням розмірів верстата економічна стійкість падає, так як зменшується відношення витрат на інструмент до витрат на верстат і його експлуатацію. Разом з цим при точінні великогабаритних деталей на важких верстатах при  $D_c > 1600$  мм спостерігається збільшення фактичної стійкості PI. Це обумовлено фізичним і психічним навантаження на верстатника, що, в свою чергу, впливає на зниження середнього часу відновлення процесу різання. На рис.2 наглядно показано зміну періоду стійкості.

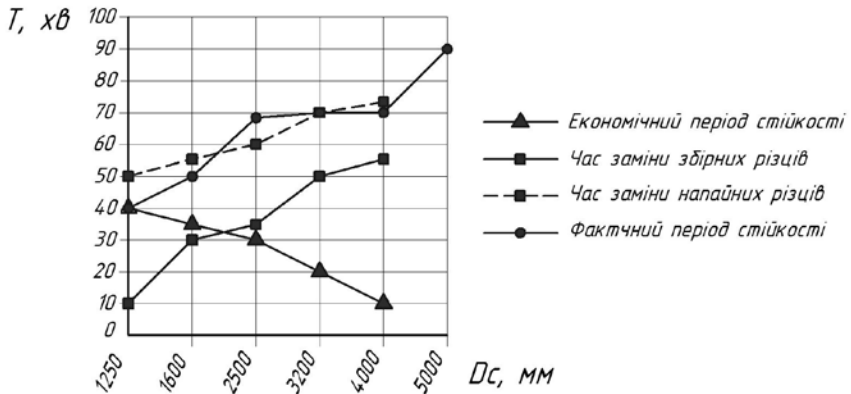


Рис. 2. Періоди стійкості різців та час їх заміни

З урахуванням рівня надійності  $\gamma$  PI, а також ймовірності його руйнування  $q$ , цільові функції приймають вигляд:

$$П = \frac{E}{S \cdot V} + \frac{\gamma \tau_{з.н.} a_{нас.} + (1 - \frac{\gamma}{100}) \tau_{з.н.} (E_1 + a_{нас.})}{T_\gamma S \cdot V} + \frac{\frac{\gamma}{100} \cdot \frac{A_{ин}}{K_1} + (1 - \frac{\gamma}{100}) \frac{A_{ин}}{K_2}}{\omega T_\gamma S \cdot V},$$

де  $E$  и  $E_1$  – відповідно вартість хвилини роботи і простою верстата, коп-хв;  
 $V, S$  – відповідно швидкість різання, м/хв., подача, мм/об;

$\tau_{з.п.}$ ,  $\tau_{з.а.}$  – час відповідно профілактичної та аварійної заміни інструментів, хв;  
 $a_{нас.}$  – вартість однієї хвилини часу заміни та настройки інструменту, коп-хв;  
 $A_{ін}$  – вартість інструменту, коп;  
 $K_1$ ,  $K_2$  – число періодів стійкості інструменту відповідно при його профілактичній та аварійній заміні: для різців з механічним кріпленням пластин

$$K_1=Z, K_2=Z(1-q_p),$$

де  $Z$  - кількість граней пластини,  $q_p$  – ймовірність руйнувань граней пластини  $P$ , пов'язаних з подачею;

$\omega$  – коефіцієнт, що враховує зменшення  $T_\gamma$  при аварійній заміні інструменту (ймовірність аварійного відмови):

$$\omega = 1 - \frac{T_{(\gamma)}^b}{a^b(b+1)} + \frac{T_{(\gamma)}^{2b}}{a^{2b}(2b+1)} - \frac{T_{(\gamma)}^{3b}}{a^{3b}(3b+1)} + \frac{T_{(\gamma)}^{4b}}{a^{4b}(4b+1)}.$$

Період стійкості, що відповідає певному рівню надійності інструменту  $\gamma$  (гамма відсотку):

$$T_\gamma = T\eta = a \left( -\ln \frac{\gamma}{100} \right)^{1/b},$$

де  $\eta$  – поправочний коефіцієнт на період стійкості  $P$ , що враховує рівень надійності:

$$\eta = \frac{\left( -\ln \frac{\gamma}{100} \right)^{1/b}}{K_b}.$$

## Список посилань

1. Клименко Г.П., Васильченко Я.В., Шаповалов М.В. Якість та надійність технологічних систем: навчальний посібник для студентів технічних спеціальностей. Краматорськ : ДДМА, 2018. 199 с.

# Однопрохідне електродугове та електрошлакове зварювання низьколегованої сталі 09Г2С товщиною 45 мм

Козулін С.М., канд. техн. наук  
Онищенко П.І., асп., пров. інж.  
Резнік С.А., пров. інж.-техн.  
Ганчук А.В., заст. зав. відділу

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,  
вул. Казимира Малевича, 11, Київ, 03150, Україна  
[pw1\\_37@ukr.net](mailto:pw1_37@ukr.net)

**Ключові слова:** однопрохідне зварювання, сталь великої товщини, двоелектродний процес, зварний шов, ЕШЗ, дугове зварювання, механічні властивості.

## 1 Вступ

Зварювання сталей великої товщини має певні особливості, труднощі та обмеження щодо умов, техніки та результатів виконання [1-3]. Найбільш поширеними для зварювання вертикальних швів сталей товщиною від 20 мм з примусовим формуванням є електродуговий та електрошлаковий способи. Кожен з них має свої переваги та недоліки. Зокрема, при високій продуктивності, ефективності та якості з'єднання (за умови дотримання технології) ЕШЗ має і основний недолік – значне тепловкладення, що впливає на структуру металу навколо шовної зони, механічні властивості з'єднання в цілому та потребує додаткових технологічних процедур (термообробки). З практичного досвіду ЕШЗ застосовується для діапазону товщин від 20 до 500 мм одним, двома або трьома електродами діаметром 3,0 мм [4-5].

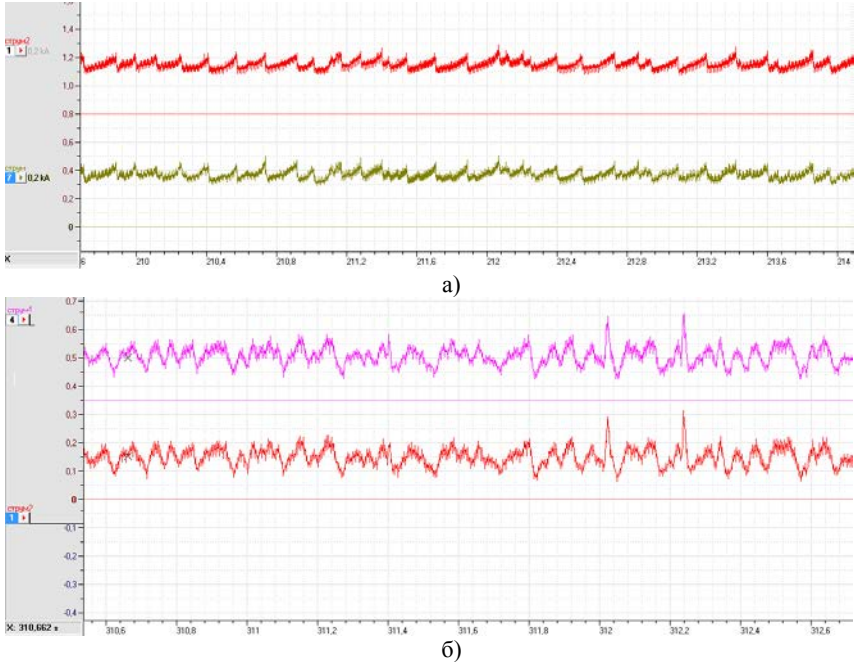
ЕДЗ, в свою чергу, має обмеження по максимальній товщині металу, який можна зварювати, нижчу продуктивність та ефективність при зварюванні великої товщини, гірші санітарно-гігієнічні характеристики, однак забезпечує кращі показники механічних властивостей з'єднання [3].

## 2 Результати досліджень

Проведені експериментальні дослідження двоелектродного ЕДЗ та ЕШЗ вертикальних швів зразків сталі 09Г2С товщиною 45 мм з примусовим формуванням електродами діаметром 2,0 мм для оцінки, порівняння та оптимізації параметрів, режиму та характеру процесу зварювання, термічного

циклу та їх впливу на формування структури металу шва та ЗТВ, механічні властивості з'єднання.

Аналіз отриманих даних показав стабільне спокійне протікання процесу ЕШЗ без коротких замикань в порівнянні з ЕДЗ (див. рис.1).

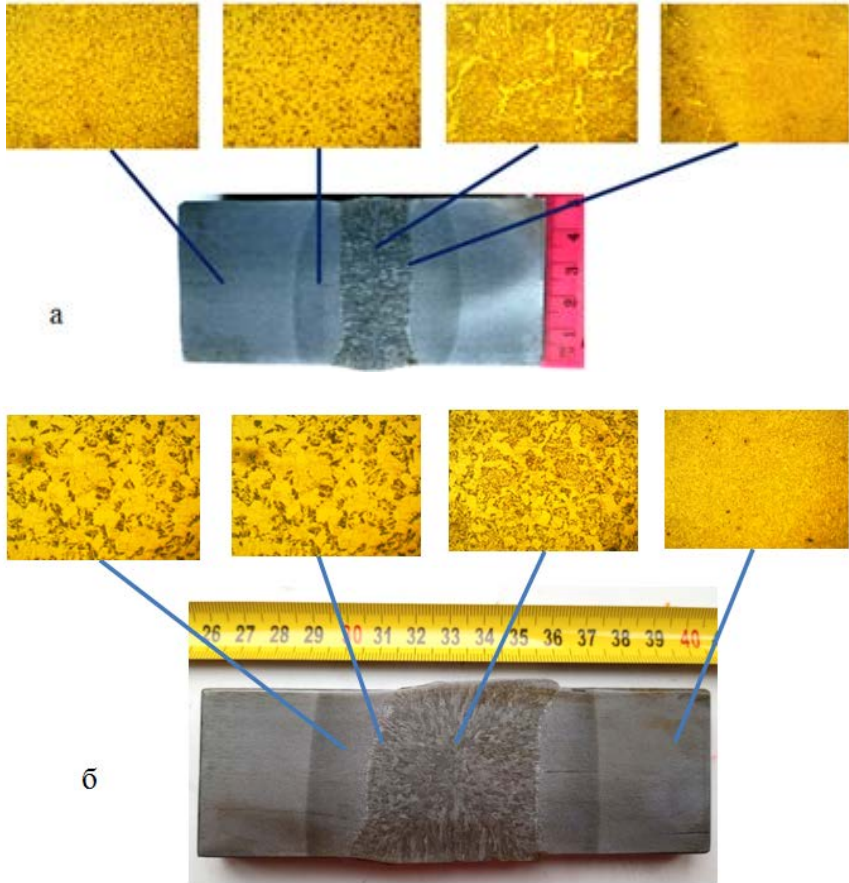


**Рис. 1.** Осцилограми струмів на окремих дротах при ЕШЗ (а) та ЕДЗ (б)

Результати запису термоциклу показали значно вищі температури при ЕШЗ в навколошовній зоні на відстані 20 та 25 мм від кромок (1350-1440°C та 590-810°C при ЕШЗ та ЕДЗ відповідно). Отримані результати розмірів шва та ЗТВ показали більші значення для ЕШЗ, що є закономірним. Це пов'язано із рівнем тепловкладення, яке в нашому випадку склало для ЕДЗ - 37 кДж/см<sup>2</sup>, а при ЕШЗ - 94 кДж/см<sup>2</sup> як.

Результати аналізу мікроструктур показали, що при ЕШЗ для металу шва характерною є однорідна бейнітна структура з ділянками полігонального фериту. При дуговому зварюванні у металі шва формується переважно ферито-перлітна структура з глобулярною морфологією перліту з деякими виділеннями полігонального фериту. На ділянці зони термічного впливу в обох досліджуваних шліфах переважає ферито-перлітна структура. Структура основного металу ферито-перлітна, та характеризується

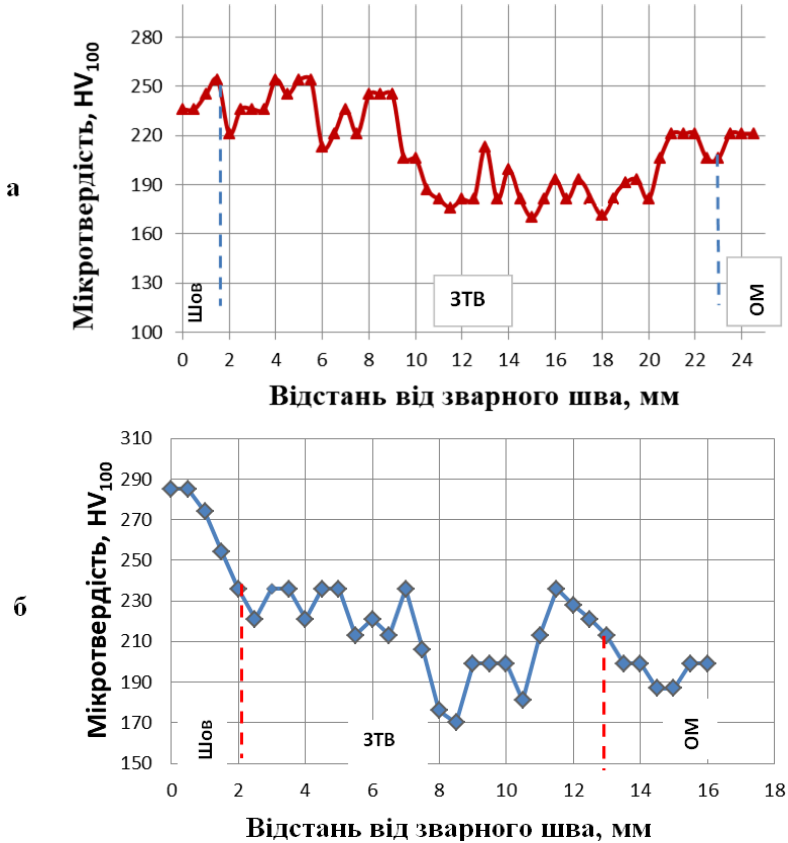
дрібнодисперсними рівноосними зернами (твердість 190-210 HV) (див. рис. 2).



**Рис. 2.** Макроструктура поперечних темплетів та мікроструктури характерних ділянок зварних з'єднань сталі 09Г2 товщиною 45 мм, виконаних електродуговим зварюванням з примусовим формуванням шва ЕДЗ×100 (а) та електрошлаковим зварюванням ЕШЗ×100 (б).

Показники мікротвердості зварних з'єднань свідчать, що метал шва має дещо нижчі значення при ЕШЗ (235-255HV) в порівнянні з ЕДЗ (235-285HV). Однак в ЗТВ ці показники майже однакові (170-230HV) (див. рис. 3).





**Рис. 3.** Мікротвердість характерних ділянок зварних з'єднань, виконаних ЕШЗ (а) і ЕДЗ (б).

Отримані показники параметрів механічних властивостей майже у всіх випадках мають значення вище показників для основного металу. При цьому, збільшення швидкості зварювання та застосування більш легованих дротів при ЕШЗ призвело до підвищення показників  $B_T$  та  $B_B$  на 10-20% практично до рівня значень ЕДЗ (див. Таблиця 1).

Результати випробувань на ударний згин зварних з'єднань виконаних ЕШЗ та ЕДЗ свідчать про значно кращі показники при застосуванні ЕДЗ. Однак, застосування легованих дротів Св10НМА+Св10ХГ2СМА при ЕШЗ и суттєво їх покращило (більше ніж у 2 рази) та наблизило до показників основного металу (див. Таблиця 2).

**Таблиця 1.** Механічні властивості зварних з'єднань, виконаних ЕШЗ і ЕДЗ із примусовим формуванням металу шва

Метод зварювання /марки дрітів	Зона випробувань	$\sigma_T$	$\sigma_B$	$\delta$	$\Psi$
		МПа		%	
Сталь 09Г2 (ГОСТ 19281-73)		$\geq 345$	$\geq 450$	$\geq 21$	$\geq 65$
ЕШЗ/ Св08Г2СЮ + Св08Г2С	Шов	$\frac{370 - 380}{376}$	$\frac{525 - 534}{530}$	$\frac{18,4 - 18,5}{18,46}$	$\frac{65 - 66}{65,7}$
	ЗТВ	$\frac{320 - 325}{323}$	$\frac{484 - 486}{485}$	$\frac{28,2 - 34,6}{30,6}$	$\frac{81,9 - 83,3}{82,5}$
ЕШЗ/ Св10НМА + Св10ХГ2С МА	Шов	$\frac{443 - 450}{446,5}$	$\frac{644 - 646}{645}$	$\frac{16,4 - 18,7}{17,55}$	$\frac{53 - 53,8}{53,4}$
	ЗТВ	$\frac{300 - 380}{340}$	$\frac{499 - 563}{531}$	$\frac{26,2 - 27,4}{26,8}$	$\frac{78,8 - 78,8}{78,8}$
ЕДЗ/ Св08Г2С + Св08Г2С	Шов	$\frac{474 - 478}{475,7}$	$\frac{687 - 697}{691}$	$\frac{15,5 - 17,3}{16,6}$	$\frac{30,6 - 43,8}{38,5}$

**Таблиця 2.** Ударна в'язкість зварних з'єднань за Шарпі

Метод зварювання	Зона випробувань	$a_n, KCV, Дж/см^2$
		Температура випробувань, $-20^\circ C$
ЕШЗ/ Св08Г2СЮ+ Св08Г2С	Шов	$\frac{7-9,5}{8}$
	ЗТВ за відстані від лінії сплавлення 1,5 мм	$\frac{24,5 - 26}{25,3}$
ЕШЗ/ Св 10НМА + Св10ХГ2СМА	Шов	$\frac{16-19}{18}$
	ЗТВ за відстані від лінії сплавлення 1,5 мм	$\frac{21,6-22,6}{22,1}$
ЕДЗ / Св08Г2СЮ+ Св08Г2С	Шов	$\frac{63 - 77}{70}$
	ЗТВ за відстані від лінії сплавлення 1,5 мм	$\frac{30 - 38}{33,7}$
Основний метал 09Г2	-	$\frac{26,5- 30,2}{28,8}$

### **3 Висновки**

Показано можливість отримання якісних зварних з'єднань однопрохідного двоелектродного зварювання двома дротами діаметром 2,0 мм сталі товщиною 45 мм як ЕДЗ так і ЕШЗ способами.

Оптимізація режиму та зростання питомої енергії при ЕДЗ на 20% забезпечило гарантований провар призвело до підвищення температури в навколо-шовній зоні на 250-320°C до 900-1050°C. При ЕШЗ, за рахунок збільшення швидкості зварювання, питома енергія знизилась на 14,9%, глибина проплавлення зменшилась майже в 1,5-2 рази, а температура металу в області вимірювання (ЗТВ) зменшилась на 300-500°C до 825-1150°C, що є позитивним фактором для формування сприятливої структури металу.

Отримані покращені параметри механічних властивостей та ударної в'язкості з'єднання при ЕШЗ за рахунок зниження тепловкладення та використання більш легованих дротів.

Результати дослідження стануть основою для розробки промислового обладнання та технологій зварювання вертикальних швів з примусовим формуванням в різному діапазоні товщини від 20 до 60 мм.

### **Список посилань**

1. Сущук-Слюсаренко И.И. Основные и сварочные материалы для электрошлаковой сварки / И.И. Сущук-Слюсаренко, И.И. Лычко, В.М. Семёнов; Киев: Наук. Думка, 1981. – 112 с.
2. Серенко А.Н. Технично-экономическое сопоставление различных способов сварки толстолистового металла / А.Н. Серенко, А.И. Патрикеев, В.А. Шаферовский и др. // Сварочное производство. – 1985. – № 12. – С. 3–5.
3. Лашенко Г.И. Современные технологии сварочного производства. – К.: «Екотехнологія», 2012. – 720 с.
4. Патон Б. Е. Электрошлаковая технология / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, Г. А. Бойко. — К.: Об-во «Знание» УССР, 1976. — 76 с.
5. Сущук-Слюсаренко И.И. Техника выполнения электрошлаковой сварки / И.И. Сущук-Слюсаренко, И.И. Лычко; Киев : Наук. Думка, 1974. – 95 с.

## Програмне забезпечення мікро- та структурного аналізу пінистих матеріалів

Денис Коменда, Олена Мікуліч

Луцький національний технічний університет,  
вул. Львівська, 75, Луцьк, 43018, Україна  
nvkomenda@gmail.com, shupra@ukr.net

**Ключові слова:** мікроструктурний аналіз, пористість, піністі матеріали, програмне забезпечення.

Використання пінистих та пористих матеріалів набуває істотного зростання у останні роки. Це пояснюється їх перевагами у порівнянні з суцільними матеріалами: можливістю не тільки забезпечити економію матеріалу, а і досягти більшого термо- та вібро поглинального ефекту.

Механічні властивості полімерних пін істотно залежать не тільки від пружних та в'язкопружних властивостей полімерної основи [1], а і від мікроструктури матеріалу, що визначається пористістю та її однорідністю.

Структурно-неоднорідний пінистий матеріал характеризується його пористістю, відносною густиною та визначається [2]:

$$P = \left(1 - \frac{\rho_v}{\rho_t}\right) \cdot 100\%, \quad (1)$$

де  $\rho_t$  — справжня густина матеріалу зразка,  $\rho_v = \frac{m}{V}$  — густина пористого матеріалу, де  $m$  та  $V$  — маса та об'єм зразка з порами.

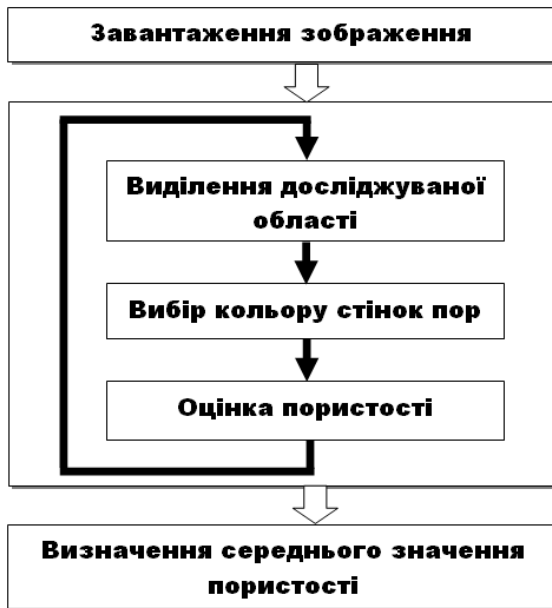
Також при визначенні пористості використовують величину відносної об'ємної частки  $V_V$  (відношення об'єму матриці до загального об'єму зразка) [2]:

$$P = (1 - V_V) \cdot 100\%, \quad (2)$$

Обидва підходи дозволяють з достатньою точністю у лабораторних умовах визначити пористість матеріалу за використання спеціального обладнання.

Проте, часто виникає потреба у таких дослідженнях і не в лабораторіях, а у виробничих умовах, де необхідно здійснити аналіз мікроструктури матеріалу та визначити пористість. Тут зручним буде відповідне програмне забезпечення, що дозволить на основі зрізів чи фотографій структур при певному збільшенні визначити пористість спіненого матеріалу.

Принцип аналізу пористості розробленого програмного забезпечення включає у себе три етапи, що представлені на рис. 1.



**Рис. 13.** Алгоритм визначення пористості на основі розробленого програмного забезпечення

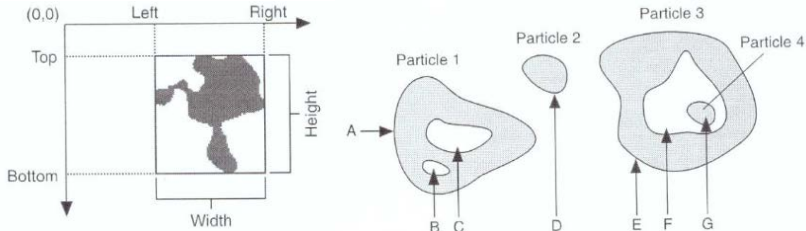
Принцип роботи програми відображений на рис. 2. На другому етапі аналізу проводяться дослідження визначення пористості для виділеної області на основі морфометричного аналізу [3]. Отримані результати виводяться у вікні програми. При визначенні середньої пористості можна враховувати як усі отримані результати, так і тільки вибрані, встановивши прапорці навпроти потрібних значень. Такий підхід дозволяє верифікувати дані ще на етапі їх обробки та контролювати точність розрахунків.

Для тестування програмного забезпечення було використано пінополіуретан, основними компонентами для отримання якого були поліол і поліізоціанат. Ці компоненти змішували протягом 30 секунд у співвідношенні 1:1. Піна готувалася у відкритих формах та витримувалася при кімнатній температурі протягом 24 годин. З отриманого піноматеріалу зроблені зразки, для яких отримано зрізи структур у внутрішніх областях матеріалу за допомогою цифрового USB-мікроскопу при 30-кратному збільшенні (рис. 2) Для покращення роботи програми та збільшення контрастності на зразках було масковано частину поверхні області червоним кольором (рис. 2).



**Рис. 2.** Зріз структури пінополіуретану, отриманий при 30-ти кратному збільшенні з маскованою частиною досліджуваної області

Відповідно до принципів та положень морфометричного аналізу [3], при оцінці часток та дефектів у досліджувальній прямокутній області (рис. 3, зліва) здійснюється аналіз площі цих елементів у порівнянні з площею області з врахуванням дефектів та їх геометрії (рис. 3, справа).



**Рис. 3.** Принципи морфометричного аналізу

Інтерфейс програми представлений на рис. 4. Для визначення пористості у програму завантажується зображення, що отримані мікроскопом чи камерою (кнопка Load image). У програмі передбачена можливість збільшення досліджуваного зображення кнопкою Ctrl та зміна його яскравості повзунком знизу вікна програми для підвищення ефективності досліджень.

Користувач має змінити контрастність та виділити область дослідження. Виділена область визначається червоним прямокутником. Використовуючи інструмент color-picker, користувач вибирає колір областей, площу яких треба визначити.

Розроблений програмний продукт дає можливість проведення серії експериментів з фіксацією значень, що відображаються у правій частині вікна програми та можливістю очищення списку отриманих даних кнопкою Clear List. Крім того, користувач може визначити середню величину пористості з урахуванням лише вибраних варіантів, що значно зменшує неточність досліджень і дає можливість виключити "хибні" значення.

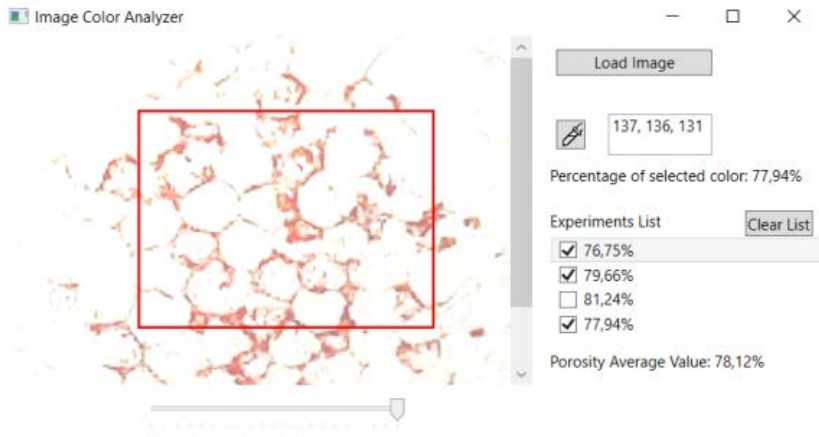


Рис. 4. Визначення пористості у програмному середовищі

## Висновки

Розроблене програмне забезпечення буде корисним для визначення пористості матеріалів під час їх виробництва та експлуатації.

## Список посилань

1. Wypych, G.: Handbook of Foaming and Blowing Agents; ChemTec Publishing: Toronto, ON, Canada, 2007.
2. Carolis, S., Putignano, C., Soria L., Carbonen G.: Effect of porosity and pore size distribution on elastic modulus of foams. International Journal of Mechanical Sciences, 261, 1, 2024, 108661.
3. Costa L. Da Fontroura. Shape analysis and classification : theory and practice / Costa L. Da Fontroura, Cesar R.M. – Chicago : CRC Press, 2000. 659 p.

## Python-модуль для логічного виведення фактів з бази нотаток Foam

Копей Володимир<sup>1</sup>, д.т.н., професор; Пронюк Ігор<sup>2</sup>, Шваб Юліан<sup>3</sup>

<sup>1, 2</sup> Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
вул. Карпатська, 15, Івано-Франківськ, 76019, Україна

<sup>3</sup> Івано-Франківська філія Університету «Україна»,  
вул. Набережна ім. В. Стефаніка, 42а, Івано-Франківськ, 76010, Україна  
vkorey@gmail.com

**Ключові слова:** база знань, експертна система.

Сучасна науково-технічна діяльність передбачає ефективне управління науковими нотатками і знаннями. Для цього можуть бути використані програмні менеджери нотаток, структурні редактори (outliners), рушії вікі та редактори онтологій. Foam [1] - це вільна система управління та обміну знаннями для сучасного редактора коду Visual Studio Code [2]. Знання в Foam подаються у вигляді нотаток, що зберігаються у файловій ієрархії текстових документів в форматі Markdown [3]. Аналогами Foam є такі програми як Obsidian, Zettlr, Logseq, TiddlyWiki. Серед можливостей Foam: гіперпосилання в форматі Markdown та вікі, візуалізація графа нотаток, автодоповнення посилань, синхронізація посилань після перейменування файлів, унікальні ідентифікатори в каталогах, попередній перегляд посилань і навігація, панель зворотних посилань, підсвічування синтаксису, підтримка розділів, псевдонімів, шаблонів, тегів, можливість публікації нотаток у web або у GitHub та інше.

Нашою метою було створення програми для логічного виведення фактів з бази нотаток Foam, приблизно так, як це реалізовано у Semantic MediaWiki.

Для прикладу є файл Corrosion.md зі статтею про корозію, який містить посилання на файли Crack.md та StressConcentration.md:

```
# Corrosion
[isCause](Crack.md) crack
[isCause](StressConcentration.md) stress concentration
```

Фактично в ньому подано факти бази знань: «корозія є причиною тріщин» та «корозія є причиною концентрації напружень». За допомогою правила логічного виведення

$(X, \text{isCause}, Y) \rightarrow (Y, \text{isEffect}, X)$



потрібно автоматично отримати нові факти: «тріщина є наслідком корозії» та «концентрація напружень є наслідком корозії». Для цього може бути використаний розроблений авторами Python-модуль foam2KB.py [4].

Функція parse(filename, properties=[]) цього модуля шукає усі посилання у файлі filename у вигляді [property](object.md) та додає в базу знань KB факт (filename, property, object). Функція foam2KB(path, properties=[]) повертає множину фактів шляхом синтаксичного аналізу файлів .md каталогу path. Функція reasoner(KB, property='isCause') реалізує найпростішу машину логічного виведення для інверсної властивості property та повертає множину виведених фактів. Користувач може створити більш складні алгоритми логічного виведення (див. модуль example3.py [4]), або задіяти для логічного виведення сторонні програми. Функція facts2foam(KB) може бути використана для дописування виведених фактів в кінець відповідних файлів .md. Це дозволить побачити виведені факти під час візуалізації Foam-графа. Функція facts2mermaid(KB, properties=[]) створює у файлі .md Mermaid-граф [5] з семантичною мережею KB. Граф може бути візуалізовано в VS Code, якщо встановлені відповідні розширення.

Приклад використання модуля:

```
path="c:\\FoamTest"
KB=foam2KB(path, ['isCause', 'isEffect']) # отримати факти
K=reasoner(KB) # вивести нові факти
print(KB, K)
facts2mermaid(K, properties=['isEffect']) # візуалізувати факти
```

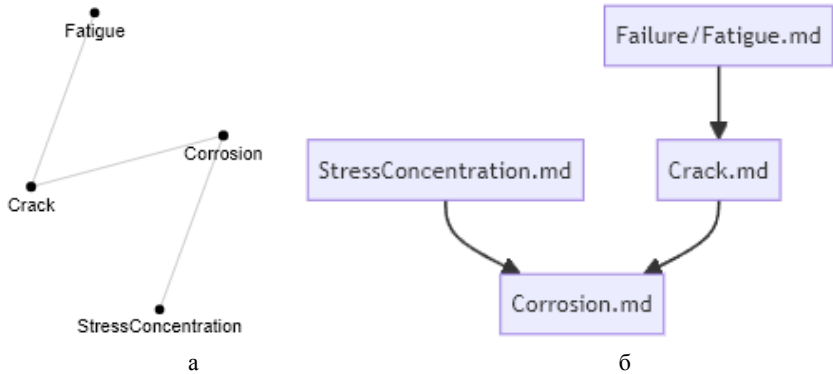
Результатом синтаксичного аналізу Markdown-файлів є множина введених фактів KB:

```
{('Corrosion.md', 'isCause', 'StressConcentration.md'), ('Crack.md', 'isCause', 'Failure/Fatigue.md'), ('Corrosion.md', 'isCause', 'Crack.md')}
```

А результатом логічного виведення є множина K:

```
{('Crack.md', 'isEffect', 'Corrosion.md'), ('StressConcentration.md', 'isEffect', 'Corrosion.md'), ('Failure/Fatigue.md', 'isEffect', 'Crack.md')}
```

На рис. 1 показано Foam-граф нотаток та Mermaid-граф з виведеними фактами.



**Рис. 14.** Граф з нотатками Foam (а) та Mermaid-граф з виведеними фактами для властивості isEffect (б)

Розроблена програма може бути використана для створення невеликих баз знань і експертних систем на основі Foam і подібних інструментів. Її використання планується для створення бази знань з проблем якості різьбових з'єднань. Автори запрошують приєднуватись до проекту на GitHub [4].

## Список посилань

1. foambubble/foam. URL: <https://github.com/foambubble/foam> (accessed 30.04.2024).
2. Documentation for Visual Studio Code. URL: <https://code.visualstudio.com/docs> (accessed 30.04.2024).
3. Daring Fireball: Markdown. URL: <https://daringfireball.net/projects/markdown> (accessed 30.04.2024).
4. vkopey / ThreadES. URL: <https://github.com/vkopey/ThreadES> (accessed 30.04.2024).
5. Mermaid. Diagramming and charting tool. URL: <https://mermaid.js.org> (accessed 30.04.2024).

## **Дослідження екрануючих характеристик металополімерних багат шарових систем**

Коржик В.М.<sup>1,2</sup>, д.т.н., чл.кор.НАНУ

Стухляк П.Д.<sup>2,3</sup>, д.т.н., проф.

Берднікова О.М.<sup>1,2</sup>, д.т.н., ст.н.с.

Zhao Junjun Джао Дзюньдзюнь<sup>2</sup>, докт.наук

Тотосько О.В.<sup>3</sup>, к.т.н., доц.

Стухляк Д.П.<sup>3</sup>, к.т.н., доц.

Лепіліна К.М.<sup>2</sup>, інженер

<sup>1</sup>Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України,  
Вулиця Казимира Малевича, 11 м. Київ, 03150, Україна

<sup>2</sup>Науково-дослідний інститут зварювальних технологій ім. Є.О. Патона  
провінції Чжецзян, Китайська Народна Республіка

<sup>3</sup>Тернопільський національний технічний університет ім.І. Пулюя,  
вулиця Руська, 56, м. Тернопіль  
Totosko@gmail.com

**Ключові слова:** : композитний матеріал, екранування, електромагнітне випромінювання, діапазон частот, покриття.

### **1 Вступ**

Сучасний розвиток промисловості сприяє використанню різноманітних об'єктів електротехнічного призначення. Робота таких агрегатів супроводжується виникненням електромагнітного випромінювання (ЕМВ) в промисловому діапазоні частот. Це перешкоджає стабільній роботі електротехнічного обладнання за рахунок зовнішніх збурень. Захист від такого випромінювання зумовлює розробку і використання захисних екранів. Тому розробка методів захисту є необхідною умовою при проектуванні і конструюванні виробів, що чутливі до зовнішнього ЕМВ. Найбільш ефективним є використання захисних екранів у вигляді покриттів. У зв'язку з цим дослідження матеріалів які використовуються при формування захисних покриттів для виробів є актуальною задачею сучасного матеріалознавства.

### **2 Метою роботи**

Дослідження екрануючих властивостей композитних багат шарових матеріалів на основі металополімерних систем.

### **3 Матеріали обладнання та методика випробувань**

Випробування проводили в діапазоні частот 1- 70 кГц з кроком 5 кГц на установках розроблених в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. Напруженість магнітного поля становила 15-20 Гс. Формування матеріалів здійснювали використовуючи електролітичний метод, плазмове ультразвукове напилення з використанням дроту відповідного матеріалу і дисперсний порошок на основі кобальту (Co). Епоксидний матеріал у вигляді багатошарового матеріалу формували викладкою в на твердій основі з використанням гнучкої діафрагми до основного завершення структурних процесів у кожного з шарів на протязі 24 год. Розподіл магнітних полів залежно від розмірів зразка для випробувань представлено на рис.

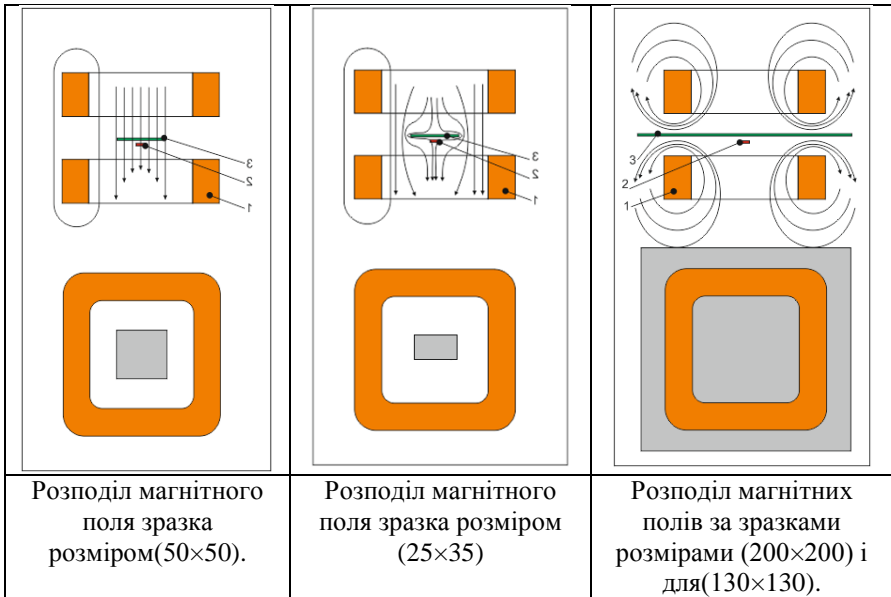
#### **4 Результати досліджень**

На початковому етапі дослідження екрануючих властивостей проводили використовуючи вуглетканину з мідним електролітичним покриттям. При товщині міді менше 0,7 мм (електроліз 6 год) екрануючих властивостей не спостерігали. При товщині міді 0,8 (електроліз 15 год ) і 0,9 (електроліз 20 год ) мм спостерігали монотонне зменшення напруженості за екраном на 5,6 і 6,0 дБ, відповідно.

При випробуваннях багатошарового матеріалу на основі епоксидних композитів з розміром згідно (рис.1) в діапазоні частот 1-70 кГц зменшення ЕМВ за екраном не спостерігали. Результати таких досліджень були в межах похибки експерименту. Формування на полікарбонаті плазмового тришарового покриття з міді, цинку і на основі кобальту, використовуючи ультразвукове напилення з використанням дроту з відповідного матеріалу і дисперсного порошку на основі Co. Встановлено, що для вказаного покриття монотонне зменшення напруженості ЕМВ за екраном спостерігали при частоті 45 кГц на 19,3 дБ. Далі випробували матеріал на основі епоксидного вуглепластику з напилених на тильну сторону вуглетканини (зі сторони захисту об'єкта) шарів міді, цинку і кобальту з наступним формуванням на основі багатошарового покриття зі сторони ЕМВ шарів на основі епокикомполімерів з різними добавками. Встановлено, що. до частот 45 кГц спостерігали монотонне збільшення екрануючих властивостей. Напруженість електромагнітного поля знижується на 31,5 дБ. При збільшенні частоти в межах 45-50 кГц спостерігали подальше покращення екрануючих характеристик вказаних багатошарових систем. В діапазоні частот 50-70 кГц слід очікувати подальше зменшення напруженості ЕМВ за екраном. Напруженість ЕМВ при даних частотах знаходилась в межах похибки експерименту використаного обладнання.

На нашу думку покращення майже в два рази для вуглецевих епокикомполімерних систем, порівняно з покриттями на полікарбонаті пов'язано з частковим розсіюванням та поглинанням ЕМВ при даних частотах (1-70 кГц). Цікавим з наукової та технічної точки зору було-б проведення

випробувань при частотах 30-3000 мГц. Встановлено, що багат шарове покриття на основі епоксидних композитів знижує рівень випромінювання у вказаному діапазоні після екрану на 35-53 дБ.



Покриття, що сформовано на полікарбонаті при плазмовому формуванні трьох металевих суцільних шарів при вказаних частотах після екрану знижує електромагнітне випромінювання на 59-96 дБ. В запропонованих матеріалах використано принцип зміни електротехнічних характеристик (провідність, магнітні та діелектричні властивості). Слід зазначити, що важливим є науково прогнозована зміна таких властивостей шарів екрану у системі «джерело ЕМВ – екран – об’єкт т захисту». У випадку використання виробу на основі полікарбонату з металевими покриттями екранування реалізовано за рахунок відбиття електромагнітних хвиль. При використанні багат шарового покриття на основі епоксидних композитів процес екранування здійснюється за рахунок поглинання і розсіювання ЕМВ.

## 5 Висновок

Таким чином, запропоновані системи з екранів дозволять значно розширити частотний діапазон захисту об’єктів від електромагнітного випромінювання в кГц-му і ГГц - му діапазонах електромагнітного випромінювання.

## **Зернограничне конструювання структури матеріалів деталей для експлуатації в умовах контактної взаємодії**

Кузін О.А.<sup>1</sup>, доктор технічних наук, доцент;  
Копилов В.І.<sup>1</sup>, доктор технічних наук, професор  
Кузін М.О.<sup>2,3\*</sup>, доктор технічних наук, професор

<sup>1</sup> Національний технічний університет  
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,  
Берестейський проспект (Перемоги), 37, Київ, 03056, Україна;

<sup>2</sup> Національний університет «Львівська політехніка»,  
вул. Степана Бандери, 12, Львів, 79013, Україна;

<sup>3</sup> Львівський науково-дослідний інститут судових експертиз,  
вул. Липинського, 54, м. Львів, 79024, Україна  
\* kuzin.nick81@gmail.com

**Ключові слова:** поверхні поділу структурних складових, потрійні стики зерен, життєвий цикл деталей.

### **1 Вступ. Роль поверхонь поділу сплавів в утворенні пошкоджень при навантаженнях**

Створення виробів із заданим життєвим циклом вимагає використання матеріалів із високим комплексом фізико-механічних і експлуатаційних властивостей, комп'ютерних методів їх конструювання.

Важливе значення при контактних навантаженнях мають такі джерела дефектів як границі поділу і потрійні стики зерен [1].

В даний час накопичено достатньо експериментальних даних про вплив поверхонь поділу зерен з різною енергією на поведінку полікристалічних матеріалів у процесі пластичної деформації. Створення низькоенергетичних поверхонь поділу зерен при технологічних обробках закладено в принципи зернограничного конструювання структури металовиробів.

При дії знакозмінних навантажень в деталях відбувається утворення розсіяних або нелокалізованих пошкоджень [2]. Внаслідок структурної неоднорідності матеріалів виникають випадково розподілені зони пластичного деформування, в яких зароджуються мікроскопічні тріщини. В матеріалі з більшою кількістю мікроскопічних тріщин відповідного розміру швидше розвивається магістральна тріщина, поглинаючи при своєму поширенні дрібні тріщини.

При контактних навантаженнях важливого значення набувають такі джерела дефектів як границі поділу і потрійні стики зерен, що виходять на зовнішні поверхні деталей [3]. В зв'язку з цим необхідно визначати відносний внесок цих елементів структури в поведінку матеріалів в умовах контактного навантаження. Такий аналіз стає можливим на основі комп'ютерних модельних розрахунків, які для забезпечення їх достовірності доповнюються експериментальними даними.

## **2 Управління параметрами поверхонь поділу структурних складових для підвищення опору руйнуванню сплавів при контактних навантаженнях**

Найбільш поширеною причиною виходу з ладу деталей є зношування і пошкодження їх робочих поверхонь за рахунок локальності та неоднорідності передачі силових навантажень через плями контакту. Їх розмір для сталевих деталей складає від 10 до 20 мкм. Для деталей із розміром зерен 10...50 мкм існує велика ймовірність попадання в пляму контакту зерен, поверхонь їх поділу і потрійних зеренних стиків. Для врахування їх впливу на контактну довговічність у роботі використали підходи ієрархічного моделювання.

Побудову інваріантних моделей проводили на основі аналізу кількісних параметрів зеренної структури. Інформацію про структуру поверхонь поділу зерен розміщували у матрицю (рис.). Методика цифрового представлення системної моделі поверхонь поділу зерен структурних складових подана в роботі [3].

$$Y = \begin{array}{|c|c|} \hline A_1 & Y_{1.2} \\ \hline Y_{2.1} & A_2 \\ \hline \end{array}$$

**Рис.** Матричні представлення моделі поверхонь поділу зерен сталі:

$A_1$ ,  $A_2$  – площі поверхонь поділу навколо зерен, які відповідають першій і другій розмірним групам;  $Y_{1.2}$  – площа поверхонь поділу між зернами першої і другої розмірних груп;  $Y_{2.1}$  – площа поверхонь поділу між нерівноважними потрійними стиками

Вплив структурно-енергетичного стану поверхонь поділу зерен вивчали при дослідженні покращуваних легованих сталей з вмістом вуглецю 0.4%. Зміна стану поверхонь поділу зерен досягалась гартуванням від температури 860°C...1050°C з витримкою 30 хв і 80 хв.

Отримані результати показали, що характеристики поверхонь поділу зерен, які описуються матричним параметром, суттєво впливають на зносотривкість сталей. Збільшення зношування відбувається після

гартування від 950°C за наявності в структурі сталі стиків з високим градієнтом зернограничної енергії, які формуються поверхнями поділу зерен, кути між якими знаходяться в діапазоні від 40°..60° до 161°..180°, а їх присутність обумовлена наявністю різнозернистості.

### **3 Висновки**

1. Показано, що в якості цифрового двійника структури сплавів, який описує їх поведінку в умовах контактних навантажень доцільно використовувати матричне представлення системної моделі структури з її наповненням кількісними характеристиками поверхонь поділу зерен.
2. Збільшення тривалості життєвого циклу деталей досягається при зменшенні в сплаві кількості локальних об'ємів з підвищеним рівнем енергії за рахунок оптимізації температурно-часових режимів термічної обробки.

### **Перелік посилань**

1. Копилов В.І. Застосування моделей структури поверхонь поділу в сталях під час отримання виробів із заданим життєвим циклом / В.І. Копилов, О.А. Кузін, М.О. Кузін // Наукові вісті КПП. – 2022. – № 1-4. – с. 76–81.
2. Трощенко В.Т. Усталость металлов. Влияние состояния поверхности и контактного взаимодействия/ В.Т. Трощенко, Г.В. Цыбанев, Б.А. Грязнов, Ю.С. Налимов. – К.: ИПП НАН Украины, 2009. – 661 с.
3. Kopylov V. Improving contact durability of polycrystalline systems by controlling the parameters of large-angle grain boundaries / V. Kopylov, O. Kuzin, N. Kuzin // Eastern-European Journal of enterprise technologies. – 2019. - № 5/12 (101). – P. 14-22.



# **Контроль параметрів матеріалу алюмінієвих виливків в процесі механічного оброблення різанням**

Ярослав Кусий<sup>1</sup>, д.т.н., проф., Сергій Корній<sup>2</sup>, д.т.н., с.н.с.  
Олег Личак<sup>2</sup>, к.т.н., ст. дос., Богдан Дацко<sup>2</sup>, к.т.н.  
Іван Климаш<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний університет «Львівська політехніка»,  
вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

<sup>2</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України,  
вул. Наукова, 5, Львів, 79060, Україна  
jarkym@ukr.net

**Ключові слова:** сплав Al-Si, метод LM-твердості.

## **1 Сучасний стан застосування алюмінієвих сплавів**

Зростання відсотку використання алюмінієвих сплавів в конструкціях автомобілів сприяє зниженню їхньої ваги, підвищенню ефективності використання палива та зменшенню шкідливих викидів у атмосферу, що особливо важливо в умовах стійкої механічної обробки (Sustainable Machining) та вимог Індустрії4,0/5,0. Сплавами Al-Si доцільно замінити чавун та інші матеріали в процесі виготовлення деталей автомобільної техніки з огляду на їхню зносостійкість та співвідношення високої міцності та низької густини [1].

Підвищення вимог до виконавчих поверхонь деталей із сплавів Al-Si вимагають пошуку ефективних критеріїв оцінки стану матеріалу виробів в процесі їхньої механічної обробки та розроблення комплексних методів контролю поверхонь деталей [2].

Метод LM-твердості, розроблений академіком А.А. Лебедевим, успішно апробовано для аналізу технологічного успадковування параметрів якості деталей машин в процесі обробки різанням за показниками розробленого критерію однорідності матеріалу (КОМ) [2].

Мета даного дослідження – встановлення взаємозв'язків між показниками КОМ і параметрами шорсткості алюмінієвого сплаву АК21М2,5К2,5 ДСТУ 2839-94 в процесі обробки різанням.

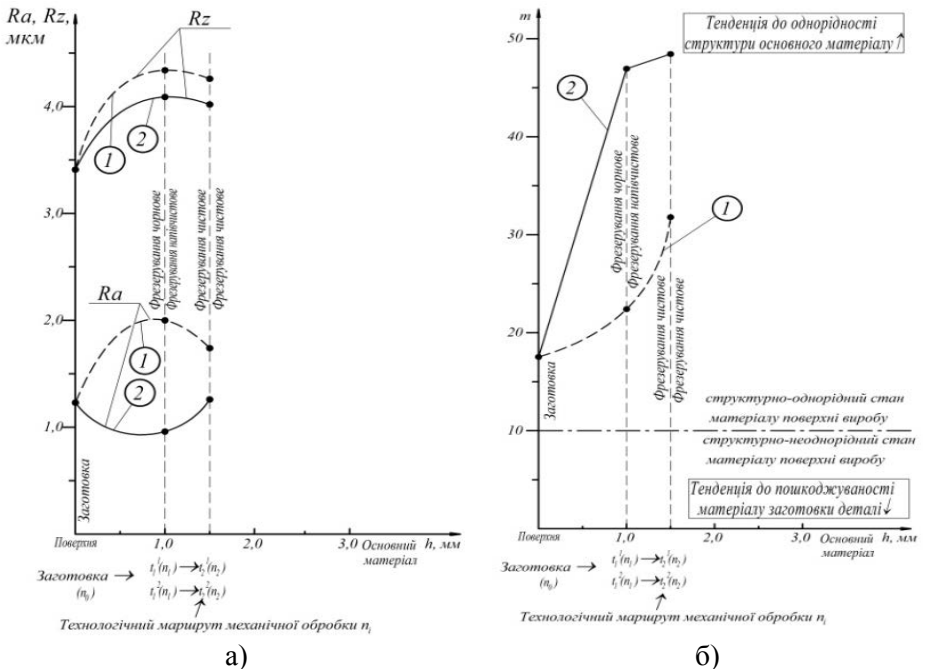
## **2 Методика досліджень**

В процесі експериментальних досліджень проаналізовано зміну параметрів шорсткості поверхонь заготовки після мехобробки на інтерференційному профілометрі «Micon-alpha» та визначено показники КОМ за результатами вимірювань твердості на приладі TP5006 за розробленою методикою [2].

Габаритні розміри заготовки – 145×60×15 мм. Оброблювана поверхня – паз 32×60 мм. Металорізальний верстат – широкоуніверсальний фрезерний мод. 676. Металорізальний інструмент – кінцева фреза Ø 32 мм ( $z=4$ ) із швидкорізальної сталі P6M5.

Проаналізовано зміну параметрів поверхневих шарів матеріалу для двох варіантів технологічних маршрутів: 1) заготовка; чорнове фрезерування (режими різання (PP):  $t=32$  мм;  $V=1,0$  мм;  $S_{хв}=52$  мм/хв;  $n=410$  хв<sup>-1</sup>;  $V=41,22$  м/хв); чистове фрезерування (PP:  $t=32$  мм;  $V=0,5$  мм;  $S_{хв}=26$  мм/хв;  $n=315$  хв<sup>-1</sup>;  $V=31,67$  м/хв); 2) заготовка; напівчистове фрезерування (PP:  $t=32$  мм;  $V=1,0$  мм;  $S_{хв}=26$  мм/хв;  $n=410$  хв<sup>-1</sup>;  $V=41,22$  м/хв); чистове фрезерування (PP:  $t=32$  мм;  $V=0,5$  мм;  $S_{хв}=26$  мм/хв;  $n=315$  хв<sup>-1</sup>;  $V=31,67$  м/хв).

Динаміку зміни висотних параметрів шорсткості ( $R_a$ ,  $R_z$ ) і коефіцієнта гомогенності Вейбулла ( $m$ ) приведено на рис. 1, а, б відповідно.



**Рис. 15.** Динаміка зміни висотних параметрів шорсткості ( $R_a$ ,  $R_z$ ) а) і коефіцієнта гомогенності Вейбулла ( $m$ ) б) (1, 2 – різновиди технологічних маршрутів)

### 3 Результати досліджень, висновки

Поверхня відправної заготовки характеризується задовільними параметрами мікрорельєфу, зокрема, його висотними параметрами  $Ra=1,23$  мкм,  $Rz=3,41$  мкм та одним з основних показників КОМ – коефіцієнтом гомогенності Вейбулла  $m=17,5>10$ , що відповідає стану структурно-однорідного матеріалу (рис. 1).

Для першого варіанту технологічного маршруту після чорнового фрезерування відбувається погіршення висотних параметрів мікрорельєфу  $Ra$  (з 1,23 до 2,00),  $Rz$  (з 3,41 до 4,34), які покращуються наступним чистовим фрезеруванням. Проте у загальному випадку параметри мікрорельєфу відправної заготовки є кращими, ніж після методів обробки різанням (рис. 1, а). У той же час коефіцієнт гомогенності Вейбулла ( $m$ ) зростає поступово: заготовка (17,5) – чорнове фрезерування (22,41) – чистове фрезерування (31,79) (рис. 1, б).

Для другого варіанту технологічного маршруту вже після напівчистового фрезерування параметр  $Ra$  зменшується з 1,23 мкм до 0,96 мкм, а параметр  $Rz$  зростає з 3,41 мкм до 4,09 мкм. Після чистового фрезерування параметр  $Ra$  збільшується з 0,96 до 1,26 мкм, а параметр  $Rz$  зменшується з 4,09 мкм до 4,02 мкм (рис. 1, а). У той же час коефіцієнт гомогенності істотно зростає вже після напівчистового фрезерування (з 17,5 до 46,94) і незначно покращується після чистового фрезерування (з 46,94 до 48,44) (рис. 1, б).

Неоднозначні результати експериментальних досліджень (з однієї сторони – погіршення або співрозмірність висотних параметрів шорсткості після обробки різанням порівняно із характеристиками заготовки, а з іншої – покращання коефіцієнта гомогенності Вейбулла) пов'язані із мехобробленням різними методами фрезерування на нерациональних режимах різання. Поряд з тим потрібно продовжити комплексні дослідження у даному напрямку із врахуванням технічного стану елементів технологічного середовища: металорізальний верстат – пристрій – металорізальний інструмент.

### Список посилань

1. Hernandez F. C. R. Al-Si Alloys: Automotive, Aeronautical, and Aerospace Applications / F. C. R. Hernandez, J. M. H. Ramirez, R. Mackay. – Cham, Switzerland, Springer, 2017. – 239 p.
2. Kusi Y. Improvement of the technique of optimal technological routes planning for machining of the machine parts surfaces [Electronic resource] / Y. Kusi, O. Onysko, A. Kuk, O. Kostiuk, B. Solohub // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2023. – Vol. 687. – P. 221–232. – Mode of access: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-31066-9\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-031-31066-9_23) (date of access: 20.05.2023). — Title from screen.

# ВОДНЕВИЙ ПОКАЗНИК ТЕХНОЛОГІЧНОЇ РІДИНИ ПРИ АБРАЗИВНІЙ ОБРОБЦІ, ЯК ОДИН З ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА КОНТАКТНІ ПРОЦЕСИ ПІД ЧАС ОБРОБКИ

Валерій Лавріненко<sup>1</sup>, доктор технічних наук, професор  
Володимир Солод<sup>2</sup>, кандидат технічних наук, доцент

<sup>1</sup> Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України,  
вул. Автозаводська, 2, Київ, 04074, Україна  
[lavrinen52@gmail.com](mailto:lavrinen52@gmail.com)

<sup>2</sup> Дніпровський державний технічний університет,  
вул. Дніпробудівська, 2, Дніпропетровська обл., Кам'янське, 51918, Україна  
[v\\_solod@ukr.net](mailto:v_solod@ukr.net)

**Ключові слова:** технологічна рідина, водневий показник, активована гідрат-іонами вода, питома енергоємність, алмазно-абразивна обробка.

Водневий показник (pH) технологічної рідини (ТР) для процесів механічної обробки має важливе значення, адже він впливає не тільки на сам процес оброблення різних матеріалів, але і на корозійну стійкість верстатного обладнання та безпечні умови для обслуговуючого персоналу. У науковій літературі останнього часу з'являються додаткові відомості про певний вплив на процес обробки значення pH ТР, при якій проходить контактний процес, та поляризації такої рідини, на що ми і звертаємо увагу у даному повідомленні.

Так, в статті [1] показаний вплив рідкого середовища з різним pH на зношування твердого сплаву WC/Co з різним відсотком кобальту. Дослідження на алмазне дряпання провадилися на трьох марках WC/Co, із вмістом Co – 6, 11, 28 % за масою і в рідинах: дистильованій (pH6), кислій (pH2) і лужній (pH10) воді. Встановлено, що вміст кобальту істотно впливає на навантаження в зоні дряпання і коефіцієнт тертя. Останній збільшується із підвищенням вмісту Co з-за більшої ступені пластичної деформації. Крім того, засвідчено, що при навантаженнях, менших за 62 Н водневий показник рідини не впливає на тертя. А ось при більш високих навантаженнях вплив рідкого середовища є статистично значимим, і дистильована вода дає більш низький коефіцієнт тертя. Вкажемо, що на вплив pH електроліту на зміну складу катодних плівок на ріжучій поверхні круга при контакті із твердим сплавом, причому із зменшенням pH рідини із значення 10 до 4 різко змінюється склад плівки, у якій значно зростає вміст елементів твердого сплаву, який контактує зі шліфувальним кругом. Фактично це означає, що із підвищенням значення pH погіршується

оброблюваність твердого сплаву, оскільки кобальт менше втрачається із твердого сплаву, а відтак, у відповідності до [1] збільшуються навантаження в зоні різання і коефіцієнт тертя.

Разом з тим, лужне середовище може бути ефективним для процесів полірування, що і показано в статті [3]. В цій роботі проведені експерименти по хіміко-механічній поліровці (CMP) міді, яку здійснювали при рН 10,5 із застосуванням перекису водню ( $H_2O_2$ ), діоксиду кремнію, бензотриазолу та FA/O II (лужного макромолекулярного органічного хелатируючого агента з високою енергією активації) у якості окислювача, абразиву, інгібітору корозії та комплексоутворювача, відповідно. Шорсткість обробленої поверхні зменшується при застосуванні  $H_2O_2$  у лужному середовищі. Шорсткість поверхні також зменшується із додаванням FA/O II і ефективно поліпшуються характеристики вирівнювання поверхні при CMP міді.

В більш пізній роботі [4] показано, що токсичні і корозійні суспензії, які широко застосовуються при CMP, призводять до забруднення оточуючого середовища. Щоби вирішити цю проблему, був розроблений новий «зелений» CMP для полірування міді. Церій і діоксид кремнію застосовані у якості композитних абразивів. Винну кислоту застосовували для доведення значення рН отриманої «зеленої» суспензії до 6,5. Після CMP шорсткість поверхні складає 0,1 нм, що є найбільш низкою шорсткістю поверхні на великій площі виміру. Просвітлювальна електронна мікроскопія підтверджує, що товщина пошкодженого шару після CMP варіюється від 0,4 до 2 нм.

У дослідженні [5] перевірено зміну хімічних властивостей поверхні, коли безлужну скляну панель дисплея промивають різними водними розчинами безпосередньо перед аналізом. У цьому дослідженні використано скло дисплея Corning EAGLE XG® (бороалюмосилікат кальцію). Після ретельного очищення скляні панелі занурювали у водний розчин з рН 1, 7 і 13 на 1 хвилину, а потім висушували сухим азотом. Аналізи засвідчили, що структура та кінетика сушіння адсорбованої води чутливі до рН водного розчину, яким було оброблено скло, що може бути пов'язано зі співвідношенням  $O/(Si+Al)$  скляної сітки. Розсіювання електростатичного заряду виявилося просторово неоднорідним на поверхні скла, обробленої рН 7, порівняно з поверхнями, обробленими рН 1 і рН 13. Результати свідчать, що вільна енергія поверхні і загальний елементний склад скляних поверхонь нечутливі до впливу різних значень рН. Але відношення  $O/(Si+Al)$  у скляній сітці, оголеній на найбільш верхній поверхні, було змінено, а структура води і швидкість десорбції також різнилися серед зразків, промитих розчинами з різним рН. Цікавим є те, що поверхня, оброблена деіонізованою водою, розряджалася повільніше, ніж поверхні, оброблені розчином з рН1 або рН13.

На завершення звернемо увагу на гідроксиди, роль яких наведена в статті [6], де виявлена підвищена відновлюваність монокристалу  $SeO_2$  (111) після декорування високотемпературним стабільним ОН, що утворювався при

зануренні у рідку воду. Збільшення кількості стабільних форм ОН ще більше знизило температуру відновлення церію, що підкреслює ключову роль ОН у підвищенні активності церію. Примітно, що наночастинки церію, оброблені рідкою водою, а, особливо, відновлені зразки, проявляють чудову каталітичну активність у реакціях окислення у порівнянні з необробленими. Це дослідження розкриває нову стратегію створення об'ємних частинок ОН на церії за допомогою рідкої води і подає унікальний механізм реакції на межі розділу між рідкою водою і оксидом.

Таким чином, в літературі останнього часу звернена увага на певний вплив для процесів контактної взаємодії значення водневого показника технологічної рідини, при якій проходить контактний процес, та поляризації такої рідини. Показано для широкого діапазону показників рН1–рН13, що під час абразивної обробки краще застосовувати нейтральні рідини, або технологічні рідини із дещо підвищеним показником рН та наявністю активованої гідрат-іонами технологічної рідини. Тобто, наведене вище свідчить про те, що саме нейтральні рідини є більш ефективними для застосування. Разом з тим, дослідження свідчать і про позитивну дію активних гідроксидів, тому певна лужність ТР може бути також ефективно застосована.

## Список посилань

1. Liquid media effect on the abrasion response of WC/Co hardmetal with different cobalt percent / R.V. Magnol, T. Gatti, M.C. Romero, A. Sinatora, C. Scandian. *Wear*. Volume 477, 18 July 2021, 203815.
2. Lavrinenko, V.I. The structurally changed layer of superabrasive wheel and workpiece contact surfaces as a factor of improving their wear resistance (Film component). *J. Superhard Mater.*, 2012, no. 5, pp. 314–320.
3. Qinzhi Xu, Lan Chen, Fei Yang, He Cao. Influence of slurry components on copper CMP performance in alkaline slurry. *Microelectronic Engineering*. Volumes 183–184, 5 November 2017, Pages 1–11.
4. Angstrom surface on copper induced by novel green chemical mechanical polishing using ceria and silica composite abrasives / Dongdong Liu, Zhenyu Zhang, Hongxiu Zhou, Xingqiao Deng, Chunjing Shi, Fanning Meng, Zhibin Yu, Junyuan Feng. *Applied Surface Science*. Volume 640, 15 December 2023, 158382.
5. Surface chemistry, water adsorption/desorption, and electrostatic charging behavior of display glass panel: Effect of rinsing solution pH / Yen-Ting Lin, Ava N. Zoba, Nicholas J. Smith, Joy Banerjee, Andrew C. Antony, Gabriel Agnello, Seong H. Kim. *Applied Surface Science*. Volume 651, 1 April 2024, 159204.
6. Increasing reactivity of ceria through water assisted surface modification / Qin Zhou, Zeyu Zhou, Shipeng Lu, Lingling Wang, Xiaoyi Zhan, Hongru Peng, Jun Cai, Beibei Wang, Yong Han, Aidi Zhao, Shujie Tang, Fan Yang, Zhi Liu. *Applied Surface Science*. Volume 656, 30 May 2024, 159666.

## **Дослідження впливу вмісту включень та домішок на окислення алмазів з низькою міцністю**

Лаврінченко Валерій<sup>1</sup>, д.т.н., проф., Рудь Віктор<sup>2</sup>, д.т.н., проф.  
Льницька Галина<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с., Логінова Ольга<sup>1</sup>, д.х.н., с.н.с.  
Смоквина Володимир<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с., Зайцева Ірина<sup>1</sup>, к.т.н.  
Тимошенко Вікторія<sup>1</sup>, к.т.н., Старик Сергій<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с.  
Білорусець Віктор<sup>1</sup>, Котинська Людмила<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України,  
вул. Автозаводська, 2, Київ, 04074, Україна  
[gil-ism@ukr.net](mailto:gil-ism@ukr.net)

<sup>2</sup> Луцький національний технічний університет,  
вул. Львівська, 75, Луцьк, 43018, Україна

**Ключові слова:** синтезовані алмази, вміст внутрикрісталічних металічних включень та домішок, розділення у магнітному полі, термостійкість.

### **1 Вступ**

Процес синтезу низькоміцних алмазних порошоків марок AC4, AC6 відбувається при великих швидкостях росту кристалів. Зростаючий кристал алмазу при вирощуванні захоплює всі побічні фази, які присутні в реакційній камері. При цьому включення повністю законсервовані в об'ємі кристала алмазу і є об'ємними дефектами, які дуже сильно впливають на експлуатаційні властивості порошоків алмазу [1].

### **2 Матеріали і методи досліджень**

Дослідження проводили на шліфпорошках синтетичного алмазу марки AC6 зернистості 125/100, отриманих в системі Ni-Mn-C. Шліфпорошки алмазу попередньо були розділені в магнітному полі на немагнітну і магнітну фракції. Після їх розділення були вивчені наступні властивості отриманих зразків: магнітна сприйнятливість, міцність при статичному стиску, термостійкість за методиками, розробленими в Інституті надтвердих матеріалів.

Після розділення в магнітному полі магнітна і немагнітна фракції шліфпорошків алмазу окремо піддавалася обробці. Обробка проводилася наступним чином: зерна алмазу піддавалися спочатку високотемпературній обробці при 800 °C і 1000 °C в повітряному середовищі протягом 10 хвилин, а потім хімічній обробці в суміші соляної і азотної кислот у співвідношенні 3:1. У вихідних шліфпорошках алмазу і після їх обробок визначали загальний ( $\beta$ , % за масою) та елементний склад домішок і включень методами растрової

електронної мікроскопії та рентгеноспектрального мікроаналізу з програмно-цифровою обробкою зображення за допомогою електронного мікроскопу ZEISS EVO 50XVP (Carl Zeiss, Німеччина) укомплектованого аналізатором рентгенівських спектрів Ultim Max 100 (Oxford Instruments, Англія).

Методом комплексного диференціального термічного аналізу були проведені дослідження процесу окислення на повітрі вихідних шліфпорошків та після їх розділення у магнітному полі на немагнітні та магнітні фракції.

### 3 Результати досліджень

Були досліджені характеристики якості вихідних шліфпорошків. Найбільша відмінність в отриманих результатах досліджень властивостей немагнітної і магнітної фракцій вихідних шліфпорошків алмазу спостерігається в магнітній сприйнятливості ( $\chi$ ). Величини  $\chi$  цих фракцій розрізняються приблизно в 8 разів. Характеристики міцності шліфпорошків алмазу немагнітної і магнітної фракцій у вихідному стані майже не розрізняються між собою. Термостійкість зерен алмазів немагнітної фракції вище на 15 %, а магнітної фракції після термічних впливів знижується в 1,4 рази, що пов'язано з більш високим вмістом включень та домішок.

Дослідження вмісту включень і домішок в немагнітній і магнітній фракціях порошків алмазу та у вихідному порошку і після проведених обробок показує, що в немагнітній фракції елементи (Ni+Mn) від загальної кількості включень і домішок складають: у вихідному стані 61,3 %, після обробки при 800 °C – 75,5 %, після обробки при 1000 °C – 72,5 %. У магнітній фракції елементи (Ni+Mn) у вихідному стані становлять 78,4 %, після обробки при 800 °C – 78,1 % і після обробки при 1000 °C – 66,9 %.

Магнітна сприйнятливість шліфпорошків алмазу немагнітної фракції з  $3,5 \times 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг у вихідному стані змінюється до  $12,3 \times 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг за рахунок фазового перетворення сплаву-розчинника при 800 °C. Магнітна сприйнятливість після хімічної обробки і розчинення металевих включень, що з'явилися на поверхні зерен алмазу після термообробки складає  $4,9 \times 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг. В результаті термічної обробки при 1000 °C  $26,6 \times 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг, а після хімічного розчинення включень, що виплавилися, після термообробки  $0,39 \times 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг. Магнітна сприйнятливість шліфпорошків алмазу магнітної фракції

з  $30,2 \times 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг у вихідному стані змінюється до  $180 \times 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг за рахунок фазового перетворення сплаву-розчинника при термообробці як при 800 °C так і при 1000 °C. Після хімічної обробки і розчинення металевих включень, що з'явилися на поверхні зерен алмазу після термообробки при 800 °C магнітна сприйнятливість складає  $40,9 \times 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг, а після 1000 °C  $8,8 \times 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг.

В результаті проведених обробок загальний вміст домішок і включень в



шліфпорошках алмазу немагнітної фракції змінюється від 3,268 % (за масою) у вихідному стані до 1,282 % (за масою) після термохімічної обробки. У магнітній фракції загальний вміст домішок і включень змінюється від 6,4992 % (за масою) до 1,974 % (за масою).

Аналіз кількості розчинених включень і домішок після обробок при 800 °С і 1000 °С в обох фракціях показує, що після проведення обробки шліфпорошків алмазу немагнітної фракції в них розчинилося елементів (Ni+Mn): при 800 °С 38,1 % домішок і включень, а після 1000 °С – 53,5 %. В магнітній фракції після виконання обробки при 800 °С розчинилося 37,0 % елементів сплаву-розчинника (Ni+Mn), а після 1000 °С – 74,1 %.

В результаті проведеного диференціального термічного дослідження показано, що вихідний порошок немагнітної фракції починає окислюватися при температурі 900 °С. Шліфпорошки магнітної фракції через високий вміст в ньому домішок і включень починає окислюватися при температурі 800 °С. Шліфпорошки алмазу немагнітної і магнітної фракцій після обробки при 1000 °С починають окислюватися при температурі 690 °С і 680 °С, відповідно. Швидкість окислення порошоків алмазу магнітної фракції в порівнянні з порошком алмазу немагнітної фракції зростає в 1,2–1,5 рази.

Термостійкість до окислення на повітрі і міцність порошоків алмазу залежать від концентрації в них металевих домішок. Чим вище кількість металевих домішок міститься в порошках алмазу, тим термостійкість до окислення і міцність нижче. Для алмазів, синтезованих в системі Ni-Mn-C показано, що з ростом в них вмісту домішок і включень сплаву-розчинника, швидкість їх окислення зростає.

## **Висновки**

Показано, що в результаті проведених обробок загальний вміст домішок і включень в шліфпорошках алмазу немагнітної фракції змінюється у 2,6, а магнітної у 3,2 рази.

Встановлено, що швидкість окислення порошоків алмазу магнітної фракції в порівнянні з порошком алмазу немагнітної фракції зростає в 1,2–1,5 рази.

Термостійкість до окислення на повітрі і міцність алмазних порошоків залежать від концентрації в них металевих домішок. Чим вище кількість металевих домішок міститься в алмазних порошках, тим термостійкість до окислення і міцність нижче.

Робота виконувалася на підставі меморандуму про співпрацю з Луцьким національним технічним університетом № 17 від 30 січня 2024 року.

## **Список посилань**

1. Лаврінченко В. І., Новіков М. В. Надтверді абразивні матеріали в механообробці: енциклопедичний довідник. – К.: ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України, 2013. – 456 с.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ ФІЛЬТРУВАЛЬНИХ СІТОК

Латишев Д.В., здобувач  
Молчанов В.Ф., кандидат технічних наук, доцент

Дніпровський державний технічний університет,  
вул. Дніпробудівська, 2, Кам'янське, 51900, Україна  
[v\\_molchanov@ukr.net](mailto:v_molchanov@ukr.net)

**Ключові слова:** сітки, фільтрувальна здатність.

### 1 Вступ

У гірничій промисловості та на машинобудівних підприємствах застосовують високопродуктивні агрегати і верстати, в яких основним технологічним елементом є рідина [1,2]. У процесі роботи ці рідини безперервно й інтенсивно забруднюються твердими частинками. Для відокремлення великих часток від рідини, а також очищення рідини від дрібних частинок використовують різні види сіток. Питання впливу параметрів сіток на їхню фільтрувальну здатність теоретично й експериментально вивчені недостатньо [3,4]. Усе це значною мірою стримує широке впровадження пристроїв для відокремлення твердих частинок від рідини та фільтрації її від дрібних часток із використанням сіток.

### 2 Методика досліджень

Для визначення пропускної спроможності сіток авторами запропонований експериментальний метод дослідження, розроблена методика досліджень і експериментальна установка [5].

Експериментальні дослідження проводилися на установці, схема якої представлена на рис.1. Установка дозволяла випробовувати сітчасті елементи

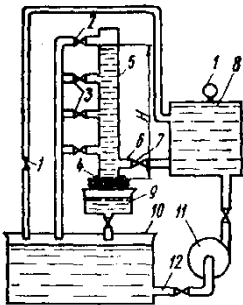


Рис.1. Схема установки

будь-якого типу, з різними розмірами чарунок, герметично ущільнюювати фільтроелемент, безперервно подавати рідину і протягом експерименту забезпечувати необхідну висоту стовпа рідини. Рідина з бака 10 по всмоктувальній трубі 12 насосом 11 подавалася в ресивер 8. За допомогою кранів 1 і 7 досягалася постійність висоти  $H$  стовпа рідини в циліндровому баку 5, який мав декілька відводів на різній висоті від фільтроелемента. При працюючому одному з відводів 2 інші відведення

Перекривали краном 3. По трубі 6 рідина поступала в бак 5 в такій кількості, щоб забезпечити безперервну фільтрацію її через фільтрувальну систему 4 та безперервне переливання через трубу 2. Тим самим підтримувалася задана висота стовпа рідини протягом всього експерименту.

Висоту стовпа рідини можна було змінювати від 0,15 до 1,5 м, що відповідає найбільш прийнятним умовам експлуатації вібросит, сітчастих барабанів та фільтрувальних установок. Фільтрувальна система 4 складалася з сітчастого елемента і діафрагми з отвором по центру. При проведенні експерименту під дослідну сітку встановлювали вимірювальну ємкість 9 і визначали час її наповнення. Дослідні сітки обезжирювали в ацетоні перед проведенням кожного експерименту.

Для досліджень використовували ткані сітки простого і саржевого плетіння з квадратними чарунками з неіржавіючої сталі, сталіні леговані (надалі сталіні), латунні і капронові (таблиця 1).

**Таблиця 3.** Характеристики дослідних сітчастих фільтроелементів

Матеріал сітки	Розмір Чарунки, $d_c$ мм	Діаметр Дроту, $d_{np}$ мм	Живий Перетин, $L$ %	Щільність Сітки $K_o$ %
Латунь	0,33	0,12	54	46
	0,72	0,2	61	39
	0,86	0,23	61	39
	1,42	0,34	65	35
Неіржавіюча сталь	0,47	0,22	47	53
	1,0	0,33	56	44
	1,31	0,32	65	35
	3,0	1,0	56	44
Легована сталь	0,41	0,13	54	46
	0,66	0,17	63	37
	2,1	0,38	72	28
	4,0	0,4	82	18
Капрон	0,3	0,1	56	44
	0,45	0,12	62	38
	1,66	0,24	77	23
	2,1	0,25	80	20

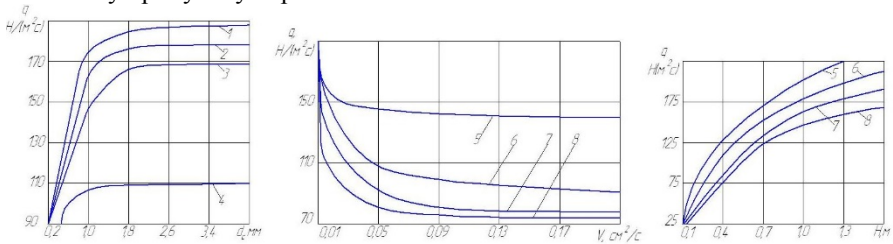
В якості рідини використовували технічну воду, водну емульсія ET-2, індустріальне мастило і суміш мастила з гасом (таблиця 2). Експериментальні дослідження проводилися в автомобільній області, при температурі  $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Таблиця 2.** Фізико-хімічні властивості технологічних рідин

Рідина	В'язкість $\nu$ , $\text{cm}^2/\text{c}$	Щільність $\rho$ , $\text{H}/\text{m}^3$
Вода	0,01	0,01
Водна емульсія ET-2	0,011	0,011
Мастило індустріальне і гас	0,045	0,008
Мастило індустріальне	0,186	0,009

### 3 Експериментальні дослідження

Експериментальні дослідження питомої пропускної спроможності сіток в залежності від матеріалу, розміру чарунки  $d_c$ , в'язкості рідини  $\gamma$  і висоти стовпа рідини  $H$  над сіткою приведені на рис.2. Аналіз графічних залежностей  $q=f(d_c)$  показує, що на питому пропускну спроможність сіток в значній мірі впливають розмір чарунки, а також матеріал сіток (рис. 2,а). Із збільшенням розміру чарунки від 0,0 до 1,0 мм залежність  $q=f(d_c)$  носить прямолінійний характер для всіх матеріалів сіток. При розмірі чарунок від 1,0 до 2,4 мм виявляється перехідна зона, де градієнт  $dq/dd_c$  має складний характер. Подальше збільшення розміру чарунки сітки практично не впливає на питому пропускну спроможність.



**Рис. 2.** Графічні залежності питомої пропускної спроможності сіток від розміру чарунки (а) при  $H=0,5$  м і  $v=0,01$  см<sup>2</sup>/с; в'язкості (б) при  $H=0,5$  м; висоти стовпа рідини (в) при  $v=0,0112$  см<sup>2</sup>/с

Такий складний характер залежності  $q=f(d_c)$  пояснюється тим, що до деякого розміру чарунки сітки сили гравітації рідини знаходяться в лінійній залежності, по-перше, від живого перетину сітки і, по-друге, від коефіцієнта поверхневого натягу, який створює певну плівку на межі рідина - тверда поверхня. У перехідній зоні сили поверхневого натягу мають менший вплив і при розмірі чарунки, 2,4 мм не впливають на процес фільтрації.

Експериментально встановлено також, що вплив в'язкості на пропускну спроможність виявляється значно істотною (рис.2,б) і має складну залежність. Для всіх видів сіток є область в'язкості, де градієнт  $dq/dv$  змінюється значно і графіки вказаних залежностей носять параболічний характер. При подальшому збільшенні в'язкості рідини градієнт  $dq/dv$  практично не змінюється.

На рис.2,в показані графічні залежності питомої пропускної спроможності  $q$  сіток від висоти  $H$  стовпа рідини над нею. Встановлено, що залежності  $q=f(H)$  при зміні в'язкості рідини і розмірів чарунки сіток мають однаковий характер, причому до певної висоти  $H$  градієнт  $dq/dH$  має більше значення, чим при подальшому збільшенні висоти. Для ряду графічних залежностей цей градієнт в межах поставлених експериментів залишається незмінним.

Проведені експерименти дозволили встановити вплив розміру чарунки сітки, матеріалу сітки, висоти стовпа рідини і її в'язкості на питому пропускну спроможність сіток.

## **Список посилань**

1. Бедрань М.Г. Машины для збагачення корисних копалин: Навч. посібник / М.Г. Бедрань. – Київ-Донецьк: Вища школа, 1980. – 416 с.
2. Тіхонцов О.М. Допоміжне обладнання механічних цехів / О.М. Тіхонцов. – Київ-Донецьк: Вища школа, 1982. – 202 с.
3. Техніка та технологія збагачення корисних копалин. Частина I. Підготовчі процеси / Білецький В.С.[та ін.]; – Кривий Ріг: Криворізький національний університет. 2019. – 202 с.
4. Пилов П.И. Гравитационная сепарация полезных ископаемых: Учеб. пособие. – Днепропетровск: Національний гірничий університет. – 2003. – 123 с.
5. Молчанов В.Ф. Дослідження пропускнуої спроможності фільтрувальних сіток / В.Ф.Молчанов // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету: (технічні науки) / Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2012.- Випуск 3(20).- С.61-65.

## **Підвищення корозійної тривкості біосумісних титанових сплавів**

Лебедев Ростислав Валерійович, аспірант  
Скребцов Андрій Андрійович, к.т.н., доцент

НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя,  
вул. Жуковського, 64, 69063, Україна.  
lebedevrostislav@gmail.com

**Ключові слова:** титановий сплав, біосумісність, гідроксиапатит, композит, порошкова металургія.

### **1 Вступ**

Титан — це легкий, міцний, біосумісний та стійкий до корозії метал, який широко використовується в медицині та хірургічному протезуванні. Його унікальні властивості роблять його ідеальним матеріалом для виготовлення імплантатів, які повинні витримувати значні навантаження, не викликаючи відторгнення організмом. Гідроксиапатит (НАр) — це мінерал, який є основним компонентом кістково-вої тканини. Він має схожу з кісткою хімічну структуру та властивості, що стимулює ріст кісткової тканини, покращує остеointegraцію імплантату та його корозійну стійкість.

Поєднання цих двох матеріалів в парі, як НАр покриття титану, чи композиту НАр в матриці титану — являються перспективними матеріалами в хірургічній імплантації.

### **2 Використання гідроксиапатиту в поєднанні з титаном**

Поєднання титану та НАр в імплантатах дає ряд переваг, таких як:

— Покращена остеointegraція: НАр на титановій основі сприяє міцному зв'язку між імплантатом і кістковою тканиною, що може призвести до більш швидкого загоєння та зменшення ризику відторгнення [1].

— Зменшення кількості операцій: поєднання титану та НАр може дозволити використовувати імплантати меншого розміру, що може зменшити розмір операції та час відновлення.

— Покращена біологічна активність: НАр може стимулювати ріст кісткової тканини навколо імплантату, що може призвести до покращення довгострокової функціональності.

— Взаємодія з фібронектином і вінкуліном — двома білками позаклітинного матриксу, які відіграють важливу роль у адгезії клітин, міграції та проліферації [1].

Використання покриттів HAp більш доцільно на складній геометрії важко-нагружених елементів таких як хірургічні шурупи та поверхні тертя суглобів [2]. Для інших вживлювальних в організм імплантів перспективою є створення композиту з HAp [3, 4].

Технологія виробництва порошкової металургії (ПМ) часто використовується для виготовлення металевих композитів, які поєднують в собі властивості різних металів або сплавів. З точки зору контролю мікроструктури, ПМ дозволяє точно контролювати розмір, форму та розподіл частинок в композиті. Це дає можливість створювати матеріали з бажаними властивостями. Методи ПМ, такі як пресування та спікання, дозволяють отримувати композити з високою щільністю та однорідною мікроструктурою [5].

Завдяки ПМ можна виробляти металеві композити складних форм та розмірів, які неможливо виготовити за допомогою традиційних методів, таких як лиття або обробка тиском. Ця гнучкість дизайну дозволяє створювати деталі, які точно відповідають конкретним потребам, що може покращити характеристики та продуктивність кінцевого продукту.

Перспективними дослідженнями очевидно являються методи виготовлення порошковою металургією композитів, котрі дозволять підвищувати корозійну стійкість та біосумісність.

## Список посилань

1. Bartkowiak, A.; Zarzycki, A.; Kac, S.; Perzanowski, M.; Marszalek, M. Mechanical Properties of Different Nanopatterned TiO<sub>2</sub> Substrates and Their Effect on Hydrothermally Synthesized Bioactive Hydroxyapatite Coatings. *Materials* 2020, 13, 5290. <https://doi.org/10.3390/ma13225290>
2. Mahmud, N.N.; Sulong, A.B.; Sharma, B.; Ameyama, K. Presintered Titanium-Hydroxyapatite Composite Fabricated via PIM Route. *Metals* 2021, 11, 318. <https://doi.org/10.3390/met11020318>
3. Ning, C.Q.; Zhou, Y. In Vitro Bioactivity of a Biocomposite Fabricated from HA and Ti Powders by Powder Metallurgy Method. *Biomaterials* 2002, 23, 2909–2915.
4. Choroszyński, M.; Choroszyński, M.R.; Skrzypek, S.J. Biomaterials for hip implants—Important considerations relating to the choice of materials. *Bio-Algorithms Med-Syst.* 2017, 13, 133–145.
5. Chen, Q.; Thouas, G.A. Metallic implant biomaterials. *Mater. Sci. Eng. R Rep.* 2015, 87, 1–57.

# Проектування та виготовлення лопатки газотурбінного двигуна з використанням Future CAM

Любов Макарук, студент  
Олександр Повстяной, д.т.н., професор

Луцький національний технічний університет,  
вул. Львівська, 75, Луцьк, 43000, Україна  
[makaruk\\_liubov69@ukr.net](mailto:makaruk_liubov69@ukr.net)

**Ключові слова:** Feature CAM, автоматизація, лопатка газотурбінного двигуна.

## 1 Вступ

Програми автоматизованого виробництва (CAM) зробили революцію у способах обробки деталей у промисловості. Ці програмні додатки використовують комп'ютерні алгоритми для автоматизації та оптимізації виробничого процесу, що призводить до підвищення ефективності, точності та економічності. Програми CAM пропонують широкий спектр функцій, які оптимізують обробку деталей, від створення траєкторії до моделювання та перевірки операцій обробки. У цій статті ми розглянемо деякі ключові функції та переваги використання програм CAM для обробки деталей, зокрема для проектування та виготовлення лопатки газотурбінного двигуна. Користувач вручну або автоматично виділяє елементи по завантаженої CAD-моделі, а програма автоматично застосовує технологію обробки за замовчуванням.

## 2 Основна частина

Рекомендовані області застосування FeatureCAM:

- багатоосьова фрезерна обробка виробів, що складаються в основному з типових елементів (отвори, бобишки, кишені, стінки і т.д.);
- програмування складних токарно-фрезерних обробних центрів (підтримується до 4-х револьверних головок та поворотна голова з віссю);
- програмування токарно-фрезерних верстатів із застосуванням PartMaker;
- електроерозійна обробка деталей.

За допомогою програмного продукту Feature CAM необхідно спочатку розмістити деталь у відповідному положенні (рис. 1) та в потрібній системі



координат XYZ. Далі програма підбирає інструменти для обробки, швидкість різання, оберти шпинделя верстату (рис. 2).

Загальний вид проектування показано на рис. 3, процес виготовлення та готова лопатка газотурбінного двигуна представлено на рис. 4.

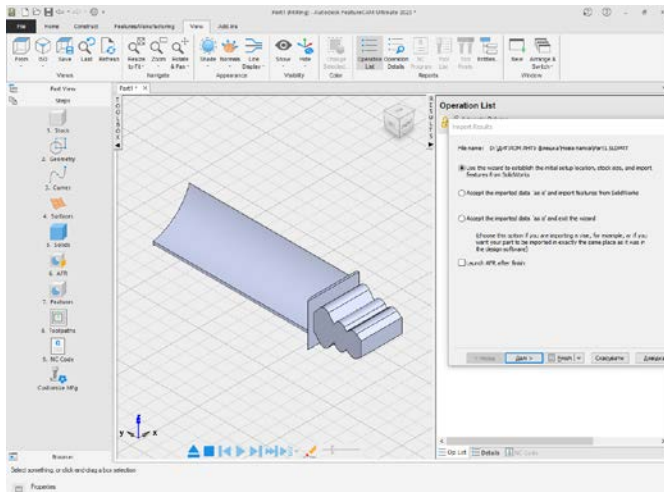


Рис. 1. Розташування деталі (лопатка газотурбінного двигуна)

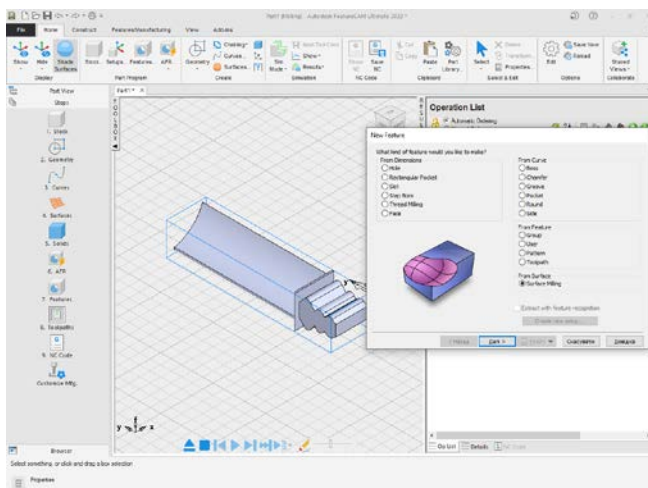
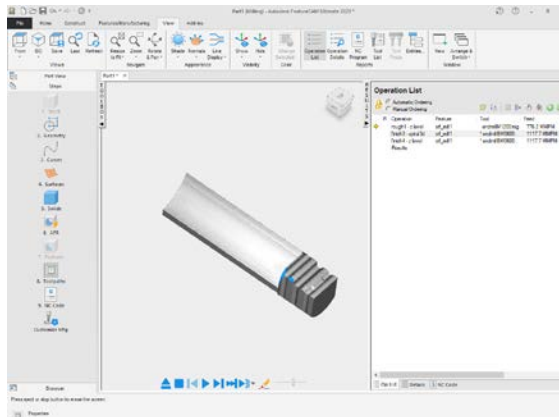
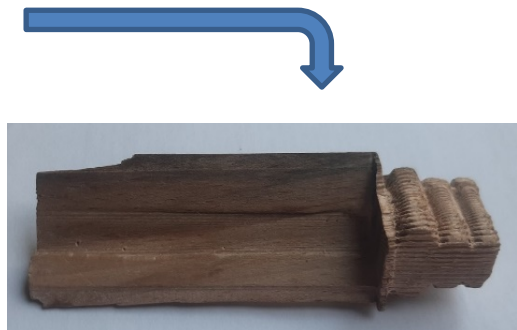


Рис. 2. Вибір способу обробки



**Рис. 3.** Вигляд лопатки після попередньої обробки



**Рис. 4.** Процес виготовлення та готова лопатка газотурбінного двигуна

### 3 Висновки

Програми САМ, зокрема Feature САМ, надають численні потужні функції, які покращують процес обробки деталей. Вони автоматизують створення траєкторії інструменту, моделюють і перевіряють операції, оптимізують видалення матеріалу, інтегруються з програмним забезпеченням САПР, пропонують можливості пост-обробки, а також забезпечують налаштування та гнучкість. Використовуючи ці функції, виробники можуть підвищити продуктивність, зменшити кількість помилок і отримати деталі вищої якості економічно ефективним способом.

## **Список посилань**

1. CAD/CAM/CAE технології в машинобудуванні: метод. вказівки до викон. практичних робіт для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Прикладна механіка» галузь знань 13 Механічна інженерія спец. 131 Прикладна механіка денної та заочної форм навч. / уклад. О.Ю. Повстяной. – Луцьк: ЛНТУ, 2022 – 84с.
2. Цейко А.В. Аналіз існуючих CAD/CAM/CAE – систем, їх потенційні можливості при постановці експерименту / А.В.Цейко // Наукові нотатки. – 2013. – Вип. 41(2). – С.244-250.
3. Повстяной О.Ю. Основи проектування технологічного обладнання з використанням SolidWorks. Частина 1 – Конструювання: навчальний посібник / О.Ю. Повстяной, В.Д. Рудь – Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2017. – 360 с.

# **Дослідження процесу автоматизації проектування технології виготовлення зварено-литого базового вузла станин верстатного обладнання**

Малигін М.О.<sup>1</sup>, аспірант

<sup>1</sup> Донбаська державна машинобудівна академія,  
вул. Федьковича, 9, Тернопіль, 46000, Україна  
svmal5.sm@gmail.com

**Ключові слова:** SADT- діаграма, ER-діаграма, діаграма прецедентів, структурно-функціональна модель, зварено-лита конструкція

## **1 Вступ**

Одним з ключових викликів при виробництві великих токарних верстатів є створення великорозмірних базових компонентів, які мають високі стандарти точності та збереження первинних параметрів форми. Потребувачами ефективного обладнання цього виду продукції є механічні виробництва, яким потрібно вибрати з вже наявної лінійки верстатів або, у разі їх відсутності, замовити нове. Крім того, цей процес є надзвичайно важливим для забезпечення конкурентоспроможності верстатів, які випускаються на верстатобудівних підприємствах. Розробка та виробництво зварено-литих з'єднань замість суцільнолитих деталей з однаковими або схожими фізико-хімічними та механічними властивостями металів, але виготовлених різними технологічними методами (лиття, прокатка або кування), надає широкі можливості для створення найбільш технологічних та раціональних конструкцій [1].

## **2 Розробка структурно-функціональної моделі процесу**

Для автоматизації процесу виготовлення зварено-литого базового вузла станин верстатного обладнання було розроблено структурно-функціональну модель, яка дозволяє дослідити процес виготовлення зварено-литих з'єднань замість суцільнолитих деталей, встановити зв'язки з іншими процесами. Було проведено детальний аналіз конструкції базового вузла та вимог до нього, включаючи вивчення технічних креслень, матеріалів, які будуть використовуватися, положення вилівка у формі, спосіб і обладнання для виготовлення форм, аналіз поведінки вилівки після охолодження, визначення величини припусків на механічну обробку, вивчення специфікацій зварювання; проаналізовано технологічний процес, який включає вибір методів зварювання, послідовність операцій, необхідне обладнання та інструменти. Під час проектування технології виробництва

зварено-литих вузлів станин важких верстатів було створено загальну та деталізовану SADT-діаграми. Вони відображають процес як послідовність дій, кожна з яких має вхідні та вихідні дані, а також виконавчий та керівний вплив. Технологічний процес включає інформацію про форми, вагу, матеріал заготовки, вузли, які будуть зварюватися, обладнання для обробки деталей, інструменти для обробки та операції, які характеризують етапи технологічного процесу. Розробка інформаційної моделі, представлені у вигляді SADT-діаграми, включає такі етапи: розробка системних процесів; напрям потоків, які містять певну інформацію; обґрунтування вибору діаграми для представлення інформації; опис функцій, які виконують керівні процеси, що впливають на роботу системи; опис керівних потоків (яку інформацію кожен з потоків містить) [2]. Деталізована структурно-функціональна діаграма першого рівня процесу проектування технології виробництва зварено-литих несучих конструкцій включає такі дії: аналіз технологічності конструкції; вибір положення виливки у формі, розрахунок елементів ливниково-живильної системи; визначення величини припусків на механічну обробку; вибір режимів та матеріалів для процесу зварювання; призначення фінішних операцій, отримання звіту. Вимоги до програмної системи представлені за допомогою діаграми прецедентів, яка використовується для моделювання виду системи з точки зору варіантів використання.

На основі аналізу предметної області та виявлених вимог до програмного продукту, що розробляється, створено діаграму послідовностей. Розроблена ER-діаграма ПМК проектування технології виробництва зварено-литих несучих конструкцій, яка містить список сутностей предметної області (Технолог, Документація, Технологія, Елементи ливарної форми, Режими зварювання, Шви), список атрибутів сутностей, опис взаємозв'язків між сутностями. Загальна структура програмно-методичного комплексу містить модуль інтерфейсу користувача та робочі модулі. Модуль інтерфейсу користувача включає меню додатку; за його допомогою відбувається виклик робочих модулів та здійснюється робота з базою даних. Робочі модулі комплексу можна розділити на дві категорії: функціональні та системні. Системні модулі відповідають за всі операції, пов'язані з операційною системою. Вони керують роботою з файлами, викликом довідкової інформації та обробкою виняткових ситуацій. Функціональні модулі виконують ключові операції, необхідні для розв'язання поставленої задачі. Вони включають такі модулі: модуль введення вихідних даних (забезпечує введення вихідних даних та вибір даних з бази); модуль розрахунку (містить процедури та функції для розрахунку всіх потрібних параметрів ливниково-живильної системи (розрахунок надливів та випарів, розрахунок ливникової системи), припуски на механічну обробку, параметри режиму зварювання); модуль побудови графіків (призначений для візуалізації розрахованих даних за допомогою побудови графічних залежностей); модуль формування звітів

(дозволяє створити звіт у форматі, зручному для користувача, з можливістю його збереження та друку) [3].

### **3 Висновки**

Використання передових комп'ютерних технологій для всебічної автоматизації процесу виробництва зварено-литих вузлів станин важких верстатів, включно з моделюванням всієї сукупності процесів, які відбуваються під час лиття, штампування окремих базових елементів; подальшого зварювання в єдину конструкцію, враховуючи отримані особливості формування структури, запас втомної міцності та рівень залишкових напруг в залежності від геометрії, термообробки та механічного зміцнення. Це дозволяє швидко визначити найбільш ефективний спосіб отримання якісних опорних систем при зменшенні ресурсомісткості самого процесу розробки та прогнозування їхньої працездатності з урахуванням умов навантаження.

Структурно-функціональна модель допомагає покращити продуктивність в процесі проектування технології виробництва зварено-литих конструкцій вузлів станин важких верстатів, дозволяє візуалізувати складний процес у вигляді послідовності активностей, що спрощує його розуміння та аналіз, допомагає виявити взаємозв'язки між різними елементами процесу, дозволяє контролювати хід виконання процесу та моніторити його ефективність, забезпечуючи якісні характеристики з'єднання за рахунок обмеження рівня технологічних збурень.

### **Список посилань**

1. Васильченко Я.В., Ковальов В.Д., Лишенко О.М., Сукова Т.А., Шаповалов М.В., Антоненко Я.С. Проектування важких металорізальних верстатів на основі функціонального моделювання // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, вип. №38, 2016. – с.23-29
2. Малигіна С.В, Кассов В.Д., Малигін М.О., Бережна О.В. Структурно-функціональна модель автоматизованого розрахунку режимів зварювання зварено-литих несучих конструкцій підвищеної точності // Розділ у колективній монографії: Innovative approaches to ensuring the quality of education, scientific research and technological processes: Monograph 43 / Edited by Magdalena Gawron-Lapuszek Yana Suchukova // Series of monographs Faculty of Architecture, Civil Engineering and Applied Arts, Katowice School of Technology Publishing House of University of Technology, Katowice, 2021. ISBN 978 – 83 – 957298 – 6 – 7.
3. Щербаков О.В. Основи об'єктно-орієнтованого програмування [Електронний ресурс]: навчальний посібник / О.В. Щербаков, Ю.Е. Парфьонов, В.М. Федорченко. – Харків: ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2019. – 237 с.

# МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ КОМПОЗИТІВ, СПЕЧЕНИХ ІЗ ПОРОШКІВ cBN З CVD-ПОКРИТТЯМ TiN-TiB<sub>2</sub>

Андрій Манохін<sup>1</sup>, кандидат технічних наук, старший дослідник

Вадим Закієв<sup>2</sup>, кандидат технічних наук

Сергій Клименко<sup>1</sup>, доктор технічних наук, професор

Сергій Клименко<sup>1</sup>, кандидат технічних наук, старший дослідник

Марина Копейкіна<sup>1</sup>, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

<sup>1</sup>Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України,  
вул. Автозаводська, 2, Київ, 04074, Україна

<sup>2</sup>Державний університет «Київський авіаційний інститут»,  
пр. Любомира Гузара, 1, Київ, 03058, Україна  
atmu@meta.ua

**Ключові слова:** композит, механічні властивості.

## 1 Вступ

Об'ємні механічні характеристики матеріалів не завжди визначають їхню працездатність в умовах експлуатації. При виборі найбільш ефективного матеріалу необхідно також враховувати сукупність деформаційних і міцнісних властивостей його поверхневого шару. Представивши модель поверхневого шару як систему випадково розподілених структурно-енергетичних бар'єрів різної потужності, що перешкоджають поширенню пружно-пластичних деформацій, можна оцінити рівень і однорідність деформаційних і міцнісних властивостей поверхневого шару комплексом числових характеристик.

## 2 Результати досліджень

Для оцінки стану поверхневого шару PсBN використаний метод статичного сканування, який базується на безперервній реєстрації опору руху індентора по поверхні із заданим постійним навантаженням. Визначення статистичних зв'язків між опорами локальних мікрооб'ємів композиту контактному деформуванню методами теорії випадкових процесів дозволяє зробити комплексну оцінку стану поверхневого шару на трасі сканування за показниками: – середня міцність поверхневого шару; – розкид і неоднорідність сукупності деформаційних і міцнісних властивостей локальних мікрооб'ємів поверхневого шару композиту.

Сканування проводили декількома проходами по одній траєкторії. Нормальне навантаження при скануванні становило 30 сН, довжина траси сканування – 1 мм, кількість повторних проходів на кожній трасі – 8.

У якості прикладів у таблиці наведено величини середньоарифметичних значень та стандартних відхилень глибин занурення індентора у поверхневий шар досліджуваних композитів.

**Таблиця.** Характеристики поверхневого шару зразків, отримані скануванням

Композит	$M_{sc}$ , мкм	$\sigma_{sc}$ , мкм	$F_{sc}$ , Н	$F_{sc}/M_{sc}$
cBN-3%Ti HV <sub>10</sub> 41,5±1,1	1,31	0,156	6,76	5,16
cBN-8%Ti HV <sub>10</sub> 30,4±2,6	1,43	0,218	11,43	8,00

Параметр  $M_{sc}$  (середня глибина занурення індентора) можна розглядати як характеристику твердості та міцності композиту, яка надає уяву про спротив поверхневого шару матеріалу як зануренню індентора, так і руйнуванню при переміщенні індентора. Дисперсія сили контактної взаємодії характеризує розкид середньої потужності спротиву тонкого поверхневого шару контактному деформуванню та визначає неоднорідність міцності поверхневого шару матеріалу вздовж траси сканування. Мінімальною дисперсією (0,15 мкм) глибини занурення індентора на трасі сканування характеризується зразок cBN-3%Ti, що свідчить про порівняно найбільшу однорідність властивостей міцності поверхневого шару цього композиту.

### 3 Висновки

Визначено високі механічні властивості поверхневого шару композитів, отриманих з порошків кубічного нітриду бору з покриттям сполуками Ti. Показано ефективність використання методу статичного сканування індентором для визначення статистичних показників деформаційних і міцнісних властивостей поверхневого шару композитів. Встановлено, що найбільшу міцність поверхневого шару і однорідність деформаційних і міцнісних властивостей має композит cBN-3%Ti, у складі якого міститься менша кількість покриття.

Отримані результати можуть бути використані під час ранжування матеріалів, у тому числі з гетерогенною структурою, відповідно до умов експлуатаційного навантаження.



## Про можливості використання генеративного дизайну під час проектування 3D моделей

Марчук В.І.<sup>1[0000-0003-4830-6909]</sup>, д.т.н., професор  
Тулашвілі Ю.Й.<sup>1[0000-0002-0780-9529]</sup>, д.т.н., професор  
Лук'янчук Ю.А.<sup>1[0000-0001-9690-6197]</sup>, к.т.н., доцент

<sup>1</sup> Луцький національний технічний університет,  
вул. Львівська, 75, Луцьк, 43018, Україна  
[iuriilukianchuk87@gmail.com](mailto:iuriilukianchuk87@gmail.com)

**Ключові слова:** 3D-моделювання, адитивне виробництво, генеративний дизайн, CAD, варіації дизайну готових виробів.

### 1 Вступ. Постановка проблеми

Хоча 3D-друк вважається нішевою технологією, він швидко стає потужним інструментом для інновацій та виробництва. Цей прогрес значно розширив коло фахівців, які володіють знаннями та навичками в цій галузі.

Одним із ключових факторів, що стимулюють цей розвиток, є поєднання 3D-друку та генеративного дизайну. Цей підхід використовує комп'ютерні алгоритми для автоматичної генерації декількох варіантів дизайну, які відповідають заданим параметрам і обмеженням. Це відкриває нові горизонти для створення оптимізованих, складних та кастомізованих продуктів, які неможливо або важко створити традиційними методами.

### 2 Аналіз останніх досліджень і публікацій

Розвиток технологій 3D-друку та генеративного дизайну широко відображено в літературі, присвяченій досвіду за кордоном [1, 2, 3]. Наприклад, Сабрі Соломан показує, як змінилася індустрія під впливом широкого використання технології 3D-друку [4]; робота Хардіка Панді, що увійшла до навчальних матеріалів для фахівців з 3D-друку, описує основи роботи з технологією адитивного лиття [5].

В Україні, як правило, використовують переклади міжнародного досвіду та власні розробки [6, 7].

Визначення генеративного дизайну описує підхід до проектування та розробки цифрових і фізичних продуктів, коли частина процесу переноситься на комп'ютерні технології та платформи [8].

У цьому випадку замість того, щоб шукати прямі рішення поставлених завдань, дизайнери та інженери створюють (генерують) варіанти рішень, які

формують бачення продукту і програмно визначають його параметри та обмеження.

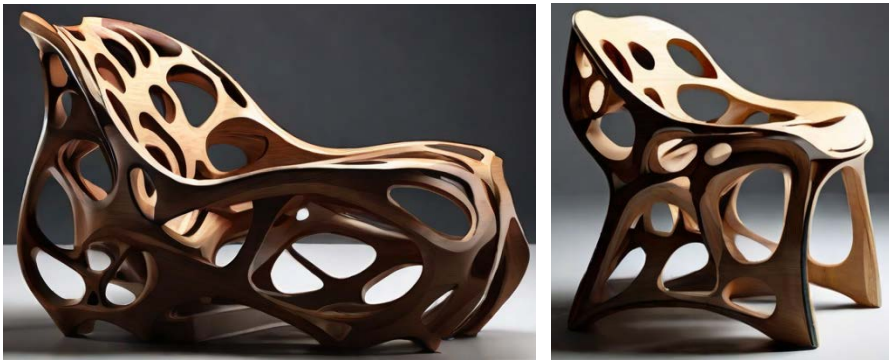
Моделі, оптимізовані за допомогою генеративного дизайну, показують, що звичайні методи металообробки, такі як різання або пресування, не підходять. Єдиний метод, на який можна покластися, - це лиття, але ця технологія є дуже енергоємною та екологічно проблематичною. Виробництво таких виробів можливе за допомогою технології адитивного виробництва, яка за останнє десятиліття продемонструвала значний розвиток.

Метою дослідження є вивчення потенціалу генеративного дизайну в процесі проектування 3D-моделей та практичних аспектів застосування цієї технології.

### **3 Виклад основного матеріалу**

Програмне забезпечення для 3D-друку включає набір програм, що використовуються для підготовки даних, налаштування обладнання та управління процесом друку. Основними компонентами для 3D-друку є програмне забезпечення для САПР, програмне забезпечення для підготовки даних, програмне забезпечення для управління принтером, програмне забезпечення для моніторингу та контролю друку та програмне забезпечення для управління матеріалами.

Генеративний дизайн продуктів автоматизує процес проектування, використовуючи різноманітні методи, включаючи еволюційні алгоритми, генеративні алгоритми, машинне навчання та інші методи оптимізації, щоб забезпечити найкраще рішення для конкретного завдання.



**Рис. 1.** Приклад застосування генеративного дизайну

Автори розробили алгоритм, який дозволяє користувачам завантажувати .obj файли та надавати генеративні варіанти дизайну. Запропоноване програмне забезпечення працює з використанням наступних технологій:

Python для бекенду, JavaScript для фронтенду та бібліотек, Three.js для 3D-рендерингу та інші для доповнення 3D-моделі та оптимізаційних розрахунків.

На рисунку показано варіації генеративного дизайну від запропонованого програмного забезпечення. Відповідно, можна побачити, що алгоритм прорахував навантаження та оптимізував ребра жорсткості. Тобто, запропонований виріб вже оптимізований під застосування адитивного виробництва. Інженеру дизайнеру залишається візуально оглянути та внести не значні корективи під обладнання, яке буде виконувати друк.

## **4 Висновки та перспективи подальших досліджень**

Фахівці з 3D-друку, які володіють навичками генеративного дизайну, можуть працювати в різних галузях, включаючи машинобудування, аерокосмічну промисловість, медицину, архітектуру та дизайн.

Застосовуючи запропонований алгоритм, що розроблений авторами, які експертами в CAD-системах, можна оптимізувати дизайн майбутніх виробів і запропонувати дизайнерам різні варіанти, скоротивши таким чином час виробництва на етапі проектування. Крім того, пропонуване програмне забезпечення просте у використанні і не вимагає тривалого навчання новим навичкам.

## **Список посилань**

1. Larson, H.: *Fabricated: The New World of 3D-Printing*. Wiley. 2013. 280 p.
2. Javaida, M., Haleema, A., Pratap Singhb, R., Sumanc, R., Rab, S.: Role of additive manufacturing applications towards environmental sustainability. In: *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 4 (4), pp. 312-322.
3. Kirchheim, A., Dennig, H., Zumofen, L.: Why Education and Training in the Field of Additive Manufacturing is a Necessity. In: *International Conference on Additive Manufacturing in Products and Applications*, 2018. pp. 329-336.
4. Sabrie, S.: Additive manufacturing technology – 3D printing and design – the 4th industrial revolution. 2020. 417p.
5. Pandya, H. 3D printing technology: fundamentals and application. 2021. 416 p.
6. Torta, S., Torta, J.: *3D Printing: An Introduction Illustrated Edition*. 2018. 370p.
7. Marchuk V.I., Lukianchuk Yu.A., Tulashvili Yu.I. *Praktychnyi dosvid vykorystannia tekhnolohii 3D-druku. Perspektyvni tekhnolohii ta pryklady*. Lutsk, 2022. Vypusk №20. S.69 - 77. (in Ukrainian)
8. Моделювання геометричної моделі деталі методами генеративного дизайну. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/30401>. (дата звернення: 15.04.2024)

# ВПЛИВ ЛЕГУВАННЯ КАРБІДАМИ ХРОМУ ТА МОЛІБДЕНУ НА КОРОЗІЙНУ ТРИВКІСТЬ МЕЗОСТРУКТУРНИХ КОМПОЗИТІВ СИСТЕМИ WC-Ni У ХЛОРИДОВІСНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Матвійчук О.О.<sup>1</sup>, Винар В.А.<sup>2</sup>, Івашків В.Р.<sup>2</sup>  
Рацька Н.Б.<sup>2</sup>, Василів Х.Б.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ

<sup>2</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів  
[o.o.matviichuk@gmail.com](mailto:o.o.matviichuk@gmail.com)

**Ключові слова:** металокераміка, нікелева зв'язка, корозійна тривкість, карбід вольфраму.

## 1 Вступ

Мезоструктурні композити системи WC-Ni характеризуються високою зносостійкістю і тріщиностійкістю та є перспективним матеріалом для вузлів пар тертя ковзання, що працюють при високих змінних навантаженнях. Ці матеріали також можуть використовуватися у вузлах тертя запірної арматури трубопроводів для перекачування нафтопродуктів і продуктів хімічної промисловості [1-3].

Пари тертя на основі сплавів WC-Ni добре працюють у таких середовищах, як нафтопродукти та аміак, але не є стійкими до корозії в електролітах, зокрема розчинах, що містять іони хлору. Для розв'язання цієї проблеми значну увагу присвячують підвищенню корозійної тривкості сполучного сплаву, оскільки потенціал окислення WC є більш позитивним, ніж у нікелю. Одним з рішень проблеми є підвищення корозійної тривкості сполучного сплаву, оскільки потенціал окислення WC є більш позитивним, ніж у нікелю. Відомо, що додавання невеликих концентрацій карбідів хрому і молібдену сприяє підвищенню корозійної стійкості сплавів системи WC-Co.

## 2 Мета роботи

Вивчити електрохімічні характеристики мезоструктурного сплаву WC-20 мас. % Ni із додаванням 1% Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> і 0,5% Mo<sub>2</sub>C у хлоридовмісних розчинах.

### 3 Методика експерименту

Металокерамічні композити отримували шляхом рідкофазного спікання у вакуумі за температури 1350°C. Характеристики корозійних процесів досліджували у потенціодинамічному режимі з використанням потенціостата ПИ-2МК-10А у розчинах: 3% NaCl + 0,5% CH<sub>3</sub>COOH (pH 3), 3% NaCl (pH 7) і 3% NaCl + 0,0004% NaOH (pH 10).

### 4 Результати

Показано, що модифікування мезоструктурного сплаву WC-20 % мас. Ni карбідами хрому і молібдену сприяє зміщенню електродного потенціалу до більш додатних значень (табл. 1). Зі зміщенням кислотності середовища від pH=3 до pH=10 спостерігається ошляхетнювання значень потенціалів для обох матеріалів.

Встановлено (табл.), що густина струму корозії сплаву WC-20 % мас. Ni без легування у нейтральному середовищі 3% розчину NaCl становить  $1 \cdot 10^{-3}$  mA/cm<sup>2</sup>. При додаванні 1% Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> і 0,5% Mo<sub>2</sub>C густина струму знижується практично на порядок і становить  $5 \cdot 10^{-4}$  mA/cm<sup>2</sup>. Подібна тенденція спостерігається і за досліджень у кислому та лужному середовищах, однак відносне зниження є дещо меншим.

**Таблиця 1.** Потенціали та струми корозії зразків WC-Ni та WCNiMoCr у 3% розчині NaCl за різних pH

Середовище	pH	Матеріал	E <sub>кор</sub> , В	i <sub>кор</sub> , mA/cm <sup>2</sup>
3% NaCl + 0,5% CH <sub>3</sub> COOH	3	WC-Ni	-0,270	$5 \cdot 10^{-3}$
		WC-NiMoCr	-0,164	$1 \cdot 10^{-3}$
3% NaCl	7	WC-Ni	-0,202	$1 \cdot 10^{-3}$
		WC-NiMoCr	-0,145	$5 \cdot 10^{-4}$
3% NaCl + 0,0004% NaOH	10	WC-Ni	-0,178	$6 \cdot 10^{-4}$
		WC-NiMoCr	-0,150	$2 \cdot 10^{-4}$

У кислому та лужному середовищах густина струмів корозії легованого композиту вища, ніж нелегованого сплаву WC-20 % мас. Ni. Зокрема, у кислому середовищі густина струмів корозії базового кермету і модифікованого карбідами становить  $5 \cdot 10^{-3}$  і  $1 \cdot 10^{-3}$  mA/cm<sup>2</sup>, у лужному –  $6 \cdot 10^{-4}$  і  $2 \cdot 10^{-4}$  mA/cm<sup>2</sup>, відповідно. Така тенденція пов'язана з тим, що у середовищі з pH=3 нікель, окислюючись, переходить у розчин, а у середовищі з pH=10 відбувається його часткова пасивація.

## 5 Висновок

Легування мезокомпозиції WC-Ni 1%Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> і 0,5%Mo<sub>2</sub>C підвищує його корозійну тривкість у середовищах з різною кислотністю. Максимальний опір корозії характерний для модифікованого сплаву у лужному середовищі.

## Список посилань

1. Matveichuk A. A. On the Interaction of the Cobalt Melt with Polycrystalline Tungsten Monocarbide / A. A. Matveichuk, S. A. Davidenko // Journal of Superhard Materials. – 2018. – V. 40. No 3. – P. 184–188. <https://doi.org/10.3103/S106345761803005X>
2. Matviichuk, O.O., Andreiev, I.V., Hnatenko, I.O. et al. Technology of Formation of Mesostructures in Sintered WC–Co and WC–Ni Solid Alloys// Material Science. – 2022. –V. 58.– P. 175–179. <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00646-2>
3. Vynar V. A., Corrosion behavior of VN20 alloy doped with graphite or chromium and vanadium carbides // Material Science.–2015. – V.50, No. 5. – P. 721–725 <https://doi.org/10.1007/s11003-015-9777-0>.

# **Аналіз властивостей матеріалів електродів для електроконтактної обробки харчових продуктів та середовищ**

Валерій Михайлов, д.т.н., проф.  
Андрій Шевченко, к.т.н., доц.  
Світлана Прасол, к.т.н., доц.

Державний біотехнологічний університет,  
вул. Алчевських, 44, Харків, 61002, Україна  
process229@ukr.net

**Ключові слова:** електроди, матеріал, електроконтактне нагрівання, електроліз, електрохімічна стійкість, графіт, нікель.

## **1 Вступ**

Розвиток галузі харчової промисловості і ресторанного господарства потребує підвищення технічного рівня підприємств шляхом впровадження результатів наукових досліджень, виконаних за напрямом енерго- та ресурсозбереження. Вирішення такого завдання можливе шляхом використання електроконтактного нагрівання (ЕКН). При застосуванні ЕКН значній увазі приділяються питання електрохімічним процесам, що при цьому відбуваються. Так, було виконано аналіз властивостей матеріалів електродів для електроконтактної обробки харчових продуктів та середовищ. Для ЕКН застосовують електроди з різноманітних матеріалів та сплавів.

## **2 Характеристика способу електроконтактної обробки харчових продуктів та середовищ**

За умов ЕКН електрична енергія перетворюється в теплову безпосередньо в провідному середовищі, що є важливою перевагою методу [1, 2]. Використання ЕКН можливе для отримання різноманітної кулінарної продукції, в тому числі жареної [3].

При застосуванні ЕКН значній увазі приділяються питання електрохімічним процесам, що при цьому відбуваються. Так, проходження постійного електричного струму через харчові продукти супроводжується електролізом. У колоїдних системах та капілярно-пористих тілах спостерігаються також процеси електрофорезу, електроосмосу, електродіалізу та ін. Для уникнення помітних явищ електролізу часто використовують змінний струм промислової частоти, що є зручним та

економічно доцільним, оскільки при цьому значно спрощується схема пристрою, виключити витрати електроенергії на перетворення частот.

### 3 Властивості матеріалів електродів для електроконтактного нагрівання

Для ЕКН застосовують електроди з різноманітних матеріалів та сплавів [4]. Узагальнені властивості матеріалів електродів для ЕКН представлені в таблиці 1.

**Таблиця 4.** Узагальнені властивості матеріалів при їх застосуванні в якості електродів для ЕКН.

Матеріал або сплав	Середовище застосування та електричні параметри	Міцність	Електрохімічна стійкість
Графіт	Будь-яке	Недостатня	Висока
Ti-Ag (80+20 %), Ta	Розчин NaCl з концентрацією 0,1...2 %; м'ясний фарш; щільність струму 0,1...0,5 А/см <sup>2</sup> з частотою 50 Гц	Достатня	Електроліз
Ta-Nb (95+5 %)	Розчин NaCl з концентрацією 0,1...0,3 %; м'ясний фарш; щільність струму 0,1...0,2 А/см <sup>2</sup> з частотою 50 Гц	Достатня	Достатня
Ti-Pa (95+5 %) Ti	Розчин NaCl з концентрацією 0,3 %; щільність струму 0,1...0,3 А/см <sup>2</sup> М'ясний фарш; щільність струму 0,1...0,3 А/см <sup>2</sup> ; частота 50 Гц	Достатня	Нестійка
Титан ВТ-4, ВТ-5	М'ясний фарш	Достатня	Темна поверхня зразків фаршу
Ag, Ni	М'ясний фарш; частота 50 Гц	Достатня	Перехід іонів з електродів в продукт
Fe	Розчин NaCl; частота 7...14 кГц	Достатня	Достатня
			Перехід іонів з електродів в продукт

Для електроконтактної обробки м'ясних продуктів часто застосовують електроди з графіту. Вони володіють доброю хімічною і електрохімічною стійкістю, проте виготовлення, монтаж і очищення їх ускладнені через малу механічну міцність.

Інший матеріал, що може застосовуватись для наведених вище цілей, є титан. Відомо, що він характеризується як один з найбільш корозієстійких матеріалів в харчових середовищах. Наразі існує досить багато теоретичних і експериментальних даних, підтверджуючих високу корозійну стійкість титану



і його сплавів. Проте, відомості про його електрохімічну стійкість в цих середовищах мало вивчені. Тому важливими є результати досліджень з його застосування в якості матеріалу для електродів при електроконтактній обробці.

Електроди зі сплавів титана BT-4 і BT-5 є нестійкими в середовищі м'ясного фаршу. Значно стійкішими є електроди з технічно чистого титану, проте внаслідок значних коливань щільності струму у виробничих умовах стійкість їх також недостатня. Щодо контакту електродів з нікелю з м'ясним фаршем при його електроконтактній обробці, то нікель володіє доброю хімічною стійкістю. Крім того, нікель є компонентом неіржавіючої сталі, яка широко застосовується в харчовій промисловості. Отже, можливе його застосування для електродів при ЕКН [5].

Таким чином, застосування в якості електродів з графіту є недоцільним, так як він не відповідає вимогам на міцність, а використання металевих електродів обмежено частотою та щільністю електричного струму. Для електроконтактної обробки харчових продуктів та середовищ, ґрунтуючись на наведеному аналізі, доцільним є вибір електродів, виготовлених на основі нікеля. Цей матеріал є досить міцним, а його електрохімічна стійкість є задовільною при частотах близьких до 50 Гц, що є мінімально необхідним для уникнення електролізу. Використання електродів зі срібла є недоцільним з економічної точки зору, зважаючи на його значну вартість.

## Список посилань

1. Chapter 11 – Ohmic Heating of Fluid Foods [Електронний ресурс] // ScienceDirect. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123814708000116> (дата звернення: 29.03.2024). – Назва з екрана.
2. Ohmic heating [Електронний ресурс] // Britannica Online Encyclopedia. – Режим доступу: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/426067/ohmic-heating> (дата звернення: 29.03.2024). – Назва з екрана.
3. Використання електроконтактного нагрівання в процесах та апаратах харчової промисловості [Електронний ресурс] / І.Г. Бабанов [та ін.] // Харчова промисловість. – 2018. – № 24. – С. 85-91.
4. Шевченко А.О. Властивості матеріалів електродів для електроконтактної обробки харчових продуктів / А.О. Шевченко // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. пр. – Х.: ХДУХТ, 2008. – Вип. 2 (8). – С. 303-308.
5. Нові технічні рішення в проектуванні обладнання для теплової обробки харчової сировини: монографія в 3 ч. Ч. 2 Використання електроконтактного нагрівання в процесах жарення кулінарної продукції / О. І. Черво [та ін.]. – Х.: ХДУХТ, 2012. – 151 с.

## Моделювання деформаційної обробки пористих заготовок, матеріал яких містить жорсткі включення

Михайлов О.В., д. т. н., с. н. с.

Михайлов А.О., доктор філософії

Штерн М. Б., д. т. н., проф., чл.-кор. НАН України

Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України,  
вул. Омеляна Пріцака, 3, Київ, 03142, Україна  
olmi.2021@gmail.com

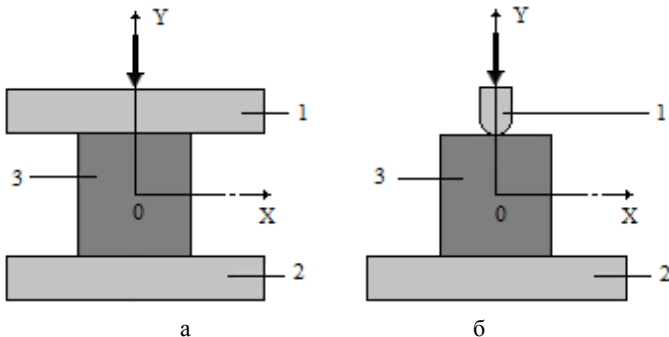
**Ключові слова:** комп'ютерне моделювання, метод скінчених елементів, пластичність, деформування, композиційний матеріал, когезійна взаємодія

В даний час все більше застосування знаходять композиційні матеріали, що складаються з компонентів, які істотно відрізняються за своїми властивостями. До них, зокрема, відносяться матеріали з металевою матрицею та керамічними включеннями. При цьому матрицю композиційного матеріалу отримують в результаті ущільнення металевого порошку і, у зв'язку з цим, вона може бути пористою. Виготовлення кінцевих виробів з одержаного композиційного матеріалу можливе методом деформаційної обробки. Тому дослідження закономірностей цього процесу є актуальним.

Методом комп'ютерного моделювання досліджено процес деформаційної обробки пористих заготовок, матеріал яких містить жорсткі включення. Виконано аналіз напружено-деформованого стану та визначено розподіли накопиченої пластичної деформації матеріалу матриці та величини її залишкової пористості. Враховувалася когезійна взаємодія між пластичною пористою матрицею та жорсткими включеннями.

Розглянуто дві схеми деформування заготовок з композиційного матеріалу: вільна осадка та вдавлювання сферичного пуансону (рис.1). Моделювання виконано методом скінчених елементів [1] із використанням співвідношень теорії пластичності пористого тіла [2]. Матеріал матриці – сплав Al, матеріал включень – SiC. Вважали, що матеріал матриці деформується пружно-пластично, а матеріал включень – пружно. Деформуючий інструмент розглядався як абсолютно жорстке тіло. Початкова пористість матеріалу матриці була 0.3. Коефіцієнт тертя між інструментом та заготовкою приймали рівним 0.15. Розглядали плоско-деформований стан, враховували властивості симетрії.

При моделюванні когезійної взаємодії між матрицею та включеннями використовували поняття когезійної зони (Cohesive Zone), яка характеризується залежностями напруження – переміщення (або деформації) у нормальному та дотичних напрямках до контактної поверхні. Вигляд цих залежностей, що описують еволюцію руйнування, може бути різним і визначається властивостями зв'язків між компонентами композиційного матеріалу. При цьому допускається деформація з можливим відривом в напрямку нормалі до поверхні контакту під дією навантажень, що розтягують. Під дією стискаючих навантажень деформація не відбувається. Крім того, можлива деформація зсуву. Залежності напруження – переміщення при нормальному і дотичному навантаженні, що визначають еволюцію відшарування матриці від включення, а також параметри когезійної взаємодії були взяті на підставі результатів роботи [3].



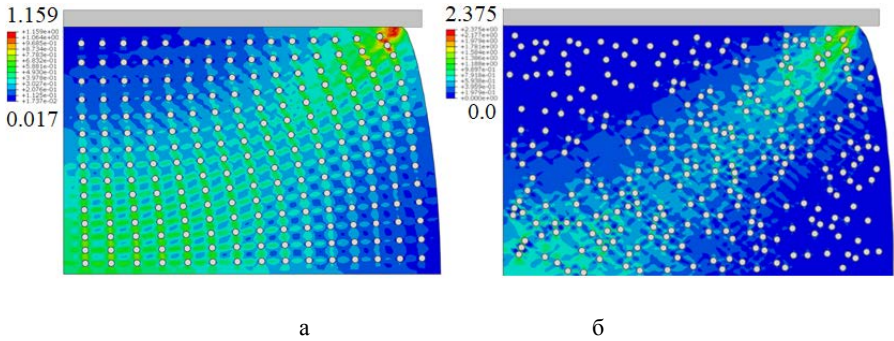
**Рис. 16.** Схеми вільної осадки (а) та вдавлювання сферичного пуансона (б):  
1 - деформуючий інструмент; 2 - нижня плита; 3 – заготовка

Аналіз результатів моделювання показав, що напружено-деформований стан заготовки подібний до стану деформованої заготовки, що не містить жорстких включень. При вільній осадці максимальна деформація відбувається в центральній зоні заготовки та у її торцях близько бічної поверхні. У торцях заготовки в безпосередній близькості від осі симетрії знаходиться зона утрудненої деформації. При вдавлюванні сферичного пуансона максимальна деформація відбувається в області контакту з інструментом.

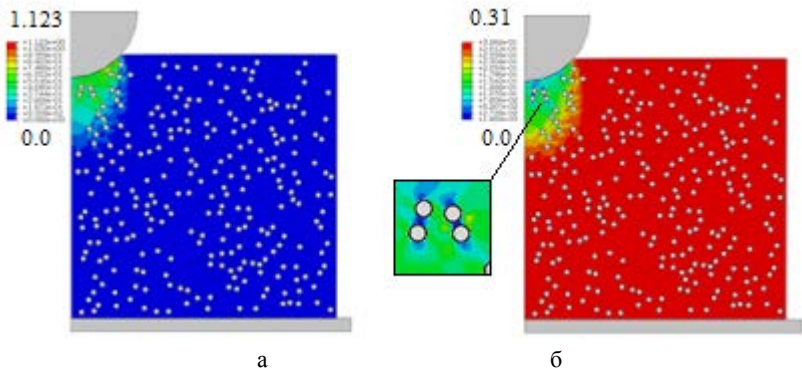
Водночас наявність жорстких включень вносить низку особливостей. Максимальні напруження виникають в областях біля включень і в них самих. Ці області є областями можливого відриву включень від матриці. На напружено-деформований стан заготовки впливає розташування включень по її об'єму (рис.2).

Також встановлено, що в результаті взаємодії жорстких включень, між ними можуть утворюватися локальні області, які характеризуються вищими

значеннями накопиченої пластичної деформації та меншою величиною залишкової пористості. (рис.3).



**Рис. 2.** Розподіл величини накопиченої пластичної деформації при регулярному (а) та нерегулярному розташуванні жорстких включень



**Рис. 3.** Розподіл величин накопиченої пластичної деформації (а) та пористості матеріалу матриці

## Список посилань

1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике: Пер. с англ. М.: Мир, 1975. 541с
2. Штерн М.Б., Михайлов О.В., Михайлов А.О. Узагальнена континуальна модель пластичності порошкових та пористих матеріалів. Порошкова металургія. Київ, 2021. № 1/2. С. 27 – 44
3. Dandekar, C.R., & Shin, Y.C. (2011). Molecular dynamics based cohesive zone law for describing Al–SiC interface mechanics. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 42(4), 355–363

# ВПЛИВ ВМІСТУ ОРГАНІЧНОГО ВОЛОКНА СУЛЬФОН-Т НА ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОРГАНОПЛАСТИКІВ

Ольга Набережна, кандидат технічних наук  
Світлана Головка

<sup>1</sup> Дніпровський державний технічний університет,  
вул. Дніпробудівська, 2а, Кам'янське, 51900, Україна  
[o.naberezhnaya@gmail.com](mailto:o.naberezhnaya@gmail.com)

**Ключові слова:** органопластики, полімерні композити.

## 1 Вступ

На сьогодні машинобудування переживає підйом, у зв'язку з чим збільшується потреба у нових полімерних виробках, які широко використовуються в різних галузях промисловості. Цей напрямок займає 18% від світового споживання полімерів, поступаючись будівельним полімерам лише на 4% [1]. Серед існуючих полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) саме органопластики, можна виділити як багатофункціональні матеріали. Вони відрізняються від типових представників ПКМ полімерною природою обох компонентів – матриці та волокна. Це наділяє їх високою міцністю, низькою щільністю та гарними теплофізичними характеристиками [2].

Тому, в даній роботі представлені результати дослідження експлуатаційних характеристик органопластиків на основі ароматичного поліаміду фенілон, армованого органічним волокном сульфон-Т.

## 2 Об'єкти і методи дослідження

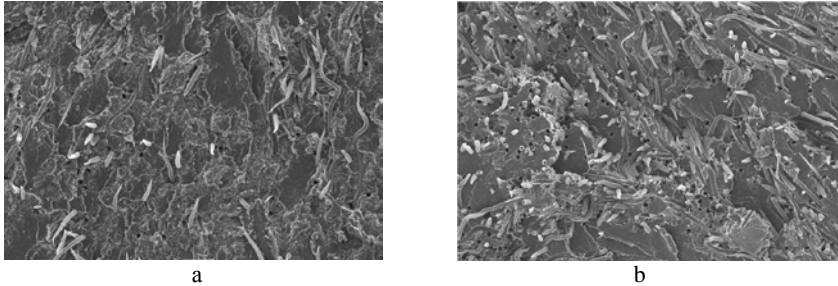
В якості матриці було обрано ароматичний поліамід фенілон С-1, а армуючим наповнювачем – дискретне волокно сульфон-Т. Композиції перероблялися методом компресійного пресування. Досліджувалися фізико-механічні характеристики матеріалів стандартів для пластмас.

## 3 Результати і обговорення

Армуючі волокна в органопластиках найбільш явно проявляють підвищення міцності композиту тоді, коли поряд з високими адгезією і здатністю змочувати (насичувати) полімерна матриця володіє комплексом

властивостей, який дозволяє забезпечити спільну роботу волокон у процесі деформації та найбільшу монолітність системи [3]. Цього можна досягти за рахунок рівномірного розподілу органічного волокна у в'язучому.

Дослідження мікроструктури отриманих органопластиків показало, що обраний метод змішування та пресування композицій із вмістом 5-20 мас. % волокна сульфон-Т у полімерній матриці фенілон забезпечує ідеальний розподіл армуючих волокон (рис. 1).



**Рис. 17.** Електронні мікрофотографії вихідного полімеру (а) та органопластиків на його основі, що містять 5 (а); 20 (б) мас.% волокна

Міцнісні характеристики органопластиків, армованих волокном сульфон-Т перевищують базовий полімер (табл.1), за показниками модулів Юнга в 1,48 рази, а коефіцієнта Пуассона у 1,3 рази.

**Таблиця 5.** Фізико-механічні характеристики органопластиків

Показники	Вміст волокна, мас.%				
	0	5	10	15	20
Модуль Юнга, МПа	2500	2700	3184	3400	3700
Коефіцієнт Пуассона	0,21	0,21	0,25	0,25	0,27

Таким чином, було встановлено, що розроблені органоластики на основі фенілону мають необхідні властивості для машинобудування: низьку щільність і високі характеристики міцності.

## Список посилань

1. Застосування полімерних композитів в агропромисловому комплексі: монографія / А.С. Кобець, О.Д. Деркач, О.П. Чигвінцева, О.С. Кабат, І. Рула, В.Ю. Дудін, Д.О. Макаренко, Ю.В. Бойко; Дніпровський держ. аграр.-екон. ун-т. – Дніпро: Журфонд, 2022. – 356 с. – Режим доступу: <http://dspace.dsau.dp.ua/jspui/handle/123456789/7031>.
2. Мамуня Є.П., Юрженко М.В., Лебедев Є.В. та ін. Електроактивні полімерні матеріали / Є.П. Мамуня, М.В. Юрженко, Є.В. Лебедев, В.В. Левченко, О.В. Черваков, О.К. Матковська, О.С. Сverdліковська. – К.: Альфа Реклама, 2013. – 402 с.

## Управління формоутворенням осесиметричної заготовки при деформуючому протягуванні зі значними деформаціями

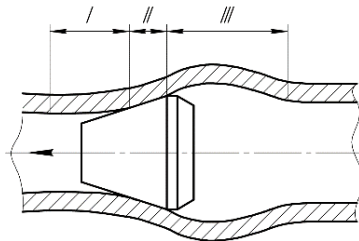
Немировський Яків<sup>1</sup>, доктор технічних наук, професор  
Шепеленко Ігор<sup>2</sup>, доктор технічних наук, професор  
Отаманський Валентин<sup>1</sup>, старший викладач

<sup>1</sup> Державний університет «Житомирська політехніка»,  
вул. Чуднівська, 103, Житомир, 10005, Україна

<sup>2</sup> Центральноукраїнський національний технічний університет,  
пр. Університетський, 8, Кропивницький, 25006, Україна  
kntucpfzk@gmail.com

**Ключові слова:** деформуюче протягування, формоутворення.

Відомо, що осередок деформації при деформуючому протягуванні складається із ділянки контакту II, також двох позаконтактних зон I і III, що сполучуються з нею. (рис. 1) [1]. Причому, деформування в різних зонах осередку деформації слід розглядати як єдиний процес пластичної формозміни заготовки, який одночасно на всіх ділянках визначає її напружено-деформований стан (НДС).



**Рис. 18.** Схема осередку деформації: I, III – позаконтактна зона; II – ділянка контакту [1]

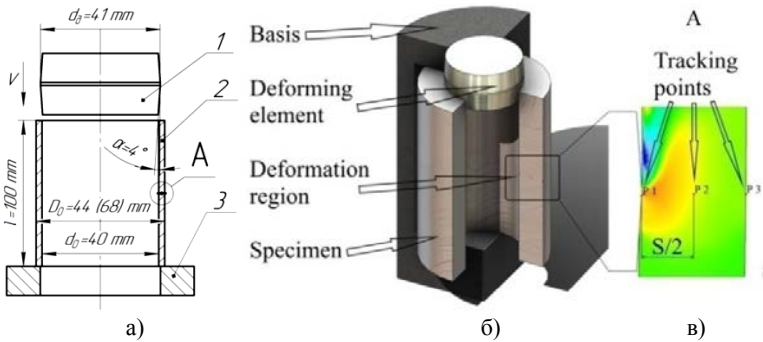
Також відомо, що зростання товстостінності заготовки призводить до появи критичного контактного тиску, який викликає в місцях сполучення ділянки контакту з поза контактними зонами виникнення зон локального пластичного деформування. Товщина стінки, при досягненні якої виникають зони локального пластичного деформування, називається критичною. Остання залежить від натягу на елемент  $a$  і кута  $\alpha$ , а також товстостінності заготовки  $t_0/d_0$  [2].

Попередньо проведені дослідження [3] засвідчили, що зони локальної пластичної деформації виникають навіть при деформуючому протягуванні заготовок із малопластичних матеріалів, наприклад із чавуну, які

обробляються виключно з малими натягами, що забезпечує наявність в контактній зоні критичних контактних тисків.

При цьому особливого значення набувають дослідження можливостей операції деформуючого протягування, тому що, наприклад, за рахунок управління процесу формоутворення заготовки можливе отримання необхідних розмірів заготовок шляхом вибору необхідних режимів обробки та геометрії інструменту.

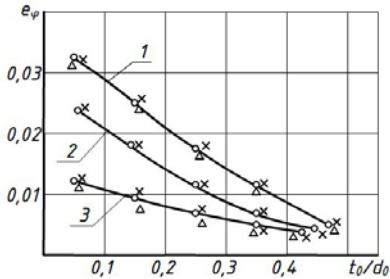
З метою дослідження технологічних можливостей деформуючого протягуванні авторами представленої роботи проведено моделювання НДС осесиметричної заготовки з пластичного матеріалу – сталі 12ХН3А. Побудова схеми скінченно-елементної моделі (рис. 2) виконувалася за методикою, представленою в роботі [4].



**Рис. 2.** Побудова скінченно-елементної моделі:

- а) схема обробки: 1 – деформуючий елемент; 2 – осесиметрична заготовка; 3 – основа;
- б) моделювання деформуючого протягування;
- в) фрагмент обробленої поверхні при моделюванні деформуючого протягування

За результатами моделювання отримано зв'язок між окружною деформацією  $e_\varphi$  та товстостінністю заготовки  $t_0 / d_0$  (рис. 3).



**Рис. 3.** Залежність окружної деформації  $e_\varphi$  від товстостінності заготовки  $t_0 / d_0$  при обробці з натягом на елемент  $a / d_0$ : 1 – 0,0375; 2 – 0,025; 3 – 0,0125 з різними кутами  $\alpha$ :  $\circ$  – 4°;  $\times$  – 8°;  $\Delta$  – 2°



Отримані дані свідчать про те, що окружна деформація  $e_\varphi$  залежить тільки від товстостінності заготовки  $t_0/d_0$  та натягу на елемент  $a$ . Кут робочого конусу деформуючого елемента  $\alpha$  практично не впливає на значення окружної деформації  $e_\varphi$  зовнішньої поверхні заготовки.

Апроксимація даних (рис. 3) дозволила отримати рівняння, що пов'язує натяг  $a$  та окружну деформацію  $e_\varphi$ :

$$e_\varphi = -1,73t_0 / d_0 + 0,95a / d_0 . \quad (1)$$

Дані моделювання дали змогу уточнити раніше отриману експериментальну залежність [1]:

$$\alpha^* = \frac{0,35(1+100a/d_0)}{t_0/d_0} . \quad (2)$$

Залежність (2) дозволяє за рахунок натягу, відповідального за збільшення розміру зовнішньої поверхні, визначити кут  $\alpha$ , що забезпечує нульову зміну довжини заготовки. Отже, в залежності від вимог до деталі виконуються умови, за яких заготовка або подовжується  $\alpha > \alpha^*$ , або скорочується  $\alpha < \alpha^*$ .

## Список посилань

1. Інженерія деталей, оброблених протягуванням/ Е.К. Посвятенко, Я.Б. Немировський, С.Є. Шейкін, І.В. Шепеленко, О.В. Чернявський / ІНМ ім. Бакуля НАН України, ЦНТУ МОН України, Кропивницький: видавець Лисенко В.Ф., 2021. – 466 с.
2. Shepelenko, I., Nemyrovskiy, Y., Chernovol, M., Kyrychenko, A., Vasylenko, I. (2022). Deformation Zone Scheme Clarification During Deforming Broaching. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing V. DSMIE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-06025-0\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-031-06025-0_30).
3. Shepelenko, I., Nemyrovskiy, Y., Mahopets, S., Lizunkov, O., Osin, R. (2023). Features of Deformation Mechanics in the Deformation Zone During Deforming Broaching of Cast Iron Workpieces. *Advanced Manufacturing Processes IV. InterPartner 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_20).
4. Nemyrovskiy, Y., Shepelenko, I., Storchak M. Plasticity Resource of Cast Iron at Deforming Broaching. *Metals* 2023, 13(3), 551. <https://doi.org/10.3390/met13030551>.

# **Штучне закриття тріщин як метод підвищення втомної міцності сталей морських портових конструкцій**

Олександр Нестеров <sup>[0000-0002-8717-5289]</sup>

Одеський національний морський університет,  
вул. Мечникова, 34, Одеса, 65029, Україна  
[shury.nesterov@gmail.com](mailto:shury.nesterov@gmail.com)

**Ключові слова:** втомна міцність, закриття тріщин, лебідка крану.

## **1 Вступ**

Значну частину підйимально-розвантажувального обладнання портових конструкцій експлуатують за інтенсивного циклічного навантаження, що часто зумовлює в найбільш навантажених елементах конструкцій появу втомних тріщин [1]. Практикою експлуатації встановлені ділянки з високою вірогідністю появи в них тріщин і вони знаходяться під особливою увагою при експертизі технічного стану такого обладнання. З іншого боку, відомі методи гальмування втомних тріщин в конструкційних сталях штучним створенням так званого ефекту закриття тріщин [2, 3] використанням спеціального технологічного середовища [4]. Суть ідеї підвищення втомної міцності сталей морських портових конструкцій базується на гальмуванні стадії зародження втомних тріщин, як це було запропоновано стосовно насосних штанг нафтовидобувного обладнання, які експлуатуються в умовах циклічного навантаження [5]. Позитивний ефект проявився в істотному підвищенні границі витривалості сталей штанг. У даній праці цей метод підвищення втомної міцності сталей поширено на елементи конструкцій підйимально-розвантажувального обладнання.

## **2 Об'єкт досліджень**

Об'єкт підвищення втомної міцності – вантажна лебідка порталного крану, в стінці якої поблизу зварного з'єднання з віссю часто виявляють втомні тріщини (рис. 1). Таким чином, ця ділянка стінки лебідки практично визначає її довговічність.



**Рис. 19.** Ділянка стінки лебідки, яка потенційно схильна до утворення в ній утомних тріщин

### **3 Технологічна процедура використання методу підвищення втомної міцності сталей**

Для практичного використання методу розроблено герметичну камеру із прозорого хімічно інертного матеріалу, яка охоплює потенційно небезпечну ділянку навколо осі барабану. В камеру заливають водний розчин спеціального технологічного середовища [5], яке неагресивне в корозійному відношенні при взаємодії з іншого боку, цей технологічний розчин, як показано попередніми дослідженнями [2, 3] активний з огляду на формуванні в порожнині втомної тріщини значної кількості твердих продуктів взаємодії зі сталями даного класу. Вони запобігають закриттю тріщини в напівциклі розвантаження, що в параметрах механіки втомного росту тріщини означає зменшення ефективного коефіцієнта інтенсивності напружень. Відповідно знижується механічна рушійна сила втомного росту тріщини. Можна очікувати, що і у випадку вантажної лебідки, гальмування стадії зародження росту втомної тріщини буде ефективним з огляду на підвищення втомної міцності металу і довговічності лебідки в цілому.

### **Список посилань**

1. Pustovyi V.M., Semenov P.O., Nemchuk O.O., Nesterov O. A., Strelbitskiy V. V. Degradation of steels of the reloading equipment operating beyond its designed service life // *Materials Science*. – 2022. – 57. – P. 640–648.
2. Khaburskiy Ya., Slobodyan Z., Hredil M., Nykyforchyn H. Effective method for fatigue crack arrest in structural steels based on artificial creation of crack closure effect // *International Journal of Fatigue*. – 2019. – 127. – P. 217–221.

3. Lesiuk G., Nykyforchyn H., Zvirko O., Mech R., Babiarchuk B., Duda S., De Arrabida Farello J.-M., Correia Jose A.F.O. Analysis of the deceleration methods of fatigue crack growth rates under mode I loading type in pearlitic rail steel // *Metals* – 2021. – v. 11, № 4. – P. 584.
4. Патент України № 128514. Спосіб гальмування росту втомної тріщини / Г. М. Никифорчин, З. В. Слободян, Я.М. Хабурський, В. М. Пустовий, О. І. Звірко, Н. В. Крет. 2018. Бюл. № 18.
5. Kopei B. V., Zvirko O. I., Venhrynyuk T. P., Slobodyan Z. V., Shtoiko I. P. Elevation of the fatigue strength of pump rods as a result of treatment with a special medium // *Materials Science*. – 2020. – 56. – P. 125–131.

# Термоелектричні сенсори в медичній діагностиці

Никируй Любомир<sup>1</sup>[0000-0002-3754-0348], Федосов Сергій<sup>2</sup>[0000-0003-3457-8911]  
Замуруєва Оксана<sup>3</sup>[0000-0003-0032-0613], Яворський Ростислав<sup>1</sup>[0000-0001-5690-7486]  
Базиліук Віктор<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,  
вул. Шевченка, 57, Івано-Франківськ, 76018, Україна

<sup>2</sup> Луцький національний технічний університет,  
вул. Львівська, 75, Луцьк, 43018, Україна  
[fedosov.serhiy@gmail.com](mailto:fedosov.serhiy@gmail.com)

<sup>3</sup> Волинський національний університет імені Лесі Українки,  
просп. Волі, 13, Луцьк, 43025, Україна

<sup>4</sup> Луцький медичний інститут,  
вул. Лесі Українки, 2, Луцьк, 43016, Україна

**Ключові слова:** термоелектричні сенсори, медична діагностика.

## 1 Вступ

Датчики для моніторингу життєво важливого здоров'я стають все більш популярними як у нашому повсякденному житті, так і в медичній діагностиці. Фізичне зондування – це унікальна сенсорна платформа, де сенсорні пристрої реагують на фізичні властивості (наприклад, випромінювання, світло, потік, тепло, тиск, магнітне поле та параметри, пов'язані з масою чи енергією) і перетворюють їх на сигнали для кількісного визначення.

## 2 Результати досліджень

Зі збільшенням уваги громадськості до самоконтролю діабету розробка візуального зчитування, простих у використанні біосенсорів, які можна носити, викликала значний інтерес. Комплексний огляд [1] усуває розрив у практичній оцінці між методами оптичної біовізуалізації, одноразовими тест-смужками, конструкціями датчиків і повною інтеграцією в гнучкі пристрої на основі шкіри або контактні лінзи за допомогою бездротової передачі сигналу виявлення глюкози в фізіологічних рідинах на місці. На сьогоднішній день повністю модульована інтеграція нано/мікромасштабних оптичних біосенсорів у переносні електронні пристрої, такі як смартфони, має вирішальне значення для продовження періодів клінічної діагностики в приміщенні та на відкритому повітрі. Слід приділити увагу вдосконаленню

інвазійних, бездротових і портативних сенсорних технологій для покращення застосовності та надійності відображення на екрані, безперервного моніторингу, динамічної візуалізації даних, збору в режимі он-лайн та медичної допомоги хворим на цукровий діабет самостійно та вдома.

У роботі [2] розглядаються розробки та вимоги до переносних гнучких електронних пристроїв у медичному моніторингу, а потім обговорюються можливі застосування та проблеми використання технології гнучких датчиків для пристроїв на місці надання медичної допомоги. Нарешті, підсумовано сучасне обговорення гнучкого датчика, його майбутні перспективи та рішення, які він може надати в медичному та діагностичному обладнанні.

Новий біоелектронний датчик, у якому живі імунні клітини перетворюються на унікальні пари біотрансдукторів шляхом розробки їх молекулярного розпізнавання для попередньо відібраних антигенів, що представляють клінічний інтерес, описано у [3]. Цей «гібридний» біосенсор, сконструйований із тучними клітинами, з'єднаними з термоелектричним пристроєм мікрофабрикату з використанням біомолекулярних зв'язків, здатний виявляти антигени в режимі реального часу шляхом перетворення хвилинних теплових змін, що виникають у результаті процесів активації тучних клітин, індукованих антигеном. Термоелектричний підхід було обрано на основі попередніх біоенергетичних розрахунків, які показали, що метаболічні зміни, що виникають внаслідок розпізнавання антигену тучними клітинами, призводять до значного збільшення екзотермічного тепла відносно умов основного метаболізму. Експериментальні дослідження підтвердили, що активацію тучних клітин і дегрануляцію можна термічно відрізнити від основної метаболічної активності. Такі гібридні біосенсорні підходи на основі клітин можуть значно розширити можливості вибіркового швидкого виявлення антигенів на місці для широкого спектру клінічно значущих антигенів і запропонувати нові підходи до діагностики *in vitro*.

Високий термічний опір між шкірою та пристроєм призводить до низьких градієнтів температури (2–10 K), що ускладнює генерацію корисної енергії цим пристроєм. Дослідження [4] зосереджено на оптимізації конструкції мікротермоелектричного генератора для таких низькотемпературних застосувань і досліджує роль структурних геометрій у підвищенні загальної вихідної потужності. У цьому дослідженні використовуються властивості телуриду сурми вісмуту *p*-типу (BiSbTe) і телуриду міді *n*-типу (CuTe). Усі моделювання та оптимізація виконані відповідно до обмежень мікрофабрикатів разом із реалістичними сценаріями температурного градієнта. Було проведено низку структурних оптимізацій, включаючи геометрію термоелектричного опору, шари з'єднувального контактного матеріалу та коефіцієнт заповнення всього пристрою. Оптимізований структурний дизайн мікротермоелектричного пристрою продемонстрував максимальну вихідну потужність 0,796 мВт і 3,18 мВт під впливом низькотемпературного градієнта 5 K і 10 K відповідно. Ці значення вихідної

потужності мають високий потенціал до реалізації майбутніх носимих пристроїв.

Традиційне спостереження за кардіологічними імплантованими електронними пристроями передбачає періодичне завантаження даних, які здебільшого не використовуються. Віддалений моніторинг являє собою зміну парадигми від епізодичного спостереження в офісі до постійного моніторингу продуктивності пристрою, стану пацієнта та захворювання. Це зменшує клінічне навантаження на пристрій і може також призвести до економії коштів. Технологія віддаленого моніторингу має потенціал для покращення результатів за рахунок раннього виявлення аритмій і порушення цілісності пристрою та, можливо, прогнозування госпіталізації через серцеву недостатність завдяки інтеграції діагностики серцевої недостатності та гемодинамічних моніторів. Платформи віддаленого моніторингу також є величезними базами даних пацієнтів і пристроїв, що пропонують безпрецедентні можливості для дослідження результатів у реальному світі. У роботі [5] описується поточний стан даної проблеми та прогнозуються майбутні напрямки.

## **Список посилань**

1. Reda A., El-Safty S.A., Selim M.M., Shenashen M.A. Optical glucose biosensor built-in disposable strips and wearable electronic devices. *Biosensors and Bioelectronics*. 2021. Vol. 185. 113237.
2. Wang L., Jiang K., Shen G. A perspective on flexible sensors in developing diagnostic devices. *Applied Physics Letters*. 2021. Vol. 119, № 15. 150501.
3. Pizziconi V.B., Page D.L. A cell-based immunobiosensor with engineered molecular recognition - Part I: Design feasibility. *Biosensors and Bioelectronics*. 1997. Vol. 12, № 4. P. 287–299.
4. Tanwar A., Lal S., Razeed K.M. Structural design optimization of micro-thermoelectric generator for wearable biomedical devices. *Energies*. 2021. Vol. 14, № 8. 2339.
5. Cronin E.M., Varma N. Remote monitoring of cardiovascular implanted electronic devices: A paradigm shift for the 21st century. *Expert Review of Medical Devices*. 2012. Vol. 9, № 4. P. 367–376.

# **Розробка функціональної моделі залежності розмірів зварювальної ванни від параметрів дугового автоматичного зварювання під флюсом**

Носов Д.Г., к.т.н., доцент  
Макаренко М.В., аспірант  
Шевцов В.Б., аспірант  
Слинько В.С., магістр

Дніпровський державний технічний університет,  
вул. Дніпробудівська, 2, Кам'янське, 51918, Україна  
[nosov\\_dstu@ukr.net](mailto:nosov_dstu@ukr.net)

**Ключові слова:** зварювання, формування валика, форма провару.

## **1 Методика розрахунку параметрів режиму зварювання та геометричних розмірів стикового з'єднання**

### **а. Визначення базової моделі**

Основною метою розрахунку параметрів режиму є визначення попередніх технологічних умов для забезпечення потрібної глибини проплавлення основного металу при якісному формуванні нанесеного шару.

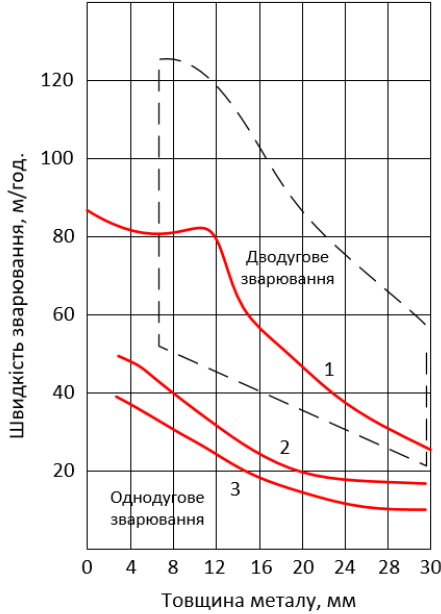
В якості вихідних даних для розрахунку режиму використовуються різні параметри. Однак найчастіше такими вихідними даними є товщина зварюваного металу або встановлена глибина проплавлення. Відомо, що швидкість зварювання пов'язана з товщиною зварюваного металу. Ця залежність представлена на рис. 1.

Відомий вплив швидкості зварювання на критичне значення форми провару. Коефіцієнт проплавлення ( $\psi$ ) повинен забезпечувати задовільне формування валика. На рис.2 показана залежність коефіцієнта  $\psi$  від швидкості зварювання, за якою встановлюється задовільне значення параметра.

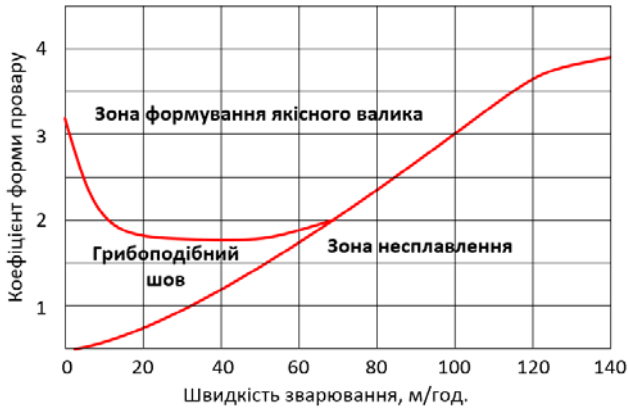
В більшості методик (візуальних або розрахункових) не враховано теплофізичні коефіцієнти, що характеризують основний метал (теплоємність, щільність, питома теплота плавлення, температура плавлення матеріалу електродного дроту та температура навколишнього середовища).

Наявність великої кількості коефіцієнтів, притаманних розрахунковим методам визначення режимів суттєво ускладнює застосування даних формул для практичних розрахунків.





**Рис. 20.** Залежність швидкості зварювання від товщини металу  
 1 – однодугове форсоване зварювання двобічний шов; 2 – однодугове зварювання;  
 3 – дводугове однобічне зварювання на флюсовій подушці



**Рис. 2.** Вплив швидкості зварювання на критичне значення форми провару

Визначену групу методик було оптимізовано та розширено, що потребувало подальшої експериментальної перевірки та верифікації.

## 2 Експериментальна перевірка визначеної моделі

Експериментальна оцінка запропонованої методики була проведена з використанням зварювання під флюсом АН-348А, дротом Св-08 діаметром 3, 4 та 5 мм, на зворотній полярності, з використанням зварювального трактора типу JASIC MZ-1250. Зварювання проводили на пластини товщиною 14 мм за планом експериментально-статистична модель другого порядку.

Для прикладу в таблиці 1 наведені результати експериментів з визначення швидкості подачі електродного дроту та геометричних розмірів наплавлених валиків в залежності від довжини виступу електрода.

**Таблиця 6.** Порівняння експериментальних та розрахованих значень геометричних розмірів наплавлених валиків (в міліметрах)

Параметр	L = 40 мм		L = 80 мм	
	експериментальні	розраховані	експериментальні	розраховані
Глибина проплавлення, h	2,9	2,7	2,5	2,4
Ширина валика, b	7,6	7,2	8,5	8,0
Посилення шву, C	1,8	1,9	2,0	2,4

Запропоновано функціональну модель для визначення параметрів зварювання під флюсом та очікуваних геометричних розмірів наплавленого валика, яка враховує вплив теплофізичних коефіцієнтів основного металу на його проплавлення.

Модель реалізовано у вигляді мобільного додатку на платформі Android.

# Дослідження зміни фізико-механічних характеристик порошків синтетичних алмазів, отриманих при їх флотаційному розділенні з попередньою спеціальною підготовкою

Олійник Н.О.<sup>1</sup>, к.т.н., ст. н с.; Ільницька Г.Д.<sup>1</sup>, к.т.н., ст. н с.  
Петасюк Г.А.<sup>1</sup> д.т.н., ст. н с.; Базалій Г.А.<sup>1</sup> науковий співробітник  
Заболотний С.Д.<sup>1</sup>, зам. зав. відділом; Рудь В.Д.<sup>2</sup> д.т.н., професор

<sup>1</sup>Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України,  
вул. Автозаводська, 2, Київ, 04074, Україна  
e-mail: oleynik\_nonna@ukr.net

<sup>2</sup> Луцький національний технічний університет,  
вул. Львівська, 75, Луцьк.43018, Україна

**Ключові слова:** порошок синтетичного алмазу, міцність при статичному стисканні, показник однорідності за міцністю, морфометричні характеристики, флотаційне розділення

## 1 Вступ

Відомо, що фізико-механічні характеристики порошку синтетичного алмазу, що застосовують в абразивному інструменті, впливають на його працездатність. Для отримання порошків високої якості в ІНМ ім. В.М. Бакуля розробляють методи і технології, які призводять до покращення фізико-механічних характеристик алмазних порошків.

## 2 Мета роботи

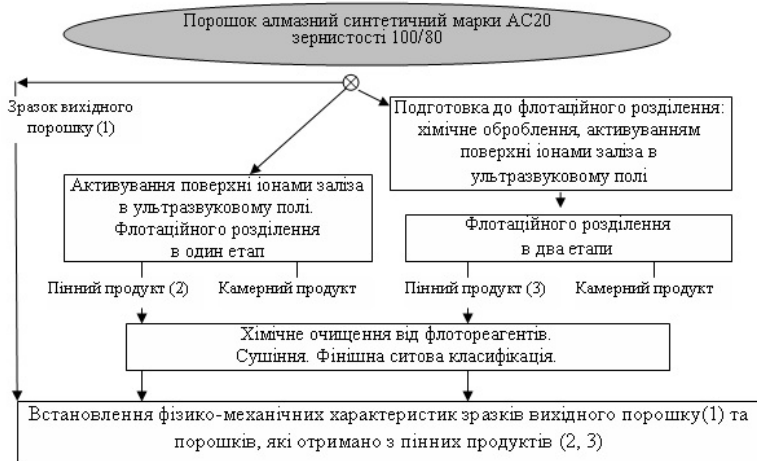
Дослідження зміни фізико-механічних характеристик порошку синтетичного алмазу, який отримано при його флотаційному розділенні з попередньою спеціальною підготовкою

## 3 Методика

Принципова схема виготовлення зразків порошків для дослідження – зразки вихідного порошку марки АС20 зернистістю 100/80, який синтезовано в системі Ni-Mn-C (1) та порошків, які отримано з пінних продуктів(2, 3) наведена на рис.1.

При дослідженні використовували методи: хімічний, магнітний, гравіметричний; ситовий аналіз; методи оптичної мікроскопії. Досліджено порошок алмазу марки АС20 зернистістю 100/80 (1) , який синтезовано в

системі Ni-Mn-C та порошки, які виготовлено з продуктів його попереднього спеціального хімічного оброблення та флотаційного розділення – пінний (2) та пінний (3). За нормативною документацією України, державними та галузевими методиками визначали зерновий склад, кількість основної фракції зернового складу, міцність порошку при статичному стисканні та показник однорідності за міцністю, масову частку домішок у вигляді розчинних компонентів та у вигляді неспаленого залишку, питому магнітну сприйнятливість. Морфометричні характеристики визначали за допомогою приладу DiaInspect.OSM [1].



**Рис. 1.** Принципова схема виготовлення зразків порошоків для дослідження фізико-механічних характеристик зразків вихідного порошку (1) та порошоків, які отримано з пінних продуктів(2, 3).

## 4 Результати та їх обговорення

Встановлено, що всі досліджені порошки відповідають марці AC20 зернистістю 100/80. Встановлені характеристики порошоків наведено в таблиці. Дослідженнями зміни показників характеристик відносно до вихідного порошку (1) показано, що у порошоків (2, 3) зафіксовано підвищення однорідності за міцністю у 1,25 рази (2) у 1,9 рази (3); підвищення показника міцності при статичному стисканні на 8,6% (3); зниження показника питомої магнітної сприйнятливості на 1 порядок (2) на 2 порядки (3); зниження масової частки домішок (у вигляді неспаленого залишку) у 1,6 рази (2) у 2,2 рази (3); зниження масової частки домішок (у вигляді розчинних компонентів) на 2 порядки (2), (3). За морфометричними характеристиками показники вихідного порошку (1) та порошоків, отриманих з пінних продуктів (2) (3), близькі за значеннями.

**Таблиця.** Фізико-механічні та морфометричні характеристики зразків вихідного порошку та порошку (1), які виготовлено з пінних продуктів, що отримано без попередньої підготовки (2) та з попередньою підготовкою (3)

Назва показників	Показники вихідного алмазного порошку марки АС20 зернистістю 100/80 (1), та порошоків, які виготовлено з пінних продуктів (2, 3).			
	Вихідний порошок (1)	Порошок (2)	Порошок (3)	
Питома магнітна сприйнятливість, $\chi \cdot 10^{-8}$ , м <sup>3</sup> /кг	32,86	3,42	0,40	
Міцність при статичному стисканні, Н	17,4	16,1	18,9	
Показник однорідності за міцністю, %	16	20	30	
Масова частка домішок (неспалимий залишок), %	2,22	1,37	1,00	
Масова частка домішок (у вигляді розчинних компонентів), %	0,61	0,01	0,01	
Частка основної фракції зернового складу, %мас.	71	71	71	
Компактність (форм фактор), $f_c$	середнє значення	1,3040	1,3263	1,3032
	однорідність	0,7107	0,6789	0,6855
Еліптичність, $E_l$	середнє значення	1,2778	1,2929	1,2709
	однорідність	0,5384	0,5409	0,5431
Шорсткість проекції зерен, $R_g$	середнє значення	1,0602	1,0640	1,0608
	однорідність	0,7402	0,7399	0,7350

## 5 Висновки

За результатами дослідження доведено, що при застосуванні спеціальної підготовки та флотаційного розділення відбувається покращення фізико-механічних характеристик порошку синтетичного алмазу.

Робота виконана за Меморандумом №17 від 30.01.2024 р. про співпрацю ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України та ЛНТУ.

## Список посилань

1. G.A. Petasyuk, H.D. Ilnytska, G.A. Bazalii, N.O. Oliinyk, Yu.V. Syrota, Flotation Separation as a Method of Improving the Uniformity of Synthetic Diamond Powders by Their Morphometric Characteristics, Grain Shape, and Grain Composition, Journal of Superhard Materials, 2024. Vol. 46. No. 1. pp. 65–75.

# Імплементация практик відкритої науки в процес підготовки сучасних фахівців

Орехова Т.В., доктор економічних наук, професор  
Дороніна О.А., доктор економічних наук, професор

Донецький національний університет імені Василя Стуса,  
вул. 600-річчя, 21, Вінниця, 21021, Україна  
t.oriekhova@gmail.com

**Ключові слова:** відкрита наука, переваги відкритої науки, Open Science Skills

## 1 Вступ

На сучасному етапі розвитку людство зтикається з численними проблемами унікального характеру, що потребують швидких та нестандартних рішень. Актуалізується потреба у фахівцях – практиках та дослідниках, які будуть володіти специфічним набором компетентностей, а також демонструвати готовність та мотивованість діяти в умовах високого рівня невизначеності й динамічності зовнішнього середовища. Вважаємо, що вагоме місце серед цих компетентностей наразі посідають Open Science Skills (навички володіння практиками відкритої науки), а отже ЗВО мають імплементувати підходи до їх розвитку у сучасних фахівців.

## 2 Місія відкритої науки у вирішенні глобальних проблем

За результатами досліджень ВЕФ наступне десятиліття буде характеризуватися екологічними та суспільними кризами, спричиненими глибинними геополітичними та економічними тенденціями. Серед 10 найбільш впливових та вирогідних ризиків 6 ризиків - екологічні: неспроможність пом'якшити зміну клімату; нездатність адаптуватися до зміни клімату; стихійні лиха та екстремальні погодні явища; втрата біорізноманіття та колапс екосистеми, кризи природних ресурсів; масштабні екологічні події. Серед решти ризиків слід відзначити, як найбільш важливі у короткостроковій та довгострокій перспективі, такі: «Геоенімічне протистояння», «Ерозія соціальної згуртованості та поляризація суспільства», «Широко поширена кіберзлочинність і кібербезпека» та «Масштабна вимушена міграція» [1].

Світова наука на сьогодні веде активні пошуки відповіді на питання: «Як зменшити викиди газів, підтримувати використання відновлювальних джерел, впроваджувати сталий спосіб життя?», «Як покращувати доступ до

освіти, охорони здоров'я, можливостей працевлаштування, щоб протидіяти нерівності у розподілі багатства?», «Як захищати природні місця мешкання, підтримувати зусилля зі збереження, боротися з незаконною торгівлею?».

Швидке відкриття та виробництво ефективної вакцини проти COVID-19, її широке розповсюдження є прикладом того, чого може досягти шляхом відкритості методів дослідження. Імпульс відкритої науки був безпрецедентним. Вірус SARS-CoV-2, що спричинює небезпечне інфекційне захворювання коронавірусну хворобу 2019, вперше був виявлений у грудні 2019 р. Геном вірусу першими повністю розшифрували служби охорони здоров'я КНР і 10 січня зробили його публічно доступним. У січні 2020 р. декілька організацій і установ почали працювати над створенням такої вакцини на основі опублікованого геному. Перше випробування вакцини розпочалося швидко, лише через 60 днів після того, як Китай поділився генетичною послідовністю коронавірусу, що є безпрецедентним для світової практики. Багато організацій використали опубліковані геноми для розробки можливих вакцин проти SARS-CoV-2. Станом на березень 2020 р. велося близько 300 досліджень. У розпал хвилі пандемії, 27.10 2020 р., Організація Об'єднаних Націй з питань освіти, науки і культури, Всесвітня організація охорони виступили із Спільним закликом щодо відкритої науки до наукових центрів, які окремо працювали над розробкою вакцини. По всьому світу завдяки відкритим даним розробників проводилися доклінічні дослідження. Країнам, в яких проводилася широка провітницька робота з населенням про способи обмеження передачі і поширення вірусу, про переваги вакцинації, вдалося уникнути великих спалахів. 5 травня 2023 року ВООЗ оголосила про завершення пандемії COVID-19 [2].

### **3 Переваги відкритої науки**

Відкрита наука має три головних переваги для науковців та суспільства в цілому:

1. доступ до наукових публікацій, даних, наукових результатів, програмних продуктів, навчальних джерел та технологій стає відкритим, безкоштовним. Руйнується система заробітку грошей на науковому прогресі окремих кіл, або обмеженого доступу до його результатів окремих еліт, які мають змогу за це платити. Результати наукового прогресу мають створювати суспільний добробут незалежно від ступеня розвитку країни або її економічного достатку;
2. поширення знань, даних та інструментів відбувається швидше, ніж це відбувалося за умови традиційних підходів;
3. завдяки відкритій науці підвищується якість та ефективність наукових досліджень.

Вражають дані результатів досліджень американських вчених: 12%

публікацій в медицині, 27% – у сфері природничих наук, 32% – у соціальних науках, 82% – у науках про людину залишаються невідомими і недонесеними до фахівців в умовах традиційної організації наукових досліджень. Тож, відкрита наука допомагає вирішити і цю проблему.

Розуміння розбудови науки на принципах відкритості та доступності, послідовний розвиток самої концепції Відкритої науки, визнання значення її результатів для створення безпечних умов для розвитку людства знаходить своє відображення й на рівні міжнародних політик. Саме тому заслуговує на підтримку позиція, що «хоча парадигма відкритої науки має певні регіональні особливості, це загалом глобальний рух, який можна розвивати тільки через істотну міжнародну співпрацю». Для України такий висновок є єдино вірним в її євроінтеграційних кроках.

#### **4 Розвиток OPEN SCIENCE SKILLS як інструмент підвищення якості вищої освіти та забезпечення конкурентоспроможності фахівців**

Важливою місією сучасних ЗВО є формування у здобувачів навичок, які дозволять їм професійно виконувати завдання фахового спрямування та продукувати інноваційні вирішення суспільнозначущих проблем. Серед ТОП затребуваних навичок 2030 представлені, зокрема, критичне мислення і аналіз, навички роботи з даними, навички роботи з віртуальними платформами для спільної роботи, креативне мислення [3]. Ці навички безпосередньо корелюються з концепцією відкритості науки та можуть розвиватися під час навчання в ЗВО при використанні відповідних практик (робота з відкритими науковими даними, відкриті наукові комунікації, застосування відкритих освітніх ресурсів та ін.). Повноцінна реалізація національного плану щодо відкритої науки [4] (в межах професійних компетентностей випускників ЗВО), також потребує розвинутих Open Science Skills.

Наразі, сучасні заклади вищої освіти скеровують свою освітню та наукову діяльність на формування та розвиток відповідних навичок у здобувачів освіти. Зокрема, в Донецькому національному університеті імені Василя Стуса, який є виконавцем проекту «Open Practices, Transparency and Integrity for Modern Academia» (OPTIMA), що реалізується в рамках програми Erasmus+ KA2, практики розвитку у здобувачів навичок відкритої науки активно імplementовані в освітній процес та позанавчальні активності (діяльність наукових гуртків, проведення науково-просвітницьких заходів тощо). В рамках освітніх компонент, що реалізуються в Університеті, розроблено відповідні тематичні блоки та окремі види завдань самостійної й індивідуальної роботи здобувачів, які дозволяються розвинути навички дослідницької, професійної та комунікаційної діяльності відповідно до



основних складників (компонент) відкритої науки. Для здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня, які проходять підготовку за освітньо-науковими програмами, що реалізуються на економічному факультеті запропоновано авторський вибірковий курс «Практики відкритої науки». Зазначені активності сприяють конкурентоспроможності молодих фахівців через їх підготовленість до дій в умовах відкритого глобального наукового та практичного простору.

## **Список посилань**

1. Global Risks Report 2024. – World Economic Forum. – URL: <https://www.weforum.org/publications/global-risks-report-2024/>
2. Коронавірус: що відомо про спалах смертельного захворювання. – BBC News Ukraine. – URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/features-51178798>
3. Десять найзатребуваніших навичок для 2030 року. URL: <http://surl.li/tilhv> (дата звернення: 27.04.2024 р.)
4. Про затвердження національного плану щодо відкритої науки: розпорядження КМУ № № 892-р від 08.10.2022 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/892-2022-%D1%80#Text> (дата звернення: 26.04.2024 р.)

# Статистичне дослідження модифікованого методу Терстоуна

Павлов Олександр Анатолійович, д.т.н, проф.  
Кобельський Вадим Володимирович, студент 5 курсу, магістр-науковець

Національний технічний університет України ім.Ігоря Сікорського “КПІ”

**Ключові слова:** модифікований метод Терстоуна, прийняття рішень в умовах невизначеності, лінійне програмування

## 1 Модифікований метод Терстоуна

### 1.1 Постановка задачі

Маємо  $m$  альтернатив  $A_i, i = \overline{1, m}$ . Існує невідома досліднику числова скалярна функція  $F(A_i)$ , аргументом якої є альтернатива. Функція  $F(A_i), i = \overline{1, m}$ , визначає інтегральну числову оцінку якості альтернативи  $A_i$ . Треба знайти найкращу альтернативу. Г. Терстоун розв’язує задачу в термінах теорії імовірності, а саме постулюються існування випадкових величин  $f(A_i), i = \overline{1, m}$  що являються незалежними, розподіленими нормально  $(n(x, v_i, \sigma_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-v_i)^2}{2\sigma_i^2}})$ , де  $v_i = Mf(A_i) = M_i$  – невідомі, інтегральні характеристики якості альтернативи  $A_i$ ,  $Df(A_i) = \sigma_i^2 = D$  – однакові (відомі чи невідомі). Випробуванням над випадковими величинами  $f(A_i), i = \overline{1, m}$ , вважається вимірювання  $f(A_i)$  що проводяться  $j$ -тим експертом у якого запитують про значення  $M_i, j = \overline{1, n}$ . Результат експертного оцінювання – числа  $x_{ij}, i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$ , де  $x_{ij}$ -оцінка  $j$ -того експерта числа  $M_i$ , що вважається реалізацією випадкової величини  $f(A_i)$ .

Треба за результатами проведених випробувань знайти  $arg \max_{i=\overline{1, m}} M_i$ , що відповідає вибору кращої альтернативи.

Розглянемо подію  $f(A_i) - f(A_j) \geq 0$  і за результатами проведених випробувань (експертних оцінок) знайдемо частість настання цієї події  $\frac{S_{ij}}{N}$ , де  $N = n^2$  чи  $n^2 - n$ . Приймається, що

$$\frac{S_{ij}}{N} \approx P(f(A_i) - f(A_j) \geq 0) \quad (2)$$

Можна показати, що при виконанні припущення (1) мають місце наступні рівності:

1) Нехай  $\frac{S_{ij}}{N} > \frac{1}{2}$ . Це означає, що  $M_i \geq M_j$ . Звідки  $M_i - M_j = \sqrt{2D} \cdot \Phi_0^{-1} \left( \frac{S_{ij}}{N} - \frac{1}{2} \right)$ ; 2) Нехай  $\frac{S_{ij}}{N} < \frac{1}{2}$ . Це означає, що  $M_i \leq M_j$ . Звідки  $M_j - M_i = \sqrt{2D} \cdot \Phi_0^{-1} \left( \frac{1}{2} - \frac{S_{ij}}{N} \right)$ ; 3)  $\frac{S_{ij}}{N} = \frac{1}{2}$ , звідки  $M_i = M_j$ .

Тут  $\Phi_0(\cdot)$  – функція Лапласа,  $\Phi_0^{-1}(\cdot)$  – обернена функція Лапласа для невід’ємного аргументу.

Отримані залежності дозволяють сформулювати наступну задачу лінійного програмування (ЛП), що і є запропонованою авторами модифікацією метода Г. Терстоуна:

$$\begin{aligned} & \min y \\ & \forall ij, i \neq j, \text{ для яких } \frac{S_{ij}}{N} > \frac{1}{2}, -y \leq M_i - M_j - \sqrt{2D} \cdot \Phi_0^{-1} \left( \frac{S_{ij}}{N} - \frac{1}{2} \right) \leq y, M_i \geq M_j; \\ & \forall ij, i \neq j, \text{ для яких } \frac{S_{ij}}{N} < \frac{1}{2}, -y \leq M_j - M_i - \sqrt{2D} \cdot \Phi_0^{-1} \left( \frac{1}{2} - \frac{S_{ij}}{N} \right) \leq y, M_j \geq M_i; \\ & \forall ij, i \neq j \text{ для яких } \frac{S_{ij}}{N} = \frac{1}{2}, -y \leq M_i - M_j \leq y, y \geq 0, M_i \geq 0, i = 1, m. \end{aligned} \quad (2)$$

Обґрунтування модифікації полягає в тому, що метод Г. Терстоуна [1] використовує загальну схему метода найменших квадратів для оцінки  $M_i, i = \overline{1, m}$ . Якщо сума квадратів дорівнює нулю (в задачі ЛП (2),(3) у дорівнює нулю) розв’язки однакові. Але якщо сума квадратів, а значить і у не дорівнюють нулю використання обмежень (3), на відміну від метода найменших квадратів, гарантує в наближеному розв’язку:

Якщо  $\frac{S_{ij}}{N} > \frac{1}{2}$ , то в розв’язку задачі ЛП  $M_i \geq M_j$ ;

якщо  $\frac{S_{ij}}{N} < \frac{1}{2}$ , то в розв’язку задачі ЛП  $M_j \geq M_i$ ;

тобто розв’язок задачі ЛП (2),(3) завжди не протирічить умовам (1),(2), на відміну від використання метода найменших квадратів.

## 1.2 Статистичні дослідження

Мета проведених статистичних досліджень ефективності модифікованого метода Г. Терстоуна полягає в дослідженні чутливості метода до використання нормального розподілу (досліджувались функції щільності випадкових величин  $f(A_i)$ , а) - нормальний розподіл в якому змінюється дисперсія при фіксованому  $M_i$ , а також (б) використання симетричної функції щільності відносно  $M_i$  (в дослідженнях випадкова величина  $f(A_i)$  вважалась сумою випадкової величини що має нормальний розподіл та випадкової величини що має рівномірний розподіл з мат сподіванням рівним  $M_i$  на відрізьку  $[M_i - b, M_i + b]$ . В статистичних дослідженнях змінювались як дисперсія нормального розподілу, так і величина б.

В статистичних дослідженнях використовувалось 10 експертів (реальне верхнє обмеження на кількість експертів), кількість альтернатив – 15, що

також можна вважати верхню границею реальної кількості альтернатив в практичних задачах, дисперсія нормального розподілу змінювалась від 1 до 10,  $b$  від 1 до 5. Істинні значення  $M_i$  в статистичних дослідженнях обирались наступні  $M_i = 16-i$ ,  $i = 1, 15$ . Реалізації випадкової величини що має нормальний чи симетричний розподіл знаходились з використанням пакету (sumru), для фіксованих значень параметрів розподілу  $f(A_i)$  було проведено 20 експериментів. Задачі лінійного програмування розв'язувались з використанням OR Tools.

## 2 Результати досліджень

Аналіз результатів статичних досліджень показує:

1. що метод є критичним до величини дисперсії нормального розподілу (при  $\sigma^2 = 1$ , 100% правильних розв'язків (ПР), при  $\sigma^2 = 2$ , 70% ПР,  $\sigma^2 = 3$ , 62% ПР,  $\sigma^2 = 4$ , 56% ПР, при  $\sigma^2 = 5$ , 43% ПР, при  $\sigma^2 \geq 6$  фактично є не достовірним)
2. для симетричного розподілу (сума нормального та рівномірного) метод стає критичний при  $b = 1$   $\sigma^2 \geq 6$  ( $\sigma^2 = 6$ , 25% ПР),  $b = 2$   $\sigma^2 \geq 6$  ( $\sigma^2 = 6$ , 31% ПР),  $b = 3$   $\sigma^2 \geq 5$  ( $\sigma^2 = 5$ , 40% ПР),  $b = 4$   $\sigma^2 \geq 5$  ( $\sigma^2 = 5$ , 42% ПР),  $b = 5$   $\sigma^2 \geq 4$  ( $\sigma^2 = 4$ , 49% ПР)

Таким чином отримані результати статистичних досліджень показують, що метод ефективно працює при симетричних функціях щільності відносно  $M_i$ , тобто не є критичним відносно нормального розподілу, що суттєво розширює область його використання. Метод є критичним відносно дисперсії нормального розподілу та параметра  $b$  рівномірного розподілу, тобто є критичним відносно професійності експертів, що використовуються в опитуванні.

Тому для розв'язання поставленої задачі пропонується метод обробки емпіричної матриці парних порівнянь (ЕМПП), викладений в [2]. При чому в випадку однакової професійності експертів її елементами є середнє арифметичне відповідних елементів ЕМПП кожного експерта.

## Список посилань

1. Катренко, А. В., Пасічник, В. В., & Пасько, В. П. (2009). Теорія прийняття рішень: підручник для студ. вищ. навч. закл. (Серія "Інформатика"; відп. ред. М.З. Згуровський). Київ: Видавнична група ВНУ.
2. Zgurovsky M.Z., Pavlov A.A. Combinatorial Optimization Problems in Planning and Decision Making: Theory and Applications. Springer Nature Switzerland, 2019. — 518 p.

# **Підвищення ефективності механічного оброблення важкооброблюваних матеріалів додатковим підведенням електричної енергії в зону різання**

Пастернак Сергій [0009-0009-6593-3315], аспірант

Національний університет «Львівська політехніка»  
Інституту механічної інженерії та транспорту  
вул. Професорська 1, 14-й н.к., Львів, Україна  
imit.dept@lpnu.ua

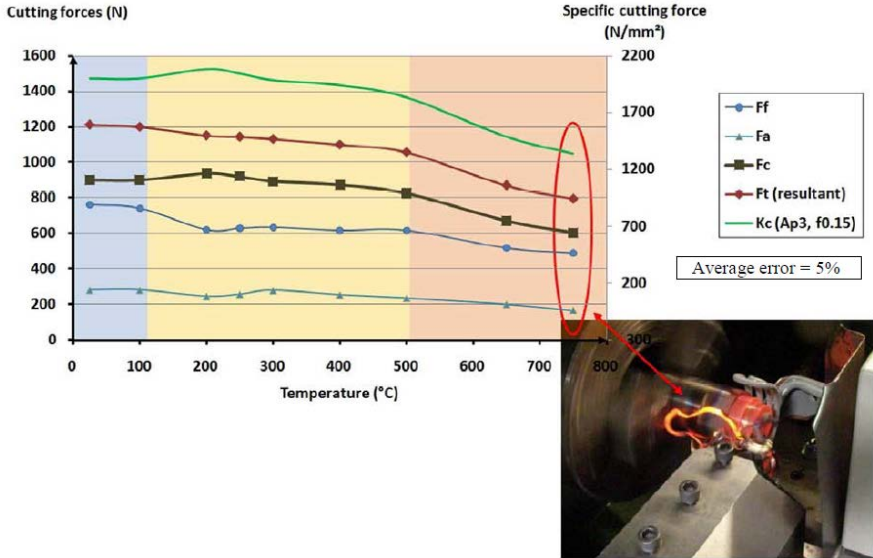
**Ключові слова:** індукційний нагрів, зона різання, важкооброблювані матеріали.

## **1 Вступ**

Деталі що підлягають інтенсивному експлуатаційному навантаженню, виготовляють з важкооброблюваних сплавів, що збільшує зношення різця і часу механічної обробки. Одним із ефективних рішень, щоб облегшити процес стружкоутворення і підвищити продуктивність, є підведення електричної енергії в зону різання, що призводить до мікроструктурної трансформації матеріалу з зниженням механічних властивостей матеріалу і підвищення пластичності.

## **2 Методи підведення електричної енергії в зону різання**

Серед названих методів нагріву заготовки, таких як плазмовий, лазерний, та індукційний, найбільш ефективним є індукційний спосіб. Цей метод дозволяє токами високої частоти підвищити температуру металу до 1000°C всього за 2 хвилини, без будь-якого контакту з заготовкою, що не перешкоджає механічній обробці. Шляхом зміни току можна впливати на степінь пластичної деформації, тертя, зношення різця і інші параметри різання. При індукційному нагріві через термічне розм'якшення оброблювального матеріалу, на контактних поверхнях інструмента можлива поява тонкої плівки оксидів, що грають роль мастила. Дослідження показують значне зменшення питомої сили різання від 20 до 50%, в залежності від матеріалу і температури заготовки.



**Рис. 1.** Зміна сил різання залежно від нагріву

Для дослідів було обрано титановий сплав марки VT22. На рисунку 1 показано зміну сили різання відносно нагріву. З точки зору температурних впливів, поведінку матеріалу можна розглядати у трьох основних температурних зонах, перша зона охоплює температури нижче 300 °С, де виявлено незначне вдосконалення процесу обробки металу, оскільки матеріал перебуває у стабільному стані.

Між температурою 300 і 750 °С знаходиться зона релаксації напруги, яка є особливо перспективною для зниження сил різання та зносу інструменту. У цій температурній зоні зниження сили різання досягають від 13 до 34%, зменшення сил різання, яке спостерігається через високу температуру заготовки, в основному пов'язане з термічним розм'якшенням матеріалу. Його можна описати законом Джонсона-Кука (представленого в рівнянні 1), який характеризує поведінку матеріалу в умовах механічної обробки нагріванням.

$$\sigma = (A + B(\varepsilon)^n) * \left(1 + C \ln \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0}\right) * \left(1 - \left(\frac{T-T_0}{T_f-T_0}\right)^m\right) \quad (1)$$

$\sigma$  – стрес потоку Мізеса;  $\varepsilon$  – деформація;  $\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0}$  – швидкість пластичної деформації;

$T_0$  – кімнатна температура;  $T_f$  – температура плавлення;  $A, B, C$  – константи;

У законі Джонсона-Кука  $m > 1$ , отже, якщо температура  $T$  матеріалу зростає, напруга  $\sigma$  і сила різання зменшуються, і навпаки.

Остання зона, яка відповідає температурам понад  $750^{\circ}\text{C}$ , спричиняє незворотні мікроструктурні зміни, що негативно позначаються на механічних властивостях матеріалу. Таким чином, необхідно уникати перегріву заготовки, щоб уникнути пошкодження структури металу.

Для трьох температурних фаз, зазначених вище, були проведені випробування на знос інструменту різання. При кімнатній температурі спостерігалось невелике сколювання ріжучої кромки, на межі глибини різання. Цей режим зносу є наслідком різних факторів: сильного стирання поверхні заготовки, зусилля та тиску на заготовку викликаного тертям стружки, різниці тисків у вільній зоні інструменту та можливої неоднорідності включень в метал. При підвищенні температури спостерігається другий режим зносу інструменту, по всій ширині різку з'являється нарощений край і відбувається знос бокової частини різця. Це стає більш прогресивним із підвищенням температури заготовки, цей режим відображає дуже високу температуру  $750^{\circ}\text{C}$  на межі інструмент-поверхня заготовки, і нижчий тиск у цій зоні.

### **3 Результати механічної обробки титану VT22**

Механічна обробка титану VT22 генерує довгу та суцільну стружку з високою швидкістю деформації, така будова стружки є негативним фактором для довговічності інструменту, засобом сегментації стружки може бути термічна обробка. Залишкові напруги на поверхні обробленого матеріалу є результатом конкуренції між механічними явищами та термічними явищами. Під час точіння сили різання (механічні явища) створюють залишкову напругу стиску, однак тепловий потік (теплові явища), викликані механічною обробкою, тобто пластичним розширенням нагрітого та охолодженого поверхневого шару, створює залишкові напруги розтягування. Таким чином, залишкові напруги повинні отримати релаксацію напруги, або тенденцію до стискаючих залишкових напруг. Зростання мікротвердості відповідно до початкової температури матеріалу, корелює з цим аналізом оскільки мікротвердість зростає залежно від температури, оброблена поверхня зазнає зміцнення на стиск або деформацію.

Отже, до основних переваг нагрівання заготовки перед механічною обробкою можна віднести зниження сили різання, вібрації та зносу інструменту, а також покращення обробки поверхні.

Недоліки, якщо підвищення температури оброблюваного матеріалу знижує його опір і покращує його оброблюваність, це погано впливає на цілісність поверхні матеріалу, відбуваються мікроструктурні зміни які викликають різницю розширення між шарами оброблювального матеріалу.

Також швидке охолодження поверхні створює напруги і з'являються тріщини. Їх наявність впливає на втомну міцність заготовки при її експлуатації.

## **4 Висновки**

Результати досліджень вказують на важливість впровадження нових технологій оброблення для забезпечення високої якості та продуктивності виробництва важкооброблюваних матеріалів. Використання токарної обробки та підвищення початкової температури заготовки сприяє зменшенню зносу різця та поліпшенню якості оброблення. Аналіз температурних впливів показав, що зниження питомої сили різання на 13% для температури 500°C, для температури 750°C зниження досягає 34%.

## **Список посилань**

1. Experimental Investigation of Hot Machining with Induction to Improve Ti-5553 Machinability/ Baili, Maher and Wagner, Vincent and Dessein, Gilles and Sallabery, Julien and Lallement, Daniel An Experimental Investigation of Hot Machining with Induction to Improve Ti-5553 Machinability. (2011) Applied Mechanics and Materials, vol. 62. pp. 67-76. ISSN 1660-9336.
2. Modeling of machining parameters affecting flank wear and surface roughness in hot turning of Monel-400 using response surface methodology (RSM)/ Asit Kumar Parida, Kalipada Maity, Publication: Measurement Publisher: Elsevier Date: April 2019.
3. CFD modelling of hot machining operation/ Prof. Kalipada Maity, National Institute of Technology Rourkela Rourkela-769008, Orissa, India May 2010



# Вплив швидкості різання при точінні заготовок із титанового сплаву TI-6AL-4V отриманих за технологією xBeam 3D metal printing

Пірогов Дмитро, аспірант  
Воронцов Борис, д.т.н, професор

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського»  
dimapirohov@gmail.com

**Ключові слова:** xBeam 3D metal printing, TI-6AL-4V, адитивне виробництво, точіння титанових сплавів, вимірювання швидкості та температури різання.

## 1 Вступ

Останнім часом адитивне виробництво є одним із найперспективніших напрямів розвитку технологій, яке використовується в різних галузях промисловості, як швидкий та зручний метод отримання деталей максимально наближених до готового виробу.

Адитивні технології отримання прототипу із використанням металевого дроту є широкомасштабним нововведенням і сучасним виробничим підходом, яке може зменшити фінансові витрати та пришвидшити процес отримання готової деталі на відміну від вже існуючих традиційних методів, по типу лиття, а також технологій 3D-друку металів, як селективне розплавлення із використанням порошку і лазерного або електронного пучка як джерела енергії.

Дані технології вже використовувались у виробництві реальних виробів, таких як, медичних імплантів, та навіть в аерокосмічній галузі, наприклад, виробництво деталей, які не несуть критичних навантажень. Вже існуючі технології мають ряд недоліків, як низька продуктивність, обмежені розміри деталі, проблеми із відповідністю розмірам та вимогам відповідних стандартів, що вимагає додаткового покращення, із використанням пост-оброблення, не кажучи вже про оброблення різанням. Також такі технології мають дуже високі вимоги до порошоків, що застосовуються, що призводить до високої вартості витрачених матеріалів. Всі разом ці недоліки призводять до дуже високої собівартості кінцевих деталей, що є неприйнятним для широкого промислового застосування.

Технологія xBeam 3D Metal Printing використовує металевий дріт із титанового сплаву TI-6AL-4V, як вихідний матеріал і забезпечує виробництво відносно великих деталей із високою продуктивністю, а також

процес пост-оброблення скорочується лише до оброблення різанням. В якості джерела енергії в такій технології застосовується метод прямого енергетичного осадження з використанням ексклюзивного профільного електронного пучка як джерела нагріву. З точки зору властивостей матеріалу електронно-променевої методи виглядають більш надійним рішенням, особливо для хімічно активних металів завдяки роботі у вакуумі. Дана технологія забезпечує мінімальні витрати матеріалу під час кінцевої обробки завдяки високій точності осадження, низькій шорсткості поверхні та низьким залишковим спотворенням, формується бездефектна структура металу, що забезпечує хороші властивості матеріалу порівняно з традиційними, стандартними вимогами до лиття та кованих матеріалів [1].

Але будь-яка технологія адитивного виробництва потребує кінцевого оброблення, адже поверхня деталі або заготовки може не відповідати конструкторським вимогам на кресленні, тому перед технологіями стоїть задача, яка має на меті дослідити процес оброблення заготовки різанням і розробити стратегію для ефективного її ефективного оброблення. Оскільки немає рекомендацій щодо використання технології xBeam 3D в поєднанні з різанням, плануються дослідження та експерименти з режимами різання для досягнення необхідної шорсткості та точності. Щоб уникнути помилок в подальших експериментах, слід зазначити кілька особливостей при обробці заготовок з титанових сплавів.

## **2 Результати досліджень**

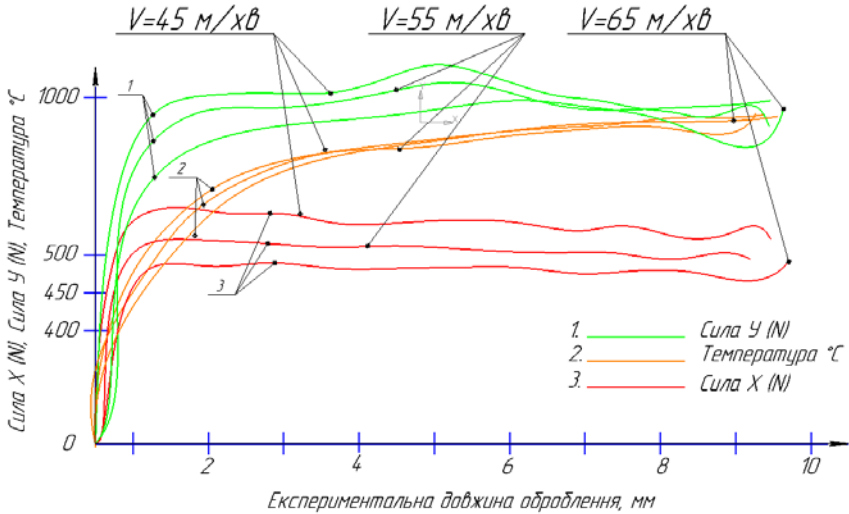
На початковому етапі дослідження процес токарного оброблення заготовок досліджується із використанням методів скінченних елементів, які дозволяють вирішувати та досліджувати складні проблеми та одержати рішення і ймовірні помилки на етапі планування експерименту не витрачаючи ресурси на реальні дослідження.

При токарній обробці металів дослідження таких параметрів, як знос інструменту, сили різання і температура під час процесу різання, є складним і дорогим. Тому метод скінченних елементів може бути використаний для прогнозування необхідних результатів шляхом вибору необхідних параметрів різання, матеріалів та ріжучих інструментів на етапі проектування, що дозволяє уникнути зайвих матеріальних витрат у майбутньому.

У цій статті представлені результати дослідження з використанням симуляції AdvantEdge. В якості ріжучого інструменту була обрана квадратна пластина з заднім кутом  $0^\circ$ , виготовлена з цементованого твердого сплаву карбід вольфраму (WC).

Параметри режиму різання призначалися аналітично з використанням каталогу. У цьому дослідженні швидкість подачі і глибина різання не змінювалися, а швидкість різання встановлювалася в діапазоні 45 м/хв, 55

м/хв і 65 м/хв.. Подача становила 0,2 мм/об, а глибина різання - 1 мм. Довжина обробки становила 10 мм. Отримані графіки залежності температури і сил різання від довжини оброблення під впливом швидкості різання (див. рис. 1).



**Рис. 21.** Результати дослідження в середовищі AdvantEdge

Таким чином, можна зробити висновок, що зі збільшенням швидкості різання зростає температура в зоні різання. Сила різання зі збільшенням швидкості різання поступово стабілізується і зменшується, що пов'язано із ефектом термічного розм'якшення, що знижує міцність матеріалу на зсув і полегшує оброблення.

## Список посилань

1. Advanced technical and technological solutions for additive manufacturing by xBeam 3D metal printing / Dmytro Kovalchuk [et al.] // Electrotechnica & Electronica (E+E). – 2018. – No. 53. – P. 60–68.

## **Важливість м'яких навичок для випускників-інженерів**

Повстяна Ю.С., кандидат технічних наук, доцент  
Самчук Л.М., кандидат технічних наук, доцент

Луцький національний технічний університет,  
вул. Львівська, 75, Луцьк, 43018, Україна  
Samchuk204@gmail.com

**Ключові слова:** м'які навички, інженер, освіта, випускники університетів.

Глобалізація суттєво впливає на хід робочих процесів у бізнесі та інших професійних сферах, що призводить до перегляду та зміни вимог до необхідних навичок для досягнення успіху у професійній діяльності. Ці компетенції, відомі як «м'які навички» - сукупність особистих і міжособистісних навичок і здібностей, які покращують працевлаштування інженера. У мультидисциплінарних робочих середовищах виявилось, що м'які навички стали не менш важливими, ніж технічні компетенції.

В інженерній освіті особливо важливим є розвиток здібностей та різноманітних навичок, які необхідні інженерам у швидкозмінному інформаційному суспільстві. Інженери – це творці новацій, дизайнери, розробники, особистості з критичним мисленням. «Інженери, як правило, більше зосереджуються на речах, ніж на людях, на логіці, ніж на емоціях, і на фактах, ніж на почуттях» [1].

Роботодавці очікують, щоб молоді інженери мали навички не тільки технічної майстерності, а й у вирішенні проблем, були відкритими, креативними, мали хороші комунікаційні здібності, спілкування з колегами з різних країн, вміли працювати в команді, брали відповідальність за результат власної діяльності. Тому заклади вищої освіти несуть відповідальність за сприяння розвитку у здобувачів вищої освіти м'яких навичок, що необхідні для успішного працевлаштування після закінчення навчання в університеті.

М'які навички – це навички, які доповнюють жорсткі навички людини, покращують взаємодію продуктивності та кар'єрного розвитку.

Ідеальне поєднання м'яких та жорстких навичок буде сприяти підвищенню можливостей працевлаштування випускників-інженерів.

Вища освіта фокусується переважно на розвитку професійних компетенцій та технічних навичок і не завжди достатньо підготовлює здобувачів освіти інженерних спеціальностей до вимог сучасного робочого середовища. Хоча останнім часом активізувався інтерес до впровадження

різноманітних методів навчання та форм роботи, заснованих на активній участі здобувачів вищої освіти інженерних спеціальностей, таких як:

- знайомство на перших заняттях – самопрезентація;
- виконання спільних завдань та проєктів у невеликих творчих групах разом з одногрупниками, що дає чудову можливість успішного досягнення спільної мети, залучення до дослідництва, винахідництва, можливості вирішення конфліктів, спілкування;
- презентація даних проєктів, де вдосконалюються навички усного висловлювання та техніки презентацій;
- ситуаційні ігри, що дають здобувачам спробувати проявити себе в різних ситуаціях;
- дебати - можливість висловити та сформулювати свою думку;
- практика на виробництві, де здобувачі відпрацьовують свої академічні навички, навички спілкування, управління часом, отримують досвід у реальному часі, перед тим як потрапити у реальний робочий світ та ін.

Проаналізувавши, можна зробити висновок, що м'які навички необхідні випускнику-інженеру передусім для підвищення власної конкурентоздатності на сучасному ринку праці, так як перевагу отримує той, хто здатен презентувати себе на набуті професійні уміння і навички потенційному роботодавцю та адаптацію в суспільстві. Проте, потрібно не забувати, що для успішного застосування на реальних ситуаціях необхідно систематично їх практикувати протягом усього періоду навчання.

## **Список посилань**

1. Fouzia Munir. More than technical experts: Engineering professionals' perspectives on the role of soft skills in their practice. *Industry and Higher Education* Volume 36, Issue 3, June 2022, P. 294-305.
2. Manuel Caeiro Rodríguez, Mario Manso Vázquez, Fernando A. Mikic-Fonte, Martín Llamas Nistal, Manuel J. Fernández-Iglesias, Hariklia Tsalapatas, Olivier Heidmann, Carlos Vaz de Carvalho, Triinu Jesmin, Jaanus Terasmaa, Lene Tolstrup Sørensen: Teaching Soft Skills in Engineering Education: An European Perspective. *IEEE Access* 9: 29222-29242 (2021).
3. Повстяна Ю. С., Самчук Л. М. Формування м'яких навичок у студентів в процесі фахової підготовки. Тези доповідей IX Міжнародної науково-практичної конференції з проблем вищої освіти і науки «Інформаційні технології в освіті, науці і виробництві» (25-26 травня 2023 року) Луцьк: відділ іміджу та промоцій ЛНТУ, 2023. С. 79-81.

# Дослідження впливу азотування титанового сплаву VT1-0 на фазовий склад та товщину оксидокерамічних покриттів.

Погрелюк Ірина Миколаївна, д.т.н., професор  
Посувайло Володимир Миколайович, к.т.н.  
Ковальчук Ігор Васильович, к.х.н  
Данильчук Максим Володимирович

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України,  
вул. Наукова, 5, Львів, 79060, Україна  
[uposuvailo@gmail.com](mailto:uposuvailo@gmail.com)

**Ключові слова:** плазмоелектролітне оксидування, оксидокерамічні покриття, титан, фазовий склад

## 1 Вступ

Одним з найактуальніших завдань сучасної науки і техніки є розробка нових технологій нанесення високоєфективних і надійних покриттів для захисту і зміцнення металевих виробів. Зараз активно розвивається новий вид поверхневої обробки та зміцнення металевих матеріалів, який є різновидом традиційного анодування – плазмоелектролітне оксидування (ПЕО). Воно дає змогу отримувати багатофункціональні оксидокерамічні покриття з унікальним комплексом властивостей на вентильних металах (Al, Mg, Ti, Zr, Ta) [1]. Виділяють чотири основні етапи формування оксидокерамічних покриттів [2] на вентильних металах: утворення на доіскровій стадії первинної оксидної плівки за електрохімічним механізмом; пробій первинної оксидної плівки і поява плазмового згустку в розрядному каналі; плазмохімічні реакції утворення проміжних і кінцевого продуктів; конденсація та поліморфні перетворення оксидних фаз [2 – 3]. В останні роки даний метод активно застосовують для формування зносо- та корозивнотривких покриттів на титанових сплавах. Їх широко застосовують в різних галузях промисловості, а саме: в машинобудуванні, авіабудуванні (блоки циліндрів, поршни для охолодження, авіаційні вузли), аерокосмічній техніці (деталі з низьким температурним коефіцієнтом лінійного розширення і високим рівнем механічних властивостей), медицині (імпланти, штучні суглоби) тощо. Ця технологія є енергозатратною. В останнє десятиріччя активно йде розробка методів нанесення ПЕО покриттів на титанові сплави, що дозволяє суттєво підвищити їх зносостійкість та зменшити енергозатрати.

Метою статті є встановлення впливу попередньо азотування за методикою [4] на фазовий склад та товщину оксидокерамічних покриттів на титановому сплаві VT1-0.

## 2 Матеріали та методи досліджень

Оксидокерамічні покриття були синтезовані на алюмінієвих сплаві VT1-0 (Ti-99,3%;Fe до 0,25; Si до 0,1; O до 0,2 ). Розмір зразків 20\*15\*3 mm. Перед синтезом зразки полірували, промивали в дистильованій воді та етиловому спирті. Покриття формували методом почергового прикладання анодних та катодних імпульсів струму на зразок. Густина катодного та анодного струмів  $J_c / J_a = 20/20$  А/дм<sup>2</sup>, час синтезу 5 хв. Електролітами були водні розчини двох типів: ЕЛ-1: 1 – 3 г/л КОН + 2 г/л Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>; ЕЛ-2: 2 –5 г/л КОН + 5 г/л Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>. Для рентгенофазового аналізу покриттів застосували дифрактометр ДРОН-3.0 з CuK $\alpha$ -випромінюванням. Вміст кожної з фаз визначали за дифрактограмами, використовуючи пакет програм FullProf, багатопрофільним методом Рітвельда. Товщину покриттів вимірювали на поперечних шліфах оптичним мікроскопом ЛОМО МЕТАМ. Мікротвердість покриттів визначали мікротвердоміром ПМТ-3М за навантаження 50 гр.

## 3 Результати

У ході рентгенофазового аналізу оксидокерамічних покриттів синтезованих на титановому сплаві VT1-0 в електроліті ЕЛ-1 встановлено дифракційні рефлекси фази  $\alpha$ -Ti та оксидів титану на рівні шуму. Це вказує на те, що отримані покриття дуже тонкі. В подальшому дослідження проводили у покриттях що сформовані в ЕЛ-2. Встановлено, що в цьому електроліті протягом 5 хвилин синтезу на сплаві VT1-0 ПЕО покриття складаються з TiO<sub>2</sub>: брукіту – 18 мас%, рутилу – 17 мас%, анатазу – 2 мас% та основного металу  $\alpha$ -Ti – 63 мас%. Великий вміст титану опосередковано вказує на малу товщину. Оксидокерамічні покриття на попередньо азотованому сплаві складаються з фаз TiO<sub>2</sub>: анатазу – 56 мас%, рутилу – 30 мас%, брукіту – 8 мас%,  $\alpha'$ -Ti – 5 мас% та  $\beta$ -Ti до 1 мас%. Слід зауважити, що фази TiN<sub>2</sub> в дифрактограмі немає.

Проведено аналіз поперечних шліфів та встановлено, що протягом 5 хвилин синтезу на титановому сплаві VT1-0 формується оксидокерамічне покриття товщиною 6 – 9 мкм, а на попередньо азотованому сплаві VT 1-0 товщиною 30 – 45 мкм. Оскільки вихідний сплав однаковий, це зумовлено впливом азоту, який сформував TiN<sub>2</sub> та дифундував в матрицю основного металу [4]. Він сприяє формуванню оксидокерамічного покриття та підвищенню температури в розрядному каналі. На це вказує суттєво збільшений вміст високотемпературної фази TiO<sub>2</sub> – рутилу, який починає

утворюватись за температури фазового переходу анатаз – рутил 650 – 825 °C [5]. Найбільш імовірно, що підвищені температури в околі розрядних каналів та складові електроліту приводять до формування  $\alpha'$ -Ti та  $\beta$ -Ti, які відсутні у вихідному матеріалі. Встановлено, що мікротвердість ПЕО покриттів на попередньо азотованому сплаві становить 400 – 600 HV, дозволяє сформувати захисну зносотривку плівку.

## 4 Висновки

Досліджено фазовий склад, товщину та мікротвердість ПЕО покриттів на вихідному та в попередньо азотованому сплаві ВТ 1-0. Встановлено, що азотування сприяє збільшеному утворенню високотемпературних фаз, як оксидокерамічному покритті, так і в основному металі та в 3 – 4 рази збільшує швидкості росту оксидокерамічного шару. Високий вміст рутилу й анатазу приводить до суттєвого росту мікротвердості 400 – 600 HV, що підвищує зносотривкість.

## Список посилань

1. Klapkiv M.D. Production of conversion oxide-ceramic coatings on zirconium and titanium alloys / Klapkiv, M.D., Povstyana, N.Yu., Nykyforchyn, H.M. // *Materials Science*. – 2006, 42(2). – P. 277–286.
2. Klapkiv M.D. Simulation of synthesis of oxide-ceramic coatings in discharge channels of a metal-electrolyte system / Klapkiv, M.D. / *Materials Science*. – 1999, 35. – P. 279–283.
3. Imbivich, N.Y. Properties of ceramic oxide coatings on magnesium and titanium alloys synthesized in electrolytic plasma / Imbivich, N.Y., Klapkiv, M.D., Posuvailo, V.M., Povstyanoi, O.Y. // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. – 2015, 54(1-2) . – P. 47–52.
4. Pretreatment Influence on Titanium Surface Properties After Gas Nitriding / Pohrelyuk, I.M., Lavrys, S.M., Sakharuk, O.M., Stasyshyn, I.V., Penkovyi, O.V. // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2017, 26(10) . – P. 5072–5078.
5. І. Ф. Миронюк .Структурні перетворення в пірогенному TiO<sub>2</sub> при електрохімічній інтеркаляції літію / І. Ф. Миронюк, Б. К. Остафійчук, І.І. Григорчак, Р. В. Льницький, В. Л. Челядин, В. О. Коцюбинський // *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*. – 2007, т. 5, № 2, – С. 579—597.



# **Використання методів машинного навчання для прогнозування синтезу карбіду під час високовольтної електророзрядної обробки порошку титану у спирті із реалізацією іскрового розряду**

Присташ М.С., кандидат технічних наук  
Присташ С.Ф., кандидат технічних наук  
Торпаков А.С., кандидат технічних наук  
Липян С.В., кандидат технічних наук  
Сизоненко О.М., доктор технічних наук, професор

Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України,  
пр. Богоявленський 43-А, 54018, м. Миколаїв, Україна

**Ключові слова:** машинне навчання, random forest, логістична регресія,  
високовольтний електричний розряд, титан

## **1 Вступ**

Традиційні методи аналізу складу та властивостей матеріалів є трудомісними та дорогими. Сучасним лабораторіям у середньому потрібно до 10 років на розробку нових матеріалів і до 20 років для їх масового виробництва. Однак, використання технологій моделювання при розробці нових матеріалів дозволяє зменшити час розробки та впровадження нових матеріалів майже у два рази за рахунок високої швидкості отримання результатів, повторюваності, безпечності, швидкому виявленню помилок та низькій вартості. Моделювання, засноване на великих базах даних з'явилося у зв'язку з збільшенням цифрових даних, які ми отримуємо про навколишній світ, а високоякісний та постійний доступ до ресурсів зберігання та прогнозування, робить цей метод все більш популярним[1].

Високовольтна електророзрядна обробка (ВЕР) порошкових сумішей – це один з сучасних методів подрібнення та зміни фазового складу порошків, який відрізняється не лише ефективністю, а низькою собівартістю процесу у порівнянні з класичними методами подрібнення[2-4]. Фізичний механізм процесів диспергування при використанні ВЕР в рідині вивчено ще недостатньо[5, 6]. Враховуючи це, використання методу моделювання на великих базах даних може дати більш точні результати прогнозування процесів та результатів ВЕР обробки, а метою цієї роботи є дослідження можливості використання методів машинного навчання для прогнозування

процесів та результатів високовольтної електророзрядної обробки порошку титану у спирті.

## 2 Методика досліджень

В загальному вигляді процес машинного навчання складається з вхідних даних, алгоритму, та результатів, які були отриманні. Додатково до процесу можуть бути додані данні попереднього «навчання» моделі що дозволяє оцінити точність прогнозу. Така модель має назву «контрольована». В якості алгоритмів модулювання було обрано логістичну регресію та метод Random forest. В якості мови реалізації – язык програмування Python та додаток Colaboratory, або скорочено «Colab» – продукт від Google Research. Colab, що писати та виконувати довільний код Python через браузер, і особливо добре підходить для машинного навчання та аналізу даних.

Логістична регресія – це алгоритм класифікації, що використовується для відношення даних до дискретного набору класів. На відміну від лінійної регресії, що виводить безперервні числові значення, логістична перетворює вихідні данні за допомогою сигмоїду.

Random forest – метод машинного навчання для класифікації, регресії та інших завдань, який працює за допомогою побудови численних дерев прийняття рішень під час тренування моделі й продукує усереднений прогноз (регресія) побудованих дерев.

В якості даних для моделювання були використані результати обробки вихідного порошку титану із різними електродними системами, отримані в Інституті імпульсних процесів і технологій НАН України в період з 2013 року до 2021 року.

Використання різних електродних систем дозволяє реалізувати різний розподіл плазми у системі металевий порошок-рідина та впливає як на гідродинамічні властивості рідини, так і на процес подрібнення та фазових перетворень порошку титану, а вуглеводнева рідина (етиловий спирт), у якості робочого середовища дозволяє проводити процес карбідизації [7]. Детально схеми реалізації електродних систем та алгоритми моделювання розглянуті у роботі [6].

Однією з поставлених задач моделювання було визначити базові елементарні характеристики ВЕР обробки, які можна безпосередньо контролювати, і які б чинили вплив на результати самої обробки. Для цього було проведено попередню обробку даних. Це дозволило виключити сталі величини, а саме:

- Іскровий розряд (IP) було отримано за рахунок використання електродної системи вістря-площина;
- У якості робочого середовища обрано етиловий спирт
- Концентрація порошку титану у спирті складала  $0,07 \text{ г/дм}^3$ ;

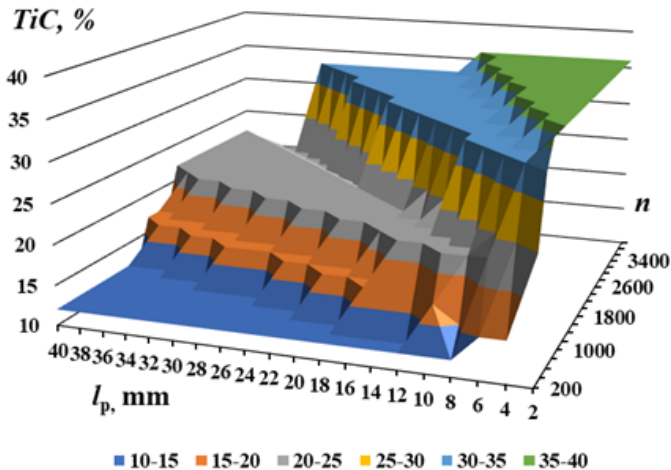
- Енергія одиничного розряду дорівнювала 1 кДж;
- Частота слідування розрядів – 0,3 Гц.

Це дозволило визначити основні змінні, які стануть вхідними даними, а саме: розрядний проміжок та кількість імпульсів впливу, що впливають на кількість карбіду титану, який утворився після ВЕР обробки при зазначених сталих величинах.

Для прогнозування вихідних даних була використана контрольована модель машинного навчання. Для цього дані були поділені у співвідношенні 80 / 20 відсотків для визначення точності прогнозу, для чого була використана метрика Ассигасу. Ассигасу - це показник, який визначає загальну точність передбачення моделі по всіх класах. Це особливо корисно, коли кожен клас однаково важливий.

### 3 Результати досліджень та їх обговорення

На рисунку 1 наведено дані щодо кількості карбіду титану, який утворився під час ВЕР обробки з IP в етиловому спирті. Згідно логістичної регресії кількість карбіду під час обробки поступово збільшується з 0 % до майже 40 % зі збільшенням кількості імпульсів обробки від 200 до 4000. Однак для міжелектродного проміжку від 20 мм до 40 мм цей процес активно починається від 1000 імпульсів обробки, а при 4000 імпульсів кількість утвореного карбіду не перевищує 30 %. Точність прогнозування, згідно метрики Ассигасу склала – 60 %



**Рис. 1.** Розподіл кількості карбіду титану, що утворився під час ВЕР обробки, отриманий згідно моделі логістичної регресії

Згідно даних, отриманих алгоритмом Random forest (див. рис. 2) при значенні міжелектродного проміжку від 2 мм до 8 мм карбідизації не відбувається, що може бути пояснено відсутністю електричного пробую по рідині. При значенні проміжку від 8 мм до 40 мм при кількості імпульсів обробки від 200 до 1000 утворюється близько 10 % карбіду титану, від 1000 до 2000 імпульсів – близько 25 %, а при кількості імпульсів обробки від 2000 до 4000 можна досягти карбідизації титану на рівні 35 %. Точність прогнозування, згідно метрики Assurance склала – 70 %

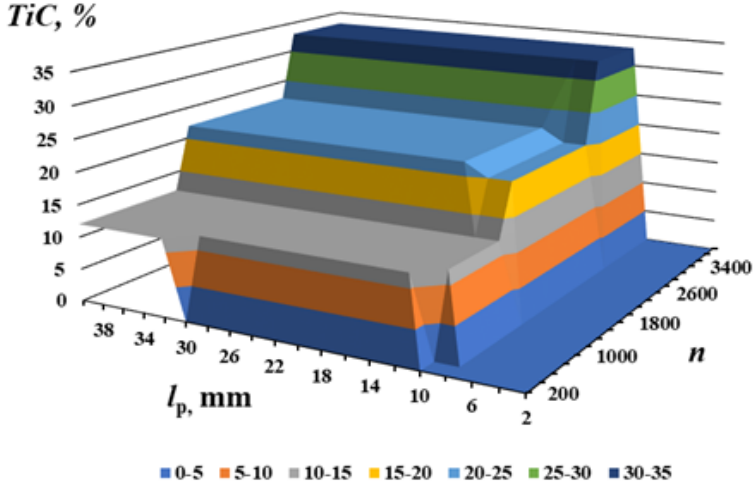


Рис. 2. Розподіл кількості карбіду титану, що утворився під час ВЕР обробки, отриманий згідно моделі Random forest

## 4 Висновки

В ході виконання роботи було показано можливість використання алгоритмів машинного навчання Логістична регресія та Random forest для прогнозування процесів карбідизації порошку титану під час його високовольтної електророзрядної обробки порошку у спирті. Точність прогнозу склала для Логістичної регресії – 60%, а для Random forest – 70 %.

## Список посилань

1. Samarskii A A Principles of Mathematical Modelling: Ideas, Methods / Samarskii A A, Mikhailov AP. – Examples 1st ed. – London: CRC Press, 2001. – 360 p.
2. Syzonenko O M. The Influence of High-Voltage Electrical Discharge on Dispersion and Structure of B4C Powder / Syzonenko O M, Loboda P I, Zaichenko A D, Solodkyi Ye V, Torpakov A S, Prystash M S, Trehub V O // Journal of Superhard

- Materials. – 2017.– Vo 39., №4. – P 243–250.  
<https://doi.org/10.3103/s1063457617040049>
3. Sizonenko O.M Modeling of Electric-Discharge Processes in the Course of Treatment of Titanium in Hydrocarbon Liquids / Sizonenko, O.M., Prystash, M.S., Taftai, E.I. A. S. Torpakov & Ye. V. Lypian. // Mater Sci. – 2021.– V 57. – P 209–214.  
<https://doi.org/10.1007/s11003-021-00533-2>
  4. Prokhorenko S. The metal-matrix composites reinforced by the fullerenes /, O. Syzonenko, A. Torpakov, D. Zak, Y. Lypian, R. Wojnarowska-Nowak, J. Polit, E. M. Sheregii // AIP Advances. – 2018. – Vol. 8, No. 8. – 085317. – ISSN 2158-3226. – DOI: 10.1063/1.5031195
  5. Prystash M. The use of machine learning methods to predict the processes and results of high-voltage electric discharge treatment of titanium powder in kerosene / M.Prystash, S. Prystash, A. Torpakov, Ye. Lypian, O. Syzonenko, R. Kandrotaitė Janutienė.// Machines. Technologies. Materials. – 2022. – Year XVI, Issue 8. – P. 267–269.
  6. Prystash M. S. The use of machine learning methods to predict the processes and results of high-voltage electric discharge processing of titanium powder in kerosene with the implementation of volume-distributed multi-spark discharge / M S Prystash, S F Prystash, A S Torpakov, Ye V Lypian, O M Syzonenko // MCEME-2022 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2023. – V 1277. – 012001  
<https://doi.org/10.1088/1757-899x/1277/1/012001>
  7. Chipera, S. J. Multireflection RIR and intensity normalizations for quantitative analyses: Applications to feldspars and zeolites / S. J. Chipera, D. L. Bish // Powder Diffraction. – 1995. – Vol. 10. – P. 47 – 55.

# Прогнозування границь ізоморфних заміщень і термодинамічної стабільності твердих розчинів вольфраматів і молібдатів зі структурою шееліту

Радіо С.В.<sup>1</sup> канд. хім. наук, доцент; Марійчак О.Ю.<sup>1</sup>, мол. наук. співр.  
Арданова Л.І.<sup>2</sup>, PhD, проф.; Гетьман Є.І.<sup>1</sup>, д-р хім. наук., проф.

<sup>1</sup> Донецький національний університет імені Василя Стуса, Вінниця, Україна

<sup>2</sup> Minnesota State University, Mankato, USA

[radio@donnu.edu.ua](mailto:radio@donnu.edu.ua)

**Ключові слова:** складнооксидні системи, молібдати, вольфрамати, структура шееліту, твердий розчин, ізоморфні заміщення, термодинамічна стабільність, фізичне й хімічне матеріалознавство.

## 1 Актуальність дослідження змішаних систем

Тверді розчини та наноккомпозити на основі вольфраматів і молібдатів лужноземельних елементів, свинцю та кадмію зі структурою шееліту становлять інтерес у зв'язку з можливістю застосування у якості матеріалів для іонних провідників, НВЧ-діелектриків, люмінофорів, скінтіляторів, світлодіодів, нових оптичних волокон, фотокаталізаторів для очищення стічних вод, високопродуктивних електрохімічних суперконденсаторів для зберігання та перетворення енергії та в багатьох інших випадках. Спочатку досліджувалися матеріали на основі індивідуальних сполук. Пізніше було встановлено, що ефективнішими є «змішані» склади, що містять декілька різних катіонів. Так, наприклад, новий наноккомпозитний суперконденсатор складу  $PbMoO_4/CdMoO_4$  показав набагато більш високу питому ємність і триваліший термін експлуатації, ніж отриманий з  $PbMoO_4$  або  $CdMoO_4$  [1]. Крім цього,  $Ca_{0,6}Sr_{0,4}WO_4$  демонструє більшу інтенсивність фотолюмінесценції, ніж  $SrWO_4$  або  $CaWO_4$  [2], а іонна провідність  $Sr_{0,6}Ba_{0,4}WO_4$  виявляється більшою, ніж для індивідуальних вольфраматів  $SrWO_4$  або  $BaWO_4$  [3].

Тому перед вивченням залежностей електрофізичних та інших властивостей у широкому інтервалі складів та температур бажано дослідити можливості взаємозаміщень у вольфраматах та молібдатах лужно-земельних металів, свинцю та кадмію, а також термодинамічну стабільність твердих розчинів. Однак, у більшості випадків, фізико-хімічні основи синтезу твердих розчинів – діаграми стану відповідних систем та навіть залежності границь заміщень від складу твердих розчинів – залишаються невивченими. Так, із 20 можливих діаграм стану із аніонами  $XO_4$ , утворених вольфраматами та молібдатами Ca, Sr, Ba, Pb та Cd зі структурою шееліту в широкому інтервалі

концентрацій та температур вивчено лише одну –  $\text{Ca}_{1-x}\text{Ba}_x\text{WO}_4$  [4]. Про досягнення рівноваги в системі  $\text{Ca}_{1-x}\text{Ba}_x\text{MoO}_4$  за 1473 також повідомлялося в [5]. При цьому, умови охолодження зразків від температур синтезу в роботах, зазвичай, не наводяться. Тому важко судити про ступінь їхньої рівноважності.

## 2 Методологія дослідження

Прогнозування границь ізоморфних заміщень і термодинамічної стабільності твердих розчинів вольфраматів і молібдатів зі структурою шееліту здійснено з використанням математичного апарату кристалоенергетичної теорії ізоморфних заміщень, використання якої надійно зарекомендувало себе для прогнозування фазової стабільності в інших складнооксидних системах:  $\text{Sc}_{1-x}\text{Ln}_x\text{PO}_4$  ( $\text{Ln} = \text{Gd-Lu}, \text{Y}$ ) [6],  $\text{Y}_{1-x}\text{Ln}_x\text{FeAsO}_{0.6}$  [7],  $\text{Ln}_2\text{SiO}_5$  ( $\text{Ln} = \text{Tb-Lu}, \text{Y}$ ) [8].

## 3 Отримані результати

1. У рамках кристалоенергетичної теорії ізоморфної сумісності розраховано енергії змішування, критичні температури розпаду, границі ізоморфних заміщень та визначено області термодинамічної стабільності твердих розчинів вольфраматів і молібдатів зі структурою шееліту в 20 системах  $\text{M}_x\text{M}'_{1-x}\text{XO}_4$  ( $\text{M} = \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}, \text{Pb}$  та  $\text{Cd}$ ).

2. Показано, що зі збільшенням розмірного параметра  $R/R_1$  величини енергій змішування та критичних температур розпаду твердих розчинів вольфраматів та молібдатів  $\text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}, \text{Pb}$  та  $\text{Cd}$  закономірно зростають.

3. Встановлено, що у всіх випадках енергії змішування та критичні температури розпаду вольфраматів перевищують їм величини для молібдатних систем. Показано, що внески в сумарну енергію змішування  $Q_{3M}$ , обумовлені різницею в розмірах структурних одиниць  $Q_R$ , які заміщуються, в більшості систем на кілька порядків перевищують внески  $Q_E$ , обумовлені відмінностями в ступені іонності компонентів, й лише у системах  $\text{Ca}_{1-x}\text{Cd}_x\text{WO}_4$  і  $\text{Ca}_{1-x}\text{Cd}_x\text{MoO}_4$  вони є близькими, а у системах  $\text{Sr}_{1-x}\text{Pb}_x\text{WO}_4$  і  $\text{Sr}_{1-x}\text{Pb}_x\text{MoO}_4$  значення  $Q_E$  виявляється більшим за  $Q_R$ .

4. Представлено розраховані куполи розпаду всіх вищевказаних систем, що дозволяють графічно визначати температуру розпаду за заданим складом або рівноважну границю заміщення за заданою температурою розпаду, а також оцінювати області термодинамічної стабільності в широкому інтервалі складів і температур.

5. Результати розрахунків не суперечать раніше отриманим літературним експериментальним даним у тому сенсі, що синтез твердих розчинів з необмеженою сумісністю раніше проводився за температур вище критичних, тобто у прогнозованих нами областях термодинамічної стабільності. Тоді як

синтез твердих розчинів із обмеженою сумісністю й нанокompatитів проводився за температур нижчих від куполів розпаду, тобто у прогнозованих областях термодинамічної нестабільності.

6. Розрахункові границі заміщень  $x$  у системах з обмеженою сумісністю компонентів  $Pb_{1-x}Ca_xMoO_4$ ,  $Sr_{1-x}Cd_xMoO_4$ ,  $Pb_{1-x}Cd_xMoO_4$ ,  $Ca_{1-x}Ba_xMoO_4$  і  $Ba_{1-x}Ca_xWO_4$  узгоджуються з експериментально знайденими значеннями, середня відхилення від яких становить 0,09 (для молібдатів) та 0,05 (для вольфраматів), що не перевищує типової похибки експериментального визначення границь заміщень, яка складає 0,10.

## Перелік джерел посилання

1. Anitha T., Reddy A.E., Kumar Y.A. et al. One-step synthesis and electrochemical performance of a  $PbMoO_4/CdMoO_4$  composite as an electrode material for high-performance supercapacitor applications. *Dalton Trans.* 48, 10652–10660 (2019). <https://doi.org/10.1039/C9DT01931F>
2. Pôrto S.L., Longo E., Pizani P.S. et al. Photoluminescence in the  $Ca_xSr_{1-x}WO_4$  system at room temperature. *J. Solid State Chem.* 181 (8), 1876–1881 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2008.04.015>
3. Губенко К.О. Оптична спектроскопія перенесення енергії електронного збудження в гібридних орґано/неорґанічних комплексах на основі наночастинок  $ReVO_4$  ( $Re = Gd, Y, Eu$ ) і  $CaWO_4$ . Дис. ... наук. ст. канд. фіз.-матем. наук, 01.04.05 – оптика, лазерна фізика, ХНУ імю В.Н. Каразіна. Харків. 2018. 151 с.
4. Kreidler E.R. Phase Equilibria in the System  $CaO-BaO-WO_3$ . *J. Amer. Ceram. Soc.* 55 (10), 514–519. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1972.tb13419.x
5. Scheetz B.E., Freeborn W.P., Pepin J. et al. The System  $SrMoO_4-BaMoO_4-CaMoO_4$ : Compatibility Relations, the Implications for Supercalcine Ceramics. *MRS Online Proceedings Library* 6, 155–162 (1981). <https://doi.org/10.1557/PROC-6-155>
6. Get'man E.I., Radio S.V., Ardanova L.I. Predicting the Phase Stability of  $Sc_{1-x}Ln_xPO_4$  ( $Ln = Gd-Lu, Y$ ) Zircon-Structured Solid Solutions. *Inorganic Materials* 54 (6), 596–600 (2018). DOI: 10.1134/S0020168518060031
7. Radio S.V., Get'man E.I., Ardanova L.I. Substitution limits and thermodynamic stability of solid solutions in HTSC based on iron and yttrium oxyarsenides. *Low Temperature Physics* 49 (2), 197–203 (2023). <https://doi.org/10.1063/10.0016895>
8. Get'man E.I., Radio S.V. Predicting the Substitution of Rare-Earth Elements with Cerium in the Solid Solutions Based on Nanoscale  $Ln_2SiO_5$  ( $Ln = Tb-Lu, Y$ ). *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii* 17 (4), 701–710 (2019). <https://doi.org/10.15407/nnn.17.04.701>



# Аналітичні дослідження силового навантаження привода натискної плити у штанцювальному пресі

Регей Іван Іванович, доктор технічних наук, професор  
Книш Олег Богданович, доктор технічних наук, професор  
Михайлів Юрій Юрійович, аспірант

Українська академія друкарства, вул. Під Голоском, 19, Львів, 79020, Україна  
[regey.ivan@gmail.com](mailto:regey.ivan@gmail.com), [knolehb@gmail.com](mailto:knolehb@gmail.com), [muhayliv99@gmail.com](mailto:muhayliv99@gmail.com)

**Ключові слова:** прес, штанцювання, картонна заготовка, розклинювальний механізм, сила, натискна плита

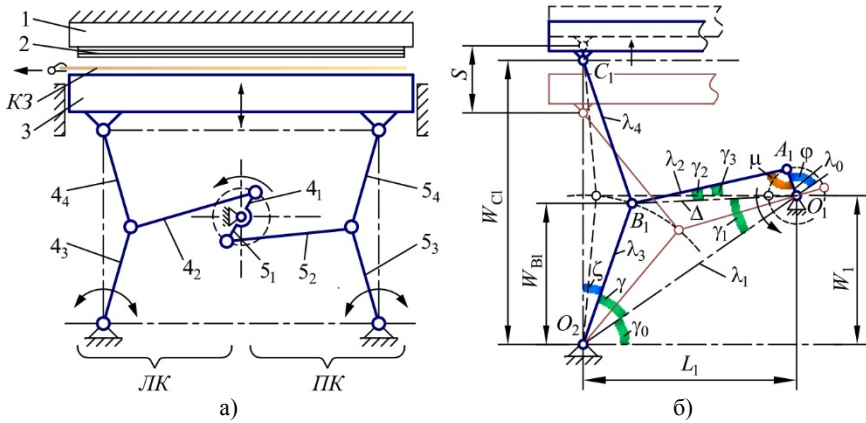
## 1 Вступ

У світі обсяг виробництва паперу та картону для тари за 10 років зріс майже на 30%. Експерти прогнозують, що європейський ринок паперового та картонного пакування зростатиме з показником 4,8% протягом 2022–2027 р.р. [1]. Для задоволення потреб ринку виробники тари розширюють парк технологічного обладнання. Відповідальною і важконавантаженою є штанцювальна техніка. Складовою секцією такої техніки є штанцювальний прес з розклинювальними важільними механізмами для привода натискної плити.

Штанцювальний прес (рис. 1а) складається із горизонтальної нерухомої опорної плити 1 із закріпленою плоскою штанцювальною формою 2 [2]. Для привода натискної плити 3 прес укомплектований механізмами лівого *ЛК* та правого *ПК* контурів. Вони складаються із кривошипів 4<sub>1</sub> та 5<sub>1</sub>, зафіксованих протилежно на приводному валу; ведучих шатунів 4<sub>2</sub>, 5<sub>2</sub>; коромисел 4<sub>3</sub>, 5<sub>3</sub>; ведених шатунів 4<sub>4</sub>, 5<sub>4</sub>, які шарнірно приєднані до нижнього боку натискної плити 3.

## 2 Методика досліджень

Аналітичні дослідження силового навантаження привода натискної плити проведено на прикладі лівого контуру *ЛК* механізму. Схема до розрахунку положень складових елементів розклинювального механізму лівого контуру зображена на рис. 1б.



**Рис. 1.** Кінематична схема штанцювального преса (а),  
схема до розрахунку положень складових розклинювального механізму  
лівого контуру привода натискної плити (б)

Прийнято такі позначення відносних лінійних параметрів механізму:

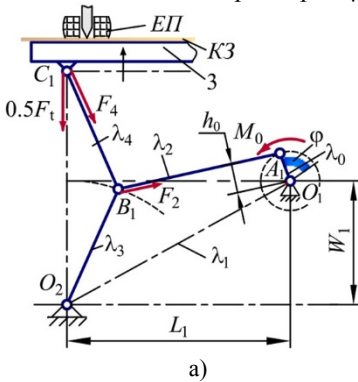
- $S = 1,0$  – максимальне переміщення натискної плити;
- $W_1 = 3,4$  – вертикальна відстань між осями  $O_1$  і  $O_2$ ;
- $L_1 = 5,0$  – горизонтальна відстань між осями  $O_1$  і  $O_2$ ;
- $\lambda_0$  – радіус кривошипа;
- $\lambda_1$  – міжбазова відстань між осями  $O_1$  і  $O_2$ ;
- $\lambda_2$  – довжина шатуна ведучого контуру;
- $\lambda_3$  – довжина коромисла веденого контуру;
- $\lambda_4$  – довжина шатуна веденого контуру;
- $\Delta$  – поточна відстань шарніра  $B_1$  до осі  $O_1$ ;
- $W_{C1}$  – поточна відстань шарніра  $C_1$  до осі  $O_2$ ;
- $W_{B1}$  – поточна відстань шарніра  $B_1$  до осі  $O_2$ ;

та поточних кутів:

- $\varphi$  – повороту кривошипа;
- $\xi$  – між коромислом ведучого контуру і вертикальною віссю;
- $\gamma_0$  – нахилу міжбазової осі до горизонталі;
- $\gamma_1$  – нахилу осі  $\Delta$  до міжбазової осі;
- $\gamma_2$  – нахилу ведучого шатуна до осі  $\Delta$ ;
- $\gamma_3$  – нахилу ведучого шатуна до горизонталі;
- $\gamma$  – нахилу коромисла веденого контуру до міжбазової осі;
- $\mu$  – між кривошипом і шатуном ведучого контуру.

Виведені аналітичні залежності для геометричного синтезу ланок  $\lambda_0$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$ ,  $\lambda_4$  розклинювального механізму привода натискної плити та розрахунку поточних значень кутів. За розмірний «еталон» лінійних значень прийнято хід  $S$  натискної плити. Як початкове прийнято положення натискної плити 3,

при якому картонна заготовка  $KЗ$  доторкається до ежекторних подушок  $ЕП$  штанцювальної форми (рис. 2а). Алгоритм послідовного розрахунку поточних значень параметрів:  $\gamma \rightarrow \Delta \rightarrow \mu \rightarrow \gamma_1 \rightarrow \varphi \rightarrow \gamma_2 \rightarrow \gamma_3$ .



**Рис. 2.** Схема силового навантаження розклинювального механізму лівого контуру привода натискної плити внаслідок штанцювання картонної заготовки (а), графік залежності відносного моменту сили на приводному валу від кута його повороту (б)

Процес штанцювання картонної заготовки натискною плитою включає два етапи:  $A$  – деформування ежекторних подушок штанцювальної форми;  $B$  – висікання розгортки вздовж контурів та бігування в них ліній згину (рис.2б). Виведені аналітичні залежності для розрахунку складових сил навантаження ланок розклинювального механізму та моменту сили на приводному валу. Алгоритм послідовного розрахунку поточних значень параметрів силового навантаження:  $F_4 \rightarrow F_2 \rightarrow h_0 \rightarrow M_O$ . За розмірний «еталон» значень сили прийнято відносно значення технологічного опору  $F_t = 1,0$ .

### 3 Результати

За результатами розрахунку силового навантаження розклинювального механізму лівого контуру привода натискної плити побудований графік залежності  $M_O = f(\varphi)$  (рис. 2б). Як видно з графіка, етап  $A$  супроводжується значно меншими значеннями  $M_O$ , ніж етап  $B$ . Причина полягає у тому, що протягом етапу  $A$  відбувається тільки деформація пружних подушок форми, а протягом етапу  $B$  – взаємодія численних інструментів форми з картоном. Відношення пікових значень становить 10,6. Зменшення значень крутного моменту на приводному валу протягом етапу  $B$  спричинене зменшенням плеча  $h_0$  внаслідок його повороту.

## **4 Висновки**

Складовою секцією штанцювальної техніки є прес з розклинювальними важільними механізмами для привода натискної плити. Для аналітичних досліджень силового навантаження привода натискної плити прийнято позначення відносних геометричних параметрів ланок та виконано їх синтез. Аналітично досліджено процес штанцювання картонної заготовки натискною плитою протягом етапу деформування ежекторних подушок штанцювальної форми та етапу висікання розгорток вздовж контурів та бігування в них ліній згину. Співвідношення пікових значень етапів становить 10,6. Зменшення значень крутного моменту на приводному валу протягом другого етапу спричинене зменшенням плеча дії сили опору внаслідок його повороту.

## **Список посилань**

1. Тенденції розвитку ринку упаковки з паперу та картону. *Упаковка*. № 2. 2023. С. 24-27.
2. Пасіка В. Р., Влах В. В. Кінематичний синтез механізму штанцювального преса з умови рівності прямого і зворотного ходів. *Поліграфія і видавнича справа*. 2016. № 1 (71). С. 129–139.

## Моделювання динаміки пелюсток затискних цанг механізмів затиску багатошпindelних токарних автоматів

Редько Н.В., аспірант, Редько Р.Г., к.т.н., доц.

Луцький національний технічний університет,  
вул. Львівська, 75, Луцьк, 43018, Україна  
redkorg@ukr.net

**Ключова слова:** затискна цанга, пелюстки цанг, цанговий затискний механізм, губка затискної цанги, шпindel, багатошпindelні токарні автомати.

В даному дослідженні проведено моделювання динаміки пелюстки цанги із врахуванням згасання в матеріалі цанги ( $\xi = 0,02$ ) і дії осевого навантаження  $S$ . В процесі моделювання виявлено дві власні частоти коливань пелюстки залежно від  $\Delta d$ : частоту  $\omega_1=140$  Гц з практично нульовою амплітудою коливань, і частоти від 1000 до 3500 Гц.

Результати динамічних розрахунків наведені в таблицях 1 і 2.

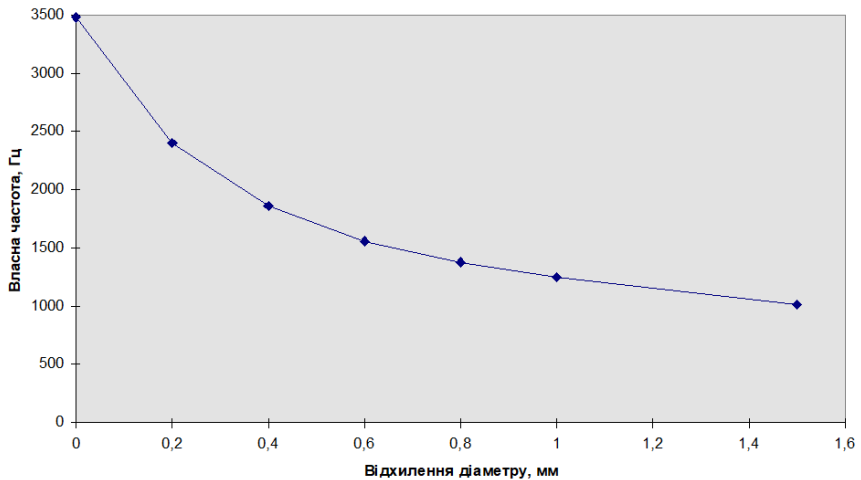
**Таблиця 1.** Напруження в корені пелюстки  $\sigma_k$  та в защемленні із губкою при відхиленнях діаметру заготовки  $\Delta d$

$\Delta d$ , мм	$\sigma_k$ , МПа	$\sigma_{пз}$ , МПа
0,2	241	158,3
0,4	479,9	314,3
0,6	728	476,3
0,8	961,7	627,9
1	1186,4	776,4
1,5	1833,5	1201,9

**Таблиця 2.** Власна частота пелюстки цанги  $\omega_c$  та амплітуди власних коливань від дисбалансу  $A_6$  і від повороту губки

$\Delta d$ , мм	$\omega_c$ , Гц	$A_6$	$A_8$
0	3484	0,075	0,0015
0,2	2403	0,122	0,141
0,4	1865	0,146	0,253
0,6	1560	0,143	0,29
0,8	1377	0,136	0,3
1	1247	0,129	0,3
1,5	1015	0,115	0,286

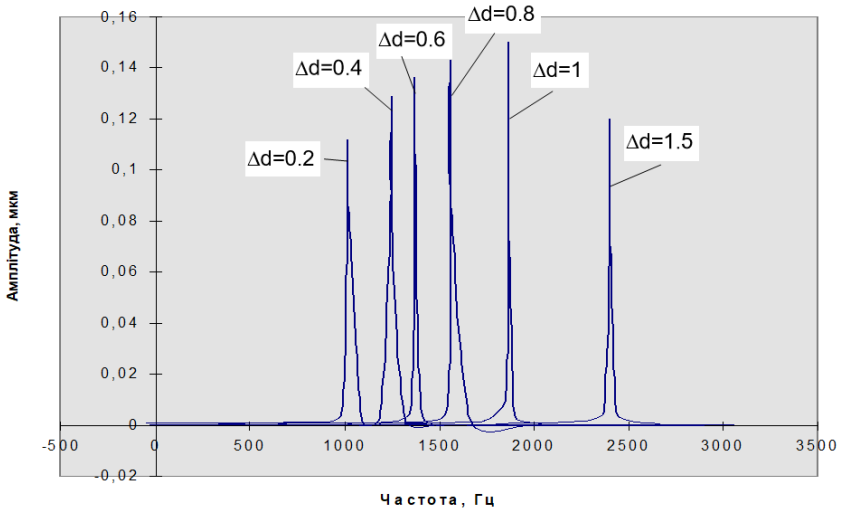
Моделювання динаміки показало, що із збільшенням  $\Delta d$  власна частота коливань системи зменшилась, що можна пояснити збільшенням стабілізуючої дії осьової сили при зменшенні згинальної деформації пелюстки цанги як тонкої оболонки (рис. 1)



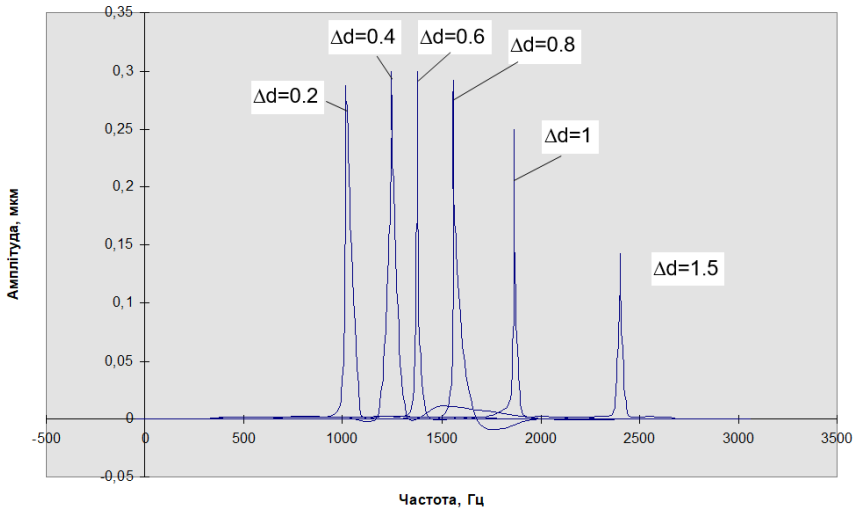
**Рис. 1.** Зміна власної частоти коливань пелюстки цанги від відхилення діаметру заготовки

При моделюванні вимушених коливань пелюстки цанги моделювалось два види навантаження – навантаження по центру пелюстки (переріз №6) радіальною силою 10 Н, що характерно для вимушених коливань, які визиваються дисбалансом цанги, і навантаження в перерізі, який безпосередньо прилягає до защемлення губки (переріз №8), що характерно при повороті губки в межах кутового зазору в конусі шпинделя [1-3].

Амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) для двох випадків вимушених коливань в корені защемлення наведені на рис. 2 і 3.



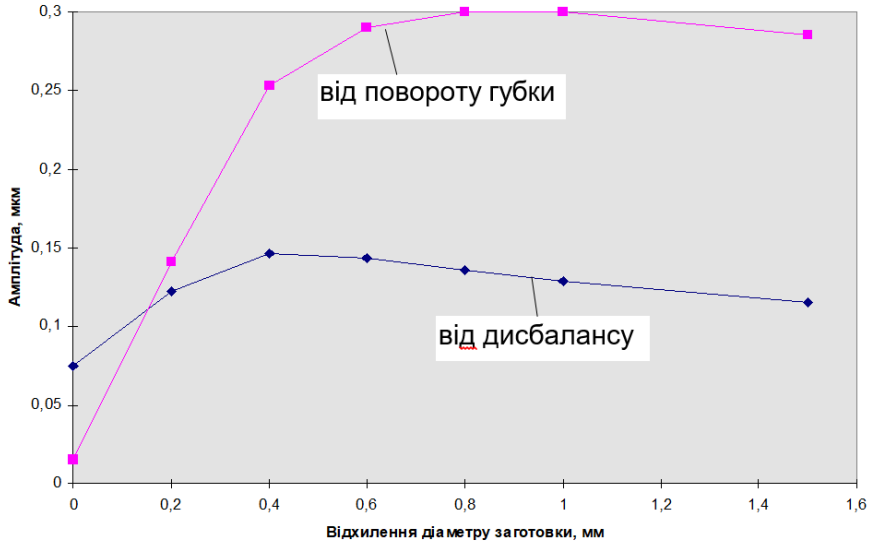
**Рис. 2.** Амплітудно-частотна характеристика в корені защемлення пелюстки ЗЦ при її дисбалансі при різних відхиленнях діаметрів заготовок



**Рис. 3.** Амплітудно-частотна характеристика в корені защемлення пелюстки ЗЦ при дії поворотного зусилля в межах кутового зазору при різних відхиленнях діаметрів заготовок

На рисунку 4 наведені графічні значення резонансної амплітуди поперечних коливань у випадку дисбалансу і для випадку повороту губки ЗЦ. Аналіз даних дозволяє зробити такі попередні висновки [4-6]:

1. Амплітуди резонансних коливань, визвані дисбалансом пелюстки, незначно залежать від відхилення діаметру заготовки  $\Delta d$ . При цьому за малих відхилень  $\Delta d$  спостерігається деякий ріст амплітуди і, в подальшому, її стабілізація із незначним зменшенням.



**Рис. 4.** Амплітуди резонансних поперечних коливань пелюстки ЗЦ в корені защемлення

2. Амплітуди резонансних коливань, визвані поворотом губки, різко зростають в межах  $\Delta d$  від 0 до 0,6 мм а потім стабілізуються. При цьому система більш чутлива до повороту губки, ніж до дисбалансу.

3. Характер АЧХ (рис. 2 і 3) показує плавне зростання амплітуд в дорезонансній зоні, що створює умови виникнення в цій зоні вимушених коливань.

4. Величини резонансних амплітуд коливань визивають додаткові динамічні складові розтягуючих напружень в волокнах защемлень в корені пелюстки та в губці. Аналіз результатів показує, що динамічні складові напруження співмірні із статичними і складають більше 1%, а тому вони мають місце при втомних руйнуваннях пелюстки ЗЦ, що виникають при вимушених коливаннях в її защемленнях.

Таким чином моделювання показало, що найбільш ймовірними місцями руйнування пелюсток ЗЦ є їх защемлення – в корені та в губці. При



відхиленні  $\Delta d$  більше, ніж на 0,4–0,6 мм, пелюстки ЗЦ традиційної конструкції (наприклад, до токарного автомату мод. 1Б240-6) знаходяться на межі статичної міцності [5, 6]. За певних умов причиною руйнування можуть бути втомні руйнування, визвані вимушеними коливаннями пелюстки ЗЦ в її корені, що виникають від дисбалансу і повороту губки в процесі обробки в межах кутового зазору конусів цанги та шпинделя [3].

Отримані результати є попередніми і потребують додаткових теоретичних і експериментальних досліджень, особливо для цанг, які застосовують при високошвидкісній обробці з великими відхиленнями діаметрів заготовок  $\Delta d$ . Дана методика може бути використана для оптимального профілювання перерізу пелюсток ЗЦ по довжині.

## Список посилань

1. Редько Р.Г. Аналіз зношення губок затискних цанг багатошпindelних токарних автоматів/Р.Г.Редько, Р.А.Склярів, Р.М.Полінкевич, Т.І.Четвержук, О.І.Редько // Наукові нотатки. – Випуск 71.– Луцьк, 2021. – С. 294 – 297.
2. Редько Р.Г. Дослідження та вдосконалення конструкції виконавчих вузлів багатошпindelного токарного напівавтомату для обробки шестерень / Р.Г.Редько, П.М. Цюпа, Р.П. Приступа // Студентський науковий вісник. Серія «Технічні науки». Науковий збірник. Випуск 47. – Луцьк: ІВВ ЛНТУ, 2022. - С. 266-272.
3. Редько Р.Г. Дослідження пружно-силових характеристик затискних цанг, виготовлених за діючими та новими технологіями/Р.Г.Редько, О.І.Редько, В.В.Шанайда, Р.А.Склярів // Наукові нотатки. – Випуск 44.– Луцьк, 2014. – С. 249– 253.
4. Кузнецов Ю. М. Проектування цільових механізмів маніпулювання верстатів нового покоління : навч. посіб. для студентів машинобуд. спец. ВНЗ / Ю. М. Кузнецов, Б. І. Придальний ; за заг. ред. проф. Ю. М. Кузнецова ; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т", Луц. нац. техн. ун-т. - Луцьк : Вежа-Друк, 2014. - 425 с.
5. Кузнецов Ю.М. Технологічне оснащення для високоефективної обробки на токарних верстатах / Ю.М. Кузнецов, І.В. Луців, О.В. Шевченко, В.Н. Волошин / під ред. Ю.М. Кузнецова . – К. – Тернопіль; Терно-граф, 2011. - 692 с.
6. Редько Ростислав Григорович. Підвищення працездатності затискних цанг токарних автоматів, виготовлених за маловідходною технологією: Дис... канд. техн. наук: 05.03.01 / Луцький держ. технічний ун-т. - Луцьк, 1999. - 233л. - Бібліогр.: л. 150-167.

## **Покращення режимів плазмової обробки шляхом аналізу продуктів згорання**

Решетило Анатолій, аспірант  
Сичук Віктор, к.т.н., доц.

Луцький національний технічний університет,  
вул. Львівська, 75, Луцьк, 43018, Україна

**Ключові слова:** плазмове різання, датчик, аналіз продуктів згорання, мікроконтролер.

Плазма – це іонізований газ утворений із електронів та позитивно заряджених іонів, а також нейтральних збуджених атомів та молекул. Виходячи із цього робимо висновок, що власне плазма може бути отримана ізотермічним чи газоподібним способом.

Розглянемо спосіб утворення плазми із ізотермічного способу за якого відбувається нагрів газу до високої температури. При цьому цей процес супроводжується іонізацією у зв'язку із збільшенням числа пружних зіткнень атомів та молекул, при цьому утворюються електрони та позитивні іони.

Уже при температурі 5000 К закінчується процес дисоціації молекул на атоми при цьому власне газ переходить у стадію плазми утворення, а також руйнується зовнішня електронна оболонка атомів, які в свою чергу перетворюються на позитивні іони, а звільненні електрони у взаємодії із атомами збільшують кількість іонів. Тобто цей процес супроводжується суттєвим збільшенням температури переходячи в лавиноподібний вид [1].

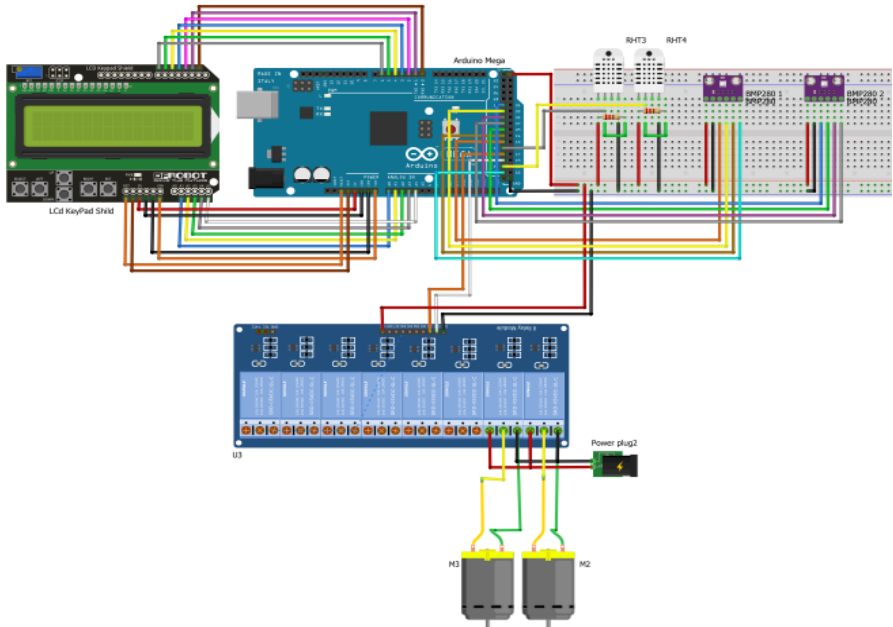
Отже, виходячи з передумов виникнення плазми з метою проведення досліджень продуктів згорання, пропонуємо систему дослідження режимів плазмової обробки шляхом аналізу продуктів згорання. В результаті чого була створена модель на основі мікроконтролера Arduino Mega 2560, в якій використовувалися наступні компоненти:

- Мікроконтролер Arduino Mega 2560
- Зовнішній датчик температури безконтактний GY-906/MLX90614
- Внутрішній датчик температури безконтактний GY-906/MLX90614
- Датчик зовнішнього тиску Arduino – BMP 280
- Внутрішній датчик тиску Arduino – BMP 280
- 4-канальний релейний модуль 5В 10А
- Щит РК-клавіатури
- Два вентилятори 12В

Отже, будемо використовувати одразу кілька датчиків температури та тиску. Кожен із вище зазначених датчиків розміщуватиметься як із

напрявленням на навколишнє середовище так і на власне зону оброблюваної ділянки плазмового середовища.

На рисунку 1 представлена запропонована схема підключення усіх компонентів до мікроконтролера. У середовищі Fritzing реалізовано схема підключення всіх компонентів даної моделі до мікроконтролера Arduino Mega 2560. У загальному вигляді ми маємо електричну схему даної моделі на рисунку 1.



**Рис. 1.** Схема підключення всіх компонентів пропонованої моделі до мікроконтролера Arduino Mega 2560

Розглянемо принцип роботи програмного забезпечення на основі даної схеми підключення елементів системи. Маємо мікроконтролер Arduino Mega 2560, який безпосередньо керуватиме системою аналізу режимів роботи.

Принцип функціонування виглядатиме наступним чином:

- запускаємо програмне обладнання та власне плазмовий різак. В режимі реального часу система буде відслідковувати одразу параметри зміни температури середовища оброблюваної деталі, а також навколишнього середовища;
- паралельно здійснюватиметься й вимірювання зміни параметрів тиску обох середовищ відстеження;

- дані параметри будуть виводитись в реальному часу одразу на LCD дисплей, для зручності швидкого моніторингу зміни параметрів оператором, а також передаватимуться за допомогою монітору Serial порту на підключене комп'ютерне обладнання з метою подальшого створення графіків змін усіх відслідкованих параметрів системи;

- також будемо проводити дослідження змін впливу на середовище обробки плазми підключивши додаткові вентилятори для подачі та забору повітря із системи, таким чином створюючи різноманітні умови обробки металів плазморізкою.

На основі загальних умов виникнення плазми будемо здійснювати дослідження змін середовища та параметри температури, тиску за різних умов.

На програмному рівні отримуємо наступний опис роботи програми. Перед початком роботи із розкroювання металу того чи іншого виду оператор вручну задаватиме обладнанню із яким видом металу він працюватиме, програмне забезпечення автоматично з бази даних підтягує технологічні режими роботи. Далі система постійно працює в автоматично підналагоджувальному режимі.

## **Список посилань**

1. Інтернет ресурс – <https://terma.in.ua/ua/a391855-plazmennaya-rezka-metalla.html>
2. Інтернет ресурс – <https://dnipro-m.ua/news/plazmorez-stroenie-princzip-raboty-vybor-apparata/>
3. Інтернет ресурс – <https://kt-stal.com.ua/ua/plazma>
4. Інтернет ресурс – <https://svarka-ua.com/ua/plazmennaya-rezka-metalla-hto-eto-takoe-vidyi-i-princzip-dejstviya-osobennosti>
5. Плазменные технологии и устройства для переработки отходов (E21429260), Автор: Моссэ Альфред Львович, Савчин Василий Васильевич.

# ШЛІФУВАННЯ НАПЛАВЛЕНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ АБРАЗИВНИМ ІНСТРУМЕНТОМ ІЗ ХРОМИСТОГО КОРУНДУ

Сергій Рябченко<sup>1</sup>, к.т.н., старший науковий співробітник  
Михайло Бандуренко<sup>1</sup>, інженер  
Олександр Яровицин<sup>2</sup>, к.т.н., провідний науковий співробітник  
Олександр Фомакін<sup>2</sup>, молодший науковий співробітник

<sup>1</sup>Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України,  
вул. Автозаводська, 2, Київ, 04074, Україна

<sup>2</sup>Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,  
вул. Казимира Малевича, 11, Київ, 03650, Україна  
s.riabchenko@ukr.net

**Ключові слова:** шліфування, наплавлені поверхні, абразивний інструмент.

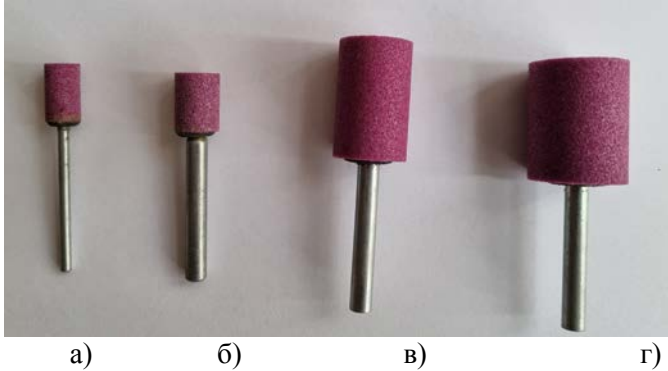
## 1 Вступ

Забезпечення якості обробки поверхонь наплавлених нікелевими сплавами є актуальною проблемою виробництва та ремонту авіаційної техніки. Наш досвід обробки різних наплавлених матеріалів абразивним інструментом з хромистого корунду дозволяє прогнозувати вибір необхідного абразивного матеріалу для обробки поверхонь деталей наплавлених нікелевими сплавами. Для опробування придатності до механічної обробки наплавленого металу нікелевих жароміцних сплавів нами розроблені та виготовлені спеціальні абразивні головки з хромистого корунду, діаметром 10, 13, 20 і 25 мм.

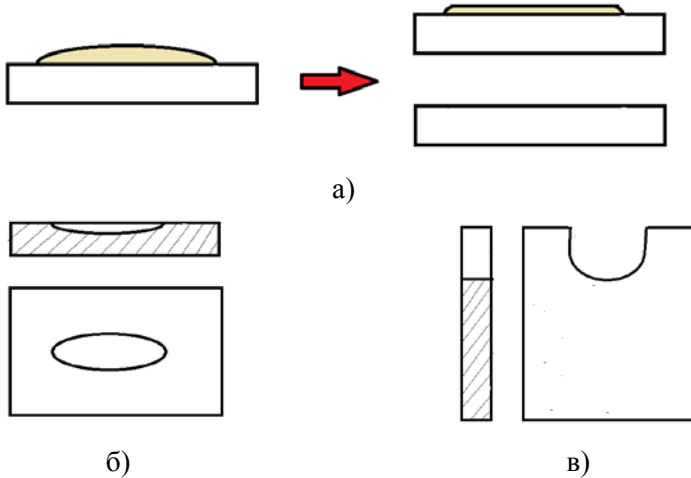
## 2 Результати досліджень

При вирішенні задач відновлення деталей авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) з нікелевих жароміцних сплавів для застосування абразивного інструменту з діаметром головки до 10-13 мм (рис. 1) можливі наступні види його типового застосування (рис. 2): зачищення наплавленого металу (рис. 2а) та виконання горизонтальних і вертикальних вибірок (рис. 2б). Причому в силу зменшеного діаметру абразивної головки в двох останніх випадках це нові задачі, не характерні для застосування абразивних головок діаметром 20-25 мм, де на абразивну головку Ø10-13 мм прикладається значно більше

зусилля притиску порівняно із необхідним для шліфування наплавленого металу і зростає площа контакту абразиву з оброблюваною поверхнею. З огляду на ці обставини при виконанні вибірок стійкість та тривалість експлуатації такої абразивної головки може значним чином зменшуватись.



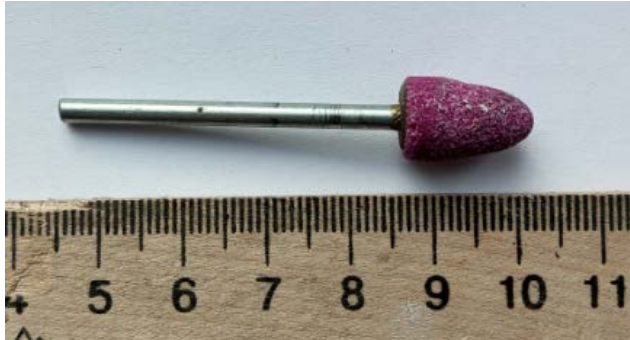
**Рисунок 1.** Зовнішній вигляд абразивних головок з хромистого електрокорунду діаметром а) 10 мм; б) 13 мм; в) 20 мм і г) 25 мм



**Рисунок 2.** Типове застосування абразивних головок діаметром до 10-13 мм при відновленні деталей авіаційних ГТД з нікелевих жароміцних сплавів:  
 а) шліфування наплавленого металу із залишковим припуском або до стану «як чисто»; б) виконання вибірки на площині деталі; в) виконання вибірки на пері деталі (по торцевій поверхні)

Також додатковим суто конструктивним фактором впливу для абразивної головки діаметром 10 мм може також бути й збільшена кривизна її поверхні. Опробування обробки наплавленого металу типу ЖС6 та ЖС32 (згідно

рис. 2а) із застосуванням прямої шліфувальної машинки Dremel 4250 потужністю 175 Вт при 30-35 тис. об./хв. при відновленні полиці деталей ГТД із сплаву ЖСЗДК (типу ЖС6) показало досить інтенсивне зношення абразивної головки на ніжці 3 мм (рис. 3).



**Рисунок 3.** Зовнішній вигляд абразивної головки діаметром 10 мм після зачищення наплавленого металу типу ЖС6 та ЖС32

Попередній аналіз показує, що раціональний вибір технічних параметрів абразивного інструменту з хромистого електрокорунду залежить не тільки від виду оброблюваного металу, зокрема в залежності від його твердості, але й від геометричних розмірів його головки та домінуючих для нього типових виробничих задач.

### **3 Висновки**

Розроблені абразивні головки з хромистого електрокорунду діаметром 10, 13, 20 та 25 мм продемонстрували хорошу здатність до механічної обробки наплавленого металу сучасних нікелевих жароміцних сплавів типу ЖС6 й ЖС32 на дослідних зварних заготовках та в умовах відпрацювання ремонту реальних деталей авіаційних ГТД мікроплазмовим порошковим та аргонодуговим наплавленням.

Випробування розроблених абразивних головок на ручному електроінструменті професійного класу показали, що зазначені головки мають близькі до оптимальних параметрів різання та стійкості абразиву характеристики на підвищених обертах більше 20-25 тис. об./хв. На менших обертах продуктивність механічної обробки знижується через «засалювання» поверхні абразивної головки оброблюваним матеріалом.

# **Металографічне дослідження пористості матеріалу на основі окалини сталі кувалдно-штампувального виробництва та природнього мінералу - сапоніту**

Самчук Людмила Михайлівна, кандидат технічних наук, доцент  
Повстяна Юлія Славомирівна, кандидат технічних наук, доцент

Луцький національний технічний університет,  
вул. Львівська, 75, Луцьк, 43018, Україна  
Samchuk204@gmail.com

**Ключові слова:** пористість, структура, обробка, поверхня, зразки, процес.

## **1 Вступ**

Дослідження мікроструктури, фазових і структурних перетворень проводять на шліфах, виготовлених із відповідних зразків. Для підготовки шліфів до металографічного дослідження здійснювали розрізання зразків на відрізнному верстаті із застосуванням алмазних кругів. Підготовка шліфів полягала в зрізуванні нерівностей поверхні абразивними частками на шліфувальних паперах. Обробку проводили в декілька стадій, постійно зменшуючи розмір цих часток. При підготовці шліфа абразивним методом шліфовку проводили в сім переходів на шліфувальних паперах № P100, P220, P500, P800, P1200, P2000, P2500 (маркування по FEPA P (ISO 6344)). Шліфування вели до повного видалення рисок, що залишилися після попередніх операцій. Шліфування повторювали, використовуючи послідовно папір з більшим умовним номером, що відповідає зменшенню розміру часточок абразиву, кожного разу змінюючи напрям руху шліфа на 90. Зміна напрямку руху шліфа дозволяла повністю знищити риси, що залишилися після попередньої шліфовки [1].

## **2 Експеримент**

Враховуючи значну поруватість досліджуваних матеріалів, в пори яких набиваються часточки абразиву при шліфуванні, перед кожним переходом на тонший абразив залишки абразиву з шліфа видаляли із застосуванням ультразвукового очищення, потім шліф промивали водою і просушували фільтрувальним папером. Щоб остаточно вирівняти поверхню, шліф

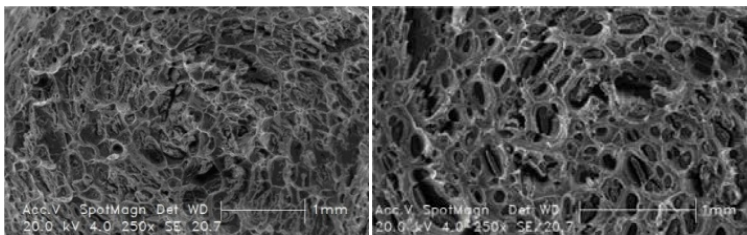


полірували алмазною пастою. Полірування проводили на таких же верстатах, що і шліфовку. Для полірування застосовували алмазні пасти по ГОСТ 25593-83. Алмазну поліровку виконували в 3-4 етапи на пастах в наступній послідовності: ACM 10/7, 7/5, 2/1, 1/0. Поверхню відполірованого зразка промивали зневодненим етиловим спиртом ( $C_2H_5OH$ ) і просушували. З метою отримання чіткого зображення границь зерен шліфи протравлювали 4%  $H_2SO_4$ . Дослідження мікроструктури проводили на оптичному мікроскопі "НЕОРНОТ" (Німеччина) при різних збільшеннях ( $\times 500$  та  $\times 250$ ,  $\times 350$ ).



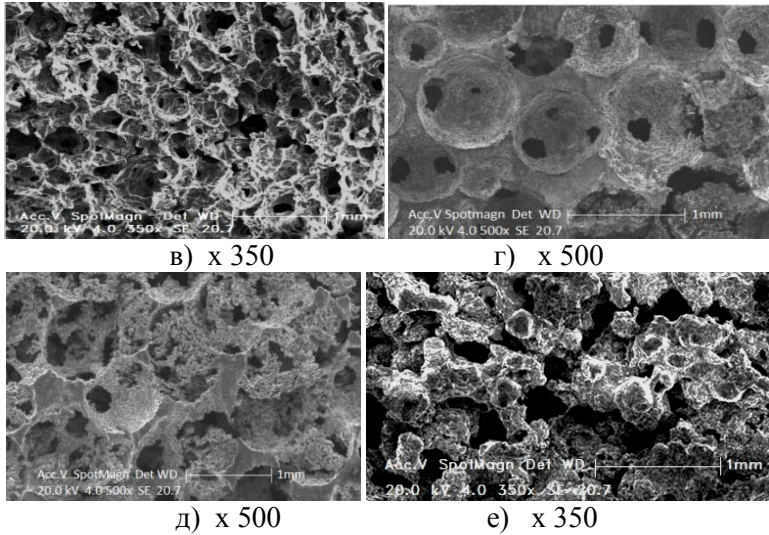
**Рис. 1.** Підготовка шліфів

Характерною складовою продукту взаємодії в складній системі є матриця на основі оксидів заліза, склад яких змінюється від  $Fe_2O_3$  до  $FeO$ . Відновлення оксидів протікає, найімовірніше, в ході металовідновлюваної реакції в послідовності  $Fe_2O_3, Fe_3O_4 - FeO$ . При цьому зростання пластин  $FeO$  відбувається за рахунок реакційного відновлення дисперсних частинок магнетиту  $Fe_3O_4$ , що є складовою фазою вихідної окалини. Паралельне протікання реакцій між алюмінієм і оксидом хрому (IV), а також між алюмінієм і окалиною, призводить до утворення в структурі продукту складних оксидів складу  $FeO(Al)_2O_3$ . На рис.2. наведені структури матеріалу при додаванні пороутворювачів різних за хімічною природою.



**а) x 250**

**б) x 250**



**Рис.2.** Мікроструктура пористого проникливого матеріалу з додаванням різних пороутворювачів (а – карболід, б – хлорид натрію, в – карбамід, г – поліетиленгліколь, д – карбонат кальцію, е – гідрокарбонат натрію)

### 3 Висновки

З отриманих структур можна зробити висновок, що при додаванні пороутворювачів різних за хімічним складом та властивостями можливо отримати пористий матеріал. При аналізі розміру та форми пор найбільш прийнятною для пористого тіла буде структура з додаванням пороутворювачів – карбаміду та гідрокарбонату натрію.

### Список посилань

1. В. Д. Рудь, Л. М. Самчук, Ю. С. Повстяна Перспективні можливості отримання нових пористих проникливих матеріалів з використанням природних мінералів. Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка.– 2014. – №2 (41). С. 174-179.
2. Ю. С. Повстяна, І. В. Савюк, Л. М. Самчук, Н. Т. Зубовецька. Одержання пористих металокерамічних матеріалів із використанням відходів машинобудування в режимі самопоширюваного високотемпературного синтезу. Журнал інженерних наук, 2016. –Том 3, № 1. С. F6-F12.

## **Практичні рішення в мотивації здобувачів освіти машинобудівних спеціальностей**

Сергій Сапон, канд. техн. наук, доцент

Національний університет «Чернігівська політехніка»,  
вул. Шевченка, 95, Чернігів, 14035, Україна  
s.sapon@gmail.com

**Ключові слова:** мотивація, здобувач освіти.

Актуальність проблеми мотивації здобувачів освіти до навчальної діяльності загальноновизнана. Історичний період, в якому опинилася Україна наразі в повній мірі визначає її майбутнє, як держави в прямому сенсі. Ця війна закінчиться і ймовірність нової агресії Російської федерації (РФ) на пряму залежить від швидкості відновлення нашої країни, її науково-технічного рівня і потенціалу промисловості. На ці чинники на пряму впливає рівень підготовки фахівців в технічній освіті і в машинобудуванні зокрема. Мотивація до навчання здобувачів освіти (ЗО) машинобудівних спеціальностей є необхідною умовою формування висококваліфікованих кадрів, спроможних успішно долати сучасні технічні проблеми і соціальні виклики.

Вивчення технічних дисциплін в галузі механічної інженерії завжди було нелегким процесом. Основна причина в тому, що шкільна освіта орієнтована і привчає учнів до того, що вчитель повинен навчити. Система освіти у вищому навчальному закладі потребує від здобувачів освіти суб'єктної позиції, перебування в позиції того, хто вчиться сам. І це безумовно неможливо без мотивації, яка дозволяє подолати об'єктивні складнощі вивчення технічних дисциплін. Далеко не всі здобувачі освіти спроможні швидко перебудуватися на нову модель навчання, внаслідок чого на перших курсах, де закладається фундамент підготовки інженерів-механіків, одночасно відбуваються і найбільші так звані «освітні втрати».

Питанням мотивації студентів до навчання присвячено чимало публікацій. Проте, їх авторами в більшості є науковці соціо-гуманітарних спеціальностей, які апріорі не завжди в повній мірі розуміють тонкощі та специфіку навчання за певними спеціальностями машинобудівного профілю. Чимало публікацій стосовно мотивації студентів є в РФ, але через заборону цитування в цій роботі посилання на них не наводяться. Практично в усіх публікаціях наводяться фактори, що впливають на мотивацію студентів та відповідні дослідження їх значимості [1-3]. Однак, незважаючи на достатню дослідженість, питання мотивації студентів до навчання досі залишається вкрай актуальним. Особливого значення набуває розповсюдження успішного досвіду і практичних кейсів, що демонструють ефективність певних інструментів мотивації.

В доповіді наведено ключові аспекти проблематики мотивації здобувачів освіти. Коротко висвітлено фактори, що підвищують мотивацію до навчання у здобувачів освіти технічних спеціальностей. Окреслено сучасну проблематику мотивації здобувачів освіти в контексті військової агресії РФ, вимушеного дистанційного навчання та дефіциту кадрів на підприємствах машинобудівного профілю. Здійснено порівняння можливості застосування певних підходів до мотивації персоналу на підприємствах і здобувачів освіти в університетах. Результати порівняння певних кейсів на практиці показують відсутність принципової різниці. Це вказує на можливість застосування інструментів та підходів до мотивації персоналу в успішних компаніях до мотивації здобувачів освіти до навчання. Звісно з певними корективами відповідно до специфіки навчальних закладів порівняно з бізнес-структурами.

Представлено практичні рішення в мотивації здобувачів освіти машинобудівних спеціальностей. Основний фокус уваги приділено чинникам, які знижують або взагалі знищують існуючу мотивацію здобувачів освіти. Показано конкретні практичні рішення і підходи, впровадження яких припиняє або деструктує процеси і явища, що зумовлюють зниження та знищення мотивації. Відображено успішність реалізації представлених рішень та проблематику, з якою безпосередньо стикнувся автор при впровадженні певних мотиваційних інструментів і заходів.

Як висновок, слід відзначити, що дуже часто для того щоб щось змінити, в тому числі і в мотивації здобувачів освіти, не потрібно робити щось новітнє та інноваційне. Достатньо припинити старі, звичні, але руйнівні дії. Неможливо розробити абсолютно універсальні інструменти та підходи до мотивації здобувачів освіти, прийнятні для всіх. Основи мотивації залишаються незмінними і полягають в створенні спонукання, бажання студента діяти, вирішувати завдання, розробляти проекти. А інструменти створення мотивації – різні та безпосередньо корельовані з суспільними змінами і обставинами. Не слід боятися діяти і щось пробувати змінити в технічній освіті. Краще невміло, з помилками робити корисне, ніж вміло і кваліфіковано створювати непотріб(не). Невмілість та кількість помилок зменшуються зі зростанням кількості дій.

## **Список посилань**

1. Квятковська А.О. Особливості навчальної мотивації студентів передвищих фахових та вищих навчальних закладів в умовах сучасних військових конфліктів / Квятковська А.О., Андросович К.А., Ковальова О.В., Прокоф'єва О.О. // Інноваційна педагогіка. – Випуск 49. Том 1. – 2022. – с. 117-182.
2. Піменова О.О. Мотивація до навчання студентів в умовах воєнного стану / О.О. Піменова, О.М. Гапончук // Габітус. – Випуск 47. – 2023. – с. 36-39.

# **Застосування технологій поверхневого пластичного деформування для підвищення зносостійкості деталей обертання**

Свіржевський Костянтин Миколайович, аспірант  
Заболотний Олег Васильович, к.т.н., доцент

Луцький національний технічний університет,  
вул. Львівська, 75, Луцьк, 43018, Україна  
[volynasi@gmail.com](mailto:volynasi@gmail.com)

**Ключові слова:** вигладжування, деформація, зносостійкість, фрикційна поверхня, індентор

## **1 Вступ**

Механічна обробка деталей методами поверхневого пластичного деформування, зокрема методом вигладжування має широкі технологічні можливості, за допомогою вигладжування можливо виконувати чистове оздоблювальне, зміцнююче і калібруюче оброблення [1].

Вигладжування з високою продуктивністю, дозволяє отримувати вироби з високою якістю обробленої поверхні, високою опорною здатністю, зміцненим поверхневим шаром з утвореними в ньому стискаючими залишковими напруженнями [2, 3].

Залежно від технологічних умов, даний метод дозволяє досягати 6...7 квалітетів точності та шорсткості до  $Ra=0,16...0,02$  мкм. Як деформуючий елемент для оброблення вигладжуванням можна використовувати не тільки спеціальні індентори, але і стандартні пластини для токарного оброблення при зміні способу їх встановлення [4].

На підставі аналізу можливих способів установки інденторів-пластин для реалізації вигладжування зовнішніх поверхонь обертання, було встановлено і експериментально підтверджено, що спосіб установки пластин істотно впливає, як на технологічні можливості процесу вигладжування, так і на параметри якості оброблених поверхонь [5]. При зміні схеми установки інструменту змінюються і геометричні параметри області контакту (площа і розміри зони контакту) індентора-пластини із заготовкою [6].

## **2 Виклад основного матеріалу. Результати досліджень**

Для вигладжування із застосуванням інденторів-пластин була розроблена методика розрахунку геометричних параметрів зони контакту, але суттєвими

недоліками даної математичної моделі є те, що в розрахунках не враховується величина глибини проникнення деформуючого елементу у метал заготовки, а також те, що фізико-механічні властивості оброблюваного матеріалу враховуються непрямым чином [7].

Якість поверхонь оброблених вигладжувальними технологіями характеризується геометричними характеристиками поверхні та фізико-механічними властивостями поверхневого шару металу [8]. Якість поверхні в свою чергу впливає на експлуатаційні властивості деталей машин і механізмів в цілому. Для методу вигладжування із застосуванням інденторів-пластин ще не проводилися повно-факторні експериментальні дослідження впливу способу установки інструменту на параметри шорсткості обробленої поверхні [9, 10].

На основі аналізу відомих даних експериментів з дослідження особливостей контактної деформації при вигладжуванні, був зроблений висновок, що заготовка повинна розглядатися як пружне тіло. Не можна нехтувати пружною складовою деформації, тому що у даному випадку пружна і пластична складові співвимірні за величиною. Для дослідження вигладжування інденторами-пластинами, найбільш доцільно застосовувати інструменти, виготовлені із сучасних твердих сплавів або композитних матеріалів [11, 12].

У зв'язку з цим – метою нашого дослідження було встановлення взаємозалежностей впливу технологічних факторів (кутів установки індентора-пластини та технологічного натягу) на мікрогеометрію обробленої поверхні, на основі виявлення взаємозв'язків мікрогеометрії поверхневого шару з силовими характеристиками та плямою контакту в ході процесу вигладжування зовнішніх поверхонь деталей обертання.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні завдання:

- розроблено методикау визначення виду та площі зони контакту індентора-пластини з поверхнею заготовки при зміні способу установки інструменту;
- розроблено математичну модель розрахунку контактного тиску в зоні контакту індентора-пластини із заготовкою, сили вигладжування та циклічності навантаження залежно від способу встановлення технологічної оснастки;
- експериментально встановлено залежності параметрів якості поверхневого шару оброблених деталей від технологічних режимів та способу встановлення індентора-пластини;
- розроблено методикау та технологічні рекомендації щодо вибору раціональних параметрів установки індентора-пластини для забезпечення регламентованих параметрів якості оброблених вигладжуванням поверхонь;
- проведено апробацію процесу вигладжування інденторами-пластинами, розробленої методики призначення технологічних режимів та параметрів встановлення інструменту.

### 3 Висновки

Таким чином нами було розроблено методику розрахунку та призначення раціональних кутів установки інденторів-пластин та силових параметрів процесу вигладжування. Вихідними даними для розрахунку є параметри шорсткості, які необхідно досягти в процесі оброблення. Виробничі випробування були проведені на заводі ДП ЛРЗ «Мотор» у м.Луцьку.

Для проведення випробувань була обрана деталь обертання з комплексу плунжерної пари – золотник керування. Результати виробничих випробувань дозволили встановити, що застосування розробленої методики для призначення раціональних кутів установки інденторів-пластин та технологічного натягу дозволяє обробляти зовнішні конічні та циліндричні поверхні заготовок, виготовлених із сталі марки 95X18, з шорсткістю поверхні, що відповідає встановленим вимогам відповідно до вимог згідно робочого креслення.

Застосування в якості фінішного оброблення процесу вигладжування з деформуючими елементами у вигляді інденторів-пластин дозволило виключити з технологічного процесу операцію шліфування, що зменшило штучний час, необхідний виготовлення даної деталі, скоротило завантаження технологічного обладнання та дозволило підвищити зносостійкість деталі на 12...15%.

### Список посилань

1. Pasternak, V., Zabolotnyi, O., Ilchuk, N., Machado, J., Svirzhevskiy, K. (2022). The Behaviour of a Rod (Beam) Under the Influence of an External Power Load. In: Ivanov, V., Pavlenko, I., Liaposhchenko, O., Machado, J., Edl, M. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing V. DSMIE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-06044-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-06044-1_2)
2. Pasternak, V., Zabolotnyi, O., Svirzhevskiy, K., Zadorozhnikova, I., Machado, J. (2023). Influence of Mechanical Processing on the Durability of Parts in Additive Manufacturing Conditions. In: Machado, J., et al. *Innovations in Mechanical Engineering II. icieng 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-09382-1\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-09382-1_3)
3. Svirzhevskiy, K., Zabolotnyi, O., Tkachuk, A., Machado, J., Kononenko, A. (2021). An Increase in Wear Resistance Frictional Contact of Functional Surfaces for Plunger Pairs. In: Ivanov, V., Pavlenko, I., Liaposhchenko, O., Machado, J., Edl, M. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. DSMIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-77823-1\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77823-1_9)
4. Svirzhevskiy, K., Zabolotnyi, O., Tkachuk, A., Zablotskiy, V., Cagaňová, D. (2021). Methods of Evaluating the Wear Resistance of the Contact Surfaces of Rolling Bearings. In: Tonkonogiy, V., et al. *Advanced Manufacturing Processes II* .

- InterPartner 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-68014-5\\_45](https://doi.org/10.1007/978-3-030-68014-5_45)
5. Svirzhevskiy, K.; Zabolotnyi, O.; Machado, J.; Tkachuk, A.; Boiarska, I. Application of Carbide Cutting Inserts as Indenters for Surface Plastic Deformation. *Appl. Sci.* 2023, 13, 3741. <https://doi.org/10.3390/app13063741>
  6. Trokhymchuk, I., Svirzhevskiy, K., Tkachuk, A., Zabolotnyi, O., Zablotskiy, V. (2022). The Structure of Automated Control Systems for Precision Machining of Parts Bearing. In: Machado, J., et al. *Innovations in Mechatronics Engineering II*. *icieng* 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-09385-2\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-031-09385-2_17)
  7. Zablotskiy, V., Tkachuk, A., Moroz, S., Prystupa, S., Svirzhevskiy, K. (2021). Influence of Technological Methods of Processing on Wear Resistance of Conjugated Cylindrical Surfaces. In: Tonkonogyi, V., et al. *Advanced Manufacturing Processes II*. InterPartner 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-68014-5\\_47](https://doi.org/10.1007/978-3-030-68014-5_47)
  8. Zablotskiy, V., Tkachuk, A., Senyshyn, A., Trokhymchuk, I., Svirzhevskiy, K. (2022). Impact of Turning Operations on the Formation of Rolling Bearing's Functional Surfaces. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskiy, G., Pavlenko, I. (eds) *Advanced Manufacturing Processes III*. InterPartner 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-91327-4\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-030-91327-4_23)
  9. Zabolotnyi, O., Pasternak, V., Andrushchak, I., Ilchuk, N., Svirzhevskiy, K. (2020). Numerical Simulation of the Microstructure of Structural-Inhomogeneous Materials. In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Zajac, J., Peraković, D. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III*. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7\\_55](https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_55)
  10. Zabolotnyi, O., Povstyanoy, O., Somov, D., Sychuk, V., Svirzhevskiy, K. (2020). Technology of Obtaining Long-Length Powder Permeable Materials with Uniform Density Distributions. In: Beltran Jr., A., Lontoc, Z., Conde, B., Serfa Juan, R., Dizon, J. (eds) *World Congress on Engineering and Technology; Innovation and its Sustainability 2018*. WCETIS 2018. EAI/Springer Innovations in Communication and Computing. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-20904-9\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-20904-9_5)
  11. Кононенко А.С., Свіржевський К.М. Можливості спрямованого формування показників якості спряжених деталей. Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку : матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної конференції (29-30 жовтня 2020 р.) : збірник тез. – Луцьк : Луцький НТУ, 2020. С. 32-34.
  12. Кононенко А.С, Свіржевський К.М., Заблоцький В.Ю., Зabolotний О.В., Ткачук А.А. Прогнозування експлуатаційних характеристик пар тертя на основі експрес-методу оцінки функціональних поверхонь. Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції з проблем вищої освіти і науки ТК-2020 «Прогресивні напрямки розвитку технологічних комплексів» м. Луцьк, Україна 2-4 червня 2020 року.



## Робот Аватар – клон руки сапера

Сичук В.А.<sup>1</sup>, к.т.н., доц., Сичук А.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Луцький національний технічний університет,  
вул. Львівська, 75, Луцьк, 43018, Україна

<sup>2</sup>Комунальний заклад загальної середньої освіти  
«Луцький ліцей №14 імені Василя Сухомлинського Луцької міської ради»,  
вул. Гімназійна, 8, Луцьк, 43003, Україна  
svamator@gmail.com

**Ключова слова:** маніпулятор, сапер, розмінування, дистанційне керування.

Мета проекту – виготовити робот-маніпулятор, виконавчий механізм якого має кінематичну структуру людської руки, а пристрій керування забезпечує повторення рухів руки людини-оператора у реальному часі.

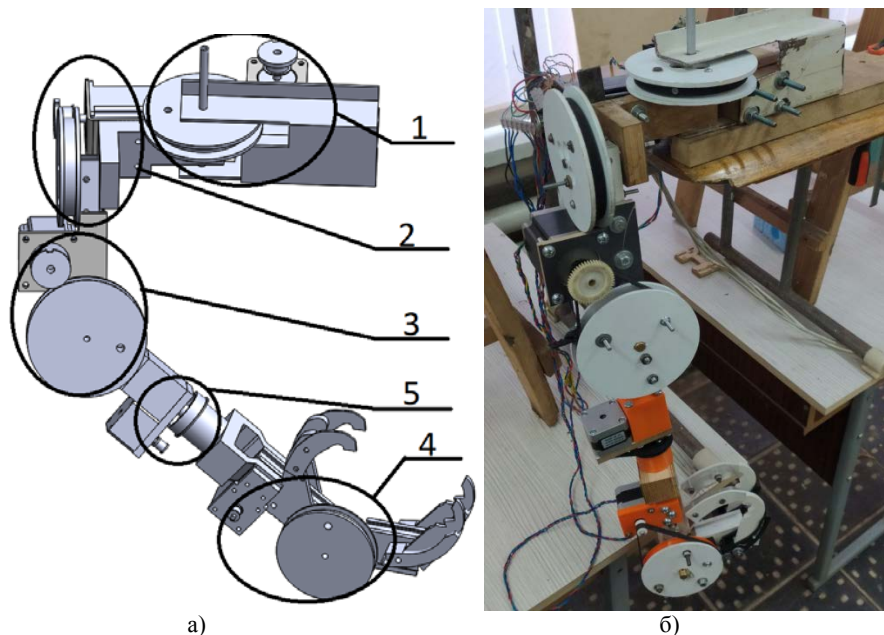
Комплекс робот Аватар складається з п'яти обов'язкових систем: перша – джерела живлення; друга – «рукавиця», що одягається на людську руку, щоб керувати виконавчими органами (для ергономічного згинання, розгинання та повороту руки конструкція «рукавиці» базується на анатомії руки людини); третя – система, що передає інформацію рухів від «рукавиці» до виконавчих органів; четверта – виконавчі органи, тобто роботизований маніпулятор, що копіює рухи руки людини; п'ята – дистанційне бачення, відеокамера, що стоїть в зоні маніпулятора та передає зображення до оператора.

Для усунення конструктивних можливих помилок при виготовленні маніпулятора перш за все його було змодельовано в програмному забезпеченні SolidWorks (рис. 1, а), а вже після проектування його було безпосередньо виготовлено (рис. 1, б).

Комплекс робота Аватара може виконувати прості типові рухи: схопити, відпустити, повернути, підняти, перемістити, притягнути тощо. При цьому, маніпулятор може здійснювати свою роботу не лише рукою, а й інструментами.

При проектуванні враховані додаткові вимоги до пристрою, який працюватиме у польових умовах: надійність, простота виготовлення та ремонту (можливість функціонування без використання комп'ютерних технологій), дешевизна та доступність матеріалів.

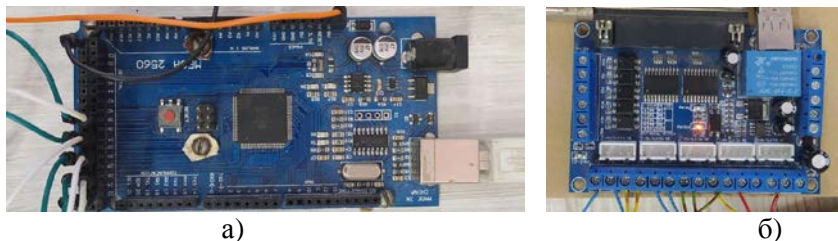
Протягом проведення дослідів, силових завдань та експериментів над комплексом робота Аватара, його системи були поступово змінені та покращені, при цьому створювались нові версії робота Аватара.



**Рис. 1.** Маніпулятор системи робота Аватара:

- а) 3D модель: 1 – блок прокручування плеча, 2 – блок підйому руки, 3 – блок підйому ліктя, 4 – блок підйому пальців, 5 – блок прокручування ліктя;
- б) виготовлений з доступних матеріалів маніпулятор системи

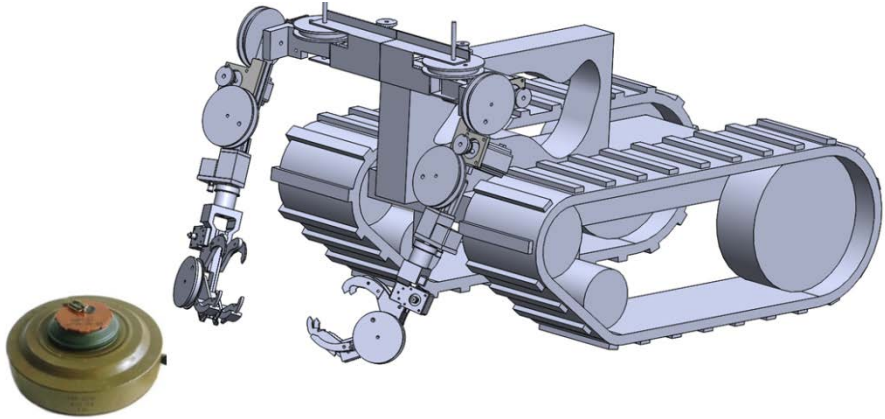
Для реалізації автоматичної роботи маніпулятора було розроблено та застосовано метод «навчання» робота-маніпулятора за допомогою плати Arduino Mega 2560 та відтворення рухів без оператора, використовуючи інтерфейсну плату VI-Mach-V1.1 через програмне забезпечення Mach3.



**Рис. 2.** Плати керування:

- а) Arduino Mega 2560 - плата запам'ятовування рухів оператора;
- б) VI-Mach-V1.1 – плата контролю відтворення рухів маніпулятором.

Варто відмітити, що роботизований маніпулятор необхідно розміщувати на дистанційно-керованій мобільній платформі для переміщення в зону проведення робіт щодо знешкодження потенційно небезпечних вибухових пристроїв. На рис. 3 представлено концептуальну конструкцію самохідної установки з дистанційно керованим маніпулятором системи Аватар.



**Рис. 3.** Концепція мобільної роботизованої платформи для розмінування

В результаті проведених робіт маніпулятор може дистанційно виконувати ризиковану для сапера роботу дистанційно та в автоматичному режимі.

## Список посилань

1. Довідка програмного забезпечення «SolidWorks»
2. Datasheet оптичного енкодера на 200 імп/об та на 600 імп/об
3. Datasheet драйверів DM556 та TB6600
4. Datasheet крокових двигунів Nema 23, Nema 19, Nema 17.
5. Дистанційно-керований роботизований маніпулятор / Сичук Аліна, Сичук Віктор // Збірник наукових доповідей міжнародної конференції «Матеріали та технології в інженерії» (МТІ-2023) 16–18 травня 2023 р. Луцьк. С. 244-246.

## Звуковий 3D сканер

Сичук В.А., к.т.н., доц., Лопух В.В.

Луцький національний технічний університет,  
вул. Львівська, 75, Луцьк, 43018, Україна  
svamator@gmail.com

**Ключова слова:** сканер, звукові хвилі, розмінування, «хмара точок».

"174 тисяч квадратних кілометрів українських територій забруднені мінами та нерозірваними боєприпасами. Ці заміновані території удвічі більші за площу Австрії. Це – сотні тисяч протипіхотних та протитанкових мін, авіаційних бомб, мінометних снарядів та боєприпасів, які не розірвалися і застрягли в полях", - сказав Володимир Зеленський під час відеовключення у своїй промові в Національній раді Австрії [1]. Такий стан речей призводить до неминучих смертей з боку цивільного населення, яке може випадковим чином натрапити на міну чи інший вибуховий пристрій. Також заміновані поля призводять до велетенських економічних проблем в агросекторі для ведення сільськогосподарських робіт.

Відповідно до проблематики виникла ідея розробити спеціальний пошуковий пристрій, який безконтактним (до шуканого об'єкту) способом буде виявляти об'єкти як на поверхні ґрунту та і під ним. В якості робочого середовища через яке можливо отримувати інформацію було обрано звукові хвилі. На рисунку 1 наведено принципову схему роботи звукового сканера на якій звукові хвилі які генерує випромінювач поширюються в просторі. В разі перебування об'єкту на напрямку поширення звукових хвиль – хвилі відбиваються від об'єкту і мікрофон звукового сканера вловлює відбиті хвилі. Згідно часу проходження випроміненої звукової хвилі і повернення відбитої від об'єкта хвилі можна судити про відстань на якій об'єкт знаходиться від сканера.

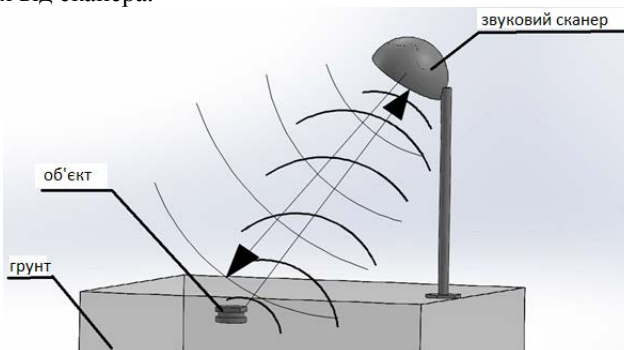


Рис. 1. Принципова схема роботи звукового 3D сканера

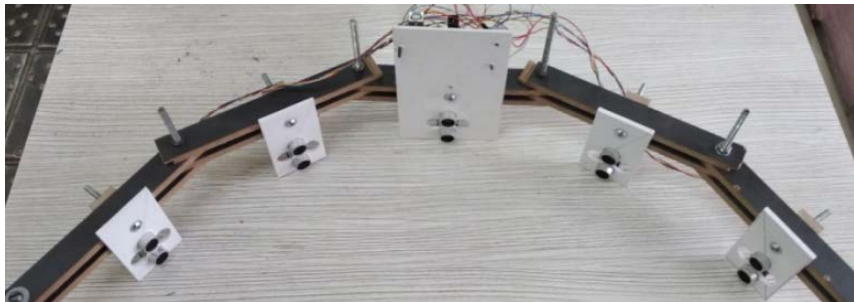
Відповідно тестова конструкція звукового сканера з 9-ма парами випромінювачів та мікрофонів була розроблена (наведено на рисунку 2). Керування звукового сканера здійснюється електронною платою Arduino Mega 2560 в якій записано спеціальний код програми [2].

Провівши серію випробувань було виявлено недолік, який полягав в тому, що оскільки на сканері 9 пар сенсорів розташовані в одній площині яка ще і є паралельною горизонтальній площині на якій і знаходяться шукані об'єкти, то їх можна «бачити» лише зверху і не «бачити» бік.



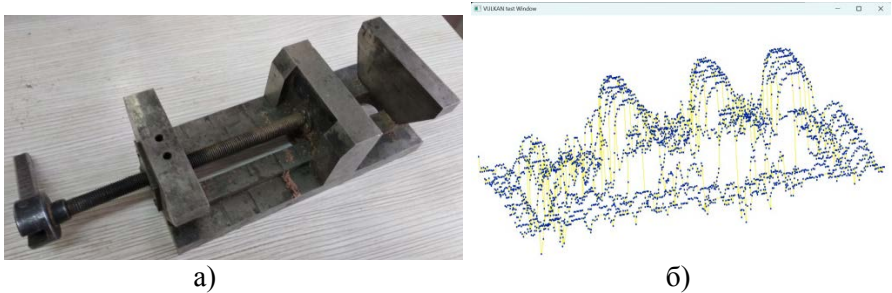
**Рис. 2.** Тестова конструкція звукового 3D сканера

Відповідно до недоліків першої конструкції на рисунку 3 представлено розроблений сканер на якому пари сенсорів розміщено вздовж уявної параболі. Така конструкція дозволяє сканувати і бокові поверхні об'єктів.



**Рис. 3.** Вдосконалена конструкція звукового 3D сканера параболічної форми

На рисунку 4 представлено об'єкт сканування типу «лещата» (рис. 4, а)) та результат сканування (рис. 4, б)).



**Рис. 4.** Експериментальне сканування: а) об'єкт сканування типу «лещата»; б) результат сканування об'єкту типу «лещата»

Розроблене програмне забезпечення (рис. 4, б)) являє собою віртуальне 3D середовище в яке можна завантажувати файл з координатами, які надав звуковий 3D сканер. Програма написана за допомогою API Vulkan [3], що має наступні переваги над іншими програмними інтерфейсами: кросплатформеність та висока оптимізація. Суть програми полягає у створенні хмари точок із файлу з координатами, ці точки з'єднуються кривими, що дає базове зображення 3D моделі, тобто знайденого об'єкту.

Використовуючи різні алгоритми обробки координат, можна утворювати різні візуальні представлення просторової моделі об'єкту. Також програма може вдосконалюватись у різних напрямках, серед них:

- краще візуальне представлення, використовуючи зафарбовування і градієнти до кривих чи точок;
- редагування об'єкту, використовуючи базові елементи редагування можна власноруч виправляти існуючі шуми (точки з невірними координатами або неякісне з'єднання точок кривими);
- підвантаження додаткових файлів, які дозволять створити повноцінне просторове середовище в якому знайдений об'єкт;
- автоматичне розпізнавання типу об'єкту, який був виявлений при скануванні.

В результаті можна зробити висновок, що представлена розробка є повноцінним програмно-апаратним комплексом, що дозволяє шукати міни.

## Список посилань

1. Джерело: <https://www.ukrinform.ua/rubric-polytics/3689353-v-ukraini-zaminovano-teritorij-ak-dvi-avstrii-zelenskij-u-nacionalnij-radi.html>
2. Джерело: <https://www.arduino.cc/reference/en/>
3. Джерело: <https://docs.vulkan.org/spec/latest/index.html>

# **Розробка обладнання, інструменту та технології виготовлення паливних брикетів з відходів біосировини природного походження**

Струк Назар Мирославович, аспірант  
Заболотний Олег Васильович, к.т.н., доцент

Луцький національний технічний університет,  
вул. Львівська, 75, Луцьк, 43018, Україна  
[volynasi@gmail.com](mailto:volynasi@gmail.com)

**Ключові слова:** подрібнення, пресування, біосировина, брикет

## **1 Вступ**

Розробка обладнання, інструменту та технології виготовлення паливних брикетів з відходів біосировини природного походження на сьогоднішній день є актуальною темою не тільки в Україні але й у всьому світі. В Україні безвідходні та зелені технології стрімко розвиваються, проте поки відстають від Європейських, тому проблема переробки доступних видів природної біосировини, і зокрема опалого листя, та ін. є найактуальнішими. Як показує статистика, вирубка лісів за 2023 рік становить 14,2 млн куб.м., що призводить до зменшення лісів з кожним роком [1]. В наслідок війни в нашій державі є значні руйнування інфраструктури, тому збільшилась потреба в заготівлі дров, пелет та брикетів для опалювання в мобільних котельнях та твердопаливних котлах. Держлісагенство заявило, що для опалювання взимку 2023-2024 років було заготовлено 7 млн куб.м дров, що є половиною з офіційно вирубаних лісів [2]. Згідно наведених показників очевидно, що збільшення обсягів використання вільної природної біосировини (листя, кора, шишки, трава, гілля тощо) замість заготовлених дров дозволить суттєво зберегти природні ресурси для нас і наступних поколінь.

## **2 Виклад основного матеріалу. Результати досліджень**

Питання переробки опалого листя та інших видів біосировини природного походження та виготовлення на їх основі конкурентоспроможних видів палива - недостатньо досліджені. На даний момент в Україні лише невелика кількість комунальних підприємств займається переробкою опалого листя, зокрема шляхом його захоронення або компостування. Тому пошук вигідної альтернативи, а саме розробка нових та удосконалення вже існуючих технологій виготовлення паливних брикетів з біосировини природного походження (листя, кора, гілля, трава, тощо) з низькими викидами шкідливих

речовин в атмосферу – є надзвичайно актуальними, оскільки вирішують одночасно кілька важливих проблем і забезпечують низку позитивних переваг, як глобального так і місцевого рівня.

В цій роботі ми розробляємо технологію виготовлення паливних брикетів з відходів біомаси природного походження, проектуємо обладнання та інструмент і вивчаємо питання переробки опалого листя, гілля, трави та ін. доступних видів природної біосировини шляхами, які мінімізують шкоду для екосистеми та здоров'я людини, а також досліджуємо найменш енергетично та фінансово-затратні шляхи для розробки необхідного для цього обладнання, оснастки та інструменту.

У Україні опале листя, гілля, траву тощо заборонено спалювати, оскільки спалювання сухої трави, гілля, листя та залишків рослин від господарської діяльності наносить шкоду навколишнім об'єктам рослинного та тваринного світу, забруднює навколишнє середовище і атмосферу. Як відзначають експерти, в диму міститься безліч токсичних сполук, оскільки листя та інші природні біоресурси вбирають з атмосфери всі викиди. А при спалюванні листя виділяється одне з найбільш токсичних синтетичних сполук - діоксин. При згорянні однієї тонни рослинних залишків у повітря вивільняється близько 9 кг мікрочастинок диму. Разом з димом у повітря потрапляють пестициди та радіонукліди, накопичені рослинами протягом року.

Крім того, у вогнищах також горять тверді побутові відходи, полімерні матеріали, які є найсильнішими алергенами, що погіршує стан екології. У димі опалого листя високий вміст сполук окису вуглецю, сірчистого ангідриду, сажі, оксиду азоту, вуглеводнів та ін. шкідливих сполук. В тліючому без доступу кисню листі виділяється бензопірен, що здатний викликати у ракові захворювання, оскільки епітелій слизової оболонки дихальних шляхів людини не здатний протистояти збудникам захворювань.

Для прикладу у Львові **частину листя, яке збирають комунальники на вулицях, скверах і парках, везуть на станцію компостування**. Листя змішується з харчовими відходами, яке збирається населенням, бізнесом і два місяці працює у буртах, його постійно перемішують і періодично додають спеціальні бактерії. Таким чином, через два місяці утворюється компост [3].

У Києві почали переробляти опале листя за допомогою хробаків. Для перетворення листя складають, обробляють розчином та ферментують, а потім вже переробляють його на гумус. Для цього застосовується технологія виробництва компосту та його переробки за допомогою вермикулювання. Вона здійснюється за допомогою використання червоних кільцевих хробаків, які поїдаючи органічні відходи, переробляють їх в біогумус, що містить необхідні речовини для насичення ґрунтів [4].

У 2017 році студент-біотехнолог Київського університету ім. Тараса Шевченка - Валентин Фречка придумав, як робити папір з опалого листя [5]. За три роки він довів технологію до промислового використання і навчився виробляти папір з листя. Для цього листя подрібнюють, обробляють паром і



хімікатами – на виході отримують волокно з якого можна виготовляти папір. Це виробництво виробляє 1,5-2 тони паперу в місяць та потребує подальших інвестицій для масштабування. Тільки в Києві кожного року вивозять 100тис кубометрів опалого листя, яке потребує переробки. Як бачимо, деякі громади навчилися переробляти невелику частину із зібраного листя в біогумус, але наразі в більшості випадків зібране листя вивозять на полігони відходів де воно пріє, гниє і виділяє шкідливі гази які забруднюють атмосферу.

Щоб не завдавати шкоди атмосферному повітрю і зберегти здоров'я населення, ми розробляємо технологію переробки відходів біосировини природного походження на основі листя, трави, гілля та залишків рослин домашнього господарства шляхом його попередньої обробки з подальшим пресуванням у брикети визначеної форми і розмірів (брикетування). Для цього ми використовуємо лінію з промивки листя та інших видів біосировини, змішування різних видів біосировини у заданих пропорціях та подальше їх ущільнення до заданої щільності за допомогою спеціального гідравлічного або шнекового брикетувального пресу. Після пресування брикети просушуються після чого упаковуються і готові до використання.

Переваги паливних брикетів на основі листя з додаванням інших видів природної біостровини очевидні. Теплотворна здатність таких паливних брикетів становить 4000–4400 Ккал/кг, вона вища, ніж у дров, і збігається з теплотворною здатністю пелет і певних різновидів вугілля, що застосовуються у комунальній теплоенергетиці. Процес виробництва відносно простий і не вимагає висококваліфікованого персоналу для обслуговування лінії виробництва.

Під час горіння паливні брикети мало димлять і не іскрять. У них низька зольність (0,5-1,5%). На відміну від інших різновидів твердого палива після згорання брикетів у топці залишається тільки попіл. Для брикетів потрібно менше місця для зберігання, ніж для дров, їх зручніше транспортувати (одна стандартна європелета з брикетами, вага якої становить 1 т, еквівалентна 3-4 м<sup>3</sup> дров). Це забезпечує суттєве скорочення витрат на перевезення і зберігання такого виду палива [6]. Брикети можна зберігати довгостроково, при цьому їхні якісні характеристики не погіршуються. На відміну від вугілля вони не створюють негативного впливу на навколишнє середовище.

Вартість брикетів виходить нижча за вартість дров чи деревних пелет. Сировина для виготовлення є безкоштовною, основні затрати це вартість лінії з виробництва, яка окуповується орієнтовно за 1-2 опалювальні сезони. Збирання і транспортування листя можна здешевити шляхом залучення до процесу комунальних підприємств, які збирають і вивозять цю біосировину на полігони побутових відходів для захоронення.

Паливні брикети з опалого листя з додаванням інших видів доступної біосировини природного походження можна використовувати як паливо для твердопаливних котлів з великою температурою горіння. Температура горіння має бути вищою за 200 градусів за цельсієм, щоб мінімізувати

викиди шкідливих речовин у навколишнє середовище. Потрібно зауважити, що спресовані брикети складніше запалити, тому рекомендуємо закладати брикети у вже добре розігрітий котел. Спалювання брикетів в котлах, призначених для цього різновиду палива, дає змогу отримати в 2-3 рази більше теплової енергії, ніж під час спалювання дров і тріски, оскільки зневоднена деревина потребує значних витрат енергії як під час спалювання й газифікації, так і в разі попереднього просушування. Спалювання дров, відносна вологість яких становить 45–60%, в 1,8–3,5 разів зменшує теплотворну здатність деревини. Підвищена вологість паливної деревини істотно впливає і на ефективність процесів горіння та теплообміну [7].

### **3 Висновки**

Одним із шляхів покращення екологічного стану довкілля та здешевлення енергоносіїв є використання біоенергетичних видів палива, а саме виготовлення брикетів із біомаси природного походження для застосування у промислових і побутових котлах. Рослинні і деревні відходи мають хороші енергетичні показники – тому розробка технології підготовки і брикетування доступних видів природної біосировини допоможе вирішити проблеми зберігання і утилізації сировини природного походження. Технологія переробки опалого листя, трави та рослинних решток, гілля, кори та інших доступних видів біосировини природного походження допоможе вирішити актуальну проблему сьогодення та сприятиме розробці чітких механізмів регулювання даного процесу на рівні громади та держави вцілому.

### **Список посилань**

1. Державна служба статистики: веб-сайт. URL: [www.ukrstat.gov.ua](http://www.ukrstat.gov.ua) (дата звернення 15.01.1024)
1. Державне агентство лісових ресурсів України: веб-сайт. URL: <https://forest.gov.ua> (дата звернення 12.01.1024)
2. Департамент з питань поводження з відходами: веб-сайт. URL: <https://city-adm.lviv.ua> (дата звернення 03.02.1024)
3. 4. Офіційни портал Києва, Київська міська рада: веб-сайт. URL: [www.kyivcity.gov.ua](http://www.kyivcity.gov.ua) (дата звернення 16.02.1024)
4. Журнал Forbes Ukraine: веб-сайт. URL: [www.forbes.ua](http://www.forbes.ua) (дата звернення 11.01.1024)
5. Напрями розвитку альтернативних джерел енергії: акцент на твердому біопаливі та гнучких технологіях його виготовлення: монографія / О.С. Полянський, О.В. Дьяконов, О.С. Скрипник та ін.; за заг. ред. В.І. Д'яконова; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2017.
6. Біоенергетичний потенціал лісостепової і поліської зон України та перспективи його використання: монографія / за заг. ред. В.І. Ладики. Суми: Університетська книга, 2009.

# Триботехнічні властивості порошкових сплавів Al-15Fe-C

С.Ю. Тесля, аспірант  
А.М. Степанчук, кандидат технічних наук, професор  
М.А. Тесля, студентка  
Д.С. Судаков' студент  
Д.Є. Чижська, студентка

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,  
Берестейський проспект, 37, Київ, 03056  
[s.teslia@kpi.ua](mailto:s.teslia@kpi.ua)

**Ключові слова:** триботехнічні матеріали; порошкові сплави алюмінію;  
Al-Fe; коефіцієнт тертя; зношування

## 1 Вступ

Сучасна індустрія побудована на впровадженні нових та ефективних матеріалів з підвищеними експлуатаційними та [1]. Серед відомих груп матеріалів, особливу увагу приділяють матеріалам триботехнічного призначення, оскільки до 95 % вузлів апаратів та машин виходять з ладу не за рахунок руйнування, а за рахунок зношування [2]. Одним з варіантів використання антифрикційних матеріалів є виробництво на їх основі контактів ковзання для громадського електротранспорту. Найбільш поширеними для даних вузлів є матеріали на основі заліза, міді та графіту, проте за рахунок складності регулювання механічних властивостей дані матеріали втрачають свою актуальність. Потенційною альтернативою можуть стати сплави алюмінію, які володіють високою питомою міцністю, корозійною стійкістю, високою електро- та теплопровідністю [3]. З техніко-економічної точки зору перспективним є легування алюмінію залізом в концентраціях до 15 мас. % [4]. Проте, за рахунок кристалізації крупних інтерметалідів, які знижують властивості сплаву, отримання таких матеріалів засобами ливарного виробництва обмежено. Більш перспективним є використання технології порошкової металургії, де за рахунок розмірного ефекту можливо подрібнити не лише зерна, але й зміцнюючі структурні складові [3]-[4]. Зазвичай в чистому вигляді порошкові сплави досить не часто використовуються у вузлах тертя, за рахунок відносно високого коефіцієнту тертя. Для стабілізації умов роботи додають тверді мастила на основі сульфідів, фторидів, графіто подібних сполук тощо. Серед відомих матеріалів найбільш високі антифрикційні властивості демонструють

добавки графіту [2]. Тому в роботі було досліджено триботехнічні властивості порошкових сплавів Al-15Fe з добавками графіту.

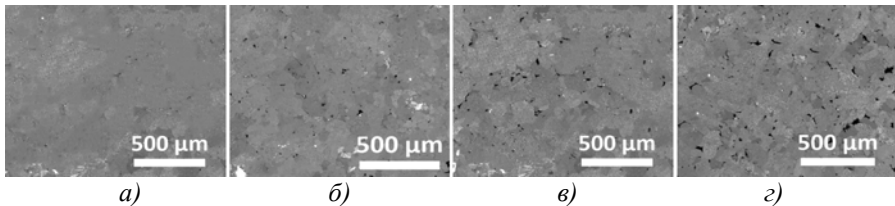
## 2 Матеріали та методи

Порошки сплавів отримували методом механічного диспергування розплаву на установках типу Полет. Детальний аналіз умов отримання наведено в роботі [3]. Вихідний порошок змішували з твердим мастилом в концентраціях

1, 2, 3 мас. % графіту. Суміш порошків ущільнювали методами пресування за тиску 700 МПа з подальшим спіканням протягом 30 хв в середовищі водню. Дослідження коефіцієнтів тертя проводили на установці 2070 СМТ-1 об стальне контр тіло твердістю 45 HRC за схемою диск-колодка за навантаження 10 Н.

## 3 Результати та обговорення

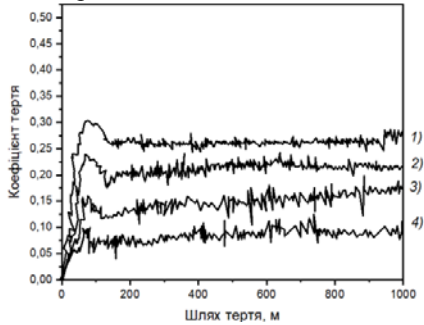
На рисунку 1 наведено мікроструктуру спечених сплавів Al-15Fe з різним вмістом добавок графіту. Відповідно до отриманих даних розподіл графіту в сплаві має рівномірний характер, без утворення конгломератів, що є одним з ключових факторів під час отримання високих антифрикційних властивостей.



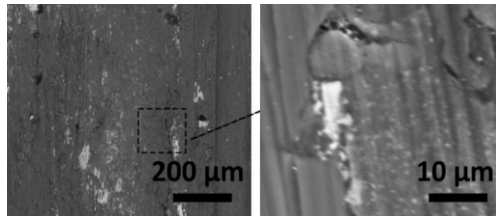
**Рис. 1.** Мікроструктура сплаву Al-15Fe з різним вмістом добавок графіту: (а) без добавок; (б) 1 мас. %; (в) 2 мас. %; (г) 3 мас. %

Дослідження коефіцієнтів тертя в умовах тертя без подачі зовнішніх мастил наведено на рисунку 2. Збільшення вмісту графіту від 1 до 3 мас. % призводить до зниження коефіцієнта тертя від 0,28 до 0,065. Спільною рисою для експериментальних сплавів (рис. 2) є стабілізація коефіцієнту тертя після проходження шляху в 200 м. Аналіз поверхонь тертя (рис. 3) вказує на подрібнення інтерметалідів та їх часткове змішування із продуктами зношування з утворенням вторинних структур. Вторинні структури суттєво

знижують величину зношування та коефіцієнту тертя за рахунок виникнення проміжного шару між поверхнями.



**Рис. 2.** Зміна коефіцієнту тертя для Al-15Fe з різним вмістом добавок графіту: (1) без добавок; (2) 1 мас. %; (3) 2 мас. %; (4) 3 мас. %



**Рис. 3.** Поверхня тертя сплаву Al-15Fe-C

## 4 Висновки

Було проведено дослідження зміни коефіцієнтів тертя сплаву Al-15Fe-C за різного вмісту графіту. Встановлено, що збільшення вмісту графіту від 1 до 3 мас. % призводить до зниження коефіцієнта тертя від 0,28 до 0,065. Встановлено, що в основі механізму тертя лежить утворення вторинних структур на основі продуктів руйнування інтерметалідів та графіту.

## Список посилань

1. Upadhyaya G. S. Powder Metallurgy: Science, Technology, and Materials / Upadhyaya G.S. Upadhyaya Anish. – Universities Press (India) Pvt. Ltd, 2011. – 536 p.
2. Giovanni Straffelini. Friction and Wear: Methodologies for Design and Control / Giovanni Straffelini. – Springer. – 2015. – 296 p.
3. Teslia S. Microstructural evolution of Al-15Fe alloy produced by mechanical milling and centrifugal atomization [Electronic resource] / Serhii Teslia, Anatoliy Stepanchuk // Intermetallics. – 2022. – Vol. 149. – P. 107671. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2022.107671>

## Дифузійне зварювання в вакуумі мішені для отримання ізотопу $^{22}\text{Na}$

Ю.В. Фальченко <sup>1</sup>[0000-0002-3028-2964], Л.В. Петрушинець <sup>1</sup>[0000-0001-7946-3056]  
В.С. Федорчук <sup>1</sup>[0000-0002-9929-3231], Л.В. Михайлов <sup>2</sup>[0009-0007-1427-6912]  
О.О. Новомлинець <sup>3</sup>[0000-0002-0774-434X]

<sup>1</sup> Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,  
вул. Малевича, 11, Київ, 03150, Україна.

<sup>2</sup> Інститут ядерних досліджень НАН України,  
пр-т Науки, 47, Київ, 03028, Україна

<sup>3</sup>Чернігівській Національний університет «Чернігівська Політехніка»,  
вул. Шевченка, 95, Чернігів, 14035, Україна  
petrushynets@paton.kiev.ua

**Ключові слова:** Дифузійне зварювання, Магнієвий сплав, Алюмінієвий сплав, Мікроструктура, Проміжний прошарок, Зварне з'єднання.

Ізохронний циклотрон У-240 ІЯД НАН України дозволяє здійснювати напрацювання практично усіх циклотронних радіонуклідів:  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{68}\text{Ge}$ ,  $^{82}\text{Sr}$ ,  $^{111}\text{In}$ ,  $^{123}\text{J}$ ,  $^{201}\text{Te}$  та інші. Ізотопи  $^{22}\text{Na}$  широко застосовується в різних галузях науки, сільському господарстві та медицині. Основна складність їх отримання полягає в розробці мішеневих пристроїв, здатних працювати в екстремальних умовах теплових і радіаційних навантажень в обмеженому просторі прискорювальної камери циклотрона, а також витримувати ці навантаження протягом всього періоду опромінення без руйнування. Для напрацювання радіонуклідів  $^{22}\text{Na}$  з ядерної реакції  $^{24}\text{Mg}(p, ^3\text{He})^{22}\text{Na}$  була розроблена конструкція мішені для опромінювання пучком протонів. Мішень складається з опромінюваної протонами смужки магнію, привареної методом дифузійного зварювання у вакуумі (ДЗВ) до корпусу зі сплаву алюмінію, що охолоджується водою. В якості модельної пари були обрані сплави алюмінію  $\text{AlMg}_2$  і магнію  $\text{MgAl}_2$ .

Відомо, що при зварюванні плавленням сплавів алюмінію з магнієвими існує підвищена схильність до утворення пор, мікротріщин і окисних включень в шві та зоні сплавлення, відбувається формування крихких фаз  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  та  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ .

Зварювання в твердій фазі дозволяє ефективніше регулювати процес утворення інтерметалідів. Зокрема, дифузійне зварювання, за рахунок відсутності плавлення основного металу і можливості з'єднувати елементи складної форми без необхідності значної наступної механічної обробки, є найбільш перспективним методом для отримання біметалевих мішеней  $\text{Al-Mg}$ .

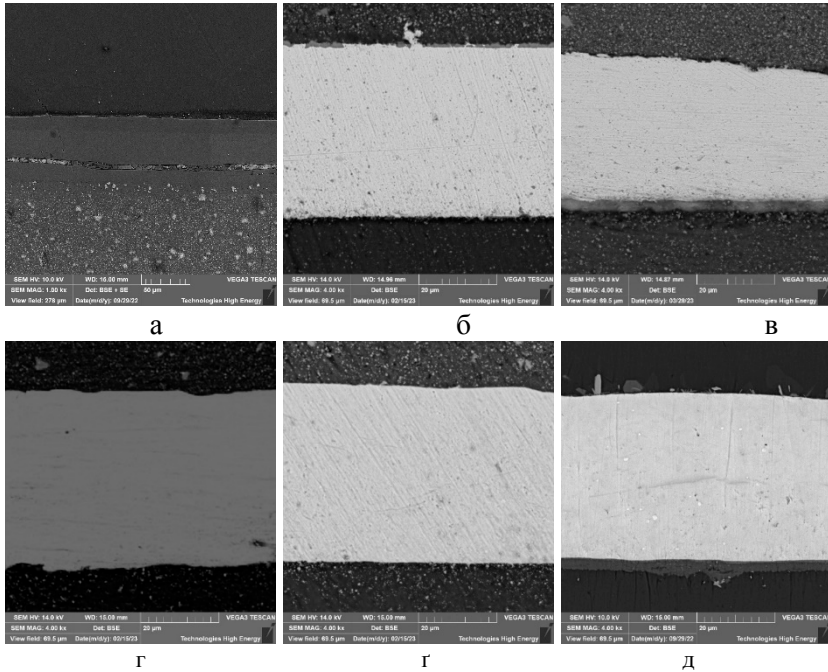
Для запобігання утворення алюмінієво-магнієвих інтерметалідів авторами пропонується використовувати проміжні прошарки з фольги з малолегованих сплавів титану ВТ1-0 і нікелю Н2 товщиною по 30 мкм.

Як показали металографічні дослідження при ДЗВ МА2-1 з АМг2 без проміжних прошарків за температури 400 °С, тиску 10 МПа, тривалості процесу 60 хв. в стику формуються три шари (рис. 1а) загальною товщиною ~ 80 мкм. Перший шар від МА2-1 має товщину 10...15 мкм і переважно складається з суміші фаз  $\gamma + \beta$  ( $Al_{12}Mg_{17} + Al_3Mg_2$ ). Другий шар має товщину 50...55 мкм і за фазовим складом являє собою суміш твердого розчину алюмінію в магнії та інтерметаліду  $Al_{12}Mg_{17}$ . Він має низьку пластичність, в результаті чого по його тілу відбувається розтріскування. Третій шар має товщину 6...10 мкм і також складається з твердого розчину алюмінію в магнії та інтерметаліду  $Al_{12}Mg_{17}$ , проте з меншим вмістом інтерметалідів ніж в другому шарі.

За нижчих температур зварювання взаємодія між контактними поверхнями сплавів не відбувається. В той же час збільшення температури зварювання до значення 420 °С призводить до більш активного утворення в стику інтерметалідної фази, і як наслідок, крихкого руйнування з'єднань.

Зварювання зразків через нікелевий проміжний прошарок проводили в температурному інтервалі 420...480 °С під тиском 10 МПа з витримкою протягом 30 хв. В процесі ДЗВ відбувається незначна взаємодія проміжного прошарку зі сплавами, що зварюються, внаслідок чого товщина зони з'єднання залишається на рівні товщини вихідної фольги з нікелю (рис. 1б, в). В стику між прошарком з нікелю та магнієм утворюється шар інтерметаліду  $Mg_2Ni$ , який при 420 °С носить переривчастий характер і формується у вигляді окремих часток розміром 0,8...2 мкм. Підвищення температури зварювання до 440 °С призводить до формування в стику суцільного шару інтерметаліду товщиною 2...4 мкм. Підвищення температури зварювання до 480 °С призводить до формування між нікелем та магнієвим сплавом шару інтерметаліду товщиною ~ 40...80 мкм, що призводить до руйнування з'єднання.

Зварювання сплавів АМг2 і МА2 через проміжний прошарок з титану проводили на тих же режимах, що і через прошарок з нікелю. Особливості утворення з'єднань подібні до попередніх експериментів. На запропонованих в роботі параметрах ДЗВ взаємодія між матеріалами практично відсутня (рис. 1г, р, д).



**Рис. 22.** Мікроструктура зварного з'єднання MA2-1 + AMg2, отриманого безпосередньо (а), через прошарок з Ni (б, в) і Ti (г, д, е) на режимах: а –  $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 10\text{ МПа}$ ,  $t = 60\text{ хв}$ ; б, г –  $T = 420\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 10\text{ МПа}$ ,  $t = 30\text{ хв}$ ; в, д –  $T = 440\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 10\text{ МПа}$ ,  $t = 30\text{ хв}$ ; е –  $T = 480\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 10\text{ МПа}$ ,  $t = 30\text{ хв}$ .

Механічні випробування на кут згину зварних з'єднань, отриманих без проміжного прошарку, показали, що при вигині металу до значення  $\alpha=180^{\circ}$  вдовж лінії з'єднання спостерігається утворення тріщини. В зразках, отриманих через проміжний прошарок з титану або нікелю тріщини не утворюються.

Дослідження міцності зразків на розтяг показали наступні результати: міцність сплавів магнію та алюмінію після відпалу на температурі зварювання становить відповідно  $\sigma_b=190$  та  $\sigma_b=170\text{ МПа}$ , міцність з'єднань, отриманих через проміжний прошарок зі сплаву VT1-0 або H2, знаходиться в діапазоні  $\sigma_b=130\text{--}142\text{ МПа}$  і становить 77...82% від міцності вихідного алюмінієвого сплаву в стані після відпалу.

Таким чином було показано, що використання при дифузійному зварюванні сплавів MA2-1 з AMg2 через фольги з титану або нікелю дозволяє отримати бездефектні з'єднання з високими механічними властивостями.



## Полірування деталей оптотехніки

Ю.Д. Філатов<sup>1</sup>, А.Ю. Бояринцев<sup>2</sup>, В.І. Сідорко<sup>1</sup>, С.В. Ковальов<sup>1</sup>  
В.А. Ковальов<sup>3</sup>, О.Я. Юрчишин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України,  
вул. Автозаводська, 2, Київ, 04074, Україна

<sup>2</sup> Інститут скінтіляційних матеріалів НАН України,  
пр. Науки, 60, Харків, 61072, Україна

<sup>3</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського,  
пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна  
[urchyshynoks@ukr.net](mailto:urchyshynoks@ukr.net)

**Ключові слова:** полірування, швидкість зняття оброблюваного матеріалу, ферстерівське резонансне перенесення енергії.

### 1 Вступ

Підвищення продуктивності полірування полімерних оптичних деталей можна забезпечити лише за удосконалення технології їх полірування та розробки нових полірувальних дисперсійних систем. Полірування полімерних оптичних деталей, які використовуються як пластмасові скінтілятори з полістиролу, контактні та інтраокулярні лінзи з поліметилметакрилату, лінзи для окулярів з аллідігліколькарбонату, в сучасному оптичному виробництві здійснюється за допомогою полірувальних дисперсійних систем з мікро- та нанопорошків неабразивних неорганічних матеріалів. Продуктивність полірування суттєво залежить від реологічних властивостей дисперсної системи, структури оброблюваного матеріалу, діелектричних та спектроскопічних характеристик оброблюваного матеріалу та дисперсної системи [1, 2]. Метою даного дослідження є вивчення закономірностей впливу фізико-хімічних властивостей оброблюваного матеріалу та полірувальної дисперсної системи на швидкість зняття оброблюваного матеріалу під час полірування.

### 2 Методика досліджень

Дослідження закономірностей полірування плоских поверхонь оптичних деталей діаметром 60 мм здійснювалось на верстаті мод. 2ШП-200М за допомогою притира з пінополіуретану діаметром 100 мм за тиску притискання деталі до притира 17,7 кПа, частоти обертання притира 90 об/хв., зміщення 30 мм та довжини штриха 80 мм, середньої температури в зоні контакту оброблюваної деталі та притира 298 К. Оброблювались оптичні

матеріали: полістирол (ПС, густина  $1,06 \text{ г/см}^3$ , діелектрична проникність 2,5, коефіцієнт теплопровідності  $0,15 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ), поліметилметакрилат (ПММА, густина  $1,18 \text{ г/см}^3$ , діелектрична проникність 3,9, коефіцієнт теплопровідності  $0,19 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ) та поліалілідігліколькарбонат (CR-39, густина  $1,32 \text{ г/см}^3$ , діелектрична проникність 10,0, коефіцієнт теплопровідності  $0,20 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ). Полірування здійснювалось за допомогою полірувальної дисперсної системи з мікро- та нанопорошків (густина  $3,86 \text{ г/см}^3$ , діелектрична проникність 6,05, коефіцієнт теплопровідності  $1,0 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ). Частоти власних коливань молекулярних фрагментів частинок полірувального порошку дисперсної системи, визначені за спектрами ІЧ-поглинання за допомогою Фур'є-спектрометра «Nicolet 6700», склали 597, 733, 777, 850, 873, 943, 984, 1085  $\text{см}^{-1}$ . Досліджувані оптичні матеріали характеризувались частотами власних коливань молекулярних фрагментів, які визначались за відповідними ІЧ-спектрами: ПС – 537, 696, 753, 905, 1027 ( $\text{см}^{-1}$ ), ПММА – 481, 750, 840, 960, 1065 ( $\text{см}^{-1}$ ), CR-39 – 495, 621, 792, 839 ( $\text{см}^{-1}$ ). Середні розміри частинок полірувального порошку визначались за зображеннями, отриманими за допомогою растрового електронного мікроскопу Zeiss-EVO50 з системою мікроаналізу AZtec і склали 409 нм. Зняття оброблюваного матеріалу визначалось ваговим методом за допомогою аналітичних терезів мод. АД-200. Параметри шорсткості полірованих поверхонь визначали за допомогою методу комп'ютерного моделювання та контролювали за допомогою безконтактного інтерференційного 3D профілографа Micron-alpha.

### **3 Результати та обговорення**

В результаті досліджень встановлено, що видалення оброблюваного матеріалу і формування нанопрофілю обробленої поверхні є наслідком видалення з неї наночастинок шламу, яке відбувається в результаті ферстерівського резонансного перенесення енергії (FRET) від частинок дисперсної фази полірувальної дисперсної системи до обробленої поверхні в мікрорезонаторі, що утворюється поверхнями оброблюваного матеріалу і частинки полірувального порошку [3–4]. Система «оброблювана поверхня – дисперсна система – поверхня притира» може бути представлена як квантовий генератор наночастинок, потужність генерації яких залежить від добротності мікрорезонатора і визначає показники полірування [5]. Показано, що під час полірування оптичних поверхонь за допомогою полірувальної дисперсної системи з мікро- та нанопорошків зняття оброблюваного матеріалу відбувається внаслідок багатомодового FRET між енергетичними рівнями частинок полірувального порошку і оброблюваного матеріалу на частотах, для яких спектральне розділення між ними має мінімальні значення. Встановлено, що швидкість зняття оброблюваного

матеріалу лінійно зростає за збільшення добутку результуючої добротності мікрорезонатора, яка для багатомодової системи з дискретним спектром власних частот визначається у відповідності до формули  $q = [\sum(q_i^{-1})]^{-1}$  (де  $m$  – кількість мод,  $q_i$  – добротність мікрорезонатора на частоті  $i$ -ої моди), на сумарний час життя збудженого стану кластерів оброблюваної поверхні на відповідних частотах. Результати визначення швидкості зняття оброблюваного матеріалу наведено в таблиці.

**Таблиця** – Показники полірування деталей оптотехніки

Параметри взаємодії оброблюваної поверхні з дисперсною системою	ПС	ПММА	CR-39
Кількість мод $m$	3	4	1
Добротність мікрорезонатора	7,9	7,6	24,7
Час життя збудженого стану, нс	370	1000	50
Швидкість зняття оброблюваного матеріалу, мкм/год.	5,0	19,2	0,5

Показано, що під час полірування деталей оптотехніки з полістиролу і поліметилметакрилату за допомогою дисперсної системи з мікро- і наночастинок досягається швидкість зняття оброблюваного матеріалу, яка задовольняє вимогам, що висуваються до процесу полірування оптичних поверхонь.

## Список посилань

1. Filatov Yu.D. Polishing of precision surfaces of optoelectronic device elements made of glass, siall, and optical and semiconductor crystals: A review. *J. Superhard Mater.* 2020. Vol. 42, no. 1. P. 30–48.
2. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Kovalev V.A., Effect of the Rheological Properties of a Dispersed System on the Polishing Indicators of Optical Glass and Glass Ceramics. *J. Superhard Materials*, 2021, Vol. 43, no. 1. P. 65–73.
3. Філатов Ю.Д., Сідорко В.І., Бояринцев А.Ю., Ковальов С.В., Ковальов В.А. Енергія перенесення під час взаємодії оптичної поверхні з полірувальною дисперсною системою. *Надтверді матеріали*, 2022, № 2. С. 58–69.
4. Філатов Ю.Д., Сідорко В.І., Бояринцев А.Ю., Ковальов С.В., Кулич В.Г., Ковальов В.А., Юрчишин О.Я. Гаращенко В.В. Перенесення енергії між оброблюваною оптичною поверхнею та дисперсною системою при поліруванні. *Збірник наукових праць «Інструментальне матеріалознавство»*. Вип. 24. – Київ: ІНМ ім. В.М.Бакуля, 2021. – С. 417–424.
5. Філатов Ю.Д., Сідорко В.І., Сохань С.В., Ковальов С.В., Бояринцев А.Ю., Ковальов В.А., Юрчишин О.Я. Шорсткість полірованих поверхонь оптико-електронних елементів із полімерних оптичних матеріалів. *Надтверді матеріали*. – 2023. – № 1. – С. 69–80.

# **Розробка обладнання, інструменту та технології виготовлення біокомпозиційних виробів з відходів меблевого виробництва**

Філюк Назар Олександрович, аспірант;  
Заболотний Олег Васильович, к.т.н., доцент

Луцький національний технічний університет,  
вул. Львівська, 75, Луцьк, 43018, Україна  
[volynasi@gmail.com](mailto:volynasi@gmail.com)

**Ключові слова:** утилізація, подрібнення, пресування, біокомпозит

## **1 Вступ**

Індустріалізація принесла людям зручність у життя, та з іншого боку, промислове виробництво завдає шкоди екологічному середовищу певною мірою та призводить до надмірного споживання енергії. Тому екологічний дизайн став важливим питанням і ми повинні це враховувати у своїй дослідницькій і виробничій повсякденній діяльності. Меблева промисловість не виключення і повинна поєднувати концепцію сталого розвитку з екологічним дизайном, щоб зменшувати витрати матеріальних ресурсів і досягнути гармонійного співіснування людини та природи.

## **2 Виклад основного матеріалу. Результати досліджень**

На сьогодні виробництво плит ДСП та МДФ перевищує 150 млн. м<sup>3</sup>/рік і щороку зростає. Ці матеріали використовують переважно для виготовлення меблів і внутрішніх комплектувальних деталей, але в обох випадках термін експлуатації плит становить близько 15 років. На сьогодні в Україні не налагоджені в достатній мірі процеси утилізації та повторного використання МДФ, ДСП та інших подібних відходів, тому виникає серйозна проблема: утилізації постійно зростаючих обсягів відходів.

Часта заміна та прискорене оновлення меблів спричиняють збільшення появи старих меблів на сміттєзвалищах. Це потребує все більше місця для захоронення подібних відходів. Ще один варіант утилізації ДСП, МДФ та подібних відходів – це спалювання. Проте процес спалювання сприяє глобальному потеплінню, генеруючи вуглекислий газ та інші шкідливі речовини. Процедури поховання та спалювання завдають значної шкоди навколишньому середовищу і застосовуються лише в крайніх випадках. Тому, на нашу думку, основним завданням нашого дослідження є розробка інноваційних процесів утилізації відходів меблевого виробництва шляхом розробки і запровадження нового обладнання, інструменту та інноваційних

технологій переробки, які забезпечать їх повторне використання шляхом виготовлення нових біокомпозиційних матеріалів та екобезпечних виробів.

На сьогодні проблема переробки та створення нових екобезпечних продуктів з відходів плит ДСП, МДФ та подібних матеріалів все більше турбує світове суспільство. Технологічний процес утилізації подібних матеріалів в основному здійснюють у декількох варіантах: 1) спалювання в спеціальних печах; 2) поховання у спеціально відведеному місці; 3) вторинна переробка. Розробка цієї теми покликана вирішити дві основні проблеми:

1. Здешевити продукцію завдяки переробці відходів і повторному використанню матеріалів. 2. Покращити екологічну ситуацію шляхом зменшення викидів від спалювання та захоронення відходів.

У нашому дослідженні ми проаналізуємо основні сучасні методи переробки подібних матеріалів та відзначимо досягнення в цьому напрямку. У статті [1] авторами було досліджено та проаналізовано можливість переробки відходів меблів на всіх етапах проєктування, виробництва, продажу, використання та переробки, а також запропоновано відповідні пропозиції підприємствам і споживачам. Зокрема, було створено систему індексів оцінки та модель оцінки можливості повторної переробки меблів, що дасть певні посилання не лише для досягнення розумної переробки та утилізації використаних меблів, але й для вирішення проблеми переробки меблів на різних рівнях.

Компанія MDF Recovery Ltd розробила інноваційний та ефективний процес відновлення деревного волокна з відходів МДФ [2]. У процесі збираються відходи МДФ і за допомогою технології електричного нагрівання ефективно відокремлюються волокна від смоли. Незалежні дослідження підтвердили, що відновлені волокна мають таку ж високу якість, що й волокна первинної деревини, та підходять для повторної інтеграції у процес виробництва МДФ і в якості сировини для виробників ізоляційних продуктів, продуктів для заміни торфу та формованих пакувальних матеріалів.

В статті [3] вивчено вплив багаторазової механічної переробки деревостружкових плит на вибрані ними механічні та фізичні властивості і розроблено підхід до переробки сировини з ДСП в повністю контрольованих умовах. Дослідження показало, що створення нових плит ДСП з попередньо подрібнених плит призводить до неприпустимого зниження їх властивостей.

Окремі компанії переробляють пил з МДФ на паливо для котлів [4]. Але такий продукт після згорання викидає в атмосферу значну кількість шкідливих речовин таких як оксиди сірки, діоксини та поліхлоровані біфеніли, оксиди азоту, а також чадний газ. На сьогодні в Україні не налагоджене повторне використання МДФ, ДСП та подібних відходів, тому постає питання: що робити із значними обсягами плит, які віджили своє? Огляд літератури показує недостатньо досліджень, які стосуються переробки плит ДСП. Це вказує, що в цій темі є достатньо великий потенціал.

Переробка плит ДСП та МДФ – не просте завдання. Ці матеріали мають у своєму складі значну кількість недеревної сировини (ABS пластики, формальдегідні смоли та ін.). Механічне подрібнення повинне бути контрольоване, щоб в кінцевому результаті подрібнення отримати частинки потрібних нам розмірів. Потрібно створити алгоритм дій для такого подрібнення. Існують окремі проекти які роблять спробу переробки подібних відходів та виготовлення на їх основі нових інноваційних матеріалів [5], проте отримані результати та матеріали поки не отримали широкої підтримки і впровадження на промисловому рівні.

Провівши аналіз існуючих методів, технологій, обладнання та інструментів ми будемо акцентувати свою увагу на переробці відходів меблевого виробництва та виготовленні екобезпечних біокомпозиційних виробів їх на основі. Окрема увагу приділяємо процесам моделювання та проєктування процесів подрібнення різних видів відходів меблевого виробництва. Окремий розділ присвячуємо дослідженню, проєктуванню та розрахунку обладнання та оснастки для пресування екобезпечних біокомпозиційних матеріалів та розробці технології виготовлення виробів з на основі різних видів подрібнених відходів меблевого виробництва.

### **3 Висновки**

Таким чином розробка нових альтернативних підходів до утилізації відходів МДФ, ДСП та подібних побутових відходів меблевої промисловості – це проєкт, який покликаний вирішити проблему переробки відходів та налагодження їх повторного використання шляхом розробки і виготовлення на їх основі нових інноваційних матеріалів та екобезпечних виробів для різних галузей промисловості.

### **Список посилань**

1. Zhang, Z.; Zhu, J.; Qi, Q. Research on the Recyclable Design of Wooden Furniture Based on the Recyclability Evaluation. *Sustainability*, 15, 16758 (2023). <https://doi.org/10.3390/su152416758>
2. Матеріали сайту британської компанії MDF Recovery Ltd <https://www.mdfrecovery.co.uk/>
3. Wronka, A.; Kowaluk, G. The Influence of Multiple Mechanical Recycling of Particleboards on Their Selected Mechanical and Physical Properties. *Materials*, 15, 8487 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15238487>
4. Матеріали статті From by-product to fuel. <https://cfnielsen.com/from-by-product-to-fuel/>
5. Матеріали проєкту Developing innovative method for recycling used chip board furniture and plastics by producing new environment friendly reusable multipurpose composite material. <https://cordis.europa.eu/project/id/262337>

## **Відновлення деталей машин з використанням анаеробних матеріалів**

Хітров Ігор<sup>1</sup>, к.т.н., доцент  
Кононогов Юрій<sup>2</sup>, провідний інженер

<sup>1</sup> Національний університет водного господарства та природокористування,  
вул. Соборна, 11, Рівне, 33028, Україна

<sup>2</sup> Національний науковий центр  
«Інститут механізації та електрифікації сільського господарства»,  
вул. Вокзальна, 11, смт. Глеваха, Київська обл, 08631, Україна  
i.o.khitrov@nuwm.edu.ua

**Ключові слова:** машина, деталь, відновлення, полімерний матеріал.

Тривалий час на виготовлення та відновлення деталей застосовувалися переважно метали. З розвитком науки і техніки знайшли застосування нові неметалічні матеріали на основі полімерів, які дозволяють відновлювати широку номенклатуру деталей з різними дефектами, що визначає їх універсальність в порівнянні з іншими ремонтними матеріалами.

Середнє значення зношення для більшості деталей не перевищує 0,3 мм [1]. Традиційні способи відновлення деталей (наплавлення, хромування, залізнення та ін.) себе не виправдали, оскільки потребують складного технологічного обладнання та значних економічних затрат. Тому перспективою є застосування сучасних полімерних матеріалів [2].

Останнім часом широкого застосування набули анаеробні матеріали (герметики). Вони можуть тривалий час знаходитися на повітрі в рідкому стані і швидко полімеризуватися при введенні в зазор з'єднання. Твердіння відбувається за кімнатної температури 20°C протягом 6-8 годин (використання спеціальних активаторів дозволяє зменшити час полімеризації до 3-4 годин). Він не чутливий до дії води, розчинників, паливо-мастильних матеріалів [3, 4].

Застосування анаеробного герметика забезпечує: можливість з'єднання деталей з різнорідних матеріалів; відсутність внутрішніх напружень, впливу на структурний стан і зміну властивостей з'єднувальних матеріалів; міцність і герметичність з'єднань; простоту технологічного процесу; невисоку трудомісткість і вартість робіт; можливість використання в польових мовах.

Усунення дефекту самовідкручування болтів, гайок, шпильок відбувається шляхом нанесення анаеробного герметика на 3-4 нитки різьби на одну зі поверхонь з подальшим закручуванням. При цьому крутний момент відкручування значно збільшується (до 50 % і більше) порівняно з моментом затяжки [4].

Для герметизації фланцевих роз'ємів корпусних деталей застосовуються герметизуючі анаеробні рідкі прокладки. Заміна традиційних прокладок на рідкі дозволяє знизити витрати на 30 %.

Найбільш розповсюджений дефект корпусних деталей – зношення посадочних місць під підшипники ковзання та кочення. Технологія збирання з використанням анаеробного матеріалу полягає в наступному. Вимірюють граничні відхилення розмірів посадочних отворів під підшипники. Виходячи з умов міцності і в'язкості, підбирають анаеробний матеріал, яким у рідкому виді заповнюють зазор [5].

Не зважаючи на різний характер дефектів деталей, які усуваються анаеробними герметиками, технологічний процес відновлення включає підготовку деталі, нанесення анаеробного матеріалу, твердіння анаеробного матеріалу, обробку деталі.

Наноситься анаеробний герметик на відновлювану поверхню за допомогою кісточки, шприцем-нагнітачем або зануренням.

Таким чином, застосування анаеробних герметиків відкриває нові можливості в технології відновлення деталей. Метод анаеробного пресування базується на переході «рідина (полімер) - покриття виробу», обходячи складні технологічні процеси нанесення та обробки деталей.

## **Список посилань**

1. Хітров І. О., Гавриш В. С. Ремонт машин і обладнання. Рівне : НУВГП, 2011. 184 с.
2. Види автомобільних герметиків та застосування. Китаєс : веб-сайт. URL: <https://kitaes.ua/ua/articles/vyd-avtomobyln-kh-germetykov-y-prymenenyje/>
3. Ружи́ло З. В., Мельник В. І., Новицький А. В., Ревенко Ю. І., Бистрий О. М., Попик П. С., Мельник В.І. Надійність машин та обладнання. Ч. 2. Ремонтування машин та відновлення деталей: навч. пос. Київ : НУБіП України, 2023. 309 с.
4. Анаеробні клеї. Henkel : веб-сайт. URL : <https://www.henkel-adhesives.com/ua/uk/продукти/промислові-клеї/анаеробні-клеї.html>.
5. Технологічне забезпечення якості відновлення посадочних отворів корпусних деталей : монографія / Хітров І. О., Гавриш В. С., Кононогов Ю. А., Фастовець П. М. Рівне: НУВГП, 2013. 128 с.



## **Оцінка критеріїв працездатності шпиндельних вузлів верстатів з опорами кочення**

Четвержук Т.І., к.т.н., доц.; Полінкевич Р.М., к.т.н., доц.  
Демчук А.В., аспірант

Луцький національний технічний університет,  
вул. Львівська, 75, Луцьк, 43018, Україна  
[t.chetverzhuk@lutsk-ntu.com.ua](mailto:t.chetverzhuk@lutsk-ntu.com.ua)

**Ключова слова:** шпиндельний вузол, опора кочення, металорізальний верстат, динамічні характеристики, жорсткість.

### **1 Вступ**

Поява нових інструментальних матеріалів відкрила широкі можливості для підвищення швидкостей різання на металорізальних верстатах, що в свою чергу дало необхідність різкого підвищення частот обертання шпинделів. В теперішній час на високошвидкісних верстатах обробляють деталі з чавуна і сталі з швидкостями різання  $1500...25000 \text{ м}\cdot\text{хв}^{-1}$ , алюмінію  $3000...4700 \text{ м}\cdot\text{хв}^{-1}$ , пластиків  $3000...10000 \text{ м}\cdot\text{хв}^{-1}$  [1].

Високошвидкісні фрезерні верстати зазвичай використовуються при обробці алюмінію і легких сплавів, при цьому знижуються сили різання, забезпечується мала шорсткість, безвібраційне різання, підвищується стійкість інструменту, зменшується нагрівання деталі в зв'язку з винесенням тепла стружкою. Токарні верстати для високошвидкісної обробки розповсюдженні менше. В теперішній час вони працюють переважно з частотою обертання шпинделя до  $10000 \text{ хв}^{-1}$ . Для роботи з такими швидкостями створюють спеціальні шпиндельні вузли (ШВ), частота обертання яких досягає  $100000 \text{ хв}^{-1}$ . Підвищення швидкохідності ШВ супроводжується збільшенням його потужності [2].

Крім вимог забезпечення заданої потужності у поєднанні з високою швидкохідністю, до сучасних ШВ є вимоги підвищеної жорсткості, високої точності обертання, малого нагріву, малих втрат на тертя, забезпечення заданого ресурсу роботи.

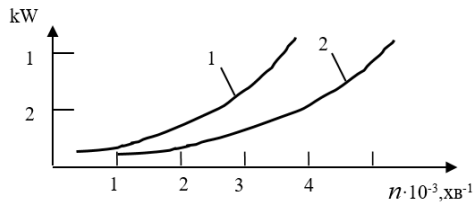
### **2 Виклад основного матеріалу. Результати досліджень**

Критеріями працездатності ШВ, по яким виконуються необхідні для правильного вибору вузла розрахунки, слугують наступні показники: швидкохідність; навантажувальна здатність; статична жорсткість (осьова і радіальна); динамічні характеристики; енергетичні витрати; нагрівання опор і заміна умов їх роботи при нагріванні. Для ШВ на опорах кочення, крім перерахованих показників, критерієм працездатності є ресурс підшипників.

Найбільше поширення отримали ШВ з опорами кочення, як найбільш економічні і надійні, які вимагають меншого догляду. По власній несучій здатності і жорсткості вони в цілому мають переваги над опорами інших типів, однак точність обертання в зв'язку з більш суттєвим впливом похибок виготовлення в них, як правило, нижче.

Показником швидкохідності підшипників є добуток  $dn$ , де  $d$  – внутрішній діаметр підшипника, мм;  $n$  – частота обертання,  $\text{хв}^{-1}$ . Іноді замість  $d$  використовують показник  $d_m$  ( $d_m$  – середній діаметр підшипника).

Використання радіально-упорних кулькових підшипників з тілами кочення менших діаметрів і більш тонкими кільцями дало змогу підвищити швидкохідність при діаметрах до 2 разів, а при рівних зовнішніх діаметрах збільшити жорсткість до 60...70%. Удосконалюються також вид і спосіб мастила підшипників кочення, рекомендується змащувати мінімальною кількістю мастила, використання імпульсної подачі і вприскування мастила.



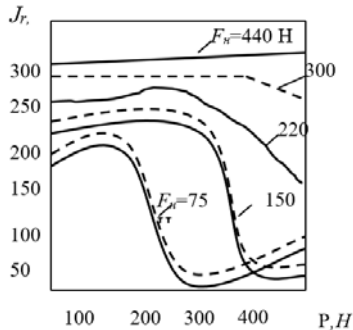
**Рис. 1.** Залежність затрат потужності холостого ходу kW гідростатичних опор (1) і опор кочення (2) діаметром 100 мм від частоти обертання.

В ШВ з діаметром передньої шийки шпинделя 100 мм при частоті обертання  $4000 \text{ хв}^{-1}$  за даними фірми FAG [2], потужність тертя холостого ходу у вузлах з опорами кочення складає 0,7 кВт, гідростатичними – 3,5 кВт (рисунок 1). При частоті обертання  $30000 \text{ хв}^{-1}$  втрати в гідростатичних опорах в 3...4 рази вищі ніж в опорах кочення.

Статична жорсткість ШВ – одна з найбільш важливих його характеристик, оскільки визначає величину пружних деформацій шпинделя при різанні. Статична жорсткість ШВ залежить від типу опор і конструктивних розмірів шпинделя. Баланс пружних деформацій на передньому торці шпинделів на опорах кочення в токарних верстатах наступний: деформації передньої опори складають 40...50%, задньої – 2...3%, деформації консольної ділянки шпинделя – 15...20%, міжопорної відстані – 30...40% [3].

Жорсткість опор кочення залежить від типу підшипника. Радіальна жорсткість опор з дворядним роликотпідшипником вища, ніж з двома радіально-упорними кульковими підшипниками в 2...3 рази [4]. Осьова жорсткість кулькових підшипників (в умовних одиницях) при рівних діаметрах, в основному визначається величиною попереднього натягу і кутом контакту. На рисунку 2 приведені залежності жорсткості радіально-

упорного кулькового підшипника від співвідношень зовнішнього навантаження (реакції опори) і сили попереднього натягу.



**Рис. 2.** Залежності радіальної жорсткості  $j_r$  радіально-упорних підшипників 36100 ( ) і (-----) з кутом контакту  $15^\circ$  від зовнішнього навантаження  $P$  і сили попереднього натягу  $F_n$ .

Крива для  $F_n=440$  Н характерна для випадку, коли в роботі беруть участь всі тіла кочення, зниження кривих пояснюється поступовим виходом з роботи все більшого числа тіл кочення в зв'язку з ростом зовнішнього навантаження [5].

На основі методик оцінки працездатності шпиндельних вузлів верстатів з опорами кочення ми розробили програмне забезпечення для розрахунку жорсткості ШВ на основі методу кінцевих елементів, що дозволяє врахувати конструктивні особливості, як шпинделів, так і їхніх опор, і є реальним при проектуванні для порівняльної оцінки жорсткості різних конструктивних варіантів.

## Список посилань

1. Joshi, Prakash Hiralal. 2007. Machine Tools Handbook: Design and Operation. 1st ed. New York: McGraw Hill Education (India) Private Limited.
2. Верстатне обладнання: навч. посіб. / Я. Бурек, І.В. Гурей, З.А. Стоцько; М-во освіти і науки України, Нац. ун-т «Львів. політехніка». – Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2014. – 168 с.: – Бібліогр.: с. 162 (10 назв). – ISBN 978-617-607-639-1
3. Гордеев О.Ф., Четвержук Т.І. (2014). Безрозбірна діагностика стиків металорізальних верстатів на основі самоподібності деформацій. Прогресивні технології і системи машинобудування, (1), 99-105.
4. Четвержук Т.І., Полінкевич Р.М., Редько Р.Г., Залета О.М., Скларов Р.А. (2021). Статистичне моделювання технічних характеристик металорізальних верстатів. Наукові нотатки, (71), 322-329.
5. Четвержук Т.І., Редько Р.Г., Полінкевич Р.М., Залета О.М., Валецький Б.П. (2022). Проблеми та задачі проектування та розрахунку несучих частин металорізальних верстатів з урахуванням навантажень. Наукові нотатки, (73), 101-104.

## Особливості $\alpha \rightarrow \gamma$ перекристалізації феритних сплавів заліза при науглецюванні

Чорноіваненко Катерина <sup>[0000-0003-1613-7784]</sup>

Український державний університет науки і технологій,  
вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010, Україна  
ekatmovchan@gmail.com

**Ключові слова:** фронт, перекристалізація, науглецювання, стаціонарний процес.

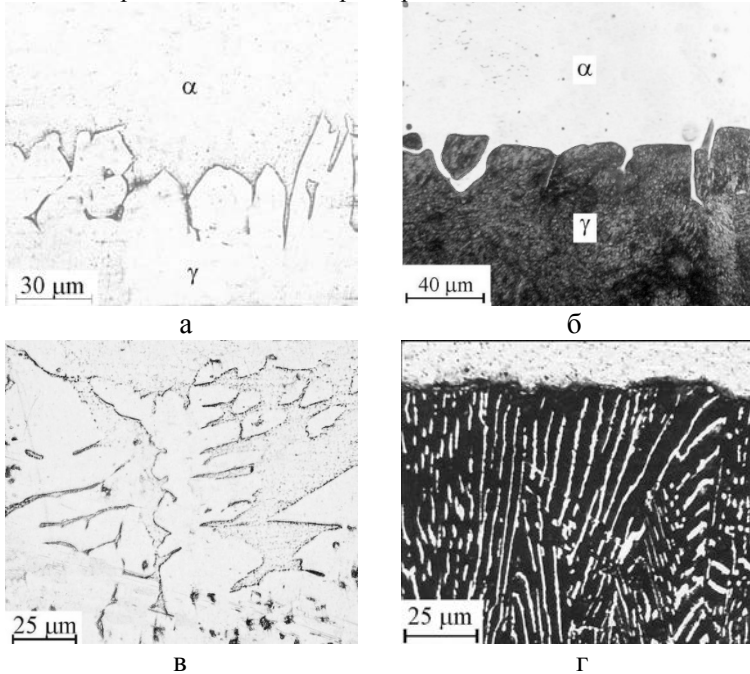
Дослідження дифузійних перетворень у багатофазних багатокомпонентних сплавах представляє інтерес для вивчення [1]. Однією із сфер інтересів є морфологія інтерфейсу між дифузійними шарами.

У роботі [2] проаналізовано теоретичні відомості про морфологічну стійкість фронту перетворення під час фазових реакцій. Розглянуто теорію концентраційного переохолодження, основою якої є дифузійний перерозподіл компонентів сплаву в розплаві поблизу границі кристалізації. Авторами [3...6] встановлено, що комірчаста структура міжфазної границі виникає у випадку, коли міжфазна поверхня стає нестійкою до хвильових збурень. Також встановлено, що трансформація фронту перетворення здійснюється під дією градієнтів концентрації.

На сьогоднішній день опубліковано багато робіт, пов'язаних з фазовими та структурними перетвореннями феритних сплавів Fe-Mn під час науглецювання [7...11]. Деякі з цих робіт [10, 11] показують, що за певних умов процесу науглецювання плоский фронт поліморфного перетворення  $\alpha \rightarrow \gamma$  стає нестійким. Він трансформується спочатку в комірковий (рис. 1 а, б), а потім у дендритний (рис. 1в). Стійкість плоского фронту аналізували за допомогою відомого методу збурень Mullins & Sekerka [3]. Результати в цілому відповідають результатам, отриманим при дослідженні кристалізації різних сплавів. Найбільш істотними факторами, що впливають на стійкість плоского фронту, є швидкість його просування, концентрація (мольна частка)  $\alpha$ -стабілізатора, а також різниця між рівноважними концентраціями компонентів у фериті та аустеніті [11].

Науглецювання сплавів заліза карбідоутворюючим  $\alpha$ -стабілізатором дає змогу отримувати матеріали з in situ структурою композиту в поверхневому шарі. Композит являє собою аустенітну (мартенситну) матрицю, армовану волокнами або пластинами спеціальних карбідів (рис. 1г). Пластини або волокна орієнтовані вздовж потоку вуглецю. Така структура поверхневого шару відповідає особливому комплексу експлуатаційних властивостей, зокрема, високій зносостійкості. Порушення односпрямованості армуючої

карбідної фази за рахунок розвитку комірчастої структури призводить до зниження або втрати необхідних характеристик.



**Рис. 1.** Структура фронту перекристалізації сплаву Fe-25Cr-0,027%Si при науглецюванні

Проведено аналіз і на підставі його побудована математична модель однофазного коміркового зростання шару  $\gamma$ -фази при ізотермічній  $\alpha \rightarrow \gamma$  перекристалізації феритного сплаву заліза при науглецюванні. Встановлено, що основним фактором, що визначає кінетику  $\alpha \rightarrow \gamma$  перекристалізації при науглецюванні, є дифузійна доставка вуглецю через  $\gamma$ -фазу до міжфазної поверхні.

Детальне вивчення мікроструктури фронту трансформації показує, що комірочки фронту перетворення мають виражене кристалічне огранювання при твердофазній рекристалізації. Зростаюча  $\gamma$ -фаза має ГЦК-гратку з набором щільно упакованих площин типу  $\{111\}$ , які мають мінімальну поверхневу енергію. Морфологія клітин залежить від кристалографічного напрямку росту  $\gamma$ -фази. Зазвичай це одне з простих напрямків, що збігається з осьюовою структурою науглецьованого шару.

З одного зерна  $\alpha$ -фази можуть вирости два або більше стовпчастих кристалів  $\gamma$ -фази. Зростання граничної площини відбувається з

максимальною швидкістю, якщо  $\{111\}\gamma$  і  $\{110\}\alpha$  взаємно орієнтовані за одним із варіантів орієнтаційного співвідношення Курдюмова–Закса.

Отриману модель можна використовувати як базову модель для дослідження специфіки росту *in situ* аустенітно-карбідного композиту.

## Список посилань

1. Sisson R.D., Dayananda J.R., Dayananda M.A. Diffusion structures in multiphase Cu-Ni-Zn couples // *Metal. Trans.*, 1972. Vol. 3. P. 647-652. <https://doi.org/10.1007/BF02642746>
2. Movchan O.V., Chornoivanenko K.O. The Analysis of Morphological Stability of a Recrystallization Front // *Prog. Phys. Met.*, 2018. Vol. 19, No. 2. P. 185-194. <https://doi.org/10.15407/ufm.19.02.185>
3. Mullins W.W., Sekerka R.F. Stability of a Planar Interface During Solidification of a Dilute Binary Alloy // *J. Appl. Phys.*, 1964. Vol. 35: 444-451. <https://doi.org/10.1063/1.1713333>
4. Sekerka R.F. A Stability Function for Explicit Evaluation of the Mullins Interface Stability Criterion // *J. Appl. Phys.*, 1965. Vol. 36. P. 264-268. <https://doi.org/10.1063/1.1713887> -Sekerka
5. Coriell S.R., McFadden G.B., Sekerka R.F. Cellular Growth During Directional Solidification // *Ann. Rev. Mater. Sci.*, 1985. Vol. 15. P. 119-145. <https://doi.org/10.1146/annurev.ms.15.080185.001003>
6. Davis S.H. *Theory of Solidification* // Cambridge: Cambridge University Press, 2001. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511546747>
7. Бунин К.П., Мовчан В.И., Педан Л.Г. Структурообразование при изотермическом науглероживании железных сплавов легированных молибденом и вольфрамом // *Изв. АН СССР. Металлы*, 1975. № 8. С. 164-168.
8. Мовчан В.И., Педан Л.Г., Иванца В.И. Формирование направленных аустенито-карбидных структур при науглероживании сложнолегированных сталей // *МиТОМ*, 1990. №8. с. 12-14.
9. Movchan O. V., Chornoivanenko K.O. Phase and Structural Transformations of High-Carbon Alloy of the Fe–V–C System During Chemical-Thermal Processing and Deformation // *Metallophysics and Advanced Technologies*, 2019. vol. 41. No. 2. pp. 251–261.
10. Бунин К.П., Мовчан В.И., Никифорова В.В. Исследование перекристаллизации при диффузионном изменении содержания углерода в железных сплавах // *Изв. ВУЗов. Черная металлургия*, 1977. №2. С. 106-109.
11. O.V. Movchan and K.O. Chornoivanenko, Analysis of the Stability of  $\alpha \rightarrow \gamma$  Plane Front of Recrystallization in Ferritic Alloys During Carburization // *Metallophysics and Advanced Technologies*, 2019. Vol. 41, No.1. P. 13-25. <https://doi.org/10.15407/mfint.41.01.0013>

# Методи дослідження та забезпечення працездатності підшипників кочення

Шимчук Сергій Петрович<sup>1</sup>, к.т.н., доцент  
Костюнік Руслан Євгенович<sup>2</sup>, к.т.н., с.н.с.  
Мартинюк Віктор Леонідович<sup>1</sup>, к.т.н., доцент  
Перій Олександр Володимирович<sup>1</sup>, магістрант

<sup>1</sup> Луцький національний технічний університет,  
вул. Львівська, 75, Луцьк, 43018, Україна

<sup>2</sup> Національний авіаційний університет,  
п-т Любомира Гузара 1, Київ, 03058, Україна  
[s.shimchuk@lntu.edu.ua](mailto:s.shimchuk@lntu.edu.ua)

**Ключові слова:** підшипники кочення, контактуюча пара, методи дослідження

## 1 Вступ

Підшипники кочення є складовими елементами багатьох складних вузлів та механізмів сучасних машин, слугують опорами й передають рух завдяки використанню тертя кочення [1]. Вони бувають різної точності, містять відповідні конструктивні особливості, проте усі такі підшипники складаються з зовнішнього та внутрішнього кілець, тіл кочення (які можуть мати різну геометричну форму) та сепаратора. Доріжки кочення зовнішнього та внутрішнього кілець та тіла кочення складають, так звану, контактуючу пару, яка традиційно виготовляється з шарикопідшипникових сталей та піддається необхідній термообробці, для забезпечення потрібної зносостійкості та інших експлуатаційних властивостей.

В складному технологічному процесі виготовлення підшипників кочення та при інтенсивній їх експлуатації у вузлах сучасної техніки (особливо авіакосмічної), важливе місце займають діагностика й контроль, що передбачає використання відповідних методів забезпечення працездатності таких підшипників.

## 2 Літературний огляд

На сьогодні існує багато методів дослідження, забезпечення та оцінювання працездатності підшипників кочення. В даній роботі буде розглянуто методи вхідного контролю, методи дослідження нових та таких, що піддавались експлуатаційним навантаженням різного роду підшипників кочення, методи очищення підшипників від різного роду забруднень [2 – 4].

### **3 Викладення основного матеріалу роботи**

Методи дослідження та забезпечення працездатності підшипників кочення можна поділити на:

- методи вхідного контролю, що передбачають оцінювання геометричних розмірів, рівень шумів і вібрацій при їх виготовленні;
- магнітотурбулентні методи очищення підшипників кочення, що використовуються як для підшипників, що були в експлуатації так і як фінішні операції очищення нових підшипників. Вони побудовані на особливій взаємодії імпульсного магнітного поля та турбулентного потоку рідини, в якій відбувається очищення підшипників від різного роду забруднень (в першу чергу металічної природи) [2 – 3]. Такі методи можна використовувати як методи очищення так і методи діагностики;
- ультразвукові методи очищення, що базуються на використанні можливостей ультразвуку для забезпечення ефективного очищення підшипників кочення від різного роду забруднень [4].

Методи вхідного контролю передбачають використання універсального вимірювального інструменту (штангенциркулі) та спеціального інструменту й обладнання (електромагнітних, акустичних та лазерних пристроїв).

Імпульсні магнітно-турбулентні методи очищення кулькових та роликових підшипників кочення, започатковані в лабораторії Нанотриботехнологій НАУ під керівництвом д.т.н. О.У. Стельмаха, набувають все нового подальшого розвитку [2 – 3] з використанням відповідного діагностичного обладнання та стендів для безпосереднього очищення різного роду підшипників. Метод та відповідне обладнання інтегровані у виробничий процес на підприємствах АТ «Мотор Січ», ТОВ «ЛРЗ» Мотор», ДП «Івченко-Прогрес».

Ультразвукові методи очищення – це найбільш поширені методи очищення підшипників кочення, які використовуються, як основні у багатьох галузях промисловості та машинобудування. Вони призначені для розм'якшення та видалення з поверхонь контактуючої пари різного роду забруднень: елементів окислів, закоксованих мастил та забруднень металічної природи.

### **Список посилань**

1. Павлище В.Т. Підшипники кочення: основні параметри конструкції опор змащування, ущільнення та розрахунку ресурсу. Довідник / В.Т. Павлище. – 2 вид. доп. – Львів, 2001. – 145 с.
2. Аксьонов О.Ф., Костюнік Р.Є., Кушев О.В. Підвищення функціональної якості підшипників кочення шляхом електромагнітного очищення.//Проблеми тертя та зношування: Науково-технічний збірник. – К.: НАУ 2008. – Вип.49. – Т. 1. С.9 – 13.
3. С.П. Шимчук, П.П. Савчук, О.П. Герасимчук, О.В. Кушев. Фізико-математичне дослідження магнітно-турбулентного методу очищення підшипників кочення //



Міжвузівський збірник «Наукові нотатки» –Випуск №55. –Луцьк, 2016 – С. 432-436.

4. Ультразвуковая мойка, очистка и обеззараживание металлических и пластмассовых деталей. /Тематич. Подборка/. Рига, - 1971. – 26 с.

**Для нотаток**

**Для нотаток**

**Для нотаток**

Наукове видання

## **Матеріали та технології в інженерії (МТІ-2024)**

Інженерія, матеріали, технології, транспорт:  
Збірник наукових доповідей міжнародної конференції,  
Луцьк, Україна, 14–16 травня 2024 р.

## **Materials and Technologies in Engineering (MTE-2024)**

Engineering, Materials, Technologies, Transport:  
Collection of Scientific Reports of the International  
Conference, Lutsk, Ukraine, May 14–16, 2024

*Друкується в авторській редакції*

Формат 60x84 1/16. Обсяг 17,44 ум. друк. арк., 17,01 обл.-вид. арк.  
Наклад 300 пр. Зам. 68. Видавець і виготовлювач – Вежа-Друк  
(м. Луцьк, вул. Шопена, 12, тел. 066 936 25 49).  
Свідоцтво Держ. комітету телебачення та радіомовлення України  
ДК № 4607 від 30.08.2013 р.



LUTSK  
NATIONAL  
TECHNICAL  
UNIVERSITY



Encouraging the growth of creative industries



ISBN 978-966-940-566-1



[mte.lntu.edu.ua](http://mte.lntu.edu.ua)