

Міністерство освіти і науки України;  
ДНУ «Інститут модернізації змісту освіти» (Україна);  
Національна академія наук вищої освіти України;  
Донбаська державна машинобудівна академія (Україна);  
Вінницький національний технічний університет (Україна);  
Engineering Academy of Serbia (IAS), Belgrade (Serbia);  
Apeiron University in Banja Luka, (Bosnia and Herzegovina);  
Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod JJ Strossmayer University of Osijek  
(Croatia);

University of Montenegro Faculty of Mechanical Engineering (Montenegro);  
Zhejiang Normal University, College of Engineering,  
Key Laboratory of Urban Rail Transit Intelligent Operation and Maintenance Technology &  
Equipment of Zhejiang Province, Jinhua, (China);

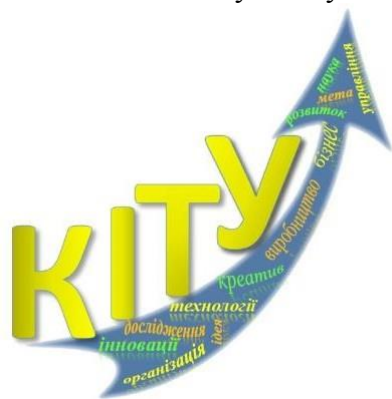
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя (Україна);

Вінницький національний аграрний університет (Україна);;

Кафедра «Інноваційних технологій і управління» ДДМА (Україна);

Студентське наукове товариство з технологій машинобудування ДДМА (Україна);

Мала академія наук з науково-промислового профілю ДДМА (Україна).



## **МОЛОДА НАУКА - РОБОТИЗАЦІЯ І НАНО- ТЕХНОЛОГІЇ СУЧАСНОГО МАШИНОБУДУВАННЯ**

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ**

міжнародної молодіжної науково-технічної конференції  
10-12 квітня 2024 р.

За загальною редакцією  
д-ра техн. наук, проф. С. В. Ковалевського and  
Hon.D.Sc., Prof. Predrag Dašić

Краматорськ – Вінниця – Тернопіль, 2024

Ministry of Education and Science of Ukraine;  
Institute of Education Content Modernization (Ukraine);  
National Academy of Higher Education of Ukraine;  
Donbass State Engineering Academy (Ukraine);  
Vinnytsia National Technical University (Ukraine);  
Engineering Academy of Serbia (IAS), Belgrade (Serbia);  
Apeiron University in Banja Luka, (Bosnia and Herzegovina);  
Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod, JJ Strossmayer University of Osijek  
(Croatia);  
University of Montenegro Faculty of Mechanical Engineering (Montenegro);  
Zhejiang Normal University, College of Engineering,  
Key Laboratory of Urban Rail Transit Intelligent Operation and Maintenance Technology &  
Equipment of Zhejiang Province, Jinhua, (China);  
Ternopil National Technical University named after Ivan Puluy (Ukraine);  
Vinnytsia National Agrarian University (Ukraine);  
Department of Innovative Technologies and Management DSEA(Ukraine);  
Student Society Technology Engineering DSEA(Ukraine);  
Small Academy of Sciences for Scientific and Industrial Profile (Ukraine).



## **YOUNG SCIENCE - ROBOTICS AND NANO- TECHNOLOGY OF MODERN MECHANICAL ENGINEERING**

**COLLECTION OF SCIENTIFIC PAPERS**  
International Youth Scientific and Technical Conference  
April 10-12, 2024

According to the general edition  
Doctor of Technical Sciences, Prof. Sergiy Kovalevskyy and  
Hon.D.Sc., Prof. Predrag Dašić

Kramatorsk - Vinnytsia - Ternopil, 2024

УДК 62:007:[681.5:621.7](075.8)

М 75

**Рецензенти:**

Колосов Д.Л. - докт. техн. наук, професор, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»;

Новіков Ф.В. - докт. техн. наук, професор, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця;

Затверджено на засіданні вченої ради ДДМА (протокол № 8 від 28.03.2024 р.)

М 75 Молода наука - роботизація і нано-технології сучасного машинобудування: збірник наукових праць Міжнародної молодіжної науково-технічної конференції, 10-12 квітня 2024 р. / за заг. ред. С. В. Ковалевського, д-ра техн. наук., проф., and Hon.D.Sc., Prof. Predrag Dašić – Краматорськ : ДДМА, 2024. – 324 с.

Young science - robotics and nano-technologies of modern mechanical engineering: a collection of scientific papers of the International Youth Scientific and Technical Conference, April 10-12, 2024 / for general. ed. S.V. Kovalevsky, Dr. Tech. Science, Prof., and Hon.D.Sc., Prof. Predrag Dašić - Kramatorsk: DSEA, 2024. - 324 p.

ISBN 978-617-7889-68-6

У збірнику опубліковано матеріали праць аспірантів, магістрантів, студентів і учнів – членів Малої академії наук з науково-промислового профілю. Пропонуються перспективні ідеї, аналіз конкретних проблемних питань автоматизації машинобудування, створення робочих функціональних поверхонь деталей машин; подано розробки, готові до впровадження. Призначений для використання в практичній діяльності здобувачів освіти ВНЗ і фахівців машинобудівних підприємств.

The collection contains materials of works of graduate students, undergraduates, students and pupils – members of the Small Academy of Sciences in science and industry. Perspective ideas, the analysis of concrete problematic questions of automation of mechanical engineering, creation of working functional surfaces of details of cars are offered; ready-to-implement developments are submitted. It is intended for use in practical activity of students, masters of high school and experts of the machine-building enterprises.

УДК 62:007:[681.5:621.7](075.8)

ISBN 978-617-7889-68-6

© ДДМА,  
2024

### Програмний комітет конференції:

- Predrag Dašić** - Hon.D.Sc., Prof., Engineering Academy of Serbia (IAS), Belgrade (Serbia);
- Jenek Mariusz** - Dr. inz (Polska, Uniwersitet Zielonogorski);
- Marušić Vlatko** - Dr.Sc., Prof., J.J. Strossmayer University of Osijek, Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod (Croatia);
- Sandra Poirier** - Doctor of Education, CFCS, LD/N Professor (Middle Tennessee State University, USA);
- Guida Domenico** - Dr.Sc., Prof., University of Salerno, Department of Industrial Engineering (DIIn), Fisciano (Italy);
- Gyula Mester**, - Dr.Sc., Prof., Academic, (University of Szeged, Hungary);
- Ilija Čosić** - Dr.Sc., Prof., (Engineering Academy of Serbia (IAS), Belgrade, Serbia);
- Karabegović Isak** - Dr.Sc., Prof., Academy of Sciences and Arts of Bosnia and Herzegovina, Sarajevo (Bosnia and Herzegovina);
- Mirjanić Dragoljub** - Dr.Sc., Prof., Academy of Sciences and Arts of the Republika Srpska (ANURS), Banja Luka (Republic of Srpska - Bosnia and Herzegovina);
- Valentin Nedeff** - Dr.Sc., Prof., University of Bacău, Faculty of Engineering, Bacău (Romania);
- Pele Alexandru-Viorel**, dean - Dr.Sc., Prof., University of Oradea, Faculty of Management and Technological Engineering, Oradea (Romania);
- Zhelezarov S. Iliya**, rector - Dr.Sc., Prof., Technical University of Gabrovo, Gabrovo (Bulgaria);
- Гринь О.Г.** – к.т.н., доц., ДДМА, м. Краматорськ-Тернопіль (Україна);
- Залого В.О.** - д.т.н., проф. (СумДУ, м. Суми, Україна);
- Кіяновський М.В.** - д.т.н., проф. (КНТУ, Кривий Ріг, Україна);
- Клименко С.А.** – д.т.н., проф. (ІНМ АНУ, Київ, Україна);
- Ковалевська О.С.** - к.т.н., доц., (ДДМА, м. Краматорськ, Україна);
- Ковалевський С.В.** - д.т.н., проф., (ДДМА, м. Краматорськ, Україна);
- Ковальов В.Д.** - д.т.н., проф., (ДДМА, м. Краматорськ, Україна);
- Козлов Л.Г.** - д.т.н., проф., (ВНТУ, м. Вінниця, Україна);
- Колосов Д.Л.** – д.т.н., проф. («Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна);
- Коржов Є.О.** - к.е.н., начальник бюро перспективного розвитку ПрАТ «НКМЗ» (м. Краматорськ, Україна);
- Кузнецов Ю.М.** - д.т.н., проф., (НТУУ «КПІ» ім. І. Сікорського, м. Київ, Україна);
- Мазур М.П.** - д.т.н., проф., (ХНУ, м. Хмельницький, Україна);
- Макаренко Н.О.** - д.т.н., проф., (ДДМА, м. Краматорськ, Україна);
- Марков О.Є.** - д.т.н., проф., (ДДМА, м. Краматорськ, Україна);
- Марчук В.І.** - д.т.н., проф., (ЛНТУ, м. Луцьк, Україна);
- Новіков Ф.В.** - д.т.н., проф., (ХНЕУ, м. Харків, Україна);
- Оргіян О.А.** - д.т.н., проф., (ОНПУ, м. Одеса, Україна);
- Петраков Ю.В.** - д.т.н., проф., (НТУУ «КПІ» ім. І. Сікорського, м. Київ, Україна);
- Петров О.В.** - к.т.н., доц., (ВНТУ, м. Вінниця, Україна);
- Сапон С.П.**, - к.т.н., доц., (НУ "Чернігівська політехніка", м. Чернігів, Україна);
- Сухоруков С.І.** – к.т.н., доц. (ВНТУ, м. Вінниця, Україна).

***Program Committee:***

- Predrag Dašić** - Hon.D.Sc., Prof., Engineering Academy of Serbia (IAS), Belgrade (Serbia);
- Jenek Mariusz** - Dr. inz (Polska, Uniwersitet Zielonogorski);
- Marušić Vlatko** - Dr.Sc., Prof., J.J. Strossmayer University of Osijek, Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod (Croatia);
- Sandra Poirier** - Doctor of Education, CFCS, LD/N Professor (Middle Tennessee State University, USA);
- Guida Domenico** - Dr.Sc., Prof., University of Salerno, Department of Industrial Engineering (DIIn), Fisciano (Italy);
- Gyula Mester**, - Dr.Sc., Prof., Academic, (University of Szeged, Hungary);
- Ilija Ćosić** - Dr.Sc., Prof., (Engineering Academy of Serbia (IAS), Belgrade, Serbia);
- Karabegović Isak** - Dr.Sc., Prof., Academy of Sciences and Arts of Bosnia and Herzegovina, Sarajevo (Bosnia and Herzegovina)
- Mirjanić Dragoljub** - Dr.Sc., Prof., Academy of Sciences and Arts of the Republika Srpska (ANURS), Banja Luka (Republic of Srpska - Bosnia and Herzegovina)
- Nedeff Valentin** - Dr.Sc., Prof., University of Bacău, Faculty of Engineering, Bacău (Romania)
- Pele Alexandru-Viorel**, dean - Dr.Sc., Prof., University of Oradea, Faculty of Management and Technological Engineering, Oradea (Romania)
- Zhelezarov S. Iliya**, rector - Dr.Sc., Prof., Technical University of Gabrovo, Gabrovo (Bulgaria)
- Hryn O.H.** - Ph.D., Associate Professor (DSEA, Kramatorsk, Ukraine);
- Zaloha V.O.** - D.Sc., Professor (SumDU, Sumy, Ukraine);
- Kiyanovsky M.V.** - D.Sc., Professor (KNTU, Kryvyi Rih, Ukraine);
- Klymenko S.A.** - D.Sc., Professor (ISM NASU, Kyiv, Ukraine);
- Kovalevska O.S.** - Ph.D., Associate Professor (DSEA, Kramatorsk, Ukraine);
- Kovalevskyy S.V.** - D.Sc., Professor (DSEA, Kramatorsk, Ukraine);
- Kovalov V.D.** - D.Sc., Professor (DSEA, Kramatorsk, Ukraine);
- Kozlov L.G.** - D.Sc., Professor (VNTU, Vinnytsia, Ukraine);
- Kolosov D.L.** - D.Sc., Professor («Dnipro Polytechnic», Dnipro, Ukraine);
- Korzhov Ye.O.** - Ph.D. in Economics, Head of the Bureau of Strategic Development of PJSC "NKMZ" (Kramatorsk, Ukraine);
- Kuznetsov Yu.M.** D.Sc., Professor (NTUU "KPI" named after Igor Sikorsky, Kyiv, Ukraine);
- Mazur M.P.** - D.Sc., Professor (KhNU, Khmelnytskyi, Ukraine);
- Makarenko N.O.** - D.Sc., Professor (DSEA, Kramatorsk, Ukraine);
- Markov O.Ye.** - D.Sc., Professor (DSEA, Kramatorsk, Ukraine);
- Marchuk V.I.** - D.Sc., Professor (LNTU, Lutsk, Ukraine);
- Novikov F.V.** - D.Sc., Professor (KhNEU, Kharkiv, Ukraine);
- Orhiyan O.A.** - D.Sc., Professor (ONPU, Odesa, Ukraine);
- Petrakov Yu.V.** - D.Sc., Professor (NTUU "KPI" named after Igor Sikorsky, Kyiv, Ukraine);
- Petrov O.V.** - Ph.D., Associate Professor (VNTU, Vinnytsia, Ukraine);
- Sapon S.P.** - Ph.D., Associate Professor (ChNTU, Chernihiv, Ukraine);
- Sukhorukov S.I.** - Ph.D., Associate Professor (VNTU, Vinnytsia, Ukraine).

1. Opening speech from the organizing committee. Вступне слово від організаційного комітету	12
2. Predrag Dašić ( <i>Engineering Academy of Serbia (IAS), Belgrade, Serbia</i> ) <b>RESEARCH TRENDS IN DEVELOPMENT OF MODERN MANUFACTURING SYSTEMS</b>	14
3. Abhari P.B., Solianov D.O. ( <i>Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk - Ternopil, Ukraine</i> ) <b>INVESTIGATION OF POWER MODE PARAMETERS IN THE FINITE ELEMENT SIMULATION OF LATERAL EXTRUSION</b>	18
4. Islam MD Muzahidul, Shkvar Ye. (advisor), E. Shiju ( <i>College of Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua, China</i> ) <b>THE EXPERIENCE OF USING PIV MEASUREMENTS IN DIMPLES WITH BLOWING THROUGH THEIR CURVED SURFACE</b>	22
5. Iwona Ciešlik ( <i>Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, Polska</i> ). <b>THE LABORATORY OF INNOVATIVE MACHINING TECHNOLOGIES IS OPEN</b>	26
6. Kandume J., Shkvar Ye. (advisor), E Shiju ( <i>College of Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua, China</i> ) <b>TECHNOLOGICAL DIFFICULTIES AND FEATURES OF CONDUCTING PIV MEASUREMENTS NEAR A NON-FLAT STREAMLINED SURFACE</b>	28
7. Kuznetsov Yu.M., Osadchiy O. I. ( <i>National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine</i> ) <b>EVOLUTION OF THE MAIN MOVEMENT DRIVE OF A LATHE</b>	34
8. Krapić A., Šimunović, S., Milinović A. ( <i>Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod, University of Slavonski Brod, Croatia</i> ) <b>THE INFLUENCE OF BORONIZING ON THE ABRASIVE WEAR RESISTANCE OF C15 STEEL</b>	39
9. Malgorzata Zakrzewska ( <i>Universitet Wroslawski, Poland</i> ) <b>PILOT PROJECT BY IPMA "POLSKA YOUNG CREW"</b>	46
10. Mishra Sunil B., Kazi Sultanabanu Sayyad Liyakat, and Kazi Kutubuddin Sayyad Liyakat ( <i>Brahmdevdada Mane Institute of Technology, Solapur, Maharashtra, India</i> ) <b>REVOLUTIONIZING THE MECHANICAL WORLD: THE PIONEERING ROLE OF NANOTECHNOLOGY IN MECHANICAL ENGINEERING</b>	49
11. Nedim Pervan ( <i>Faculty of Mechanical Engineering, University of Sarajevo, Bosnia and Herzegovina</i> ) <b>GEOMETRIC DESIGN EFFECTS ON DRIVE AXLE HOUSING FATIGUE: A FEM STUDY</b>	52
12. Predrag Pravdić <sup>1</sup> , Violeta Dorđević <sup>2</sup> , Jelena Erić-Obućina <sup>2</sup> , Vladan Obućina <sup>2</sup> ( <sup>1</sup> <i>Academy of Professional Studies, Department in Kruševac, </i> <sup>2</sup> <i>Academy of Professional Studies Šumadija, Department in Trstenik, Serbia</i> ) <b>APPLICATION OF NEW TECHNOLOGIES FOR OBTAINING BIO-GAS FROM MUNICIPAL WASTE</b>	58
13. Predrag Pravdić <sup>1</sup> , Violeta Dorđević <sup>2</sup> , Jelena Erić-Obućina <sup>2</sup> , Vladan Obućina <sup>2</sup> ( <sup>1</sup> <i>Academy of Professional Studies, Department in Kruševac, </i> <sup>2</sup> <i>Academy of Professional Studies Šumadija, Department in Trstenik, Serbia</i> ) <b>NANO-TECHNOLOGY IN MODERN MECHANICAL ENGINEERING</b>	67

14. **Saad Khan** (*Department of Mechanical Engineering, University of Panjab Lahore, Pakistan*) **MECHATRONICS AND ROBOTICS IN MECHANICAL ENGINEERING: SYSTEM INTEGRATION** 76
15. **Vasile Nastasescu<sup>1</sup>, Antonela Toma<sup>2</sup>** (<sup>1</sup>*Military Technical Academy "Ferdinand I", Romania;* <sup>2</sup>*National University of Science and Technology Politehnica Bucharest, Romania*) **RADIAL DISPLACEMENTS IN FGMS ROTATING DISCS – A FEM STUDY** 78
16. **Yu-Sheng Lai, Wei-Zhu Lin, Yung-Chih Lin, Jui-Pin Hung** (*National Chin-Yi University of Technology, Republic of China; Industrial Technology Research Institute, Republic of China*) **URFACE ROUGHNESS MONITORING AND PREDICTION IN MILLING** 80
17. **Zuzana Murcinkova, Martin Pollak** (*Department of Design and Monitoring of Technical Systems, Department of Computer Aided Manufacturing Technologies, Faculty of Manufacturing Technologies with a seat in Presov, Technical University of Kosice, Slovak Republic*) **ENHANCING ROTOR BEARING CASINGS: A STUDY ON POLYMER PARTICLE COMPOSITES FOR ACOUSTIC EMISSION REDUCTION** 82
18. **Алексеев А.С., Гарбуз Є.С., Яворський В.Є.**, науковий керівник: д.т.н., професор Березюк О.В. (*Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна*) **УДОСКОНАЛЕННЯ КЕРУВАННЯ МЕХАНІЗМАМИ РОБОЧИХ ОРГАНІВ СМІТТЄВОЗІВ ЗА ДОПОМОГОЮ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ** 84
19. **Андрієнко Є.А.**, науковий керівник: к.т.н., доцент Задорожня І. М. (*Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна*) **ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ОПТИМІЗАЦІЯ ТА ПЕРЕДБАЧЕННЯ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ ВИРОБНИЦТВА** 89
20. **Бабаков Д.О.**, науковий керівник: к.т.н., доцент Ковалевська О.С. (*Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна*) **РОЗРОБКА МЕХАНОСКЛАДАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ МЕТАЛУРГІЙНИХ МЕХАНІЗМІВ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ** 94
21. **Бабаш А.В.** (*Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна*) **РОЗРОБКА, АНАЛІЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПРИ РІЗНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ** 96
22. **Балицький К. Е.**, науковий керівник: Крюка С. В. (*ВСП «Дружківський фаховий коледж Донбаської державної машинобудівної академії» м. Дружківка, Україна*) **ОРГАНІЗАЦІЯ ПРОПУСКУ ПЕРСОНАЛУ НА ТЕРИТОРІЮ ПІДПРИЄМСТВА НА БАЗІ ПЛАТФОРМИ ARDUINO** 103
23. **Бахтін І.Д.**, науковий керівник: д.т.н., професор Ковалевський С.В. (*Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна*) **МОДЕРНІЗАЦІЯ БАШТОВИХ КРАНІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА СТАЛОСТІ** 110
24. **Безродній І.О.**, науковий керівник: д.т.н., професор Ковалевський С.В. (*Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна*) **ІННОВАЦІЙНИЙ МЕХАНОСКЛАДАЛЬНИЙ** 112

**ТЕХНОЛОГІЧНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА  
ГУСЕНИЧНИХ ХОДОВИХ ЧАСТИН**

25. Біляк К. С., науковий керівник: д.т.н., професор Новіков Ф. В. (Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, м. Харків, Україна) **РОБОТИЗАЦІЯ І ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ В СУЧАСНОМУ МАШИНОБУДУВАННІ** 114
26. Близнюк О.О., науковий керівник: к.т.н., професор Третяк В.В. (Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна): **АВТОМАТИЧНЕ ФОРМУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ І СТРУКТУРИ ТП ЗА ДОПОМОГОЮ СТРУКТУРНО-АНАЛІТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБРАЗІВ** 118
27. Бочковой Д.О., Шустова В.М. (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна) **ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МОДИФІКОВАНОЇ СТАНИНИ КОЛОННОГО ТИПУ ДЛЯ ГІДРАВЛІЧНИХ ПРЕСІВ З ВИКОРИСТАННЯМ САПР SOLIDWORKS** 126
28. Бровко А.М., науковий керівник: д.т.н., професор Ковалевський С.В. (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна) **ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ГІДРОАПАРАТУР У КОНТЕКСТІ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ І ЗНИЖЕННЯ ВИТРАТ** 130
29. Буковський О.М., науковий керівник: к.т.н., доцент Вислоух С.П. (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна) **АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ МІЖБЛОКОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ З'ЄДНАНЬ** 132
30. Гребенкін О.О., науковий керівник: д.т.н., професор Ковалевський С.В. (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна) **ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО РОЗРОБКИ МЕХАНОСКЛАДАЛЬНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВУЗЛІВ ПРИВОДУ КРУПНИХ СОРТОВИХ СТАНІВ** 139
31. Гринь О.Г., Трембач І.О., Воропаєв Є.В. (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ-Тернопіль, Україна) **ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ОКСИДІВ РІДКОЗЕМЕЛЬНИХ МЕТАЛІВ В СКЛАДІ ПОРОШКОВОГО ДРОТУ** 141
32. Дубова А. Д., науковий керівник: д.т.н., професор Новіков Ф. В. (Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, м. Харків, Україна) **РОЗВИТОК ДУАЛЬНОГО НАВЧАННЯ ЗДОБУВАЧІВ ОСВІТИ В УКРАЇНІ** 147
33. Іваненко Р.О.<sup>1</sup>, Волошко О.В.<sup>2</sup> (<sup>1</sup>Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз, м.Київ; <sup>2</sup>Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут” імені Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна) **МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ ВИРОБНИЧИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ** 152



34. **Кінденко М. І.** (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ-Тернопіль, Україна) **МЕХАНІЗМ ЗНОШУВАННЯ ТА ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ СВЕРДЛІ ІЗ ШВИДКОРИЗАЛЬНОЇ СТАЛІ, ЗМІЦНЕНИХ МЕТОДОМ ОІМП** 157
35. **Кітов О.А.**, науковий керівник: к.т.н., доцент Задорожня І. М. (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна) **ВДОСКОНАЛЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОКСОГАСИЛЬНОГО ВАГОНУ** 164
36. **Кириченко А.М., Завгородній Б.М.** (Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна) **ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ 3D-ДРУКУ** 171
37. **Косарєв В.С., Хмарський Д.П.** (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ-Тернопіль, Україна) **АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПОРОЖНИСТИХ ДЕТАЛЕЙ В ПРОЦЕСІ КОМБІНОВАНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ** 178
38. **Кривошея В.Р.**, науковий керівник: д.т.н., професор Кузнецов Ю.М. (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна) **СПОСОБИ ВІДРІЗАННЯ ТРУБ ЗСЕРЕДИНИ І ЗЗОВНІ** 185
39. **Кузнецов Ю.М., Підгорний Н.А., Столярчук Д. П.** (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна) **РОБОТИЗАЦІЯ ТА ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ В ІНДУСТРІЇ 4.0** 188
40. **Мартиненко Д.В.**, науковий керівник: к.т.н., доцент Ковалевська О.С. (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ-Тернопіль, Україна) **РОЗРОБКА ІННОВАЦІЙНОГО МЕХАНОСКЛАДАЛЬНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ РЕДУКТОРІВ АГЛОМЕРАЦІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА** 193
41. **Надіч П.В.**, наукові керівники: к.т.н., доцент Онищук С.Г. і к.т.н., доцент Тулупов В.І. (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ-Тернопіль, Україна) **ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНИХ РІЗАЛЬНИХ ІНСТРУМЕН-ТІВ ДЛЯ ТОКАРНОЇ ОБРОБКИ В МАШИНОБУДУВАННІ** 197
42. **Надіч П.В.**, наукові керівники: к.т.н., доцент Тулупов В.І. і к.т.н., доцент Онищук С.Г. (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ-Тернопіль, Україна) **МЕТОДИ ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН** 200
43. **Новіков Ф. В.** (Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, м. Харків, Україна) **НАНОТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ШОРСТКОСТІ ОБРОБЛЮВАНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПІД ЧАС ШЛІФУВАННЯ** 204
44. **Нікітенко В.Р.**, науковий керівник: д.т.н., професор Кузнецов Ю.М. (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна) **АВТОМАТИЗОВАНА ОБРОБКА БУРШТИНУ** 211

45. **Пірогов Д.О.**, науковий керівник: д.т.н., професор **Воронцов Б.С.** (*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*, м. Київ, Україна) **ВПЛИВ ШВИДКОСТІ РІЗАННЯ НА СТРУЖКОУТВОРЕННЯ ПРИ ТОЧІННІ ЗАГОТОВОК ІЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ ТІ-6АL-4V** 217
46. **Пустовалов В.І.** (*Донбаська державна машинобудівна академія*, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна) **ІННОВАЦІЇ У ВИРОБНИЦТВІ РЕДУКТОРІВ ДЛЯ ДРОБАРІВ В АСПЕКТІ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ І ОПТИМІЗАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА** 221
47. **Рак А.О.** (*Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»*, м. Харків, Україна) **ПЕРЕВАГИ ЗАСТОСУВАННЯ КЕРАМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ У ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛАХ** 224
48. **Сахнюк І.О., Рудак Н.П., Кириленко Л.В., Тігова Г.М., Федосєєва І.К.** (*Технічний центр НАН України*, м. Київ, Україна) **АКТУАЛЬНІ ЗМІНИ ЩОДО СТАНДАРТИЗАЦІЇ ТЕРМІНОЛОГІЇ У СФЕРІ НАНОТЕХНОЛОГІЇ** 228
49. **Сидюк Д.М., Ганєвська В.О., Ковалєвський С.В.** (*Донбаська державна машинобудівна академія*, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна) **РОЗМІРНИЙ АНАЛІЗ ЯК ФАКТОР ВПЛИВУ НА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИРОБІВ МАШИНОБУДУВАННЯ** 233
50. **Сиротін О.А., Кавецький О.І., Болячок А.Б.**, науковий керівник: к.т.н., доцент **Лозінський Д.О.** (*Вінницький національний технічний університет*, м. Вінниця, Україна) **ЗАСТОСУВАННЯ РОБОТИЗОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ В МАШИНОБУДІВНОМУ ВИРОБНИЦТВІ** 238
51. **Соколов М.В.** (*Донбаська державна машинобудівна академія*, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна) **ОСОБЛИВОСТІ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ВИРОБНИЦТВІ МЕХАНІЗМІВ ТРАНСМІСІЇ ДЛЯ РОТОРНИХ ЕКСКАВАТОРІВ** 242
52. **Тіщенко А.В., Тарасов О.Ф., Коваленко А.К.** (*Донбаська державна машинобудівна академія*, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна) **МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРАВКИ МЕТАЛЕВОГО ЛИСТА НА ОСНОВІ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ** 245
53. **Товкач А. О., Ковальчук В. А., Козлов С. Л.** (*Вінницький національний технічний університет*, Вінниця, Україна) **ПОКРАЩЕННЯ СТАТИСТИЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГІДРОПРИВОДА НА ОСНОВІ РЕГУЛЬОВАНОГО НАСОСА ТА КОНТРОЛЕРА** 250
54. **Трегубов В.О., Соколовський М.Є., Ницимайло В.О.**, науковий керівник: к.т.н. **Піонткевич О.В.** (*Вінницький національний технічний університет*, м. Вінниця, Україна) **УДОСКОНАЛЕННЯ ГІДРОПРИВОДІВ МОБІЛЬНИХ РОБОЧИХ МАШИН ПРОПОРЦІЙНОЮ ГІДРОАПАРАТУРОЮ ТА МІКРОКОНТРОЛЕРОМ** 257
55. **Хворостухіна М.Л.**, науковий керівник **Беш А.М.** (*Загально-освітня школа №17*, м. Краматорськ, Донбаська державна машинобудівна 262

- академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна*) **ІНФОРМАЦІЙНА МОДЕЛЬ АНТИГРАВІТАЦІЙНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ**
56. **Чурсов С.О., Дмитрієв Д.О.** (*Херсонський національний технічний університет, Херсон, Україна*) **ПРОГНОЗУВАННЯ УМОВ НАКОПИЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОШКОДЖЕНЬ ТА ПОКАЗНИКІВ ВТОМНОЇ МІЦНОСТІ В МАТЕРІАЛАХ ПНЕВМАТИЧНИХ ШИН ЗА РАХУНОК СТЕНДОВИХ ВИПРОБУВАНЬ** 268
57. **Чучин О.В., Чепеленко О.Ю.** (*Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна*) **ВИЗНАЧЕННЯ РОЗПИРАЮЧИХ ТИСКІВ НА ВНУТРІШНІ ПОВЕРХНІ МАТРИЦІ ПРИ РАДІАЛЬНО-ПРЯМОМУ ВИДАВЛЮВАННІ** 274
58. **Шипа О.В.,** наукові керівники: к.т.н., доцент **Онищук С.Г.** і к.т.н., доцент **Тулупов В.І.** (*Україна, м. Краматорськ - Тернопіль, Донбаська державна машинобудівна академія*) **ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ В МАШИНОБУДУВАННІ** 282
59. **Jelena Dimovski<sup>1</sup>, Marina Stanojević<sup>2</sup>** (*<sup>1</sup>University of Priština in Kosovska Mitrovica, Faculty of Economic, <sup>2</sup>University of Niš, Faculty of Economics, Niš, Serbia*): **MODERN EDUCATION CHALLENGES AND OPPORTUNITES IN THE ERA OF INTELLIGENT TUTORING SYSTEMS** 285
60. **Онищенко С.В., Колосов Д.Л.** (*Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна*): **ВПЛИВ РОЗРИВІВ ЕЛЕМЕНТІВ АРМУВАННЯ ТА НЕЛІНІЙНОГО РОЗПОДІЛУ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН КОМПОЗИТНОЇ БАГАТОШАРОВОЇ ВАНТИ** 295
61. **Milica Tufegdžić<sup>1</sup>, Predrag Dašić<sup>2</sup>, Milorad Pavlović<sup>3</sup>** (*<sup>1</sup>Academy of Professional Studies Šumadija, Kragujevac; <sup>2</sup>Engineering Academy of Serbia (IAS), Belgrade; <sup>3</sup>University Clinical Center Niš, Clinic of Thoracic Surgery, Niš, Serbia*): **APPLICATION OF NANOPARTICLES FOR BONE FRACTURE HEALING** 300
62. **Проданчук О.О.,** науковий керівник: д.т.н., професор **Ступницький В.В.** (*Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна*): **ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСІВ МЕТАЛООБРОБКИ ВАЖКООБРОБЛЮВАНИХ МАТЕРІАЛІВ ШЛЯХОМ СТВОРЕННЯ ДОСЛІДНОЇ УСТАНОВКИ** 312
63. **Stetsko A.E.** (*Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine*): **FORMATION OF HIGH-QUALITY SURFACES OF THE MAIN PARTS OF COGENERATION MACHINES BY A COMPLEX METHOD WITH FINISHING MECHANICAL PROCESSING** 318

## ВСТУПНЕ СЛОВО ВІД ОРГАНІЗАЦІЙНОГО КОМІТЕТУ КОНФЕРЕНЦІЇ

Шановні учасники та гості Міжнародної молодіжної науково-технічної конференції «Молода наука – роботизація і нано-технології сучасного машинобудування», від імені організаційного комітету ми раді вітати вас у цьому знаковому науковому зібранні, що проходить 10-12 квітня 2024 року. Ця подія об'єднує вчених, інженерів, дослідників, студентів та молодих науковців з України та світу, сприяючи обміну ідеями, досвідом та результатами досліджень з питань роботизації та нано-технологій, які формують майбутнє машинобудування.

Ми переконані, що ваша участь у цій конференції не тільки збагатить її зміст, але й сприятиме професійному розвитку учасників, відкриє нові можливості для співпраці та налагодження ділових контактів. Значення тем, які обговорюються під час конференції, важко переоцінити, адже роботизація та нано-технології стають ключовими напрямками технологічного прогресу, що впливає на різноманітні сфери нашого життя.

Організатори конференції, серед яких Міністерство освіти і науки України, ДНУ «Інститут модернізації змісту освіти», Національна академія наук вищої освіти України, Донбаська державна машинобудівна академія, Вінницький національний технічний університет та інші провідні навчальні та наукові установи з України та зарубіжжя, покладають надії на результати цієї конференції. Ми очікуємо, що вона стане платформою для обговорення найактуальніших питань, знаходження нових рішень та визначення напрямків подальших досліджень.

Ваша активна участь, ідеї та дослідження є невід'ємною частиною нашої спільної мети – розвитку науки та технологій. Віримо, що обмін знаннями та досвідом на цій конференції не буде безплідним, а висвітлені напрямки досліджень знайдуть своє втілення в майбутніх інноваційних проєктах та розробках. Ми сподіваємося, що ця конференція стане важливою віхою у розвитку наукової думки та відкриє нові горизонти для подальших досліджень.

Збірник наукових праць конференції, який ми публікуємо, безсумнівно, стане значним внеском у наукову спільноту та забезпечить широке розповсюдження вашої роботи серед фахівців з різних країн. Ваші дослідження, представлені на конференції, стануть основою для нових відкриттів та розробок, сприятимуть інтеграції наукових зусиль і створенню нових міжнародних наукових і навчальних проєктів.

Особлива подяка адресована усім вишам та науковим установам, які взяли участь у підготовці цієї конференції. Без вашої підтримки та співпраці ця подія не мала б такого високого рівня організації та значення.

На завершення хочемо побажати всім учасникам конференції плідної роботи, нових наукових досягнень, успішного втілення ваших ідей та проєктів. Сподіваємось, що ця конференція стане стартовим майданчиком для ваших майбутніх успіхів і відкриє нові можливості для наукової та професійної реалізації.

З повагою, **Сергій Ковалевський**, Голова організаційного комітету,  
**Леонід Козлов**, Співголова організаційного комітету.

## OPENING SPEECH FROM THE ORGANIZING COMMITTEE

Dear participants and guests of the International Youth Scientific and Technical Conference "Young Science - Robotics and Nano-technologies in Modern Mechanical Engineering", on behalf of the organizing committee, we are pleased to welcome you to this significant scientific gathering taking place from April 10 to 12, 2024. This event brings together scientists, engineers, researchers, students, and young scientists from Ukraine and around the world, fostering the exchange of ideas, experience, and research findings on robotics and nano-technologies that are shaping the future of mechanical engineering.

We are confident that your participation in this conference will not only enrich its content but also contribute to the professional development of participants, open new opportunities for collaboration, and establish business contacts. The importance of the topics discussed during the conference cannot be overstated, as robotics and nano-technologies are becoming key directions of technological progress, affecting various aspects of our lives.

The conference organizers, including the Ministry of Education and Science of Ukraine, the DNU "Institute for Modernization of Education Content", the National Academy of Educational Sciences of Ukraine, the Donbas State Engineering Academy, the Vinnytsia National Technical University, and other leading educational and scientific institutions from Ukraine and abroad, place their hopes on the outcomes of this conference. We expect it to serve as a platform for discussing the most pressing issues, finding new solutions, and identifying directions for further research.

Your active participation, ideas, and research are an integral part of our common goal - the development of science and technology. We believe that the exchange of knowledge and experience at this conference will be fruitful, and the research directions highlighted will find their implementation in future innovative projects and developments. We hope that this conference will become an important milestone in the development of scientific thought and open new horizons for further research.

The conference proceedings, which we publish, will undoubtedly make a significant contribution to the scientific community and ensure the widespread dissemination of your work among professionals from different countries. Your research, presented at the conference, will lay the foundation for new discoveries and developments, promote the integration of scientific efforts, and lead to the creation of new international scientific and educational projects.

Special thanks are addressed to all universities and scientific institutions that participated in preparing this conference. Without your support and cooperation, this event would not have achieved such a high level of organization and significance.

In conclusion, we wish all conference participants fruitful work, new scientific achievements, successful implementation of your ideas and projects. We hope that this conference will become a launching pad for your future successes and open new opportunities for scientific and professional realization.

With respect, **Sergiy Kovalevskyy**, Head of the Organizing Committee,  
**Leonid Kozlov**, Co-Chairman of the Organizing Committee.

**Predrag Dašić** (*Engineering Academy of Serbia (IAS), Belgrade, Serbia*)

## **RESEARCH TRENDS IN DEVELOPMENT OF MODERN MANUFACTURING SYSTEMS**

***Abstract:** The work provides an analysis of modern methodologies and technologies that transform production systems, emphasizing the importance of Integrative Definition (IDEF) methods for standardization and optimization of production processes. IDEF's integration with modern manufacturing philosophies and the shift to a model-driven model that improves adaptability and efficiency are highlighted. Built-in model frameworks and the role of digital doubles in the development of a unified representation of production systems are analyzed. A progressive approach to the design of production processes is indicated, which contributes to the development of more intelligent, responsible and sustainable production.*

***Анотація:** В роботі надано аналіз сучасних методологій та технологій, що трансформують виробничі системи, наголошуючи на важливості методів Інтеграційного визначення (IDEF) для стандартизації та оптимізації виробничих процесів. Висвітлюється інтеграція IDEF з філософією сучасного виробництва та перехід до орієнтованого на моделювання, що покращує адаптивність та ефективність. Аналізуються вбудовані модельні рамки та роль цифрових двійників у розробці уніфікованого представлення виробничих систем. Вказується на прогресивний підхід до проектування виробничих процесів, що сприяє розвитку більш розумних, відповідальних та сталого виробництва.*

### **INTRODUCTION.**

The industrial domain is witnessing a paradigm shift in the architecture of modern manufacturing systems, propelled by an unprecedented integration of sophisticated methodologies and cutting-edge technologies. This shift is not merely incremental; it represents a foundational transformation towards optimizing the core attributes of productivity, flexibility, and operational efficiency. Central to this evolutionary process is the strategic adoption of advanced modeling techniques, particularly emphasized through the application of Integration Definition (IDEF) methods. These methodologies serve as the linchpin in redefining the contours of manufacturing systems, enabling a seamless synthesis of functional and informational components to construct a more responsive and agile manufacturing environment [1,2].

The inception of IDEF methods, initially designed to enhance the United States Air Force's operational capabilities, has now permeated the broader industrial fabric, offering a comprehensive toolkit for addressing complex manufacturing challenges. By fostering a standardized approach to the visualization and analysis of manufacturing processes, IDEF methodologies facilitate a deeper understanding of the intricate dynamics at play, thereby empowering stakeholders to make informed decisions. This paper delves into the exploration of contemporary research trajectories within the realm of modern manufacturing systems. It seeks to unravel the multifaceted impact of IDEF

methodologies, not only as a tool for process optimization but also as a catalyst for industrial innovation and growth [3].

In doing so, the paper aims to shed light on the transformative potential of these methodologies in sculpting the future of manufacturing systems. It endeavors to articulate how the convergence of functional and information modeling techniques, underpinned by IDEF methods, is instrumental in charting new pathways for the development of manufacturing systems that are not only efficient and flexible but also resilient and adaptable to the rapidly changing technological landscape. Through this exploration, the paper underscores the critical role of IDEF methodologies in facilitating the ongoing evolution of manufacturing systems, setting the stage for a comprehensive discussion on the emerging research trends and their implications for the future of industrial manufacturing [4].

### **BASIC PART.**

The evolution of the IDEF family of methods since its inception in the late 1970s for the United States Air Force has been nothing short of revolutionary. Originally designed to enhance military operations, IDEF methods have transcended their initial scope to become a cornerstone in the realm of manufacturing systems. These methodologies provide a structured and standardized approach to dissecting and understanding the complex web of interactions that define modern manufacturing processes. By covering functional, informational, and dynamic aspects, IDEF methods facilitate a granular exploration of manufacturing systems, enabling a nuanced understanding of their operational intricacies.

The fusion of IDEF methodologies with contemporary manufacturing philosophies such as lean manufacturing, total quality management (TQM), and just-in-time (JIT) production has heralded a new era in manufacturing. This synthesis extends beyond the mere application of these methodologies; it signifies a paradigm shift towards a more integrated and holistic approach to manufacturing. Through this integration, the entire spectrum of the manufacturing process, from the initial conceptual design to the final product delivery, is reimagined, laying a robust foundation for continuous improvement and fostering an environment ripe for innovation.

The transition towards knowledge-based manufacturing modeling marks a critical inflection point in the trajectory of manufacturing system evolution. At the forefront of this shift is the application of the IDEF0 framework, which seamlessly integrates detailed, domain-specific knowledge into manufacturing systems. This integration enables a depth of analysis and decision-making previously unattainable, allowing for highly informed optimizations and adjustments.

The impact of this knowledge-based approach is particularly pronounced in sectors with high demands for precision and adaptability, such as the metal-cutting industry. Here, the convergence of process planning with production planning and control through knowledge-based systems has catalyzed a

transformative change, enhancing the adaptability and efficiency of manufacturing operations. This revolution underscores the profound value of integrating detailed, contextual knowledge into manufacturing systems, setting a new standard for how complex production demands are met.

The pursuit of excellence in manufacturing is an unending journey, characterized by continuous evaluation, diagnosis, and improvement. Integrated modeling frameworks, which marry IDEF methods with advanced simulation techniques, stand out as a critical tool in this quest. These frameworks excel in pinpointing systemic inefficiencies and bottlenecks, offering a comprehensive overview of current manufacturing processes. By facilitating the virtual experimentation of potential changes and innovations, these frameworks empower manufacturers to preemptively address issues and seize opportunities for optimization. This proactive approach ensures that manufacturing systems not only solve existing challenges but also consistently evolve to stay ahead of efficiency and effectiveness curves.

The ambition to achieve a unified representation of physical processes and information systems has led to significant advancements in manufacturing technology, notably through the advent of digital twin technology. By creating an accurate virtual counterpart of the physical manufacturing system, digital twins offer an unparalleled perspective on the manufacturing process. This dual representation enhances predictive analysis, supports nuanced decision-making, and underpins continuous improvement strategies. The development of comprehensive simulation modeling systems, capable of embodying both the physical and informational dimensions of manufacturing, grants manufacturers an unprecedented level of control and insight. This, in turn, lays a fertile ground for sustained innovation and enhancement, heralding a new frontier in manufacturing technology.

The landscape of modern manufacturing systems, as depicted through the exploration of advanced modeling and simulation techniques, underscores a pivotal shift towards optimizing the core tenets of industrial operations. The diligent integration of IDEF methods with knowledge-based systems and integrated modeling frameworks heralds a new epoch in the design and enhancement of manufacturing processes. This paper has meticulously navigated through the intricate layers of these methodologies, unraveling their collective potential in sculpting manufacturing systems that are not only more efficient and adaptable but also poised to thrive in a competitive global environment.

The strategic application of these methodologies delineates a path towards a future where manufacturing systems transcend traditional limitations, embodying the principles of agility, innovation, and sustainability. By harnessing the power of IDEF methods, the paper illuminates a structured approach to dissecting and reconstructing manufacturing processes, thereby fostering an environment where continuous improvement is not merely an objective but a fundamental operational ethos.



Furthermore, the adoption of knowledge-based modeling emerges as a beacon of progress, offering a nuanced understanding of manufacturing dynamics.

This approach, characterized by its depth and precision, empowers decision-makers with the insights required to navigate the complexities of modern production demands. The transformative potential of integrating process planning with production planning and control underscores the value of embedding domain-specific knowledge into the operational fabric of manufacturing systems.

The discussion on integrated modeling frameworks elevates the discourse to a realm where systemic issues and bottlenecks are not just identified but systematically addressed. These frameworks, through their capacity for virtual testing and scenario simulation, offer a proactive toolset for refining manufacturing processes. The emphasis on a unified representation of physical processes and information systems, particularly through digital twin technology, marks a significant leap forward. It lays the groundwork for predictive analytics, decision support, and continuous operational refinement, setting the stage for the manufacturing systems of tomorrow.

### CONCLUSION.

The development of modern manufacturing systems is intrinsically linked to the advancement of modeling and simulation techniques. The strategic application of IDEF methods, alongside knowledge-based systems and integrated modeling frameworks, exemplifies a forward-thinking approach to the design and improvement of manufacturing processes. This paper has outlined how these trends contribute to the creation of more efficient, adaptable, and competitive manufacturing environments. As these methodologies continue to evolve, they promise to meet the challenges of the 21st century, driving the industry towards smarter, more responsive, and sustainable operations.

### REFERENCES

- 1.E. Radu, A. Dima, E. M. Dobrota, A.-M. Badea, D. Ø. Madsen, C. Dobrin, and S. Stanciu, "Global trends and research hotspots on HACCP and modern quality management systems in the food industry," *Heliyon*, vol. 9, no. 7, e18232, 2023, ISSN 2405-8440. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18232> .
- 2.A. Baratta, A. Cimino, F. Longo, and L. Nicoletti, "Digital twin for human-robot collaboration enhancement in manufacturing systems: Literature review and direction for future developments," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 187, 109764, 2024, ISSN 0360-8352. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109764> .
- 3.J. Friederich and S. Lazarova-Molnar, "Reliability assessment of manufacturing systems: A comprehensive overview, challenges and opportunities," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 72, pp. 38-58, 2024, ISSN 0278-6125. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.11.001>.
4. A. Billey and T. Wuest, "Energy digital twins in smart manufacturing systems: A case study," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 88, 102729, 2024, ISSN 0736-5845. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102729> .

**Abhari P.B., Solianov D.O.** (*Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk - Ternopil, Ukraine*)

## INVESTIGATION OF POWER MODE PARAMETERS IN THE FINITE ELEMENT SIMULATION OF LATERAL EXTRUSION

**Abstract:** *Researchers studied cold lateral extrusion of branch-shaped parts using computer simulations (finite element method) focusing on a single-sided process. They investigated how different die shapes, initial material sizes, and machine settings (power mode) affect the flow of the material. The simulations, performed with DEFORM 3D software, examined the relationship between the force applied (load) and the distance the material is pushed (stroke). They also looked at how the variable branch radius ( $R_i$ ) compared to their starting radius billet ( $R_0$ ) is affected by the branch height, all while keeping the branch angle constant. This study aimed to improve the understanding of the cold lateral extrusion process for branches, leading to better quality branch-shaped components in manufacturing.*

**Анотація:** *Дослідники вивчали холодне бічне видавлювання деталей у формі розгалуження за допомогою комп'ютерного моделювання (метод скінчених елементів), зосереджуючись на односторонньому процесі. Вони досліджували, як різні форми матриці, початкові розміри матеріалу та налаштування машини (режим потужності) впливають на потік матеріалу. За допомогою програмного забезпечення DEFORM 3D було проведено моделювання, щоб дослідити зв'язок між прикладеною силою (навантаженням) і відстанню, на яку матеріал проитовхується (хід). Також було досліджено, як впливає висота розгалуження на співвідношення змінного радіуса розгалуження ( $R_i$ ) до початкового радіуса заготовки ( $R_0$ ), при цьому кут розгалуження залишався сталим. Це дослідження було спрямоване на покращення розуміння процесу холодного бічного видавлювання для розгалужень, що призводить до виробництва високоякісних компонентів у формі розгалужень.*

### 1. INTRODUCTION

The metal forming industry has experienced rapid growth in recent decades, driven by advancements in tools, materials, and powerful presses. This progress has intensified competition within the industry, demanding improved efficiency for success. Achieving this requires minimizing scrap, reducing lead times, and optimizing costs throughout the production process.

Extrusion, a versatile metal forming process, utilizes cold, warm, or hot forming to create various shapes for industrial applications. Process modeling predicts material flow, stress and strain distribution, tool forces, and potential defects. Cold extrusion, conducted at room temperature, offers several advantages, including: superior surface finish, enhanced mechanical properties and precise dimensional accuracy.

Driven by the market's demand for cost-efficiency, cold forging has gained traction in manufacturing. The process utilizes different configurations, including forward, backward, radial, lateral and combined extrusion. In all cases, a billet (metal workpiece) is placed within the die cavity and compressed by one or more rams, forcing the material to fill the desired shape.

The finite element method (FEM) has emerged as a powerful tool in

computer-aided engineering (CAE) for solving complex design and manufacturing problems. While historically limited in its ability to address non-linear problems like metal forming, advancements in high-speed computing have paved the way for its successful application in this field.

Commercial CAE software leveraging FEM is now readily available and utilized for analyzing, validating, and optimizing metal forming processes, ultimately leading to design improvements.

To tackle the challenges of complex die geometries encountered in metal forming simulations, various numerical techniques have been developed. While extensive research has been conducted on elastic-plastic approaches, rigid-plastic and visco-plastic methods offer significant advantages in reducing computational time, crucial for handling complex 3D problems.

Effective mesh generation is essential for accurate FEM analysis. The present work employs a modular remeshing technique using hexahedral and triangular prismatic elements, demonstrating its effectiveness [1, 2].

## **2. METHOD OF ANALYSIS**

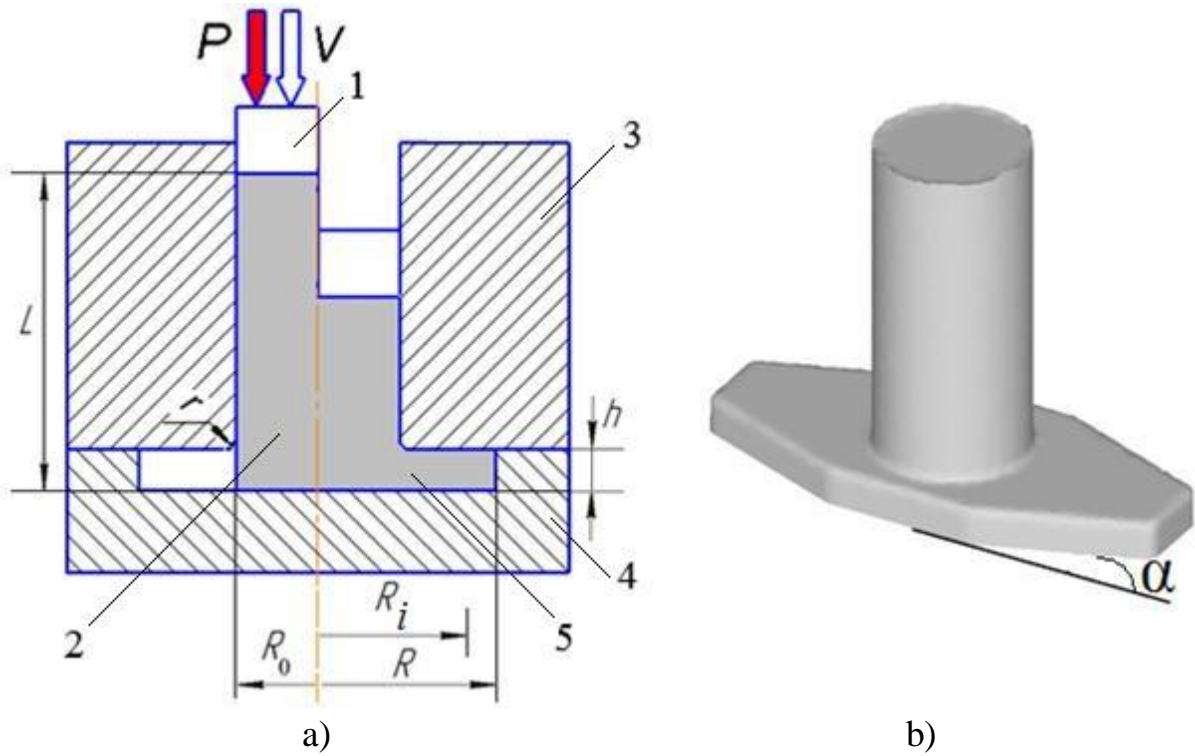
This study leverages finite element analysis (FEA), a powerful computer-aided engineering (CAE) tool, to investigate the lateral extrusion process. FEA allows engineers to solve design and manufacturing problems numerically, leading to reduced development time and cost. Specifically, we employ the DEFORM 3D software, a rigid plastic finite element program, to model the process.

## **3. PURPOSE OF INVESTIGATION**

This study employed finite element simulations using DEFORM-3D software to investigate the relationship between load and stroke (load-stroke curves) and the ratio of variable branch radius to initial branch radius ( $R_i/R_0$ ) for single-ended lateral extrusion with branches of varying heights in a constant-angle configuration. The findings offer valuable insights into the mechanics of the lateral extrusion process, thereby aiding in the optimization of production parameters for high-quality branch-shaped components.

## **4. LATERAL EXTRUSION PROCESS**

Fig. 1 illustrates the die scheme, die geometry parameters, axisymmetric billet dimensions, and the final formed part for the single-ended lateral extrusion process. The details of the die geometry parameters, billet dimensions, and power mode parameters are listed below.:  $R_0$  – the radius of billet ( $R_0 = 15\text{mm}$ ),  $R$  – the branch radius ( $R/R_0=2$ ),  $R_i$  – the variable branch radius,  $L$  – the billet height ( $L=100\text{mm}$ ),  $h$  – the branch height ( $h/R_0=0,5$ ;  $h/R_0=0,75$ ;  $h/R_0=1,0$ ),  $r$  – the die tip radius ( $r/R_0=0,135$ ),  $\alpha$  – angled branch ( $\alpha=20^\circ$ ),  $V$  – punch velocity ( $V=1\text{mm/s}$ ),  $P$  – punch load, the friction factors between the billet and tools are constant (Zibel's law,  $\mu=0.08$ ).



1 – punch, 2 – billet, 3 – upper die, 4 – lower die 5 – final formed part

Fig. 1. Die scheme of single-ended lateral extrusion process with angled branch (a) and final formed part (b)

## 5. MATERIAL PROPERTY

This simulation employed AA 6060 aluminum alloy as the material. The relationship between flow stress and effective strain for this material can be approximated by:

$$\sigma = 191.55 \epsilon^{0.202} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

## 6. ANALYSIS OF LATERAL EXTRUSION PROCESS

An FEA (Finite Element Analysis) simulation in DEFORM 3D was used to design the upper and lower dies, and movable punch for a single-ended lateral extrusion process with an angled branch. For the simulation, the billet was modeled with a rigid-plastic material model, while the upper and lower dies along with the punches were treated as rigid objects. The variation of punch load with punch displacement (stroke) and the ratio of variable branch radius to initial branch radius with branches of varying heights in a constant-angle configuration have been shown in Figs 2. As shown in this Fig. stiff rising of forming loads were commonly observed according to increase of the punch stroke and the ratio of variable branch radius to initial branch radius along the any stage of the deformation.

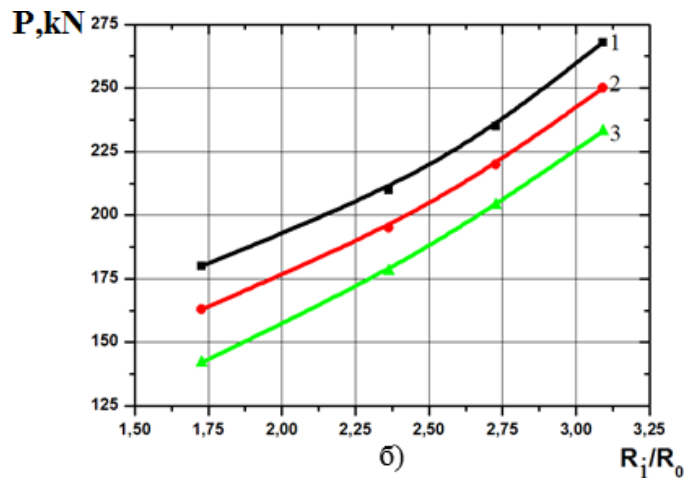
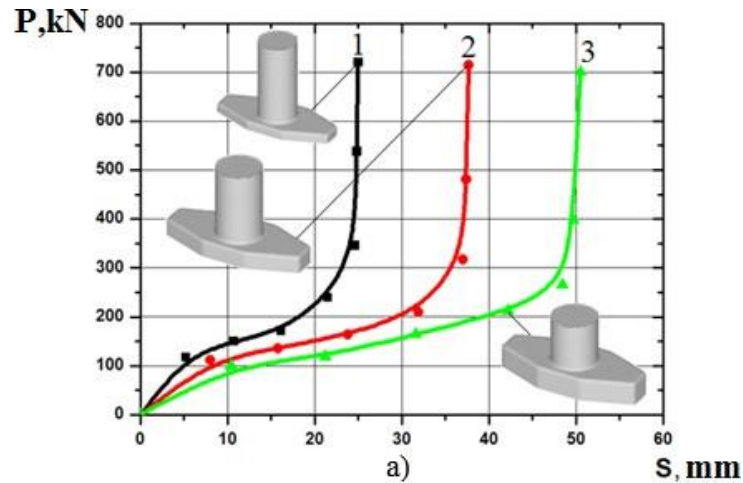


Fig. 2. The punch load vs. the punch stroke (a) and the punch load vs.  $R_i/R_0$  (b) in single-ended lateral extrusion process with angled branch: 1 –  $h/R_0=0,5$ ; 2 –  $h/R_0=0,75$ ; 3 –  $h/R_0=1,0$ ;  $\alpha=20^\circ$

## 7. CONCLUSIONS

This study used computer simulations (3D finite element analysis with DEFORM software) to investigate power mode in the single-ended lateral extrusion process with angled branch. The results showed that forming loads generally increased with both the depth of the punch movement (punch stroke) and the amount of material being diverted (ratio of variable branch radius to initial branch radius).

## REFERENCES

1. Abhari Payman. *Investigation of load on the tools in precision radial extrusion process with multiple rams. XVII International scientific conference: Nr 56. – Częstochowa, 2016 – P. 330–333.*
2. Abhari Payman. *The investigation of lateral extrusion process using finite element simulation. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology (IJRASET). – August 2017. – Volume 5. – Issue VIII. – p. 1703–1707. – ISSN 2321-9653.*

**Islam MD Muzahidul, Shkvar Ye. (advisor), E. Shiju** (*College of Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua, China*)

## **THE EXPERIENCE OF USING PIV MEASUREMENTS IN DIMPLES WITH BLOWING THROUGH THEIR CURVED SURFACE**

***Abstract:** The article explores the use of Particle Image Velocimetry (PIV) measurements on dimpled surfaces, focusing on complex flow patterns. It uses advanced PIV techniques to capture detailed velocity fields, providing insights for optimizing aerodynamic performance in engineering designs with curved dimples and controlled blowing through their surface.*

***Анотація:** У статті висвітлюється використання технології вимірювання поля швидкості на основі аналізу зображень малесеньких частинок, якими засівається потік (PIV) на поверхнях з локальними заглибленнями – лунками, приділяючи особливу увагу складним схемам течії. Використовуються передові технології PIV вимірювань для отримання докладних полів швидкостей, що дозволяє оптимізувати аеродинамічні характеристики в інженерних конструкціях з вгнутими заглибленнями і контрольованим вдуванням через їх поверхню.*

### **1. INTRODUCTION**

The study of PIV measurements in this unique setting offers valuable information for engineers and scientists and could potentially pave the way for innovative solutions and advancements in fields where fluid dynamics play a crucial role. Dimples, often associated with golf balls and certain aerodynamic surfaces, have been known to alter the flow characteristics around objects. The addition of blowing through the curved surfaces of these dimples introduces an innovative parameter. Understanding how this manipulation influences the flow patterns can have profound implications for industries such as aviation, automotive design, and energy production.

### **2. EXPERIMENTAL SETUP**

We used a transparent flat plate measuring 200\*300\*5 (Fig. 1) mm for the experiment. Five dimples measuring 60\*30\*3 mm are carved. Three dimples have been modified so that the blowing feature can be utilized. One has a series of small holes running along the midplane, and the second one has two sets of small holes with a gap of 5mm between each pair of holes. The other one has two sets of big holes separated by a 4mm space. Two plates, which are connected to a compressor via a tube, were then compressed using double-sided thick tape. When the compressor was turned on, air was forced onto the flat plate through the modified dimples at a certain pressure. We were able to see how various hole configurations influenced the pressure and airflow distribution on the plate due to the blowing feature.

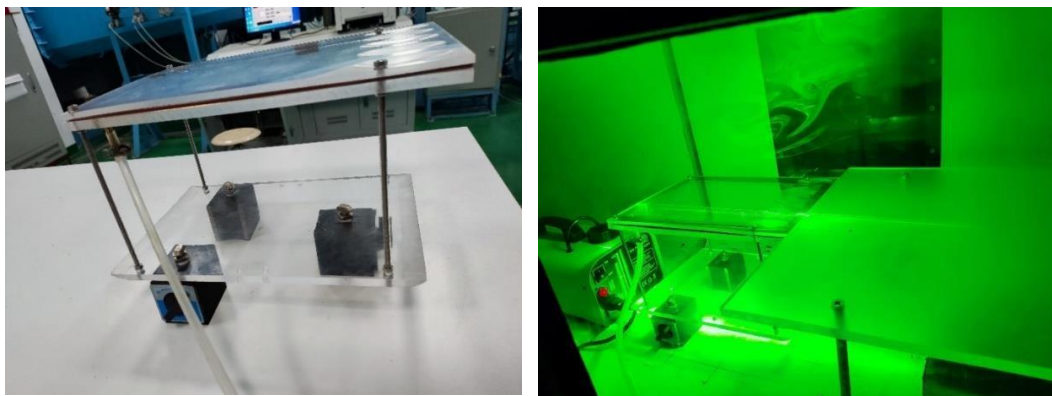


Fig. 1: Experimental model and testing adjustment.

We use a wind tunnel (Fig. 2) certified by Chongqing Lantian Co., Ltd. that has two test sections with an octagonal shape. The tunnel has a high-speed flow area of 600\*600mm with a speed of 60 m/s and a low-speed flow area of 1050\*1050mm with a speed of 20 m/s. The turbulence intensity level of flow homogeneity is 0.02 percent in the low-velocity region and 0.03% in the high-speed zone. La Vision Co. developed a time-resolved PIV system for ZJNU College of Engineering in 2018 using an OTS-1100X3 oil-free air compressor with a nominal volume flow of 300 L/min and a rated exhaust pressure of 0.7 MPa. The compressor and fog generator are used for blowing purposes.



Fig. 2: Compressor and fog generator.

### 3. EXPERIMENTAL RESULTS

The initial results (Fig. 3) show the presence of blowing inside a dimple. Then we continue to run the experiment under three different conditions. For the first experiment, we used 3 m/s wind velocity and then 10 m/s. For the third experiment, we used a wind velocity of 20 m/s. The wind velocity was gradually increased to observe the effects on the results. The blowing speed was medium throughout the experiment. The results we obtained in the vertical section of the developed flow are presented below.

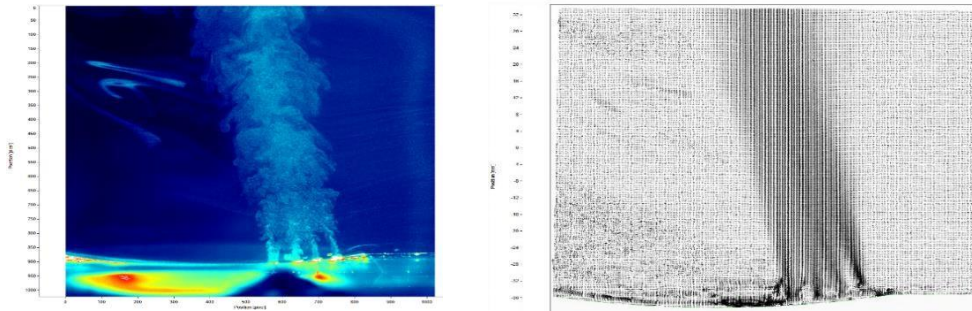


Fig. 3: Flow visualization for blowing inside dimple.

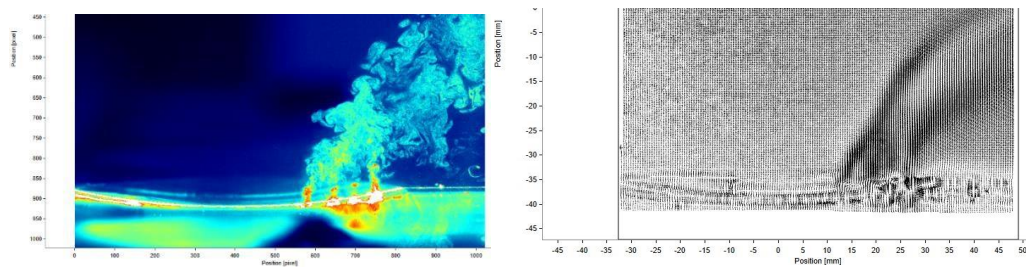


Fig. 4: Flow visualization for wind speed 3m/s.

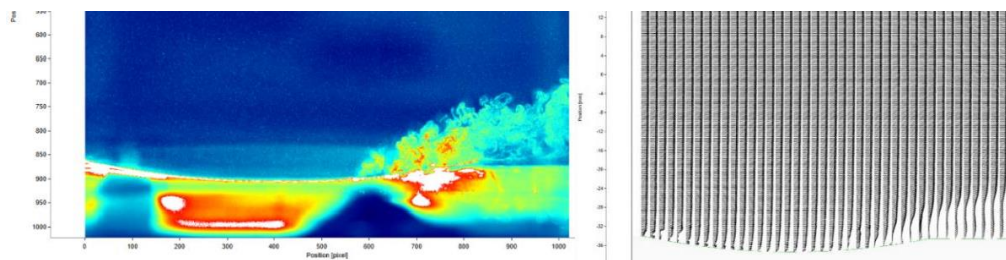


Fig. 5: Flow visualization for wind speed 10m/s.

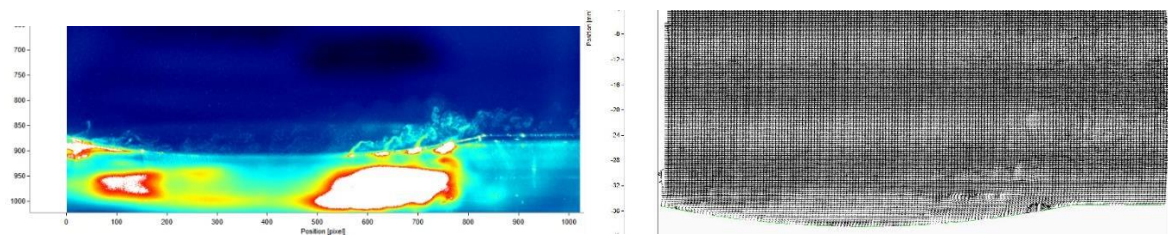


Fig. 6: Flow visualization for wind speed 20m/s.



Fig. 7: An experimental model undergoing PIV assessment.



#### 4. BRIEF INTRODUCTION TO THE RESEARCH PROJECT

This project will be executed with multiple combinations of blowing holes inside a dimple. The result varies depending on the diameter of the blowhole as well as the position of these holes. By experimenting with different types of dimple structures and blowing hole configurations, we hope to identify the optimal design that can be further studied and potentially implemented in various industries. This research will provide valuable insights into the effects of dimples on airflow and may lead to advancements in aerodynamic technology.

#### 5. CONCLUSION

The preliminary result shows promising findings for the overall efficiency and effectiveness of the blowing features inside the dimple. This research has the potential to significantly improve the aerodynamics of high-speed trains, ultimately leading to reduced drag and increased speed. Further studies will establish the right combination of the dimple and the blowing hole to enhance the most optimal performance.

#### REFERENCES

1. C. M. J. Tay, B. C. Khoo and Y. T. Chew, *Mechanics of drag reduction by shallow dimples in channel flow*. <https://doi.org/10.1063/1.4915069>, 16 March 2015
2. Federica Gattere, Alessandro Chiarini and Maurizio Quadrio, *Politecnico di Milano, Dimples for skin-friction drag reduction: status and perspectives*, Dept. of Aerospace Science and Technologies, *Fluids* 2022, 7, 240, [doi.org/10.3390/fluids7070240](https://doi.org/10.3390/fluids7070240)
3. Hermann Lienhart, Michael Breuer, Cagatay Koksoy, *Institute of Fluid Mechanics, Drag reduction by dimples? – A complementary experimental/numerical investigation*, 2008, *International Journal of Heat and Fluid Flow*
4. J. H. Ng, R. K. Jaiman, T. T. Lim, C. M. Tay B. C. Khoo, *Geometric Effects of Shallow Dimples in Turbulent Channel, Flows at  $Re \approx 180$ : A Vorticity Transport Perspective*. February 2020, *Flow Turbulence and Combustion*, DOI:10.1007/s10494-020-00112-6
5. J. P. Panda, J. Handique, H. V. Warrior, *Mechanics of drag reduction of an axisymmetric body of revolution with shallow dimples*, [sagepub.co.uk/journalsPermissions.nav](https://sagepub.co.uk/journalsPermissions.nav)
6. M. van Nesselrooij, L. L. M. Veldhuis, B. W. van Oudheusden, F. F. J. Schrijer *Drag reduction by means of dimpled surfaces in turbulent boundary layers*, *Experiments in Fluids* (2016) 57:142, – 14p. DOI 10.1007/s00348-016-2230-9
7. Olaf Van Campenhout, Michiel Van Nesselrooij, Leo Veldhuis, Bas Van Oudheusden, Ferdinand. Schrijer, *Flow visualization over drag-reducing dimpled surfaces in turbulent boundary layers using Particle Image Velocimetry*. 18th International Symposium on the Application of Laser and Imaging Techniques to Fluid Mechanics At: Lisbon, Portugal (2016)
8. Xian Li, Mengmeng Du, and Fengquan Zhong, *Effect of dimple depth on turbulent flow and heat transfer of kerosene in the rectangular duct*, State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, [doi.org/10.1007/s10409-021-09010-x](https://doi.org/10.1007/s10409-021-09010-x)

**Iwona Cieřlik** (*Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, Polska*).

## THE LABORATORY OF INNOVATIVE MACHINING TECHNOLOGIES IS OPEN

**Анотація:** *Лабораторія інноваційних технологій обробки (LITO) на факультеті лісового та деревообробного машинобудування, відкрита у березні цього року, є передовим освітньо-дослідницьким простором. Оснащена найновітнішими технологіями обробки деревини вартістю майже 1 мільйон євро, лабораторія пропонує унікальні можливості для студентів, дослідників та підприємців у галузі верстатів, програмування та промислової цифровізації. Вона оснащена передовим обладнанням для автоматизації та цифровізації, адаптованим до стандартів Індустрії 4.0, включаючи п'ятиосьові центри з числовим програмним керуванням та роботизовані обробні центри. LITO сприяє освіті, науково-дослідницькій роботі та співпраці з промисловістю, забезпечуючи студентам можливість розвивати інноваційні проекти та здобувати практичний досвід. Лабораторія також відкрита для зовнішніх компаній для тестування нових технологій і розробки інновацій на промисловому рівні, стимулюючи співпрацю та обмін знаннями між академічним сектором і підприємцями.*

**Abstract:** *The Laboratory of Innovative Processing Technologies (LITO) at the Faculty of Forestry and Wood Technology, opened in March this year, is an advanced educational and research space. Equipped with the latest woodworking technologies valued at nearly EUR 1 million, the laboratory offers unique opportunities for students, researchers, and entrepreneurs in the fields of machine tools, programming, and industrial digitalization. It features cutting-edge equipment for automation and digitization, adapted to Industry 4.0 standards, including five-axis centers with numerical control and robotic processing centers. LITO facilitates education, research, and industry collaboration, providing students with the opportunity to develop innovative projects and gain practical experience. The laboratory is also open to external companies for testing new technologies and developing innovations at the industrial level, encouraging cooperation and knowledge exchange between the academic sector and entrepreneurs.*

The Laboratory of Innovative Processing Technologies (LITO) of the Faculty of Forestry and Wood Technology, which opened on March 15 this year, is a modern educational and research space, equipped with the most modern woodworking technologies available on the market. This groundbreaking venture will enable students, researchers and entrepreneurs to gain unique experience in the field of machine tools, programming and industrial digitalization.

The value of the equipment in the Laboratory reaches almost EUR 1 million, and its equipment will be regularly replaced with the latest models, providing users with access to the latest technological solutions.

The laboratory is equipped with state-of-the-art machines, devices and tools for processing wood and wood-based materials, from world leaders in their production. Machines at LITO are characterized by a high degree of automation, numerical control and adaptation to the latest digitalization standards related to Industry 4.0. "The equipment includes, among others: a five-axis numerically controlled center, an automatic transverse optimizer, a four-sided planer, a numerically controlled narrow surface gluer and a robotic machining center with a six-axis industrial robot. It sounds complicated, but it is equipment of the highest standard that not only meets current technical requirements, but is also ready to

meet the challenges of the industry of the future," says Dr. Eng. Bartosz Pałubicki from the Department of Machine Tools and Fundamentals of Machine Design.



LITO will have an educational function, enabling students of the Poznań University of Life Sciences to acquire knowledge about the most modern machine tools, their design, control, programming and operation. Students will have the opportunity to experiment with robot programming, learn about industrial processes and collect production data. The laboratory is also a place for carrying out research and development work, which will include engineering and master's theses and projects of student scientific groups.

The laboratory was created thanks to the cooperation of the Faculty of Forestry and Wood Technology of the University of Applied Sciences with leading companies providing solutions for the wood industry. The agreements cover not only the use of modern technologies at LITO, but also the involvement of students in research and development work. Future wood technology specialists will have the opportunity to work on innovative projects, developing their skills and gaining practical experience.

The Laboratory of Innovative Machining Technologies is also a place where external companies will be able to take advantage of training opportunities, test new technologies and develop innovative solutions on an industrial scale. It is an ideal environment for cooperation between the academic sector and entrepreneurs, encouraging the exchange of knowledge and experiences.

**Kandume J., Shkvar Ye. (advisor), E Shiju** (*College of Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua, China*)

## **TECHNOLOGICAL DIFFICULTIES AND FEATURES OF CONDUCTING PIV MEASUREMENTS NEAR A NON-FLAT STREAMLINED SURFACE**

***Анотація:** Статтю присвячено розгляду технологічних труднощів та особливостей, а також надані ідеї та рекомендації щодо того, як подолати проблеми та оптимізувати PIV вимірювання поблизу неплоських обтічних поверхонь, оскільки дослідники, як правило, систематично зіштовхуються з цими аспектами. Висвітлені питання використання різних матеріалів, технологій виготовлення моделей, розташуванням лазера/камери та методами обробки зображень, щоб покращити точність вимірювань та зменшити негативний вплив проблем, обумовлених віддзеркаленнями та геометричною складністю поверхні.*

***Abstract:** The article would likely delve into these technological difficulties and features in more detail, providing insights and recommendations on how to overcome challenges and optimize the PIV measurements near non-flat streamlined surfaces, researchers would typically systematically investigate these aspects. They might experiment with different materials, manufacturing methods, laser/camera positions, and image processing techniques to optimize measurement accuracy and mitigate challenges associated with reflections and surface complexities.*

### **INTRODUCTION**

It's important to note that the specific details and approaches would depend on the objectives of the study, the flow conditions, and the available resources. Conducting pilot experiments and consulting existing literature on PIV techniques near non-flat surfaces can provide valuable insights and guidance in designing and executing such measurements.

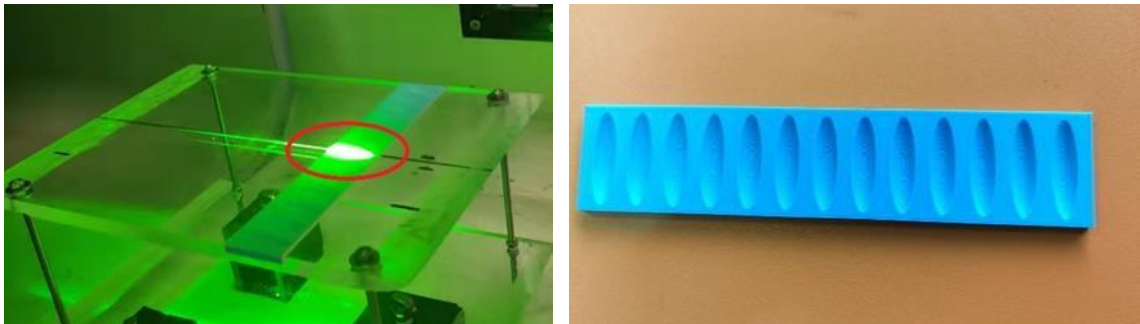
Particle Image Velocimetry (PIV) measurements near non-flat streamlined surfaces face several technological challenges. These include surface geometry, laser sheet placement, particle seeding, and image distortion. Surface geometry can introduce flow disturbances and complex flow patterns, requiring understanding. Laser sheet placement can be challenging due to surface curvature, requiring adjustments and additional optical components. Particle seeding can be affected by surface geometry, requiring careful selection of particle size and concentration. Image distortion can occur due to varying optical path lengths, requiring correction techniques. Data analysis can be more complex than in flat or simple geometries, requiring advanced data processing techniques. Techniques like adaptive PIV or alternative methods like Stereo PIV or Tomographic PIV can help overcome these challenges.

### **1. INFLUENCE OF REFLECTIONS**

When conducting PIV measurements near a non-flat streamlined surface, reflections can be a significant challenge. These reflections can distort the images

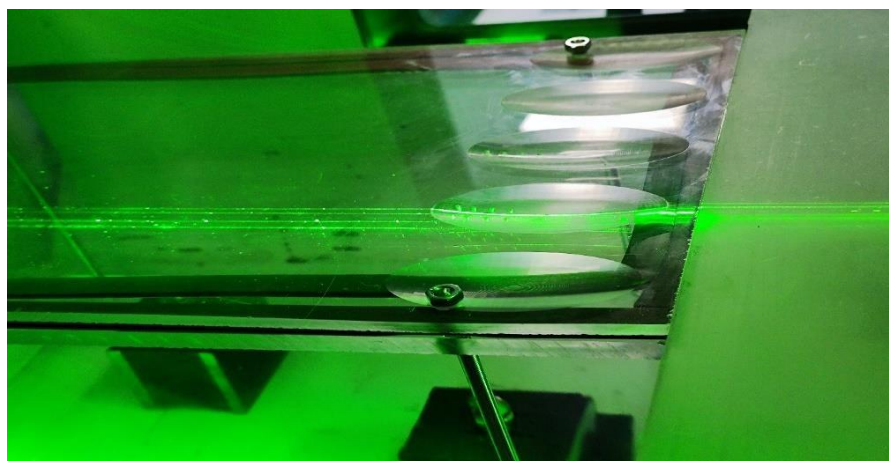
captured by the camera and interfere with the accuracy of the measurements. Minimizing or mitigating reflections is crucial for obtaining reliable data.

Reflections can occur when the laser beam or camera captures light that bounces off the surface being studied (Fig. 1). These reflections can interfere with the clear visualization of the tracer particles and hinder accurate velocity measurements. To mitigate reflections, anti-reflective coatings can be applied to the surface or optical components. Careful positioning and angling of the laser beam and camera can also help minimize unwanted reflections. Additionally, using polarization techniques can help reduce the impact of reflections by selectively filtering out polarized light.



*Fig. 1: Blue dimpled insert for initial experiment and it has highest degree of reflection which doesn't allow to see the inside of the curvature of the dimple.*

Clear materials, like Acrylic or glass and certain plastics, have lower levels of reflection compared to opaque materials due to their optical properties and light interaction (Fig. 2). Clear materials transmit light, while the amount is reflected back, depending on their refractive index and surface characteristics. Opaque materials have a higher refractive index mismatch with air, resulting in more light being reflected at the air-material interface. However, even clear materials can still exhibit some degree of reflection, especially at certain wavelengths or angles of incidence.



*Fig. 2: Clear material chosen after realizing that the degree of reflection was difficult to avoid completely.*

## **2. THE CORRECT CHOICE OF THE POSITION OF THE FLAT LASER BEAM, POSITIONING OF LASER BEAM AND CAMERA:**

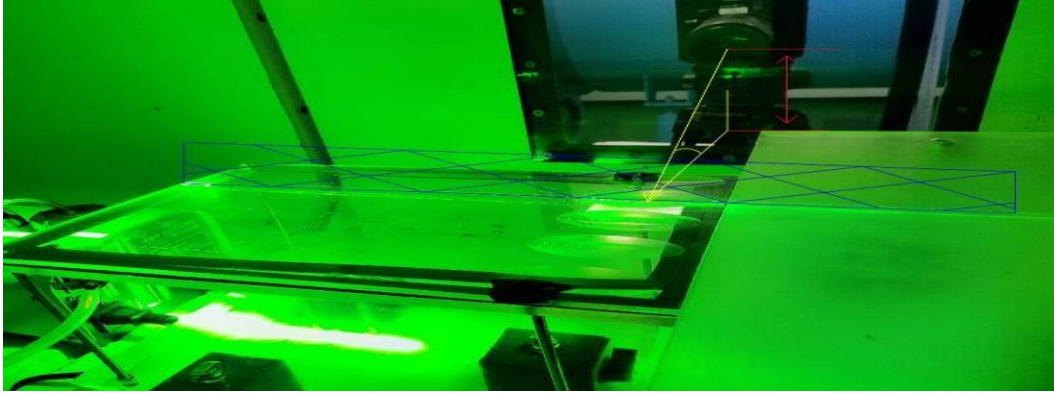
The precise positioning of a laser beam and camera is crucial for accurate PIV measurements. The laser beam should intersect with the flow field of interest, while the camera should capture clear images without obstruction or interference. To visualize the depth of a dimple curvature, position the laser sheet and camera at an inclined angle, perpendicular to the tangent of the dimple's surface. This ensures uniform illumination and captures variations in lighting and shadows. Adjustments may be needed based on the dimple's properties, distance, laser properties, camera settings, and image processing techniques. To determine the optimal angles, consider the dimple's shape, size, material, and potential challenges in capturing its features. Determine the type of laser sheet and its characteristics, and set up an experimental setup. Capture and evaluate data, adjust angles incrementally, and analyze results. Iteratively optimize the setup to provide the most informative visualization of the dimple's depth. Finally, fine-tune the positions of the laser sheet and camera within that range, making small adjustments until the desired visualization quality is achieved.

## **3. CAMERA WHEN MEASURING INSIDE A DIMPLE**

Proper positioning of the laser beam and camera is crucial for successful PIV measurements near a non-flat streamlined surface. The laser beam should be aligned to intersect the flow field in a way that allows clear visualization of the tracer particles and minimizes the influence of surface features. The camera should be positioned to capture the desired region of interest without obstructions or excessive reflections. Trial and error, as well as careful adjustment, may be necessary to optimize the positioning for each specific measurement setup.

To accurately measure inside a dimple using a camera, consider the following guidelines: angle of view, lighting, depth of field, distance, stability, calibration, and image processing. Position the camera at an angle that allows a clear view of the dimple depth, adjust the tilt and rotation to ensure visibility (Fig. 3).

Use additional lighting sources to reduce shadows and reflections if necessary. Adjust the aperture settings to maintain focus and ensure accurate measurements. Secure the camera with a tripod for stability. Calibrate the camera before measuring to ensure accurate results. Experimentation and adaptation to specific scenarios may be necessary.



*Fig. 3: set-up which allowed us to capture the depth of the dimple.*

#### **4. THE EXPEDIENCY OF CHOOSING A TRANSPARENT SURFACE**

Transparent surfaces are advantageous for Particle Image Velocimetry (PIV) measurements due to their ability to visualize flow patterns, streamline structures, and enable cross-sectional views. They also facilitate the use of advanced visualization techniques like index of refraction matching, enhancing accuracy and measurement capabilities. Transparent materials like glass or acrylic offer better visualization of flow patterns near the surface, allowing researchers to observe flow from different angles and depths. These surfaces also facilitate the use of advanced visualization techniques, such as index of refraction matching, to enhance accuracy and measurement capabilities.

Transparent surfaces are also advantageous for PIV measurements due to their ease of laser sheet placement, reduced image distortion, and unobstructed visualization. This allows for a more straightforward setup, reducing the chances of misalignment and allowing for more accurate velocity measurements. They also enable simultaneous flow and surface visualization, making them useful for studying phenomena like boundary layer development, flow separation, or vortex shedding near the surface.

However, transparent surfaces may not always be suitable for every application, and factors such as research objectives, flow nature, and availability of transparent materials should be considered when choosing a surface type for PIV measurements.

#### **5. EXPERIENCE USING DIFFERENT MATERIALS AND METHODS OF MANUFACTURING THE MODEL.**

The choice of materials and manufacturing methods for the model can influence the accuracy and reliability of the PIV measurements. Different materials may have varying optical properties and surface characteristics, which can impact the quality of the data obtained. Experience with different materials

and manufacturing techniques can help identify the most suitable options for specific experimental requirements.

Experience with different materials and manufacturing methods is beneficial when working with non-flat streamlined surfaces. The choice of material can impact the optical properties, surface roughness, and transparency of the model. Different manufacturing techniques, such as 3D printing, molding, or machining, can yield surfaces with varying levels of smoothness and accuracy. Understanding how different materials and manufacturing methods influence the measurement process helps in selecting the most appropriate combination for the specific study, ensuring accurate results, and minimizing potential artifacts.

## **6. MEASUREMENT ACCURACY**

Measurement accuracy is a critical factor in PIV experiments. Factors such as the resolution of the camera, the size and shape of the tracer particles, particle distribution, and image processing techniques all contribute to the accuracy of the velocity measurements. Ensuring high measurement accuracy requires careful calibration, proper image acquisition settings, and robust data processing methods.

Achieving high measurement accuracy in PIV experiments involves several considerations. It starts with selecting an appropriate seeding density of tracer particles and optimizing their size and distribution for the specific flow conditions. Calibration procedures should be followed to relate the pixel positions in the images to physical distances accurately. Image processing techniques, such as correlation algorithms, should be carefully implemented to track the particle displacements accurately. Post-processing methods, like interpolation and filtering, can be employed to enhance the accuracy of the velocity field. Furthermore, validation and uncertainty analysis should be conducted to assess the reliability and limitations of the obtained results.

## **7. DISCUSSION AND CONCLUSION**

Clear materials have less reflections than opaque ones, but factors like refractive index, angles of incidence, and anti-reflection coatings which optimize refractive index transition, reducing reflection and improving light transmission in clear materials, thereby reducing unwanted glare or ghost effects must be considered.

Transparent surfaces for PIV measurements speed up the process, reduce distortion, and enable simultaneous flow and surface observations.

Camera adjustments ensure visibility, detail, focus, depth of field, lighting optimization, and balance stability, with distance varying depending on dimple and measurement requirements.



## REFERENCES

1. Wenwu Zhou, Yu Rao, Hui Hu, *An Experimental Investigation on the Characteristics of Turbulent Boundary Layer Flows Over a Dimpled Surface.*
2. Baojie LIU, Xiaobin XU, Xianjun YU, Guangfeng AN, *Method for utilizing PIV to investigate high curvature and acceleration boundary layer flows around the compressor blade leading edge. Research Institute of Aero-Engine, Beihang University, Beijing 1 100083, China, National Key Laboratory of Science & Technology on Aero-Engine Aerothermodynamics, Beihang University, Beijing 100083, China School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China, <https://doi.org/10.1016/j.cja.2022.04.013>*
3. *Particle image velocimetry for combustion measurements: Applications and developments, Fang CHEN, Hong LIU, School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*
4. *Uncertainty quantification in particle image velocimetry, A Sciacchitano.*

**Kuznetsov Yu.M., Osadchiy O. I.** (National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine)

## EVOLUTION OF THE MAIN MOVEMENT DRIVE OF A LATHE)

**Abstract:** The article illustrates how, taking into account the achievements in science and technology, the kinematic chain from the driving force (engine) to the executive body (spindle) was shortened and became the shortest in the form of a motor-spindle. On the examples of lathes, places of possible limitation of spindle rotation frequencies are highlighted. A self-acting motor-spindle, which has rotary and translational motion, is proposed.

**Анотація:** У статті показано, як з урахуванням досягнень науки і техніки кінематичний ланцюг від рушійної сили (двигуна) до виконавчого органу (шпинделя) був скорочений і став найкоротшим у вигляді мотор-шпинделя. На прикладах токарних верстатів виділено місця можливого обмеження частот обертання шпинделя. Запропоновано самодіючий мотор-шпиндель, який має обертальний і поступальний рух.

### 1. INTRODUCTION

One of the main units of machine tools, which provides form-forming movements in the process of cutting on lathes and other machines with rotary movement of the part or tool, has always been the spindle unit, as the main movement drive. The entire history of the development of machine tools, starting from the simplest times, from the Stone Age to modern times, is connected with the evolution of its individual mechanisms, nodes, layouts, and control systems. According to the laws of development of technical systems (TS), the life cycle is described by an S-shaped curve, where the ordinate is the technical and economic indicator (an important characteristic), and the abscissa is time (years). Some parts of the TS develop unevenly, which is influenced by the achievements of mankind in science and technology. It is now impossible to imagine the life of Man on earth and beyond its borders without electricity. Therefore, the future of new generation machines cannot be imagined without using the energy of electromagnetic forces[2].

#### 2. Advantages of the electric drive.

The process of using electricity took place in parallel with the progress of methods of generating and transmitting electricity over a distance, with successes in the creation of electric motors and in the development of rational electric drive systems. The electric drive has a high efficiency, since it is possible to directly obtain rotary motion from its shaft, and the losses are minimal at the same time as labor productivity increases. In addition, with the introduction of electric motors, it became possible for the first time not only to provide any machine with its own engine, but also to put a separate drive on each of its nodes. The electric car has come a long and difficult way, passing more than a dozen years before it was introduced into production everywhere and, in particular, in the drives of the main movement. During the evolution of SHV, the kinematic chain from the energy source to the final link (part or tool) was shortened and turned into a single node

that unites the energy source, energy converters, transmission-amplifying circuits and the executive body - a spindle with a clamping device for the part or tool in one whole (Fig. 1). These became electric spindles, which were recently named motor-spindles (M-S) [6,7]. M-S is considered as one of the main elements representing the machine and becomes a key object on the way to the transition to smart production, where intelligent machines, systems and networks are able to independently exchange information and respond to it, manage industrial production processes. Structural and functional adaptation of machines and mechanisms to the requirements of automated digital technologies in the context of the challenges of the fourth industrial revolution "Industry 4.0" [1] and the approach of the fifth "Industry 5.0" is a key direction on the way to transition to smart manufacturing. In the process of forming, working translational movements are performed by feed mechanisms, which are driven by their energy source. Thanks to the universal genetic operator of crossing [6], it was possible to move to hybrid systems [10], which became the object of self-acting research data of M-S. The process of using electricity took place in parallel with the progress of methods of generating and transmitting electricity over a distance, with successes in the creation of electric motors and in the development of rational electric drive systems (Fig.1) [4].

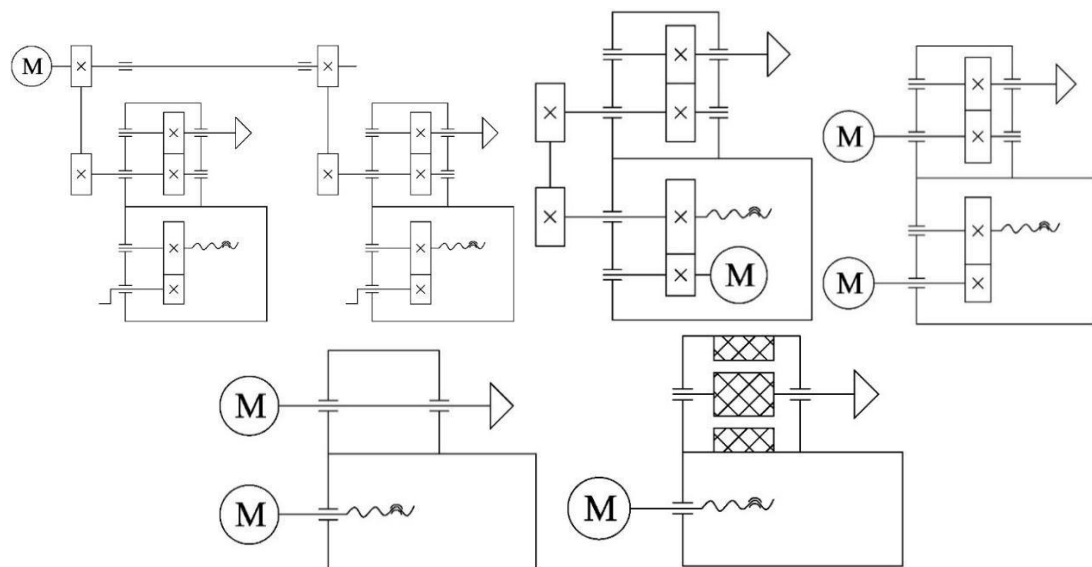


Fig. 1. The evolution of the electric drive of the main movement on the example of lathes: a- group for several machines; b – general for one machine with stepped gears; c- individual with a stepped box; d) - c- individual with stepless regulation; e) - motor-spindle of ratio

### 3. Sources of spindle speed limitation.

According to the global trends in the development of machine tool construction, great attention is paid to increasing the productivity and quality of processing while reducing costs, which reduces the cost of production. Turning performance can be expressed through volumetric productivity:  $Q_o = V S t$ ,  $m^3/min.$ , (1) where  $V$  is the cutting speed;  $S$  – feed for 1 revolution of the part;  $t$

is the cutting depth. The quality of parts manufacturing, which is ensured during finishing operations, is characterized by dimensional stability, deviation of the geometric shape, waviness and roughness of the surface. The latter is determined by the height of the irregularities and depends on the feed  $S$  and the radius  $r$  of the rounding of the cutter [3]:  $R_z = S^2/8r$ . (2) It follows from dependencies (1) and (2) that in order to increase the productivity and quality of processing parts, it is necessary to increase the cutting speed  $V$  at the expense of the spindle rotation frequency and reduce the feed  $S$ . The increase in the speed of the spindle assemblies of the lathe group machines is restrained by a number of factors, among which the following 5 can be singled out (Fig. 2). The drive of the main movement (source 2) with a short kinematic chain in the form of a motor-spindle (Fig. 1, e) of various manufacturers is becoming common. The rotation frequency of clamping cartridges (source 3) is limited by the centrifugal forces  $F_w$  of unbalanced elements (mainly clamping cams) with an open power circuit [7]:

$$F_w = m w^2 R_k, \quad (1)$$

where  $m$  is the mass of the cam;  $w$  – angular frequency of rotation of the spindle;  $R_k$  is the distance from the center of gravity of the cam to the axis of rotation of the spindle. Even with the introduction of centrifugal force compensation [4], the maximum rotation frequency is limited by the strength of the elements of the cartridge and, in particular, its case, which can explode like a bomb.

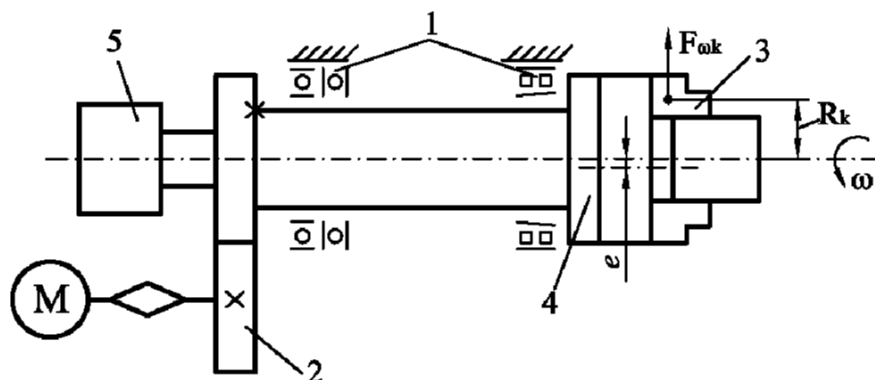


Fig. 2. Spindle assembly of a lathe with indication of the sources-places of rotation frequency limitation: 1-supports; 2-transmission of revolutions from the engine to the spindle; 3-clamping cartridge; 4-system "spindle-cartridge-part" with eccentricity (imbalance)  $e$ ; 5-clamp drive

The imbalance of the spindle with the eccentricity of the shift  $e$  of the mass  $M$  of the clamping chuck (source 4) can lead to vibrations and destruction of the parts of the chuck and the cutting tool due to the occurrence of unbalanced loads due to additional forces  $P_g$  and moments  $M_g$ :

$$P_g = M w^2 e \quad (3)$$

$$M_g = P_g e = M w^2 e^2. \quad (3)$$

In the presence of unbalanced elements in the clamp drive (source 5), for example, with geometric locking, the energy consumption may change (increase

or decrease) on the clamp-unclamp and disrupt the reliable operation of the entire clamping mechanism.

#### 4. The proposed motor-spindle solution.

The results of structural and genetic analysis [3] show that the current level of technical implementation of M-S characterizes them as a complex EM system that integrates components of different physical nature. Modern designs of drive spindle assemblies can combine dozens of various subsystems and assemblies, keeping the actual energy and genetic core – the electric motor – unchanged. Complex EM systems, the structures of which combine subsystems of different genetic nature, have the status of intersystem hybrids [3,5].

The appearance of the manufactured self-acting M-S horizontal version is shown in fig. 3. To study the stiffness characteristics of the high-speed self-acting M-S, an experimental stand (Fig. 4) was created on the basis of a vertical drilling machine, installed in the laboratory of the "Machine Design" department of NTUU "KPI named after Igor Sikorsky".

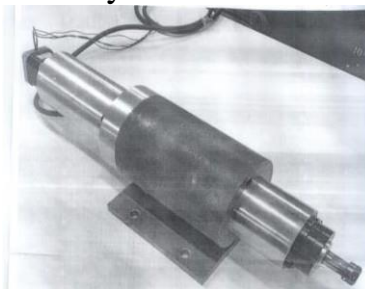


Fig. 3. Modular design of the self-acting M-S horizontal execution



Fig. 4. Stand for experimental studies of self-acting M-S

### 5. Conclusions

Using the theory of evolution of technical systems, the process of improving the drive of the main movement of metal-cutting machines was tracked and a self-acting motor-spindle was proposed, the efficiency of which was experimentally confirmed.

### REFERENCES

1. *Yu.N. Kuznetsov Challenges of the fourth industrial revolution "Industry 4.0" to the scientists of Ukraine // journal "Bulletin of the Kherson National Technical University", No. 2(61), 2017.-p.67-75.*
2. *Kuznetsov Yu.M., Pridalnyi B.I. New views and approaches to the creation of clamping mechanisms of machine tools with an electromechanical drive. Section in col.*

*Monographs. Sherman Oaks, California (USA), 2022.-70 pages. doi: 10.51587/9798-9866-95914-2022-010-119-180*

3. *Shynkarenko V.F. Fundamentals of the theory of evolution of electromechanical systems / V.F. Shinkarenko. - K.: Naukova dumka, 2002. - 288p.*

4. *B.I. Prydalnyi, Y.M. Kuznetsov Synthesis of structures of spindle units with electromechanical actuators of clamping mechanisms as complex combined axisymmetric system //Journal of the Technical University of Gabrovo, vol.60, 2020. p.p.66-69.*

5. *Hongrui Caoa,□, Xingwu Zhanga, Xuefeng Chenb The concept and progress of intelligent spindles: A review // International Journal of Machine Tools & Manufacture, 112 (2017), p.p. 21-52*

6. *Kuznietsov Yurii, Oliinyk Kateryna Evolution of spindle assemblies of machines based on motor-spindle //International Scientific Journal, "Machinens. Technologies. Materials", issue 2022.-p.p.150-154.*

7. *Oliinyk K.O. Operability analysis of spindle-motor hybrid electromechanical systems //Mech. Adv. Technol. Vol.5, No.1, 2021, pp. 89-96.*

**Krapić A., Šimunović, S., Milinović A.** (Croatia, Slavonski Brod, Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod, University of Slavonski Brod)

## THE INFLUENCE OF BORONIZING ON THE ABRASIVE WEAR RESISTANCE OF C15 STEEL

**Abstract:** *The abrasion behaviour of boronized C15 steel was investigated using the pin-on-disc method. The samples boronized at 870 C for 4, 6 and 8 hours were loaded with a test force of 9.81 N and subjected to abrasion with 80 grit sandpaper as a rotating counter body. The wear rate was calculated as mass loss per sliding distance, and the results showed that the samples boronized for 8 hours had the highest abrasion wear resistance. Samples produced from the as-received base material showed the highest wear, while the 4 and 6 hour boronized samples showed approximately the same wear rate at the test distance. The microstructure of the layers obtained was analysed using an optical microscope. The analysis showed the formation of boride layers with pronounced toothness, with thicker layers forming with increasing duration of boronizing.*

**Анотація:** *Поведінка до зносу борованої сталі C15 була досліджена методом штифт-проти-диска. Зразки, боровані при 870 °C протягом 4, 6 та 8 годин, були навантажені тестовою силою 9,81 Н і піддані абразивному зношуванню за допомогою шліфувального паперу з зернистістю 80 як обертового протитіла. Швидкість зношування була розрахована як втрата маси на одиницю пробігу, і результати показали, що зразки, боровані протягом 8 годин, мали найвищу стійкість до абразивного зношування. Зразки, виготовлені з вихідного базового матеріалу, показали найвищий знос, тоді як зразки, боровані протягом 4 та 6 годин, показали приблизно однакову швидкість зношування на тестовій відстані. Мікроструктура отриманих шарів була проаналізована за допомогою оптичного мікроскопа. Аналіз показав утворення боридних шарів з вираженою зубчастістю, при цьому товщі шари формувалися зі збільшенням тривалості борування.*

### 1 INTRODUCTION

Machine elements whose surfaces are in contact and relative motion are subject to wear during operation, so that the wear resistance of the surfaces is often crucial for their long and reliable operation. In order to extend the service life of such parts and thus significantly reduce economic losses, increasing emphasis has been placed on the heat treatment of surfaces in recent years. In surface engineering, numerous surface treatments such as carburizing, nitriding and boriding have been developed to increase wear resistance, reduce the coefficient of friction and improve corrosion resistance [1,2]. Boronizing is a thermochemical surface treatment in which boron atoms diffuse from a boron-containing medium into the surface of the treated part and form a boron-containing surface layer. The resulting surface layer is characterized by exceptional hardness and improves abrasion wear resistance. In addition to abrasion wear resistance, boronizing also improves resistance in acidic environments and corrosion resistance in molten metals [3-6]. Boronizing of steels results in layers that can consist of one Fe<sub>2</sub>B phase or two FeB/Fe<sub>2</sub>B phases.

Although the hardness of Fe<sub>2</sub>B (1400 – 1600 HV) is lower than that of FeB (1800 – 2100 HV), the formation of a single-phase Fe<sub>2</sub>B layer is preferable due to its lower brittleness and lower risk of cracking at the FeB/Fe<sub>2</sub>B interface [7-10]. The aim of this study was to investigate the effects of boronizing on the abrasion wear resistance of C15 steel.

## 2 MATERIALS AND METHODS

To investigate the effect of boronizing on abrasion wear resistance, C15 steel was selected for this study. The samples were boronized at a temperature of 870 °C and for three different durations (4, 6 and 8 hours), so 6 samples with dimensions Ø 6 x 20 mm were machined (two samples for each boronizing treatment). Boronizing was carried out in Hef-Durferrit Durborid 3 powder in the LHP laboratory furnace without a protective atmosphere. The abrasion wear test was performed with the Taber Abraser device (pin-on-disc method) using 80 grit abrasive paper as a rotating counter body. The sample was held vertically against the rotating counter body and a test force of 9.81 N was applied. The test was performed with up to 100 revolutions of the counter body (corresponding to a sliding distance of 22.5 m), with the samples being weighed after every 10 revolutions (sliding distance of 2.25 m). Before each weighing, the samples were cleaned (washed in water and alcohol) and dried. The mass loss was measured on a Scaltec SPB 32 balance with an accuracy of 0.1 mg. After each weighing, a new abrasive paper with the same grit size as the previous one was used. The wear rate is calculated as mass loss per sliding distance according to:

$$W_r = \frac{\Delta m_t}{d_t} \quad (1)$$

where:

- $W_r$  – wear rate, g/m
- $\Delta m_t$  – mass loss at total sliding distance, g
- $d_t$  – total sliding distance, m.

The boronized samples were also examined using a Leica DM 2500 M light microscope and a Leica Q550 MW imaging solution. Prior to the metallographic examinations, the samples were mounted in cold mounting acrylic resin, sanded with emery paper up to 1000 grit, polished with alumina and etched with 3% Nital.

## 3 RESULTS AND DISCUSSION

### 3.1 Microstructure of boride layers

The microstructure of the layers obtained by boronizing at 870 °C for 4, 6 and 8 h is shown in Fig. 1.



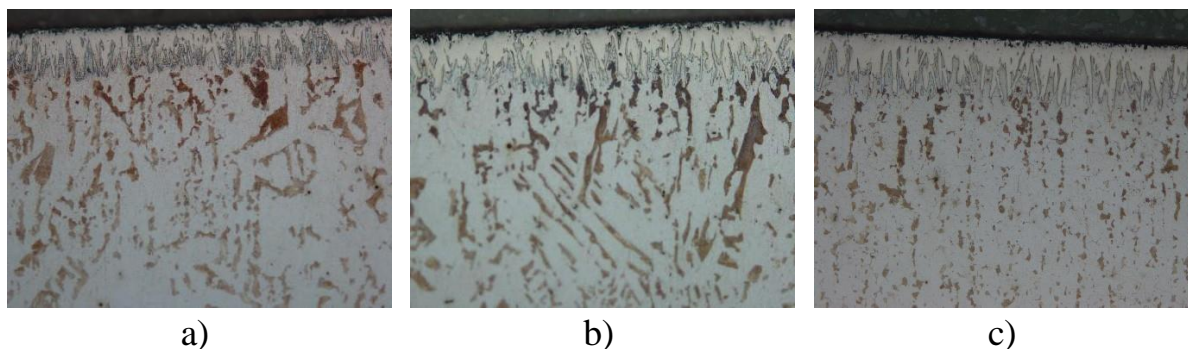


Fig. 1. Microstructure of the boride layer obtained by boronizing at 870 °C, magnification 200:1, a) 4 h; b) 6 h; c) 8 h

It can be seen that the boronizing of C15 steel leads to the formation of boride layers with pronounced toothness. This is consistent with other studies that have confirmed that the toothness of the boride layer is more pronounced in steels with a lower proportion of alloying elements or in unalloyed steels with a lower carbon content. The micrographs also show a higher proportion of pearlite in the diffusion zone. A higher proportion of pearlite is due to an increased proportion of carbon, which is pushed inwards from the surface during the growth of the boride layer. The micrographs in Fig. 1 show that an extension of the boronizing time leads to the formation of thicker layers.

### 3.2 Abrasion wear resistance

Table 1 shows the results of the abrasion wear of the test sample from the base material in the as-delivered condition. Tables 2, 3 and 4 show the abrasion wear results for samples boronized for 4, 6 and 8 h, respectively at 870 °C. In the tables,  $\Delta m$  stands for the mass loss per 10 revolutions (2.25 m), which is calculated as the mean value of two measurements. The wear rates in Tables 1 to 4 are calculated according to (1), where  $\Delta W$  is the wear rate per 2.25 m (10 revolutions), while  $W_r$  is the wear rate over the entire distance traveled. The results in Tables 1 to 4 are also shown graphically in Figs 2 to 5.

Table 1. Test results of abrasion wear for samples made of C15

no.	$d_t$ , m	$\Delta m$ , g	$\Delta W$ , $\times 10^{-4}$ g/m	$m_t$ , g	$W_r$ , $\times 10^{-4}$ g/m
1	2,25	0,0067	29,63	0,0067	29,63
2	4,50	0,0065	28,99	0,0132	29,31
3	6,75	0,0070	30,92	0,0201	29,85
4	9,00	0,0061	27,05	0,0262	29,15
5	11,25	0,0058	25,77	0,0320	28,47
6	13,50	0,0067	29,63	0,0387	28,66
7	15,75	0,0068	30,28	0,0455	28,89
8	18,00	0,0059	26,41	0,0515	28,58
9	20,25	0,0070	30,92	0,0584	28,84
10	22,50	0,0055	24,48	0,0639	28,41

Table 2. Test results of abrasion wear for samples boronized at 870 °C for 4 h

no.	$d_t$ , m	$\Delta m$ , g	$\Delta W$ , $\times 10^{-4}$ g/m	$m_t$ , g	$W_r$ , $\times 10^{-4}$ g/m
1	2,25	0,0017	7,56	0,0017	7,56
2	4,50	0,0013	5,56	0,0030	6,56
3	6,75	0,0019	8,44	0,0049	7,19
4	9,00	0,0017	7,33	0,0065	7,22
5	11,25	0,0010	4,44	0,0075	6,67
6	13,50	0,0032	14,22	0,0107	7,93
7	15,75	0,0028	14,67	0,0140	8,89
8	18,00	0,0059	26,00	0,0199	11,03
9	20,25	0,0033	14,67	0,0232	11,43
10	22,50	0,0050	22,22	0,0282	12,51

Table 3. Test results of abrasion wear for samples boronized at 870 °C for 6 h

no.	$d_t$ , m	$\Delta m$ , g	$\Delta W$ , $\times 10^{-4}$ g/m	$m_t$ , g	$W_r$ , $\times 10^{-4}$ g/m
1	2,25	0,0009	4,00	0,0009	4,00
2	4,50	0,0015	6,67	0,0024	5,33
3	6,75	0,0014	6,00	0,0038	5,56
4	9,00	0,0016	7,11	0,0054	5,94
5	11,25	0,0027	11,78	0,0080	7,11
6	13,50	0,0035	15,56	0,0115	8,52
7	15,75	0,0032	14,00	0,0147	9,30
8	18,00	0,0044	19,33	0,0190	10,56
9	20,25	0,0041	18,22	0,0231	11,41
10	22,50	0,0034	15,11	0,0265	11,78

Table 4. Test results of abrasion wear for samples boronized at 870 °C for 8 h

no.	$d_t$ , m	$\Delta m$ , g	$\Delta W$ , $\times 10^{-4}$ g/m	$m_t$ , g	$W_r$ , $\times 10^{-4}$ g/m
1	2,25	0,0011	4,89	0,0011	4,89
2	4,50	0,0012	5,11	0,0023	5,00
3	6,75	0,0010	4,22	0,0032	4,74
4	9,00	0,0021	9,11	0,0053	5,83
5	11,25	0,0017	7,56	0,0070	6,18
6	13,50	0,0021	9,33	0,0091	6,70
7	15,75	0,0033	14,67	0,0124	7,84
8	18,00	0,0020	8,67	0,0143	7,94
9	20,25	0,0019	8,44	0,0162	8,00
10	22,50	0,0032	14,00	0,0194	8,60

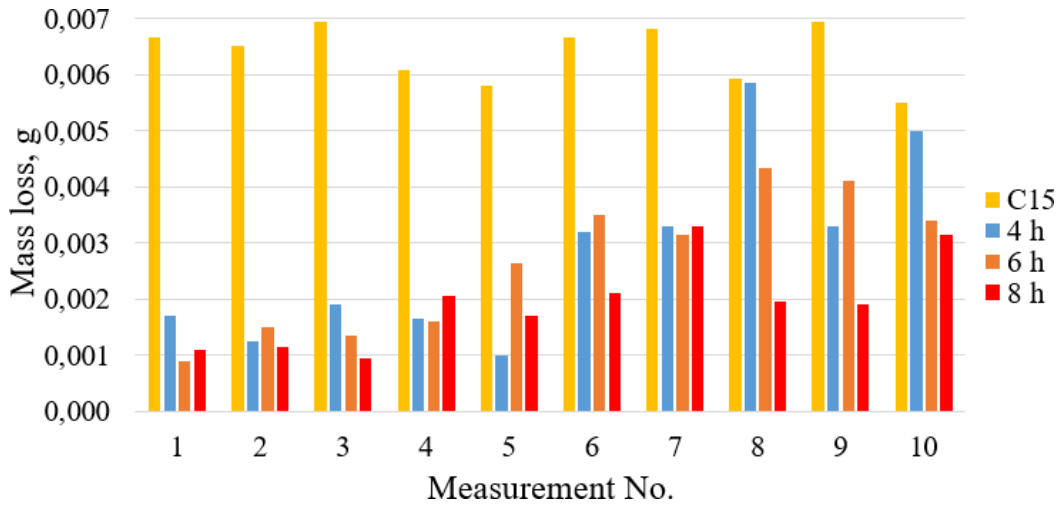


Fig. 2. Average values of mass loss at 10 revolutions for all samples

Fig. 2 shows the average mass losses after each weighing. It can be seen that the samples made from the base material exhibit significantly higher mass losses than the boronized samples. Among the boronized samples, the 8 h boronized samples showed the lowest mass loss after each weighing, while the 6 h boronized samples generally showed less mass loss than the 4 h boronized samples. A similar behaviour can be observed in Fig. 3, which shows the wear rate per total sliding distance.

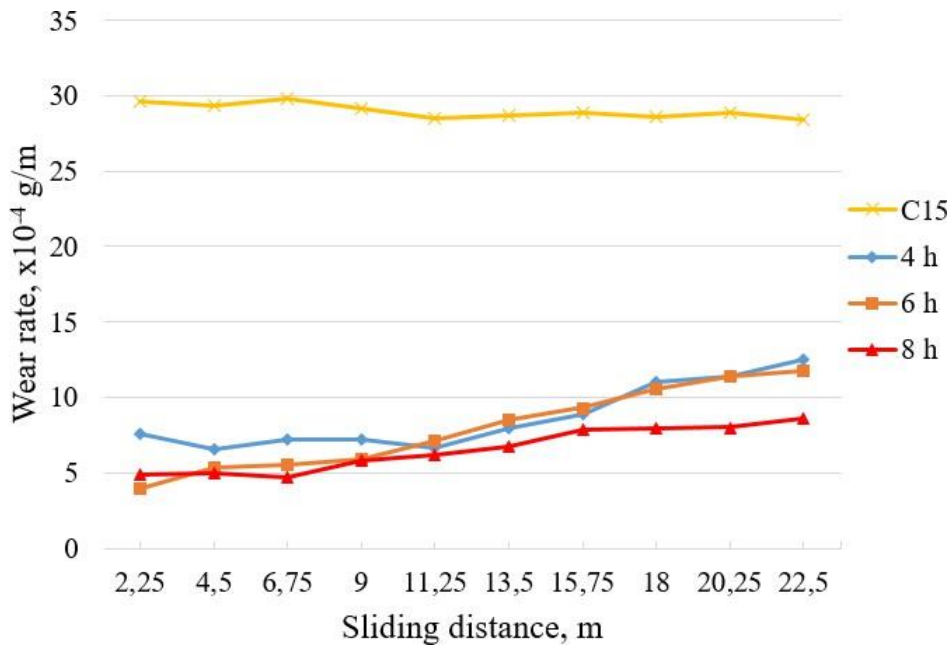


Fig. 3. Total wear rates for all samples

Fig. 4 shows the wear rate per 2.25 m. It can be seen that the base material sample was worn at an almost constant rate (with an average value of  $28.41 \times 10^{-4}$  g/m).

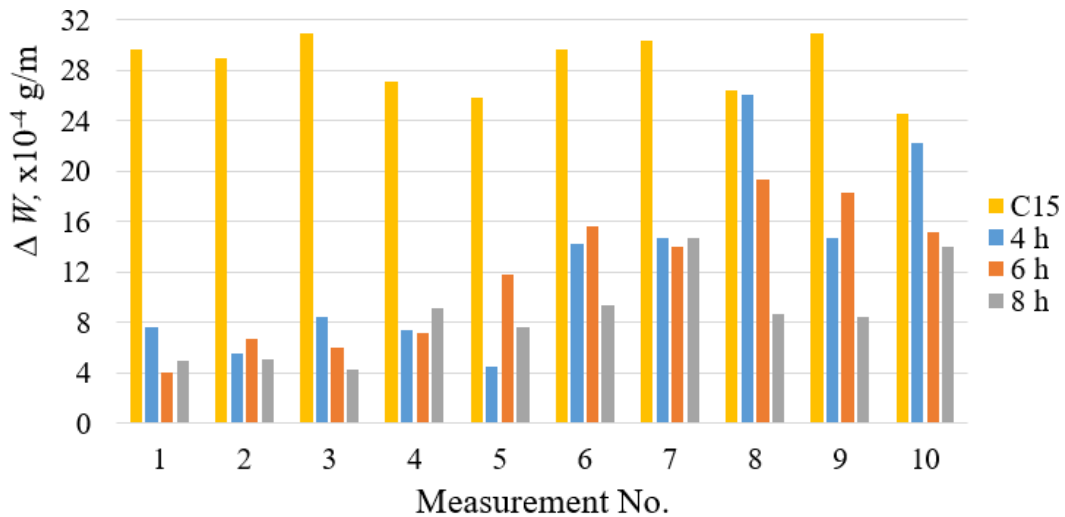


Fig. 4. Wear rates for the total sliding distance

The data in the tables and in Fig. 3 show that the samples boronized for 4 and 6 hours had approximately the same total mass loss over the 22.5 m test distance (0.0282 and 0.0265 g), but the data in Fig. 4 show that the wear rate of the sample boronized for 4 hours was almost the same as that of the base material samples after 18 m test distance. This indicates that the boride layer is practically worn away. In contrast, the sample boronized for 6 hours shows less wear, which means that the layer is not completely worn away. This would mean that if the test were extended, the difference between the mass losses of the 4 and 6 hour boronized samples would be greater, i.e. in favour of the 6 hour boronized sample. The graph also shows that the 8 hours boronized sample degrades more slowly. These results are consistent with the results of the metallographic studies, which showed that prolonging the boronizing led to the formation of thicker layers.

#### 4 CONCLUSIONS

The following conclusions can be drawn from the test results:

- Boronizing of C15 steel resulted in the formation of boride layers with pronounced toothness on all samples, with longer durations leading to thicker layers.
- The abrasion resistance test showed that the samples made from the base material were worn significantly faster than the boronized samples.
- The lowest wear rate was achieved with 8 hours of boronizing. Although the 4 and 6 hour boronized samples showed approximately the same mass loss, the results indicate that the boride layer on the 4 hour boronized sample is almost completely worn away and that the difference between the 4 and 6 hour boronized samples would be greater if the test was extended.

#### REFERENCES

- [1] Meric, C.; Sahin, S.; Backir, B.; Koksal, N.S. Investigation of the boronizing effect on the abrasive wear behavior in cast irons. *Materials & Design*. 2006, 27, 751–757.

- [2] Atik, E.; Yunker, U.; Meriç, C. *The effects of conventional heat treatment and boronizing on abrasive wear and corrosion of SAE 1010, SAE 1040, D2 and 304 steels. Tribology International.* 2003, 36, 155–161.
- [3] Mebarek, B.; Keddam, M. *A fuzzy neural network approach for modeling the growth kinetics of FeB and Fe<sub>2</sub>B layers during the boronizing process. Matériaux & Techniques.* 2018, 106, 603. [CrossRef]
- [4] Jurci, P.; Hudáková, M. *Characterization of Microstructure and Fracture Performance of Boronized H11 Grade Hot-Work Tool Steel. Materials Performance and Characterization.* 2020, 9, 20190086. [CrossRef]
- [5] Carrera-Espinoza, R.; Figueroa-López, U.; Martínez-Trinidad, J.; Campos-Silva, I.; Hernández-Sánchez, E.; Motallebzadehd, A. *Tribological behavior of borided AISI 1018 steel under linear reciprocating sliding conditions. Wear* 2016, 362–363, 1–7. [CrossRef]
- [6] Kaouka, A.; Allaoui, O.; Keddam, M. *Growth kinetics of the boride layers formed on SAE 1035 steel. Matériaux & Techniques.* 2013, 101, 705. [CrossRef]
- [7] Ortiz-Domínguez, M.; Flores-Rentería, M.Á.; Keddam, M.; Elias-Espinosa, M.; Damián-Mejía, O.; Aldana-González, J.I.; Zuno-Silva, J.; Medina-Moreno, S.A.; González-Reyes, J.G. *Simulation of growth kinetics of Fe<sub>2</sub>B layers formed on gray cast iron during the powder-pack boriding. Materials and Technologies.* 2014, 48, 905–916.
- [8] Erdoğan, A. *Investigation of high temperature dry sliding behavior of borided H13 hot work tool steel with nanoboron powder. Surface and Coatings Technology.* 2019, 357, 886–895. [CrossRef]
- [9] Karakaş, M.S.; Günen, A.; Kanca, E.; Yılmaz, E. *Boride layer growth kinetics of AISI H13 steel borided with nano-sized powders. Archives of Metallurgy and Materials.* 2018, 63, 159–165.
- [10] Tabur, M.; Izciler, M.; Gul, F.; Karacan, I. *Abrasive wear behavior of boronized AISI 8620 steel. Wear* 2009, 266, 1106–1112.

**Malgorzata Zakrzewska** (*Universitet Wroslawski, Poland*)

## **PILOT PROJECT BY IPMA “POLSKA YOUNG CREW”**

***Abstract:** IPMA Young Crew Poland completed its pilot project "Polish Student Project Excellence Award" aimed at evaluating student projects according to the IPMA Project Excellence Model. This competition, the first of its kind for students by IPMA Young Crew Poland, sought to acquaint students with the principles of the model and improve future project management. Three projects were recognized in the competition, with the first place awarded to the Neuroinformatics Club from the University of Warsaw. The results were announced on December 14 at an event at the Krakow University of Economics, which served as a platform for exchanging experiences and establishing new contacts among young project managers. The evaluation was conducted by a panel of experts in project management.*

***Анотація:** IPMA Young Crew Poland завершила пілотний проект "Polish Student Project Excellence Award", спрямований на оцінку студентських проектів за Моделью відмінності у проектах IPMA. Цей конкурс, перший зі свого роду для студентів від IPMA Young Crew Poland, мав на меті ознайомити студентів з принципами моделі та покращити управління проектами в майбутньому. У конкурсі було відзначено три проекти, з яких перше місце отримав проект Клубу нейроінформатики з Варшавського університету. Результати були оголошені 14 грудня на заході у Краківському університеті економіки, який став майданчиком для обміну досвідом і встановлення нових контактів серед молодих менеджерів проектів. Оцінка проектів здійснювалася комісією з експертів у галузі управління проектами.*

At the end of 2023, IPMA Young Crew Poland successfully completed its pilot project, the Polish Student Project Excellence Award 2023. This project aimed to evaluate student projects according to the guidelines of the IPMA Project Excellence Model.

The Polish Student Project Excellence Award is the first competition of its kind organized by IPMA Young Crew Poland specifically for students. The competition assessed student projects based on the IPMA Project Excellence Model. The goal was to familiarize students with the principles of the model and provide feedback and recommendations for future project management improvement.



Three student projects were recognized in the competition. The third place was awarded to the Furniture Science Club from the Warsaw University of Life Sciences for their project “Research on eco-innovative technology for the production of fully biodegradable furniture composites. Finally, the first place was awarded to the Neuroinformatics Club from the University of Warsaw for their project “Organization of the international conference Aspects of Neuroscience with the satellite event Brainhack Warsaw.”

The official announcement of the PSPEA 2023 results took place on December 14, 2023, at the University of Economics in Krakow. During this event, the awarded project teams had the opportunity to showcase their projects. It was a fantastic occasion for young project managers to connect, exchange experiences, and establish new contacts. The event facilitated networking and allowed participants to learn from each other, fostering a sense of community among young project management professionals. On 15 December, the PSPEA 2023 finalists had the opportunity to attend the IPMA Young Crew Poland Workshop ‘Modern Project Management – Tools and Trends’.



The projects were evaluated by a panel of assessors, including Ewa Bednarczyk, Agnieszka Jędrusik, Wojciech Jarosz, Mateusz Trzeciak, Krzysztof Juszczyk, and Krzysztof Witkowski, who are experts in the field of project management.

This pilot project has been a great success in promoting and recognizing the excellence of student projects in Poland. It has provided students with valuable insights into project management and has encouraged them to strive for excellence in their future endeavors. IPMA Young Crew Poland is proud to have been a part of this initiative and looks forward to organizing more successful competitions in the future.



Pilot project brought us great satisfaction and achievement. It was not only an excellent tool for evaluating student projects, but also a great opportunity to promote excellence in project management and inspire future project leaders. We are proud of the results achieved and the enthusiasm generated by the event among students, and hope to continue and further develop similar initiatives in the future.



Participating in the competition gave us the opportunity to look at organizing events from a different perspective – we were able to test our organizational skills and learn about the strengths and weaknesses of our organization. At the same time, we gained a great deal of knowledge in an area that we were not normally familiar with, which we will certainly use in the organization of future projects. The award ceremony itself was also a unique experience, where we had the opportunity to meet many people involved in project implementation in completely different fields – Kamila Trafna, member of the Neuroinformatic Club from the University of Warsaw.



**Mishra Sunil B., Kazi Sultanabanu Sayyad Liyakat, Kazi Kutubuddin Sayyad Liyakat** (*Brahmdevdada Mane Institute of Technology, Solapur, Maharashtra, India*)

## **REVOLUTIONIZING THE MECHANICAL WORLD: THE PIONEERING ROLE OF NANOTECHNOLOGY IN MECHANICAL ENGINEERING**

**Abstract:** *Nanotechnology, the science of manipulating materials on an atomic or molecular scale, is pioneering unprecedented advancements in mechanical engineering. This field's integration has led to the development of stronger, lighter, and more efficient materials and components, significantly enhancing mechanical systems' performance and energy efficiency. From nano 3D printing to the creation of nanomaterials with exceptional physical and chemical properties, nanotechnology is reshaping mechanical engineering's future, offering sustainable solutions and innovative applications.*

**Анотація:** *Нанотехнологія, наука про маніпуляції з матеріалами на атомному або молекулярному рівні, відкриває безпрецедентні можливості у машинобудуванні. Інтеграція цієї галузі призвела до розробки міцніших, легших та ефективніших матеріалів та компонентів, значно підвищуючи продуктивність механічних систем та енергоефективність. Від нано 3D друку до створення наноматеріалів з винятковими фізичними та хімічними властивостями, нанотехнологія переформатовує майбутнє машинобудування, пропонуючи сталі рішення та інноваційні застосування.*

**Introduction:** Historically, mechanical engineering has driven progress through the invention and improvement of machinery, from the steam engines of the Industrial Revolution to today's sophisticated automobiles and aircraft. The introduction of nanotechnology into this field promises a continuation of this tradition of innovation, by allowing for the manipulation of materials at the most fundamental levels. This capability opens up new possibilities for the design, production, and operation of mechanical systems, making them more durable, efficient, and adaptable to a variety of applications.

Main Contributions of Nanotechnology in Mechanical Engineering:

1. **Enhancement of Material Properties:** Nanotechnology has enabled the creation of materials with superior strength, durability, and lighter weight, such as carbon nanotubes and graphene. These advancements are pivotal in developing mechanical components that are not only more robust but also significantly more energy-efficient.

2. **Nanoscale 3D Printing:** The advent of 3D printing at the nanoscale has revolutionized the manufacturing process, allowing for the production of highly complex structures with precision previously unattainable. This breakthrough paves the way for innovative designs and applications in various sectors, including healthcare, electronics, and aerospace.

3. **Development of Sensors and Actuators:** Nanotechnology has significantly enhanced the functionality and sensitivity of sensors and actuators, integral components of mechanical systems. By operating at the nanoscale, these devices offer unprecedented accuracy and efficiency in monitoring and controlling mechanical operations, leading to smarter and more responsive systems.

4. **Energy Efficiency:** A crucial benefit of nanotechnology in mechanical engineering is its potential to reduce energy consumption. By enabling the creation of lighter materials and more efficient components, nanotechnology contributes to the development of mechanical systems that require less energy to operate, thus promoting sustainability and reducing environmental impact.

Nanotechnology is poised to revolutionize mechanical engineering, offering innovative solutions to longstanding challenges and opening up new opportunities for advancement. Its ability to enhance material properties, along with the development of nanoscale manufacturing techniques and components, heralds a new era of efficiency, sustainability, and performance in mechanical systems. As research and applications continue to evolve, the integration of nanotechnology within mechanical engineering promises to yield further breakthroughs, cementing its role as a cornerstone of future technological progress.

As we delve deeper into the integration of nanotechnology within mechanical engineering, the horizon of potential applications continues to expand. Future prospects include the creation of self-healing materials capable of autonomously repairing damage, further reducing maintenance needs and extending the lifespan of mechanical components. Additionally, the development of nano-lubricants could revolutionize mechanical systems' efficiency, minimizing friction and wear to an unprecedented extent.

The advancement in nanoscale sensors and actuators is expected to pave the way for more sophisticated robotic systems and smart materials, capable of responding to environmental stimuli with high precision. These innovations hold promise not only for industrial applications but also for enhancing everyday products, making them more durable, efficient, and adaptable.

However, with great power comes great responsibility. The manipulation of matter at the atomic and molecular level introduces a plethora of ethical considerations. The potential impact of nanomaterials on health and the environment remains a significant concern. As such, it is imperative to approach the development and application of nanotechnology within mechanical engineering with caution, ensuring thorough testing and regulation to mitigate potential risks.

The interdisciplinary nature of nanotechnology also calls for collaboration across scientific and engineering disciplines. By combining expertise in physics, chemistry, biology, and engineering, we can harness nanotechnology's full potential while addressing its challenges and ethical implications.

### **Closing Remarks:**

Nanotechnology represents a pivotal shift in the paradigm of mechanical engineering, offering a toolkit for innovation that can address some of the most pressing challenges of our time, including energy conservation, sustainability, and the development of high-performance materials and systems. As we continue to explore the nanoscale, the boundaries of what is possible in mechanical engineering will undoubtedly expand, leading to advancements that were once considered the realm of science fiction.

The future of mechanical engineering, powered by nanotechnology, promises not only enhanced performance and efficiency but also a greater emphasis on sustainability and responsible innovation. As we venture further into this uncharted territory, it is crucial to foster an environment of collaboration, ethical consideration, and rigorous research, ensuring that nanotechnology's integration into mechanical engineering benefits society as a whole.

In conclusion, nanotechnology in mechanical engineering is not just about pushing the limits of science and technology; it's about reimagining the future of how we design, build, and interact with the mechanical world. With continued research, development, and thoughtful application, nanotechnology is set to revolutionize mechanical engineering, opening up a new era of possibilities that will shape the future of industry, technology, and society.

**Nedim Pervan** (*Faculty of Mechanical Engineering, University of Sarajevo, Bosnia and Herzegovina*)

## **GEOMETRIC DESIGN EFFECTS ON DRIVE AXLE HOUSING FATIGUE: A FEM STUDY**

**Abstract:** *The study investigates the impact of geometric design parameters on the fatigue and failure of the drive axle housing using the Finite Element Method (FEM). The work examines the effects of various factors on the fatigue life of the drive axle housing, such as the wall thickness of the housing, the rounding radius of the housing cross-section, and the rounding radius of the central part of the housing. Based on known material properties and dynamic loads, a CAD/FEM model of the drive axle housing was developed, and a structural analysis was conducted. From the results of the structural analysis, critical locations on the housing were identified, and fatigue analysis and life expectancy prediction were performed. Through a series of simulations, the study reveals that increasing the wall thickness of the housing can significantly improve fatigue resistance.*

**Анотація:** *Дослідження аналізує вплив геометричних параметрів дизайну на втому та відмову корпусу ведучого мосту, використовуючи метод скінченних елементів (МСЕ). У роботі вивчено вплив різних факторів на втомне життя корпусу ведучого мосту, таких як товщина стінки корпусу мосту, радіус закруглення перерізу корпусу та радіус закруглення центральної частини корпусу. Виходячи з відомих матеріальних властивостей та динамічних навантажень, була розроблена CAD/FEM модель корпусу ведучого мосту, і було проведено структурний аналіз. На основі результатів структурного аналізу були визначені критичні місця на корпусі, і були проведені аналіз втоми та прогнозування терміну служби. Через серію симуляцій дослідження показує, що збільшення товщини стінки корпусу може значно покращити втомну стійкість.*

In the course of a vehicle's operational lifespan, dynamic forces induced by road irregularities generate dynamic stresses that culminate in fatigue failure of the drive axle housing. This phenomenon is of significant concern due to the critical role the drive axle housing plays in maintaining the structural integrity and operational reliability of the vehicle. Dynamic stresses, if not adequately managed or mitigated, can lead to the premature failure of the drive axle housing, thereby compromising vehicle safety and performance. As such, it is imperative that the drive axle housing is designed to resist fatigue failure over its expected service life, ensuring that it can withstand the variabilities and unpredictabilities of real-world driving conditions. This entails a comprehensive understanding of the factors that contribute to fatigue failure, including the material properties of the housing, the geometric design parameters, and the spectrum of loads to which the housing is subjected. By elucidating the interplay between these factors, engineers and designers can devise strategies to enhance the fatigue resistance of the drive axle housing, thereby extending its lifespan and, by extension, that of the vehicle itself.

The development of the CAD/FEM model for the drive axle housing was a critical step in the study, leveraging the comprehensive capabilities of the CATIA

V5 software package. The chosen material for the housing, S460N, is known for its robust mechanical properties, which include a high Young's modulus of elasticity, yield strength, and Poisson's ratio, among others. These properties were crucial for accurately simulating the physical behavior of the housing under various load conditions.

Following the establishment of the material parameters, the next phase involved meticulous modeling of the drive axle housing. This process entailed defining the geometric dimensions and shapes in line with real-world specifications to ensure that the simulations would be as realistic as possible. Critical to this phase was the accurate representation of the housing's complex features, such as its wall thickness and curvature, which are vital factors in its fatigue performance.

After the completion of the modeling phase, the study focused on identifying the loads and boundary conditions that the drive axle housing would realistically encounter during operation. This involved applying forces that simulate the dynamic stresses imposed by road conditions, vehicle weight, and other operational factors. The loads were carefully calculated based on legal requirements and the specific axle configuration of the vehicle under study, ensuring that the simulation scenarios were grounded in practical operational conditions.

Furthermore, the establishment of boundary conditions was instrumental in simulating the actual support and constraints that the housing experiences in a vehicle. This includes the positioning and nature of supports at bearing locations, which are critical for accurately predicting the stress distribution and deformation of the housing under load. By meticulously setting these conditions, the study aimed to create a highly accurate and predictive FEM model that could reliably inform the fatigue analysis and lifespan prediction of the drive axle housing.

In essence, the development of the CAD/FEM model was a foundational aspect of the research, setting the stage for in-depth analysis and insights into how geometric design parameters influence the fatigue failure and lifespan of drive axle housings. This approach not only allowed for the detailed examination of stress distribution and critical points of failure but also facilitated the exploration of design modifications that could enhance the durability and performance of these critical vehicle components.

The fatigue analysis and lifespan prediction of the drive axle housing were conducted using the SolidWorks software package, building upon the foundation laid by the structural analysis. This phase of the study was pivotal in translating the static stress distributions into meaningful insights regarding the component's durability and resilience under cyclic loading conditions.

The fatigue limit assessment was meticulously performed by applying established formulas that reflect the material's fatigue strength at and beyond 1,000,000 ( $10^6$ ) cycles. This critical step involved integrating the material's S–N curve—a fundamental representation of its fatigue behavior over a range of stress amplitudes and number of cycles. The S–N curve for the housing material,

S460N, was derived using a pragmatic approach that utilized data from tensile testing, ensuring an accurate and reliable basis for fatigue life prediction.

For the purpose of predicting the drive axle housing's service life within the range of 100,000 ( $10^5$ ) to 1,000,000 ( $10^6$ ) cycles, the study employed the S–N curve of the housing material, evaluated through a practical methodology with tensile test data. This approach allowed for the determination of the fatigue limit of ideal laboratory specimens. To extrapolate these findings to the actual mechanical component under real-world conditions, several correction factors were applied to account for the influences of design, manufacturing, and environmental factors on fatigue strength.

These correction factors included considerations for surface treatment, material heterogeneities, and operational conditions, among others, to adjust the idealized fatigue limit to one that reflects the more complex reality of in-service behavior. This comprehensive analysis enabled the prediction of areas within the drive axle housing that are prone to fatigue failure, highlighting the critical zones where initial cracks may develop and propagate under cyclic loading.

By incorporating the effects of load spectra, including variable amplitude and mean stress adjustments based on the Goodman mean stress correction, the study offered a nuanced view of fatigue life expectancy. This was further refined by setting the analysis to consider the specific load history and operational profile of the drive axle housing, thus ensuring that the predictions were as representative as possible of the actual service conditions.

The outcome of this fatigue life prediction phase was a detailed understanding of how different geometric design parameters and material properties interact to influence the fatigue resistance of the drive axle housing. This knowledge not only facilitates the identification of potential improvements to the design and material selection process but also supports the development of predictive maintenance schedules and the optimization of component design for enhanced durability and reliability in automotive applications.

The results of the fatigue analysis conducted on the initial design of the drive axle housing highlighted key insights into the structural integrity and expected service life under operational stress. The analysis revealed that the initial crack occurrence was most likely at points of highest stress, with a calculated life span of 61,936 cycles before the onset of cracking. This critical finding underscored the susceptibility of the drive axle housing, particularly the hollow square cross-section, to fatigue-induced failure, marking it as a focal point for design evaluation and enhancement.

Given the identification of the hollow square cross-section as a structurally vulnerable area, the study proceeded to implement design modifications aimed at extending the service life of the drive axle housing. The approach was twofold: firstly, to enhance the structural resilience against fatigue failure, and secondly, to maintain or improve other performance characteristics without significantly increasing weight or compromising the component's functional requirements.

The strategic interventions included alterations to the geometric design parameters, such as increasing the wall thickness and adjusting the rounding radii at critical sections. These modifications were predicated on their potential to distribute stress more evenly across the housing, thereby reducing the likelihood of stress concentration and the resultant crack initiation and propagation. By systematically varying these parameters and re-evaluating the fatigue life through simulations, the study was able to delineate the effects of specific design changes on the fatigue durability of the housing.

The results indicated a notable improvement in fatigue life with each incremental design modification. For instance, increasing the wall thickness directly contributed to a substantial decrease in maximum stress levels experienced by the housing, directly correlating with an extended fatigue life. Similarly, enhancements to the rounding radii demonstrated their efficacy in mitigating stress concentrations, further contributing to the durability of the component.

These results not only validated the effectiveness of the applied design modifications but also provided quantitative data to support the development of more fatigue-resistant drive axle housings. Through this meticulous analysis, the study furnished a comprehensive understanding of how geometric adjustments can significantly influence the fatigue performance of structural components. Furthermore, it offered a methodological blueprint for employing finite element analysis (FEM) in the predictive modeling and design optimization of automotive components subjected to dynamic loading conditions.

In essence, the outcomes of this research represent a significant step forward in the pursuit of longer-lasting, more reliable drive axle housings. By leveraging advanced simulation techniques and a systematic approach to design optimization, it is possible to achieve significant improvements in component durability, thereby enhancing vehicle reliability and safety.

The structural analysis of the initial design of the drive axle housing provided a critical lens through which the inherent vulnerabilities to fatigue failure were examined and understood. This in-depth analysis identified the transition area from the hollow square cross-section to the central portion of the housing, where the final drive is situated, as particularly susceptible to fatigue damage. This area's proneness to early crack initiation, underlined by the estimated fatigue life of 61,936 cycles, presents a significant concern for overall component durability and reliability.

Upon identifying this critical zone, the analysis proceeded to explore the potential for extending the housing's service life through targeted geometric modifications. The focus was on adjustments that could ameliorate the stress concentrations identified in the initial design, thus mitigating the risk of fatigue failure. These modifications were not arbitrary but informed by a nuanced understanding of stress distribution within complex structures under load. By augmenting the wall thickness and adjusting the rounding radii at the identified

stress concentration zones, the study aimed to distribute the stresses more evenly across the housing's structure.

These geometric changes are pivotal for several reasons. First, by increasing the wall thickness, the study leveraged the principle that a greater cross-sectional area can reduce stress for a given load, thereby diminishing the likelihood of crack initiation and propagation. Second, the adjustment of rounding radii, particularly at areas of stress concentration, is grounded in the understanding that sharp transitions in geometry can significantly amplify stress, thus smoothing these transitions helps in reducing stress peaks.

Furthermore, this discussion elucidates the critical balance between structural optimization and practical constraints, such as weight considerations and manufacturing feasibility. The aim was to enhance the fatigue life of the housing without unduly increasing its weight or complexity, which could have adverse implications for vehicle performance and production costs.

This meticulous approach to design refinement, underscored by a rigorous application of finite element analysis (FEM), represents a sophisticated strategy for addressing the multifaceted challenge of fatigue in critical automotive components. The discussion highlights the importance of a detailed understanding of material behavior and stress response within the context of component geometry and operational loading conditions. It also underscores the potential of targeted design interventions to significantly improve component durability, thereby contributing to the broader goals of vehicle reliability, safety, and performance.

In essence, the insights gleaned from this analysis not only contribute to the specific field of drive axle housing design but also exemplify a broader methodology for enhancing the fatigue resistance of mechanical components. By integrating detailed structural analysis with strategic design modifications, it is possible to extend the service life of critical components, thus addressing one of the key challenges in mechanical and automotive engineering.

## **Conclusions.**

The comprehensive analysis of geometric design parameters for the fatigue failure of the drive axle housing culminated in several critical conclusions that not only inform future design strategies but also underscore the intricate relationship between geometric modifications and their impact on component durability:

- The study vividly demonstrated that augmenting the thickness of the drive axle housing wall significantly mitigates the stress levels experienced across the housing, particularly in areas subjected to maximal loading. This reduction in stress directly correlates to an extended service life and enhanced fatigue strength of the housing. However, it's important to acknowledge the trade-off presented by the increased weight of the housing. This finding emphasizes the need for a balanced approach in design optimizations, where the benefits of enhanced durability must be weighed against the implications of added weight on overall vehicle performance and efficiency.



- By increasing the rounding radius at the housing's cross-section, the study revealed a marked decrease in stress concentration. This geometric modification effectively disperses stress more evenly throughout the structure, thereby diminishing the likelihood of crack initiation and propagation—a critical factor in fatigue failure. Remarkably, this improvement in the housing's fatigue life is achieved without a corresponding increase in weight, showcasing the potential for design efficiency that enhances component longevity without compromising on weight considerations.

- Similarly, the enlargement of the rounding radius in the central portion of the housing plays a pivotal role in reducing stress concentration. This alteration facilitates a more uniform stress distribution within the housing, contributing to an overall improvement in the structural integrity of the component. The resultant increase in service life, achieved without an increase in the component's weight, highlights the effectiveness of strategic geometric modifications in bolstering the durability of drive axle housings.

These conclusions collectively highlight the significant impact of geometric design adjustments on the fatigue life of drive axle housings. They provide a clear indication that through careful and targeted design interventions, it is possible to significantly enhance the fatigue resistance and overall durability of critical automotive components. Moreover, these insights pave the way for the development of design guidelines that can optimize component longevity while maintaining, or even reducing, the overall weight of the component. This delicate balance between durability, weight, and performance is crucial in the automotive industry's ongoing efforts to enhance vehicle reliability, safety, and efficiency. The study's findings offer valuable contributions to the field, suggesting that even minor geometric adjustments can have profound effects on the lifespan and reliability of structural components subjected to cyclic loading and fatigue stress.

**Predrag Pravdić<sup>1</sup>, Violeta Dorđević<sup>2</sup>, Jelena Erić-Obućina<sup>2</sup>, Vladan Obućina<sup>2</sup>** (<sup>1</sup>*Academy of Professional Studies, Department in Kruševac,* <sup>2</sup>*Academy of Professional Studies Šumadija, Department in Trstenik, Serbia* )

## **APPLICATION OF NEW TECHNOLOGIES FOR OBTAINING BIO-GAS FROM MUNICIPAL WASTE**

***Abstract:** Using stored biogas limits the amount of methane released into the atmosphere and reduces dependence on fossil fuels. Based on a waste-to-wheels assessment, compressed natural gas derived from biogas reduces greenhouse gas emissions by up to 91 percent relative to petroleum gasoline. In addition to climate benefits, anaerobic digestion can lower costs associated with waste remediation as well as benefit local economies. Anaerobic digestion also reduces odors, pathogens, and the risk of water pollution from livestock waste.*

***Анотація:** Використання збереженого біогазу обмежує кількість метану, що викидається в атмосферу, та зменшує залежність від викопного палива. На основі оцінки від відходів до коліс, стиснений природний газ, отриманий з біогазу, знижує викиди парникових газів на 91 відсоток порівняно з бензином. Крім переваг для клімату, анаеробне бродіння може знизити витрати, пов'язані з очищенням відходів, а також приносити користь місцевій економіці. Анаеробне бродіння також зменшує запахи, патогени та ризик забруднення води від відходів тваринництва.*

### **1. INTRODUCTION**

Waste is understood as any material or item that is created during the performance of production, service or other activities, items excluded from use, as well as waste materials that are created during consumption and which, from the point of view of the producer or consumer, are not for further use and must be discarded. Municipal waste represents household waste (domestic waste), as well as other waste that, due to its nature or composition, is similar to household waste. Given that the majority of municipal waste is generated in households, its generation is related to lifestyle. In Serbia, municipal waste is not managed, but it is deposited in a total of 11 sanitary and a large number of unsanitary landfills or landfills, and a significant part ends up absolutely uncontrolled in nature in wild landfills. In addition to polluting the environment and harming the health of Serbian citizens, this waste represents an unused resource from which the country could obtain new values through responsible management: raw materials or produce electricity and thermal energy. The municipal waste management system consists of sanitary landfills, recycling centers, waste treatment plants, but also efficient public utility companies that operate according to models based on economic logic. The system also consists of experts, professionals, sector workers, but also those who create waste - citizens and the economy. In order for the aforementioned elements to function as a well-ordered system, it is necessary to have financial, regulatory and inspection mechanisms, which should ensure that all costs in the waste management chain are covered by those who pollute - businesses and citizens, as

well as the consistent application of the law . The primary system consists of dedicated containers for separate collection of waste in order to separate fractions of sufficient quality for further use at the point of origin. As it is not possible in practice to achieve 100 percent purity of separately collected waste, secondary separation ensures further separation into waste that can be recycled or used to obtain electrical and/or thermal energy. The first is economic sustainability, which is ensured through the adequate price of utility services, as well as the application of the principle of extended producer responsibility. Another factor is the appropriate infrastructure and equipment, namely sanitary landfills, recycling centers, waste treatment plants, and trucks. The third is the application of regulations, i.e. penalties for negligent waste disposal and the fact that 100% of municipal waste can be disposed of at the landfill without any restrictions or mechanisms that would make the disposal less financially favorable for generators (economy and population). The fourth factor is professional staff, and the last fifth is the political will to integrate all the previous ones. When it comes to infrastructure, Serbia has only 11 sanitary landfills where only 560,000 tons of waste are disposed of annually, and as many as 138 unsanitary or municipal landfills, with only sanitary landfills being considered part of the regulated system. Also, about 13 percent of the territory of Serbia, mostly rural areas, is not covered by the municipal waste collection service, so it ends up in illegal landfills, of which there are about 3,500.

## **2. MUNICIPAL WASTE AND BIO-GAS**

The separation of waste reminds us of the hierarchy of waste management, without which there is no good waste management system: prevention of its occurrence, reuse, after that separation, recycling, energy recovery, and finally disposal. But in Serbia, depositing is not the last, it is the first. When we add here the bad application of laws and by-laws, bad control mechanisms, delays in key strategic documents, inertness and lack of interest in dealing with substance instead of form, we get the familiar picture of a huge number of wild dumps, waste in rivers, lakes and protected areas, polluted land , water and air. Considering that municipal waste management is inefficient in Serbia, among other things because it is not economically viable, solving the financing is a priority. An unavoidable step in the calculation of the future market price is precise data on the morphological composition of municipal waste, because this way it can be seen which of the waste can be reused, recycled or used for energy. The following information best describes the possibilities of energy utilization of waste: of the 2.9 million tons of municipal waste generated annually, 470,000 tons cannot be used in any other way than to obtain energy (around 50 percent of that waste is plastic). However, a significant amount of what is in theory recyclable is extremely difficult or expensive to separate for recycling, so incineration is the only solution for such waste. Instead of a new product, waste becomes a raw material for obtaining electricity and/or hot water for heating. Bearing in mind the current energy crisis and the state of the environment, it could even be said that it

is irresponsible to waste precious energy by dumping it in landfills where it pollutes nature and endangers human health. Biogas is a type of gaseous biofuel obtained by anaerobic decomposition or fermentation of organic matter, including manure, sewage sludge, municipal waste or any other biodegradable waste. It consists mainly of methane and carbon dioxide and could be an important source of energy in the future. In terms of energy, methane and hydrogen are the most important from the entire biogas mixture, while the problematic ones are hydrogen sulfide and ammonia, which must be removed before using biogas so that they do not aggressively affect the equipment. Biogas is produced in a biological process in which a mixture of gases, the so-called biogas, is formed from the organic mass without the presence of oxygen (that is, anaerobically). This very widespread process in nature takes place, for example, in swamps, at the bottom of seas and oceans, in pits for liquid manure as well as in the rumen of ruminants. At the same time, the organic mass is almost completely converted into biogas by means of a series of microorganisms. Additionally, a certain amount of energy (heat) and new biomass is generated. The gas mixture formed consists mainly of methane (50–75 vol%) and carbon dioxide (25–50 vol%). In addition, biogas contains small amounts of hydrogen, hydrogen sulfide, ammonia and other trace gases. The composition is mainly influenced by the substrates used, the fermentation process and various technical solutions. At the same time, it is important that the individual stages of decomposition are optimally coordinated with each other so that the entire process takes place without interruption. In the first phase, the so-called "hydrolysis", the complex compounds of the input raw material (eg carbohydrates, proteins, fats) are broken down into simpler organic compounds (eg amino acids, sugar, fatty acids). For this purpose, the hydrolytic bacteria involved in this process release enzymes that break down the organic matter biochemically. The resulting intermediate products are then further decomposed into lower fatty acids (acetic, propionic and butyric acid) as well as carbon dioxide and hydrogen in the so-called "acidic phase" (acidogenesis) by fermentative (acidogenic) bacteria. However, small amounts of lactic acid and alcohol are also formed. The type of products formed in this phase is influenced by the concentration of intermediately formed hydrogen. These products are then produced as part of acetogenesis, i.e. "acetic phase", with the help of acetogenic bacteria, they convert into precursor substances of biogas (acetic acid, hydrogen and carbon dioxide). In this context, the partial pressure of hydrogen is of great importance. Too high a hydrogen content for energy reasons prevents the conversion of intermediate products of acetogenesis. As a result, there is an accumulation of organic acids, e.g. propionic, isobutyric, isovaleric and caproic acids, and inhibition of methane formation. For this reason, acetogenic bacteria (which form hydrogen) must form a close living community with methanogenic archaea, which during the formation of methane together with carbon dioxide consume hydrogen (interspecies transfer of hydrogen) and thus provide acceptable environmental conditions for acetogenic bacteria. In the next "methanogenesis", the last phase of biogas production, primarily acetic acid as

well as hydrogen and carbon dioxide are converted into methane by means of strictly anaerobic methanogenic archaea. Hydrogenotrophic methanogens produce methane from hydrogen and carbon dioxide, while acetoclastic methanogens form methane by splitting acids. Under the prevailing conditions in agricultural biogas plants, the formation of methane in the case of higher loads with organic matter mainly takes place in the reaction with hydrogen, and only in the case of relatively small loads with organic matter by decomposition of acetic acid. The knowledge gained from the sewage sludge fermentation process that 70% of the methane comes from the decomposition of acetic acid and only 30% from the conversion of hydrogen, is not valid for high-capacity fermenters with very short retention times typical of agricultural biogas plants. The dominant reaction path here is hydrogen conversion with syntrophic oxidation of acetate. In principle, the four stages of anaerobic decomposition in a one-step process take place simultaneously. However, the bacteria of the individual decomposition stages have different requirements regarding their living environment (e.g. pH value, temperature), therefore a compromise must be found here in terms of process technique. Since methanogenic microorganisms, due to their slow growth rate, represent the weakest link of the biocenosis and react most sensitively to disturbances, the environmental conditions must be adapted to the requirements of methanogens. The attempt to spatially separate the hydrolysis and acid phase from the methanogenic phase (conducting a two-stage process) with two separate process steps, in practice, however, succeeds only conditionally, since despite the low pH value in the hydrolysis phase ( $\text{pH} < 6.5$ ), methane formation still occurs in part. Therefore, the gas formed in the hydrolysis phase contains methane in addition to carbon dioxide and hydrogen, which is why this gas must be used or treated to avoid negative impacts on the environment and safety risks.

### **3. NEW TECHNOLOGIES IN BIO-GAS PRODUCTION**

The term substrate is a widespread name for the raw materials from which biogas is produced. If several substrates are combined, then the raw material used in a smaller part is called co-substrate. When considering the possibility of biogas production, the quantities and prices of potential substrates are considered first. It is important to analyze their characteristics, which determine the potential for biogas production, and thus the size of the biogas plant. The potential yield of biogas is expressed per ton of fresh, dry or organic dry mass of the considered substrate. When talking about the yield of biogas from a substrate, it is said that it is potential, since the amount of produced biogas that is realized in practice depends on the operating conditions and the stability of the process. Agricultural biogas plants are suitable for the use of by-products of agricultural production (manure, remains of plant production), or energy plants for the purpose of decentralized energy production. Biogas plants are particularly suitable for the disposal of industrial waste (slaughterhouse, turnip noodles, etc.), as well as for the purification of municipal and waste water from the food industry. Such biogas plants can only in rare cases achieve favorable energy and financial effects, and

their main task is waste disposal. Manure, solid or liquid, is, from the point of view of costs, a very favorable substrate. Most often it is used from its own farm and it is free. Exceptionally, when it is brought from another farm, the transport costs should be taken into account. In the event that it is not used as a substrate for biogas production, the manure must "ripen" before being brought to the fields, which stabilizes the active organic matter, destroys pathogenic organisms and transforms harmful substances into those that are not. Manure ripening is a process that requires time, and on modern farms, equipment, labor and accommodation. Since biogas production takes place in a process similar to that in which manure ripens, the rest of the fermentation can be distributed over agricultural land. From the point of view of environmental protection, manure fermentation has significant positive effects, because in this way the emission of methane into the atmosphere is prevented, and the spread of unpleasant odors is also reduced.

There is a difference between liquid and solid manure. The liquid consists of animal excrement and is transported by pumps and pipelines. The content of dry matter is up to 10%. If a mat is used, solid manure is obtained, which has a dry matter content of up to 40%. The water content in manure is high (68 to 93%), which is advantageous when manure is combined with other co-substrates with higher proportions of dry mass, such as, for example, corn silage. Nutrients, except part of nitrogen, after fermentation are found in the rest of the process, and can be used for spreading to plots. This means that they are, for the most part, preserved and available for application in agricultural production, as is the case for the use of manure. The disadvantage of using manure as a substrate is its low energy potential, due to its high water content. Compared to corn silage, manure can have a ten times lower yield of biogas per unit weight, which means that for the same size biogas plant, a ten times greater amount of manure is needed than corn silage. One conditional head of cattle, weighing 500 kg, provides only 0.11 to 0.15 kWe of installed capacity. Therefore, for a plant with a nominal electrical power of 150 kW, at least 1,000 conditional heads would be needed. The number of large farms that have such a large number of heads in Serbia, as in other countries, is small. In addition, the economic analysis shows that it is more profitable to build and use larger plants, with a nominal electrical power of 500 to 1,000 kW. This is the reason that modern biogas plants use a mixture of manure and other co-substrates. Often, energy plants are not only used as a co-substrate, but also as the main raw material for biogas production. One ton of corn silage, which has the greatest potential for biogas production, yields 350 to 400 kWh. The above data refer to cogeneration plants with a SUS engine. One hectare of corn silage, for yields of 40 to 60 t/ha, provides the raw material with electrical power of 2 to 3 kW. Therefore, for a plant with a nominal power of 500 kWe, 170 to 250 ha would be needed for the production of corn silage. The necessary areas for the production of biogas substrate can be reduced by realizing two harvests. For example, after harvesting triticale silage, corn or sunflower is sown, and other plant species are also ensiled. At most biogas plants in countries with favorable

levels of feed-in tariffs, the share of biogas produced from silage is 30 to 100%. Unlike manure, silage has a price, it is paid for, which significantly affects economic indicators. Every potential investor should consider it and evaluate the possibilities of silage production and its price. The price of silage depends on the price of agricultural products, for example, corn kernels. The real price is arrived at by comparing the yield and price of grain and production costs. Organic waste from the food industry is generated, for example, in the production of sugar, alcohol, oil, beer, fruit and vegetable processing, etc. In the event that both solid organic waste and wastewater are generated at the same location, they are disposed of in the same biogas plant. The goal of building biogas plants on food industrial facilities is most often the production of energy from by-products, electricity and/or heat. This saves energy needed to maintain the production process. The next, and often the priority goal of building a biogas plant is the disposal of organic waste - by-products. Biogas plants that use such substrates are classified as industrial biogas plants. In order to use the by-product from the food industry as a substrate for biogas production, several prerequisites must be met. First of all, it is necessary that there is no other more favorable way of using it, that is, that it represents organic waste that needs to be disposed of and for which costs are foreseen. For example, in the production of sugar, turnip noodles are produced as a by-product, which is a very favorable substrate for the production of biogas, but it can also be advantageously used in the food industry or for feeding livestock. There is information that the market price of dried beet noodles is in the range of 100 - 150 €/t, and its use for biogas production is not worthwhile. From the technical aspect, it is necessary to have enough organic waste for the construction of a biogas plant of sufficient capacity, to produce enough energy for process needs, and thus realize the economically profitable operation of the biogas plant. In the production of sugar, a favorable substrate for the production of biogas is represented by beets and other parts of sugar beets and admixtures. The slaughterhouse industry is classified as a food industry. However, the waste of the slaughterhouse industry is considered separately due to the specific requirements for its disposal. Organic waste generated in the slaughterhouse industry is dead animals and animal parts that remain after slaughter. According to the EU Regulation, slaughterhouse waste is classified into three categories, and the requirements for disposal are defined accordingly. In Serbia, the Regulation on the disposal of slaughterhouse waste is in force, which is a translated version of the European Regulation. Biogas technology is only one way of disposing of slaughterhouse waste, and organic waste categories KII and KIII are used as substrates for biogas production. The most common way of disposal of slaughterhouse waste is in processing plants where meat and bone meal and technical fat are produced. In the public, such plants are mistakenly called rendering plants, and the lack of management in them is a high need for energy, electrical and thermal. In the event that the slaughterhouse does not own such a facility, it pays compensation for its service management, which roughly amounts to 170 €/t for KI, about 140 €/t for KII, and about 95 €/t for blood. Possible

methods of disposal of slaughterhouse waste are incineration and composting. In the case of the construction of a biogas plant for the disposal of organic waste from the slaughterhouse industry, the costs of removal would be significantly reduced, or if the combustion of biogas would achieve a significant saving in the energy required for the operation of the slaughterhouse. However, for the calculation of economic profitability, it is necessary to take into account the necessary investment for the construction of a biogas plant. In relation to live weight, about 12-14% of slaughterhouse waste is obtained for pigs, of which 3% is blood waste. The mass of organic waste after poultry processing is 32-36% in relation to live weight, depending on whether the feathers are wet or dry. Dry feathers account for about 6-7%, and wet feathers account for about 16% of live weight. The content of dry matter in slaughterhouse waste depends, first of all, on mixing with water during the process itself in the slaughterhouse, but also on storage and transport. The characteristic of the biogas plant that uses organic waste from the slaughterhouse industry is that it has equipment for shredding and mass homogenization. Before anaerobic decomposition in the fermenter, it is necessary to process the substrates from the slaughterhouse industry, in special tanks, for a certain period of time at elevated pressures and temperatures, and the conditions are defined depending on their condition and assigned classification. Most of the biogas energy, electrical and thermal, is needed to enable the efficient operation of the biogas plant itself and the slaughterhouse. Wastewater from the food industry is waste from the production process that must be disposed of. Communal waste water can only contain sewage water from households, but also industrial waste water, if it flows into the sewage network, and atmospheric water (rainwater) if there is no special network for their removal. Communal and waste water from the food industry is often discharged into watercourses and lakes and has a negative impact on the environment. Larger settlements treat waste water with physical, biological and chemical procedures before discharge into the recipient.

#### **4. MUNICIPAL WASTE AND BIO-GAS IN ENVIRONMENTAL PROTECTION**

The disadvantage of most of these procedures is the inadequate disposal of the sludge remaining after sedimentation, which contains polluting organic substances. Anaerobic treatment is a suitable way to organically stabilize the sludge, created by the processing of waste water, and to carry out its hygiene. After that, it is possible to dispose of it safely in landfills or even, if the analysis shows that there are no undesirable substances, it can be distributed on agricultural land. Municipal and food industry waste water in most cases contain a low proportion of dry matter, sometimes less than 1%. This is mostly influenced by the origin of waste water, i.e. whether it contains atmospheric water and the conditions during the production process. Separated sludge can have a slightly higher proportion of dry matter, about 5%. A high proportion of water affects the size of all parts of the biogas plant that are used for transportation, storage and processing of waste water. This is why such biogas plants require a significantly



higher investment compared to agricultural biogas plants of the same capacity. Biogas plants that use wastewater as a substrate for biogas production are in most cases part of a wastewater treatment system. The energy needs of such biogas plants are high, and by producing electricity from biogas obtained by treating waste water, it is generally possible to cover only a part of one's own needs. Due to the inhomogeneous composition of waste water, which reaches the biogas plant over time, the production and quality of biogas are not uniform. Municipal solid organic waste means biodegradable waste from populated areas, and includes waste from households, restaurants and canteens, fruit and vegetable residues from green markets, as well as residues from care of green areas and any other solid organic waste. Biodegradable waste also includes woody materials, as well as paper and cardboard, but due to the high content of cellulose, these materials are difficult and slow to decompose anaerobically, so they are not a suitable raw material for biogas production. In order for this type of organic waste to be used as a substrate for biogas production, it is necessary, first of all, to have a primary waste separation. Municipal solid organic waste is characterized by inhomogeneity of composition and non-uniformity in the amounts that reach the place of disposal. The content of dry matter is significantly higher than that of manure, and it is comparable to energy plants. A biogas plant that uses this type of organic waste should have equipment for separating large impurities and metals, as well as a device for shredding the substrate. The yield of biogas that can be achieved from this type of substrate is about 100  $\text{Stm}^3/\text{t}$ , and it depends on the type of biogas plant where it is disposed of and the operating conditions. Most often, batch fermenters are used, but also continuous ones, similar to those in agricultural biogas plants. The goal of building biogas plants that use such substrates is the disposal of municipal solid waste, but also the generation of heat and electricity from biogas, the use of which can generate income. The construction of such facilities requires large investments, and operating costs are high. Therefore, their economically profitable operation is possible with the payment of the waste disposal service, the appropriate feed-in tariff, and even with investment subsidies. Primary separation of communal organic waste is not carried out in Serbia, so its use as a substrate for biogas production is only possible in the future, after the introduction of a different waste management system. Currently, in Serbia, it is possible to use landfill gas for the production of electricity and/or thermal energy, and only at landfills where the conditions exist.

## 5. CONCLUSION

Biogas is produced after organic materials (plant and animal products) are broken down by bacteria in an oxygen-free environment, a process called anaerobic digestion. Biogas systems use anaerobic digestion to recycle these organic materials, turning them into biogas, which contains both energy (gas), and valuable soil products (liquids and solids). Organic wastes also generate large amounts of methane as they decompose. Methane is a powerful greenhouse gas that traps heat in the atmosphere more efficiently than carbon dioxide. Given

equal amounts of methane and carbon dioxide, methane will absorb 86 times more heat in 20 years than carbon dioxide. To reduce greenhouse gas emissions and the risk of pollution to waterways, organic waste can be removed and used to produce biogas, a renewable source of energy. When displacing fossil fuels, biogas creates further emission reductions, sometimes resulting in carbon negative systems. Some organic wastes are more difficult to break down in a digester than others. Food waste, fats, oils, and greases are the easiest organic wastes to break down, while livestock waste tends to be the most difficult. Mixing multiple wastes in the same digester, referred to as co-digestion, can help increase biogas yields. After biogas is captured, it can produce heat and electricity for use in engines, microturbines, and fuel cells. Biogas can also be upgraded into biomethane, also called renewable natural gas or RNG, and injected into natural gas pipelines or used as a vehicle fuel.

## REFERENCES

- [1] Kaltschmitt M., Hartmann H., (2001), *Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren*; Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York.
- [2] Schattner S., Gronauer A., (2000), *Methangärung verschiedener Substrate – Kenntnisstand und offene Fragen, Gölzower Fachgespräche, Band 15: Energetische Nutzung von Biogas: Stand der Technik und Optimierungspotenzial*, S. 28–38, Weimar.
- [3] Bauer C., Korthals M., Gronauer A., Leuhn M., *Methanogens in biogas production from renewable resources – a novel molecular population analysis approach. Water Sci. Tech.* 2008, 58, No. 7, S. 1.433–1.439
- [4] Leuhn M., Bauer C., Gronauer A., *Probleme der Biogasproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen im Langzeitbetrieb und molekularbiologische Analytik. VDLUFA-Schriftenreihe 64*, 2008, S. 118–125
- [5] Oechsner H., Lemmer A., *Was kann die Hydrolyse bei der Biogasvergärung leisten?*, VDI-Berichte
- [6] Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2014: Synthesis Report, World Meteorological Organization (WMO)*, 2015.
- [7] Yusuf R.O., Noor Z.Z., Abba A.H., Ariffin Abu Hassan M., *Methane emission by sectors: A comprehensive review of emission sources and migration methods, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012., 16; pp. 5059-5070,
- [8] Miltner M., Makaruk A., Harasek M., *Review on available biogas upgrading technologies and innovations towards advanced solutions, Journal of Cleaner Production*, 2017., 161: pp. 1329-1337
- [9] Döhler, H.; Schießl, K.; Schwab, M., (1999), *BMBF – Förderschwerpunkt, Umweltverträgliche Gülleaufbereitung und -verwertung. KTBL Arbeitspapier 272. KTBL Darmstadt.*
- [10] LTZ, (2008), *Inhaltsstoffe in Gärprodukten und Möglichkeiten zu ihrer geordneten pflanzenbaulichen Verwertung. Projektbericht, Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (LTZ).*

**Predrag Pravdić<sup>1</sup>, Violeta Dorđević<sup>2</sup>, Jelena Erić-Obućina<sup>2</sup>, Vladan Obućina<sup>2</sup>** (<sup>1</sup>*Academy of Professional Studies, Department in Kruševac,*  
<sup>2</sup>*Academy of Professional Studies Šumadija, Department in Trstenik, Serbia* )

## **NANO-TECHNOLOGY IN MODERN MECHANICAL ENGINEERING**

***Abstract:** Nanotechnology is reshaping the landscape of mechanical engineering, offering unprecedented opportunities for innovation and advancement. By harnessing the unique properties of nanomaterials and exploring novel manufacturing techniques, engineers are pushing the boundaries of what is possible. As the field continues to evolve, embracing the principles of nanotechnology will be essential for mechanical engineers to stay at the forefront of technological progress, shaping a future where nanoscale wonders transform mechanical systems and devices.*

***Анотація:** Нанотехнології переформатовують ландшафт машинобудування, пропонуючи безпрецедентні можливості для інновацій та прогресу. Використовуючи унікальні властивості наноматеріалів та досліджуючи новітні виробничі техніки, інженери розширюють межі можливого. Оскільки галузь продовжує розвиватися, прийняття принципів нанотехнологій буде суттєвим для машинобудівних інженерів, щоб залишатися на передовій технологічного прогресу, формуючи майбутнє, де наномасштабні дива трансформують механічні системи та пристрої.*

### **1. INTRODUCTION**

Nanotechnology, the science of manipulating matter at the atomic and molecular scale, has revolutionized various fields, and mechanical engineering is no exception. With its potential to create innovative materials, enhance manufacturing processes, and develop cutting-edge devices, nanotechnology has opened up new horizons in the realm of mechanical engineering. Nanotechnology operates at the nanoscale, dealing with structures sized between 1 to 100 nanometers. At this level, the properties of materials can significantly differ from their macroscopic counterparts, leading to unique mechanical, electrical, and thermal characteristics. Understanding the basics of nanotechnology is essential for engineers to harness its potential effectively. While nanotechnology offers remarkable opportunities, it also presents challenges related to safety, ethical concerns, and environmental impact. Addressing these issues is crucial to ensuring the responsible development and deployment of nanotechnology in mechanical engineering. The emerging discipline of nano-engineering is uncovering countless possibilities for advancements in manufacturing, robotics, health care, energy and other industries by revolutionizing materials, structures and systems at the smallest scale. Applying individual nano-elements to large-scale systems is one of the field's biggest challenges. Doing so often requires a multidisciplinary approach to systems engineering and problem-solving — a skillset with which mechanical engineers are well-equipped. Exposure to nanoparticles present in air pollution — from traffic emissions, forest fires and

manufacturing processes — can result in health problems including cardiopulmonary diseases and cancer. The toxic potential of these particles depends on their size, structure and chemical composition. Nanotechnology is science, engineering and technology conducted at the nanoscale, which is about 1 to 100 nm where nano denotes the scale range of  $10^{-9}$  and nanotechnology refers the properties of atoms and molecules measuring thoroughly 0.1 to 1000 nm. Nanotechnology is highly interdisciplinary as a field, and it requires knowledge drawn from a variety of scientific and engineering areas. Nanotechnology has become an all-embracing term, which means different things to different people. Nanotechnology is interface technologies that are include many different science and applications area. Nanotechnology falls into this category and offers fundamentally new capabilities to architect a board array of the novel materials, composites and structure on a molecular scale. Here discusses on some of the applications for nanotechnology and shows a few cases of them. That is believed to have the highest probability of success in competitive industry. The nanotechnology that are economically promising for the future include those that have applications in information technology, electronics, building materials, household appliances, textiles, cosmetics, food, environmental technologies, energy technologies and medicine etc., Nanotechnology has slowly yet deeply taken over different industries worldwide. This rapid pace of technological revolution can especially be seen in the developed world, where nano-scale markets have taken over rapidly in the past decade. Nanotechnology is not a new concept since it has now become a general-purpose technology. Four generations of nanomaterials have emerged on the surface and are used in interdisciplinary scientific fields; these are active and passive nanoassemblies, general nanosystems, and small-scale molecular nanosystems.

## **2. NANOMATERIALS IN MECHANICAL ENGINEERING**

This rapid development of nanoscience is proof that, soon, nano-scale manufacturing will be incorporated into almost every domain of science and technology. This review article will cover the recent advanced applications of nanotechnology in different industries, mainly agriculture, food, cosmetics, medicine, healthcare, automotive, oil and gas industries, chemical, and mechanical industries. Moreover, a brief glimpse of the drawbacks of nanotechnology will be highlighted for each industry to help the scientific community become aware of the ills and benefits of nanotechnology side by side. Nanotechnology is a process that combines the basic attributes of biological, physical, and chemical sciences. These processes occur at the minute scale of nanometers. Physically, the size is reduced; chemically, new bonds and chemical properties are governed; and biological actions are produced at the nano scale, such as drug bonding and delivery at particular sites. Nanotechnology provides a link between classical and quantum mechanics in a gray area called a mesoscopic system. This mesoscopic system is being used to manufacture nanoassemblies of nature such as agricultural products, nanomedicine, and nanotools for treatment and diagnostic purposes in the medical industry. Diseases that were previously

untreatable are now being curtailed via nano-based medications and diagnostic kits. This technology has greatly affected bulk industrial manufacturing and production as well. Instead of manufacturing materials by cutting down on massive amounts of material, nanotechnology uses the reverse engineering principle, which operates in nature. It allows the manufacturing of products at the nano scale, such as atoms, and then develops products to work at a deeper scale. Worldwide, millions and billions of dollars and euros are being spent in nanotechnology to utilize the great potential of this new science, especially in the developed world in Europe, China, and America. However, developing nations are still lagging behind as they are not even able to meet the industrial progression of the previous decade. This lag is mainly because these countries are still fighting economically, and they need some time to walk down the road of nanotechnology. However, it is pertinent to say that both the developed and developing world's scientific communities agree that nanotechnology will be the next step in technological generation. This will make further industrial upgrading and investment in the field of nanotechnology indispensable in the coming years. With advances in science and technology, the scientific community adopts technologies and products that are relatively cheap, safe, and cleaner than previous technologies. Moreover, they are concerned about the financial standing of technologies, as natural resources in the world are shrinking excessively. Nanotechnology thus provides a gateway to this problem. This technology is clear, cleaner, and more affordable compared to previous mass bulking and heavy machinery. Moreover, nanotechnology holds the potential to be implemented in every aspect of life. This will mainly include nanomaterial sciences, nanoelectronics, and nanomedicine, being inculcated in all dimensions of chemistry and the physical and biological world. Thus, it is not wrong to predict that nanotechnology will become a compulsory field of study for future generations. This review inculcates the basic applications of nanotechnology in vital industries worldwide and their implications for future industrial progress.

**Carbon Nanotubes (CNTs) and Graphene:** These materials exhibit extraordinary strength and conductivity, making them ideal for reinforcing composites, creating lightweight yet robust materials, and improving the mechanical properties of components.

**Nanocomposites:** Incorporating nanoparticles into polymers enhances their mechanical strength, wear resistance, and thermal stability, making them invaluable for applications in aerospace, automotive, and structural engineering.

**Nanofluids:** Suspensions of nanoparticles in fluids, such as water or oil, exhibit superior thermal conductivity, improving the efficiency of heat exchangers and cooling systems in mechanical systems.

Nanotechnology has taken its origins from microengineering concepts in physics and material sciences. Nanoscaling is not a new concept in the computer industry, as technologists and technicians have been working for a long time to design such modified forms of computer-based technologies that require minimum space for the most efficient work. Resultantly, the usage of nanotubes

instead of silicon chips is being increasingly experimented upon in computer devices. A few years ago, it was unimaginable to consider laptops, mobiles, and other handy gadgets as thin as we have today, and it is impossible for even the common man to think that with the passage of time, more advanced, sophisticated, and lighter computer devices will be commonly used. The traditional methods of product resizing, re-functioning, and enhanced computational capabilities, due to their expensiveness and complicated manufacturing traits, have slowly been replaced by nanotechnological renovations. Both private and public spending are increasing in the field of nanocomputing. The growth of marketing and industrialization in the biotechnology and computer industries are running in parallel, and their expected growth rates for the coming years are far higher. Researchers and technologists believe that by linking the advanced field of nanotechnology and informatics and computational industries, various problems in human society such as basic need fulfillment can be easily accomplished in line with the establishment of sustainable goals by the end of this decade. Most of these technologies have a set basis in computing, nanotechnology, biotechnology, material science renovations, and satellite technologies.

### **3. NANOTECHNOLOGY IN ICT**

Nanotechnology offers useful alterations in the physiochemical, mechanical, magnetic, electrical, and optical properties of computing materials which enable innovative and newer products. Thus, nanotechnology is providing a pathway for another broad-spectrum revolution in the field of automotive, aerospace, renewable energy, information technology, bioinformatics, and environmental management, all of which have root origins from nanotechnological improvements in computers. Sensors involved in software and data algorithms employ nanomaterials to induce greater sensitivity and processabilities with minimal margin-to-machine errors. Nanomaterials provide better characteristics and robustness to sensor technologies which mean they are chemically inert, corrosion-resistant, and have greater tolerance profiles toward temperature and alkalinity. Moreover, the use of semiconductor nanomaterials in the field of quantum computing has increased overall processing speeds with better accuracy and transmissibility. These technologies offer the creation of different components and communication protocols at the nano level, which is often called the internet of nano things. This area is still in a continuous development and improvement phase with the potential for telecommunication, industrial, and medical applications. This field has taken its origin from the internet of things, which is a hyperphysical world of sensors, software, and other related technologies which allow broad-scale communication via internet operating devices. The applications of these technologies range from being on the simple home scale to being on the complex industrial scale. The internet of things is mainly capable of gathering and distributing large-scale data via internet-based equipment and modern gadgets. In short, the internet of nano things is applicable to software, hardware, and network connection which could be used for data

manipulation, collection, and sharing across the globe. Another application of nanotechnology in the computer and information industry comes in the form of artificial intelligence, machine learning, and big data platforms which have set the basis for the fourth industrial revolution. Vast amounts of raw data are collected through interconnected robotic devices, sensors, and machines which have properties of nanomaterials. After wide-scale data gathering, the next step is the amalgamation of the internet of things and the internet of people to prepare a greater analysis, understanding, and utilization of the gathered information for human benefit. Such data complications can be easily understood through the use of big data in the medical industry, in which epidemiological data provide benefits for disease management. Yet another example is the applications in business, where sales and retail-related data help to elucidate the target markets, sales industry, and consumer behavioral inferences for greater market consumption patterns. Similarly, an important dimension of nanotechnology and computer combination comes in the form of drone and robotics technology. These technologies have a rising number of applications in maintenance, inspections, transportation, deliverability, and data inspection. Drones, robots, and the internet of things are being perfectly amalgamated with the industrial sector to achieve greater goals. Drones tend to be more mobile but rely more on human control as compared to robots, which are less mobile but have larger potential for self-operation. However, now, more mobile drones with better autonomous profiles are being developed to help out in the domain of manufacturing industries. These devices intensify and increase the pace of automation and precision in industries along with providing the benefits of lower costs and fewer errors. The integrated fields of robotics, the internet of things, and nanotechnology are often called the internet of robotics and nano things. This field of nanorobotics is increasing the flexibility and dexterity in manufacturing processes compared to traditional robotics. Drones, on the contrary, help to manage tasks that are otherwise difficult or dangerous to be managed by humans, such as working from a far distance or in dangerous regions. Nanosensors help to equip drones with the qualities of improved detection and sensation more precisely than previous sensor technologies. Moreover, the over-potential of working hours, battery, and maintenance have also been improved with the operationalization of nano-based sensors in drone technology. These drones are inclusively used for various purposes such as maintaining operations, employing safety profiling, security surveys, and mapping areas. However, limitations such as high speed, legal and ethical limitations, safety concerns, and greater automobility are some of the drawbacks of aerial and robotic drone technologies. Three-dimensional printing is yet another important application of the nanocomputer industry, in which an integrated modus operandi works to help in production management. Nanotechnology-based 3D printing offers the benefits of an autonomous, integrated, intelligent exchange network of information which enables wide-scale production benefits. These technologies have enabled a lesser need for industrial infrastructure, minimized post-processing operations, reduced waste material

generation, and reduced need for human presence for overall industrial management. Moreover, the benefits of 3D printing and similar technologies have potentially increased flexibility in terms of customized items, minimal environmental impacts, and sustainable practices with lower resource and energy consumption. The use of nano-scale and processed resins, metallic raw material, and thermoplastics along with other raw materials allow for customized properties of 3D printing technology. The application of nanotechnology in computers cannot be distinguished from other industrial applications, because everything in modern industries is controlled by a systemic network in association with a network of computers and similar technologies. Thus, the fields of electronics, manufacturing, processing, and packaging, among several others, are interlinked with nanocomputer science. Silicon tubes have had immense applications that revolutionized the industrial revolution in the 20th century; now, the industrial revolution is in yet another revolutionary phase based on nanostructures. Silicon tubes have been slowly replaced with nanotubes, which are allowing a great deal of improvement and efficiency in computing technology. Similarly, lab-on-a-chip technology and memory chips are being formulated at nano scales to lessen the storage space but increase the storage volume within a small, flexible, and easily workable chip in computers for their subsequent applications in multiple other industries. Hundreds of nanotechnology computer-related products have been marketed in the last 20 years of the nanotechnological revolution. Modern industries such as textiles, automotive, civil engineering, construction, solar technologies, environmental applications, medicine, transportation agriculture, and food processing, among others are largely reaping the benefits of nano-scale computer chips and other devices. In simple terms, everything out there in nanoindustrial applications has something to do with computer-based applications in the nanoindustry. Thus, all the applications discussed in this review more or less originate from nanocomputers. These applications are enabling considerable improvement and positive reports within the industrial sector. Having said that, it is hoped that computer scientists will remain engaged and will keep on collaborating with scientists in other fields to further explore the opportunities associated with nanocomputer sciences.

#### **4. NANOTECHNOLOGY IN MODERN INDUSTRY**

Scientific and engineering rigor is being carried out to the link fields of nanotechnology with contributions to the bioprocessing industry. Researchers are interested in how the basics of nanomaterials could be used for the high-quality manufacturing of food and other biomaterials. Pathogenic identification, food monitoring, biosensor devices, and smart packaging materials, especially those that are reusable and biodegradable, and the nanoencapsulation of active food compounds are only a few nanotechnological applications which have been the prime focus of the research community in recent years. Eventually, societal acceptability and dealing with social, cultural, and ethical concerns will allow the successful delivery of nano-based bio-processed products into the common markets for public usage. With the increasing population worldwide, food



requirements are increasing in addition to the concerns regarding the production of safe, healthy, and recurring food options. Sensors and diagnostic devices will help improve the sensitivity in food quality monitoring. Moreover, the fake industrial application of food products could be easily scanned out of a system with the application of nanotechnology which could control brand protection throughout bio-processing. The power usage in food production might also be controlled after a total nanotechnological application in the food industry. The decrease in power consumption would ultimately be positive for the environment. This could directly bring in the interplay of environment, food, and nanotechnology and would help to reduce environmental concerns in future. One of the important implications of nanotechnology in bioprocessing industries can be accustomed to fermentation processes; these technologies are under usage for greater industrial demand and improved biomolecule production at a very low cost, unlike traditional fermentation processes. The successful implementation and integration of fermentation and nanotechnology have allowed the development of biocompatible, safe, and nontoxic substances and nanostructures with wide-scale application in the field of food, bioprocessing, and winemaking industries. Another important application is in the food monitoring and food supply chain management, present in various subsectors such as production, storage, distribution, and toxicity management. Nanodevices and nanomaterials are incorporated into chemical and biological sensor technologies to improve overall analytical performance with regard to parameters such as response time, sensitivity, selectivity, accuracy, and reliability. The conventional methods of food monitoring are slowly being replaced with modern nano-based materials such as nanowires, nanocomposites, nanotubes, nanorods, nanosheets, and other materials that function to immobilize and label components. These methods are either electrochemically or optically managed. For food monitoring, several assays are proposed and implemented with their roots in nano-based technologies; they may include molecular and diagnostic assays, immunological assays, and electrochemical and optical assays such as surface-enhanced Raman scattering and colorimetry technologies. Materials ranging from heavy materials to microorganisms, pesticides, allergens, and antibiotics are easily monitored during commercial processing and bioprocessing in industries. Additionally, nanotechnology has presented marvelous transformations in bio-composting materials. With the rising demand for biodegradable composites worldwide to reduce the environmental impact and increase the efficiency of industrial output, there is an increasing need for sustainable technologies. Nanocomposites are thus being formulated with valuable mechanical properties better than conventional polymers, thus establishing their applicability in industries. The improved properties include optical, mechanical, catalytic, electrochemical, and electrical ones. These biodegradable polymers are not only used in bioprocessing industries to create food products with relevant benefits but are also being deployed in the biomedical field, therapeutic industries, biotechnology base tissue engineering field, packing, sensor industries, drug delivery technology, water remediation,

food industries, and cosmetics industries as well. These nanocomposites have outstanding characteristics of biocompatibility, lower toxicities, antimicrobial activity, thermal resistance, and overall improved biodegradation properties which make them worthy of applications in products. However, it is still imperative to conduct wide-scale toxicity and safety profiling for these and other nanomaterials to ensure the safety requirements, customer satisfaction, and public benefit are met. Moreover, the advancement of nanotechnology has also been conferred to the development of functional food items. The exposure and integration of nanotechnology and the food industry have resulted in larger quantities of sustainable, safer, and healthier food products for human consumption, which is a growing need for the rising population worldwide.

The overall positive impact of nanotechnology in food processing, manufacturing, packing, pathogenic detection, monitoring, and production profiles necessitates the wide-scale application of this technology in the food industry worldwide. Recent research has shown how the delivery of bioactive compounds and essential ingredients is and can be improved by the application of nanomaterials (nanoencapsulation) in food products. These technologies improve the protection performance and sensitivity of bioactive ingredients while preventing unnecessary interaction with other constituents of foods, thus establishing clear-cut improved bioactivity and solubility profiles of nanofoods, thereby improving human health benefits. However, it should be kept in mind that the safety regards of these food should be carefully regulated with safety profiling, as they directly interact with human bodies.

## **5. CONCLUSION**

Nanotechnology as defined by size is naturally broad, including fields of science as diverse as surface science, organic chemistry, molecular biology, semiconductor physics, energy storage, engineering, microfabrication, and molecular engineering. The associated research and applications are equally diverse, ranging from extensions of conventional device physics to completely new approaches based upon molecular self-assembly, from developing new materials with dimensions on the nanoscale to direct control of matter on the atomic scale. Scientists currently debate the future implications of nanotechnology. Nanotechnology may be able to create many new materials and devices with a vast range of applications, such as nanomedicine, nanoelectronics, biomaterials energy production, and consumer products. On the other hand, nanotechnology raises many of the same issues as any new technology, including concerns about the toxicity and environmental impact of nanomaterials, and their potential effects on global economics, as well as speculation about various doomsday scenarios. These concerns have led to a debate among advocacy groups and governments on whether special regulation of nanotechnology is warranted. Nanotechnology is the science and engineering of functional systems at the molecular scale. This covers both current work and concepts that are more advanced. In its original sense, nanotechnology refers to the projected ability to construct items from the

bottom up, using techniques and tools being developed today to make complete, high-performance products.

## REFERENCES

- [1] Pisarenko Z., Ivanov L., Wang Q. *Nanotechnology in Construction: State of the Art and Future Trends. Nanotechnol. Constr. A Sci. Internet-J.* 2020;12:223–231. doi: 10.15828/2075-8545-2020-12-4-223-231
- [2] Hanus M.J., Harris A.T. *Nanotechnology innovations for the construction industry. Prog. Mater. Sci.* 2013;58:1056–1102. doi: 10.1016/j.pmatsci.2013.04.001
- [3] Teizer J., Venugopal M., Teizer W., Felkl J. *Nanotechnology and its impact on construction: Bridging the gap between researchers and industry professionals. J. Constr. Eng. Manag.* 2012;138:594–604. doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000467
- [4] Alsaffar K.A. *Review of the use of nanotechnology in construction industry. Int. J. Eng. Res. Dev.* 2014;10:67–70
- [5] Ghazanlou S.I., Ghazanlou S.I., Ashraf W. *Improvement in the physical and mechanical properties of the cement-based composite with the addition of nanostructured BN-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> reinforcement. Sci. Rep.* 2021;11:19358. doi: 10.1038/s41598-021-98800-4
- [6] Sobolev K., Shah S.P. *Nanotechnology in Construction. Volume 292 Royal Society of Chemistry; London, UK: 2004*
- [7] Kaustav D., Sabyasachi S., Papun B. *A Review Paper—on the Use of Nanotechnology in Construction Industry (28 January 2020). Proceedings of Industry Interactive Innovations in Science, Engineering & Technology (I3SET2K19). A review paper—on the use of nanotechnology in construction industry; Proceedings of the Industry Interactive Innovations in Science, Engineering & Technology (I3SET2K19); Chennai, India. 16–17 May 2020*
- [8] Zhang P., Wang L., Wei H., Wang J. *A Critical Review on Effect of Nanomaterials on Workability and Mechanical Properties of High-Performance Concrete. Adv. Civ. Eng.* 2021;2021:1–24. doi: 10.1155/2021/8827124
- [9] Bajpai V.K., Kamle M., Shukla S., Mahato D.K., Chandra P., KyuHwang S., Kumar P., Huh Y.S., Han Y.-K. *Prospects of using nanotechnology for food preservation, safety, and security. J. Food Drug Anal.* 2018;26:1201–1214. doi: 10.1016/j.jfda.2018.06.011

**Saad Khan** (*Department of Mechanical Engineering, University of Panjab Lahore, Pakistan*).

## **MECHATRONICS AND ROBOTICS IN MECHANICAL ENGINEERING: SYSTEM INTEGRATION**

**Abstract:** *The integration of mechatronics and robotics has emerged as a transformative paradigm in the field of mechanical engineering, revolutionizing the design, implementation, and operation of complex systems. This study delves into the seamless fusion of mechatronics and robotics, exploring their interaction, applications, and implications. Through the integration of mechanical, electronic, and software components, mechatronics and robotics systems have demonstrated unprecedented capabilities, from precision manufacturing to autonomous vehicles. This research examines the underlying principles, design methodologies, and challenges associated with this integration, highlighting how it stimulates innovation, improves efficiency, and paves the way for the next generation of intelligent mechanical systems.*

**Анотація:** *Інтеграція мехатроніки та робототехніки стала трансформаційним парадигмом у галузі машинобудування, революціонізувавши проектування, реалізацію та експлуатацію складних систем. Дане дослідження занурюється в безшовне поєднання мехатроніки та робототехніки, досліджуючи їхню взаємодію, застосування та наслідки. Через інтеграцію механічних, електронних та програмних компонентів, системи мехатроніки та робототехніки продемонстрували безпрецедентні можливості, від точного виробництва до автономних транспортних засобів. Дослідження вивчає основні принципи, методології проектування та виклики, пов'язані з цією інтеграцією, підкреслюючи, як вона стимулює інновації, покращує ефективність та прокладає шлях до наступного покоління інтелектуальних механічних систем.*

### **INTRODUCTION.**

In the continuously evolving landscape of mechanical engineering, the integration of mechatronics and robotics has emerged as a transformative and multidisciplinary approach, promising to redefine the way we conceive, create, and interact with mechanical systems. Mechatronics, the integration of mechanical engineering, electronics, and computer science, and robotics, the field of designing and deploying autonomous machines, have merged to create a powerful synergy that transcends traditional boundaries. This integration not only enhances the capabilities of mechanical systems but also opens the door to entirely new realms of possibilities and applications.

### **METHODOLOGY.**

The methodology employed in this study encompasses a comprehensive and multifaceted approach to investigate the integration of mechatronics and robotics within the realm of mechanical engineering. Including theoretical exploration and practical insights, presenting a literature review, case study analysis, and expert interviews. This multivector approach ensures a comprehensive understanding of the topic, elucidating current trends, challenges, and developmental prospects of mechatronics and robotics integration.

## **THEORETICAL FOUNDATIONS.**

1. **Mechatronics: definition and principles** mechatronics represents the integration of mechanical engineering, electronics, computer science, and control engineering to create intelligent systems with enhanced functionality and performance. Mechatronics systems combine mechanical components with sensors, actuators, and computational intelligence, allowing them to achieve set goals through the collaborative work of various disciplines.

2. **Robotics: evolution and key concepts** robotics encompasses the development and implementation of autonomous machines capable of perception, analysis, and response to the external environment. From ancient automata to modern intelligent machines, robotics has evolved significantly, enriched by principles of kinematics and dynamics, perception and actuation systems, programming, and autonomy.

3. **Synergy of mechatronics and robotics** the integration of mechatronics and robotics opens new possibilities for creating systems capable of precise task execution, adaptation, and learning. This union not only enhances mechanical components with intelligence but also supports the development of adaptive systems that can optimize their behavior over time, and expands the horizons of application in medicine, manufacturing, automation, and many other areas.

## **APPLICATIONS OF MECHATRONICS AND ROBOTICS INTEGRATION.**

1. **Precision manufacturing and automation** the integration of mechatronics and robotics has radically changed manufacturing approaches, increasing precision, adaptability, and efficiency of production lines. From CAD/CAM systems to robotic assembly lines, this integration minimizes human errors, optimizes processes, and significantly improves product quality.

2. **Industrial robotics and automation** in the field of industrial production, mechatronics and robotics contribute to the creation of flexible manufacturing systems capable of quickly adapting to changes in production needs and the development of collaborative robots (cobots) that safely cooperate with humans.

3. **Medical robotics and healthcare** in medicine, the integration of mechatronics and robotics opens new horizons for surgery, rehabilitation, diagnostics, and personalized medicine, providing greater precision in surgical interventions, minimizing trauma, and reducing patient recovery times.

## **CONCLUSION.**

The integration of mechatronics and robotics is a key element of modern innovations, transforming various industries from manufacturing to healthcare. This synergy opens unprecedented opportunities for creating more efficient, precise, and intelligent systems, promoting technological development and improving quality of life at all levels.

**Vasile Nastasescu<sup>1</sup>, Antonela Toma<sup>2</sup>** (<sup>1</sup>*Military Technical Academy "Ferdinand I", Romania;* <sup>2</sup>*National University of Science and Technology Politehnica Bucharest, Romania*)

## **RADIAL DISPLACEMENTS IN FGMS ROTATING DISCS – A FEM STUDY**

**Abstract:** *The investigation focuses on the radial displacements in a rotating disc with uniform thickness constructed from functionally graded materials (FGMs), leveraging the finite element method (FEM) for calculation. This study introduces two pivotal concepts: the multilayer disc concept and the equivalent material concept. These methodologies enable the consideration of material properties' variation, typically simplified or overlooked due to computational complexity. By integrating these concepts, the study aims to enhance the precision and accessibility of modeling FGM structures, validated through numerical and analytical calculations. The findings offer valuable insights for specialists and structure designers, highlighting the potential for applying these methodologies in diverse engineering applications.*

**Анотація:** *Дослідження зосереджене на радіальних зміщеннях у ротаційному диску з однорідною товщиною, створеному з функціонально градієнтних матеріалів (ФГМ), використовуючи метод скінченних елементів (МСЕ) для обчислення. У цьому дослідженні вводяться дві ключові концепції: концепція багат шарового диску та концепція еквівалентного матеріалу. Ці методології дозволяють враховувати варіації властивостей матеріалів, які зазвичай спрошуються або ігноруються через обчислювальну складність. Інтегруючи ці концепції, дослідження прагне підвищити точність та доступність моделювання структур ФГМ, що підтверджено числовими та аналітичними розрахунками. Висновки надають цінні інсайти для фахівців та дизайнерів структур, підкреслюючи потенціал застосування цих методологій у різноманітних інженерних застосуваннях.*

## **INTRODUCTION**

The advent of Functionally Graded Materials (FGMs) has sparked significant interest in their manufacturing and computational analysis due to their unique properties. Unlike traditional composite materials, FGMs are characterized by a spatial variation in composition, offering tailored property gradients that can enhance the performance of engineered structures. This study addresses the computational challenges associated with FGMs by proposing accessible and efficient methods for analyzing structures made from these materials, focusing on a rotating disc model [1,2].

## **THEORETICAL BACKGROUND**

FGMs are distinguished by their graded material properties, such as Young's modulus, density, and Poisson's ratio, which vary according to predefined material laws. This study employs the power law for modeling the material gradient, a common approach in FGM design. The complexity of accurately representing these gradients necessitates the development of simplified

yet effective computational models, leading to the introduction of the multilayer disc and equivalent material concepts.

## **METHODOLOGY**

The multilayer disc concept approximates the graded material by segmenting the disc into layers with homogenized properties, while the equivalent material concept models the disc as a homogeneous entity with averaged properties. These approaches reduce computational complexity, enabling the use of FEM for analysis. The study validates these methods through a comparative analysis of numerical and analytical calculations, emphasizing the influence of material law variations, especially Poisson's ratio, on the model's accuracy.

## **RESULTS AND DISCUSSION**

The analysis revealed that both the multilayer disc and equivalent material concepts provide accurate and practical solutions for modeling FGM structures. The application of these concepts in FEM simulations demonstrated their effectiveness in capturing the essential behavior of rotating discs made from FGMs. Additionally, the study underscores the significance of considering Poisson's ratio variation in achieving precise computational results.

## **CONCLUSIONS**

This research contributes to the field of FGMs by offering robust computational models that simplify the analysis of structures made from these materials. The proposed methods, validated through comprehensive calculations, present a significant advancement in the design and analysis of FGM structures, ensuring high precision and operational convenience. Future work may explore the application of these concepts to a wider range of FGM structures and loading conditions.

The authors express their gratitude to the Military Technical Academy "Ferdinand I" and the National University of Science and Technology Politehnica Bucharest for their support in this research.

## **REFERENCES**

- [1] Tarlochan, F. "Functionally Graded Material: A New Breed of Engineered Material." *Journal of Applied Mechanical Engineering*, vol. 2, no. 2, 2013
- [2] El-Galy, I. M., Saleh, B. I., Ahmed, M. H. "Functionally graded materials: classifications and development trends from an industrial point of view." *SN Applied Sciences*, vol. 1, no. 11, 2019.

**Yu-Sheng Lai, Wei-Zhu Lin, Yung-Chih Lin, Jui-Pin Hung** (*National Chin-Yi University of Technology, Republic of China; Industrial Technology Research Institute, Republic of China*)

## **SURFACE ROUGHNESS MONITORING AND PREDICTION IN MILLING**

**Abstract:** *The development of a surface roughness prediction and monitoring system in milling processes is a crucial advancement towards enhancing manufacturing quality and efficiency. This article elucidates a comprehensive study conducted to create such a system, focusing on its methodology, outcomes, and implications for the field of precision manufacturing.*

**Анотація:** *Розробка системи прогнозування та моніторингу шорсткості поверхні у процесах фрезерування є важливим прогресом на шляху до підвищення якості та ефективності виробництва. Ця стаття висвітлює всебічне дослідження, проведене для створення такої системи, зосереджуючись на її методології, результатах і значенні для галузі точного машинобудування.*

### **INTRODUCTION**

Surface quality, especially surface roughness, plays a pivotal role in determining the performance of machined components. It influences not only the aesthetic and functional aspects of a part but also its wear resistance and fatigue strength. Traditional methods of surface roughness measurement are mostly offline and can significantly disrupt the manufacturing workflow. Therefore, there's a growing interest in developing online monitoring systems capable of predicting surface roughness in real-time during the milling process. Such systems can potentially offer immediate feedback to operators or automated systems, enabling adjustments to machining parameters to ensure optimal surface quality.

### **METHODOLOGY**

The study designed a predictive model based on extensive machining experiments, employing the response surface methodology to relate surface roughness to various independent variables like cutting parameters and machining vibration. This model was developed through regression analysis and neural network approaches to accurately predict surface roughness under different machining conditions.

The experimental setup included a vertical milling machine equipped with a tungsten carbide end cutter, machining Al6061 aluminum alloy blocks. The cutting parameters—axial cutting depth, spindle speed, and feed rate—were varied across a wide range to encompass conditions from low-speed rough machining to high-speed finish machining.



## **FINDINGS AND DISCUSSION**

The research highlighted the significant impact of machining parameters and tool vibrations on surface roughness. It was observed that improper selection of these parameters could lead to increased surface roughness, adversely affecting the machined part's quality. The study successfully developed a predictive model utilizing multivariable linear regression analysis and artificial neural network modeling. This model could predict surface roughness with a high degree of accuracy, around 90% in some cases, by considering both cutting parameters and vibration data.

## **IMPLEMENTATION AND VALIDATION**

The predictive model was integrated into a CNC milling machine through the Virtual Machine Extension (VMX) intelligent software development platform. This setup enabled real-time prediction of surface roughness and monitoring of machining quality. The system could alert operators when the predicted surface roughness exceeded acceptable thresholds or when abnormal vibrations were detected, facilitating immediate corrective actions.

## **CONCLUSION**

The developed system represents a significant stride towards intelligent manufacturing, where quality control is integrated seamlessly into the machining process. It not only enhances the efficiency and quality of production but also lays the groundwork for further research into adaptive control systems for machining processes. The successful implementation of such predictive and monitoring systems can lead to significant improvements in manufacturing operations, pushing the boundaries of what is currently achievable in terms of precision and quality.

The research team acknowledges the support from the Intelligent Machinery Technology Center, Industrial Technology Research Institute, Taiwan, highlighting the collaborative effort behind this significant advancement in machining technology.

The article builds upon previous studies in the field, citing works that have explored the relationship between surface roughness and various machining parameters. It also references methodologies for developing predictive models using regression analysis and neural network approaches, showcasing the interdisciplinary nature of the research.

This study, through its rigorous approach and innovative implementation, serves as a valuable contribution to the fields of mechanical engineering and manufacturing technology. It demonstrates the potential of integrating advanced predictive models with CNC machinery to enhance manufacturing processes, aligning with the broader goals of Industry 4.0 and smart manufacturing.

**Zuzana Murcinkova, Martin Pollak** (*Department of Design and Monitoring of Technical Systems, Department of Computer Aided Manufacturing Technologies, Faculty of Manufacturing Technologies with a seat in Presov, Technical University of Kosice, Slovak Republic*)

## **ENHANCING ROTOR BEARING CASINGS: A STUDY ON POLYMER PARTICLE COMPOSITES FOR ACOUSTIC EMISSION REDUCTION**

**Abstract:** *This study explores the implementation of polymer particle composites within rotor bearing casings to mitigate acoustic emissions and vibrations in high-speed production machinery. Faced with the challenge of increased operation speeds leading to higher vibration amplitudes and acoustic emissions, this research proposes a solution through the integration of high-damping polymer composites. By filling the voids in rotor bearing casings with selected polymer composites, the study aims to reduce acoustic emissions and improve machine performance. The selection of the composite material was determined through an analysis of four samples, with a focus on their damping characteristics measured via logarithmic decrements. The findings reveal a significant reduction in acoustic emissions, contributing to the advancement of material applications in mechanical engineering and offering a cost-effective method for enhancing machinery reliability and performance.*

**Анотація:** *У цьому дослідженні досліджується використання композитів на основі полімерних частинок у корпусах підшипників роторів для пом'якшення акустичних випромінювань і вібрацій у високошвидкісних виробничих машинах. Зіткнувшись із проблемою підвищення робочих швидкостей, що призводить до вищих амплітуд вібрації та акустичних випромінювань, це дослідження пропонує рішення шляхом інтеграції полімерних композитів із високим демпфіруванням. Заповнюючи порожнечі в корпусах підшипників ротора вибраними полімерними композитами, дослідження має на меті зменшити акустичну емісію та покращити продуктивність машини. Вибір композитного матеріалу визначали шляхом аналізу чотирьох зразків, зосереджуючись на їхніх характеристиках демпфування, виміряних за допомогою логарифмічних декрементів. Отримані дані свідчать про значне зниження рівня акустичних випромінювань, сприяючи вдосконаленню застосування матеріалів у машинобудуванні та пропонуючи економічно ефективний метод підвищення надійності та продуктивності машин.*

The advent of high-speed production machinery has underscored the importance of addressing increased vibration amplitudes and acoustic emissions, which compromise machine integrity and performance. Traditional solutions often involve augmenting the mass and stiffness of the mechanical system, yet these approaches can be impractical due to design and weight constraints. This research pivots towards utilizing high-damping polymer particle composites, aimed at not only enhancing the mechanical system's damping properties but also providing a novel approach to vibration and noise reduction in rotor bearing casings.

Initially, the study embarked on analyzing four polymer composite samples, each with distinct compositions, to identify the most effective material in terms of damping capability. The selection process was grounded on measuring

the logarithmic decrements of the composites, employing two experimental methodologies to ensure accuracy and reliability. The chosen composite exhibited superior damping characteristics, making it an ideal candidate for application in the rotor bearing casing.

The integration of the selected polymer composite into the rotor bearing casing was meticulously designed to fill the spaces between the casing and the housing body. This strategic placement was critical in achieving the desired damping effect while minimizing modifications to the machine's design and operational parameters. The outcomes were promising, showing a considerable decrease in acoustic emissions across different excitation amplitudes, particularly at lower frequencies where the reduction was most pronounced.

These results signify a leap forward in the application of polymer composites in mechanical engineering, particularly in scenarios involving high-speed machinery susceptible to vibration and noise issues. The study not only provides a practical solution to a longstanding problem but also opens avenues for further research in composite materials and their applications in various mechanical systems.

In conclusion, the research underscores the efficacy of polymer particle composites in reducing acoustic emissions in rotor bearing casings, highlighting their potential as a versatile and efficient material for enhancing machinery performance. The success of this application bodes well for the future of manufacturing technologies, where material innovation plays a pivotal role in overcoming operational challenges.

The authors extend their gratitude to the Slovak Research and Development Agency and the Scientific Grant Agency of the Ministry of Education of the Slovak Republic and the Slovak Academy of Sciences for their support. Special thanks are also directed to Technická Diagnostika Ltd. for their assistance in the experimental measurements.

The exploration into the use of polymer particle composites for acoustic emission reduction in rotor bearing casings represents a significant contribution to the field of mechanical engineering. It demonstrates a practical approach to mitigating the challenges posed by increased operational speeds in production machinery, marking a step forward in the quest for more efficient and reliable mechanical systems. The findings of this study not only provide a solution to a specific engineering challenge but also open the door to further innovations in the use of composite materials for vibration and noise reduction.

**Алексєєв А.Є., Гарбуз Є.С., Яворський В.Є.,** науковий керівник: д.т.н., професор Березюк О.В. (Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна)

## **УДОСКОНАЛЕННЯ КЕРУВАННЯ МЕХАНІЗМАМИ РОБОЧИХ ОРГАНІВ СМІТТЄВОЗІВ ЗА ДОПОМОГОЮ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ**

***Анотація:** Проведено аналіз літературних джерел з перспективою удосконалення керування механізмами робочих органів сміттевозів за допомогою мікроконтролерів. У роботі розглянуто приклади застосування мікроконтролерів для керування механізмами робочих органів сміттевозів та ефект від їхньої роботи. Проаналізовано вплив мікроконтролерів на функціональність та ефективність механізмів робочих органів сміттевозів.*

***Abstract:** An analysis of literature sources has been conducted with the perspective of improving the control of mechanisms of garbage truck working bodies through the use of microcontrollers. The paper examines examples of microcontroller applications for controlling the mechanisms of garbage truck working bodies and the effect of their operation. The impact of microcontrollers on the functionality and efficiency of garbage truck working body mechanisms has been analyzed.*

*Постановка проблеми в загальному вигляді.* У містах з розвиненим спецавтогосподарством існує гостра проблема, пов'язана з організацією роботи сміттевозів, що дозволяють вивозити тверді побутові відходи (ТПВ), які створюють серйозну проблему довкіллю [1, 2]. Ефективне збирання ТПВ забезпечує безпечну контейнеризацію і запобігає їхньому розкиданню при перевезенні сміттевозами, виконавчі органи яких оснащені гідравлічним приводом [3-11]. Ефективність збирання залежить від ступеня ущільнення ТПВ: вищий рівень ущільнення забезпечує більшу кількість перевезених відходів [12-14].

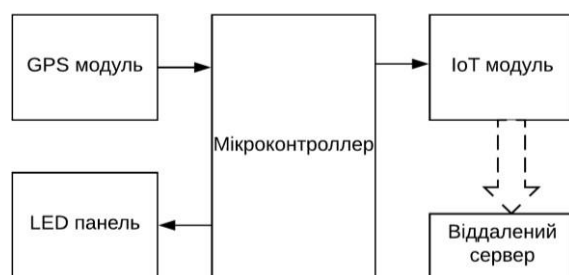
Дослідження в області застосування мікроконтролерів для керування механізмами робочих органів сміттевозів показують великий потенціал їхнього використання для підвищення ефективності та надійності. Впровадження цих технологій сприятиме підвищенню конкурентоспроможності комунальних машин.

*Основний матеріал.* В роботі [15] запропоновано вимірювач рівня ТПВ в урні, що являє собою автономну систему, для вимірювання та передачі даних до сервера для подальшої обробки. Схема вимірювача рівня урни має наступні елементи: лазерний датчик рівня, датчик температури, Global system for Mobile Communication модуль (GSM), цифрові перемикачі, регулятор напруги, контролер заряду, сонячні панелі, перетворювач напруга-струм, акумулятор, мікроконтролер, блок пожежегасіння. Автономність системи лежить у власному джерелі живлення (акумулятора), який живить усю периферію, та сонячного модуля для заряду самого акумулятора. Так як система має особисте живлення, для її економії на схемі представлені цифрові ключі, або перемикачі живлення, які подають живлення до GSM модулю, датчика рівня та перетворювача напруга-струм.

Також для економії енергії, мікроконтролер переходить у режим сну та прокидається завдяки сигналу переривання, яке надходить від Real Time Clock (роботи годинників реального часу). Основні дані, які передаються від GSM модулю до сервера, являються перш за все виміряна відстань датчиком рівня представлена у mm, та інші дані типу: температура в урні, напруга та струм що видається сонячними панелями, сигнал тривоги про пожежу, стан заряду батареї. Якщо середній рівень заповнення декількох урн вище заданої границі, одразу надається наказ про відправлення сміттевозів на той район де розташовані урни, з яких були прийняті дані.

Технологія GPS-стеження дозволить в реальному часі здійснювати контроль роботи сміттевоза, а саме здійснювати контроль маршруту, швидкості, і контроль витрати палива [16]. Для взаємодії елементів, що беруть участь у дорожньому русі (транспортні засоби, дорожні знаки, світлофори, системи контролю і безпеки тощо) використовуються стільникові мережі 3G, 4G, LTE, бездротові технології передачі даних такі як: Wi-Fi, Bluetooth, LoRa, NB-IoT, різні модулі і датчики, наприклад, RFID, GPS / ГЛОНАСС та інші.

На рис. 1. показано схему приладу для відслідковування місцезнаходження сміттевозів.



*Рис. 1. Схема приладу для відслідковування місцезнаходження сміттевозів*

Важливими компонентами інтелектуальної інформаційної системи є мікроконтролер, GPS модуль, модуль IoT.

GPS модуль використовується для визначення поточного місцезнаходження сміттевоза. Інформація від модуля GPS надсилається контролеру, який виводить дані про час та місцезнаходження на екран, встановлений на сміттевозі та модулю IoT, який надсилає отримані дані до віддаленого серверу для подальшої їхньої обробки.

Для покращення роботи сміттевоза в роботі [17] запропоновано модель цифрового приладу, що дозволяє з високою точністю вимірювати малі лінійні переміщення його робочих органів з виведенням результатів вимірювань на екран комп'ютера в реальному часі та мінімальними ресурсними затратами. Принцип дії датчика малих лінійних переміщень засновано на муаровому ефекті, що являє собою інтерференційний візерунок, утворений при накладенні двох періодичних сітчастих малюнків. Елементи двох малюнків, які повторюються, слідує з дещо різною просторовою частотою і, накладаючись один на одного, утворюють темні і

світлі муарові смуги. При переміщенні однієї з решіток відносно іншої або при повороті на певний кут виникає переміщення областей перекриття з певною періодичністю. При малих відносних переміщеннях решіток виникає суттєво більше переміщення самих областей перекриття, що і дозволяє їх фіксувати [18]. Загальний вигляд датчика лінійних переміщень на муаровому ефекті представлений на рис. 2.

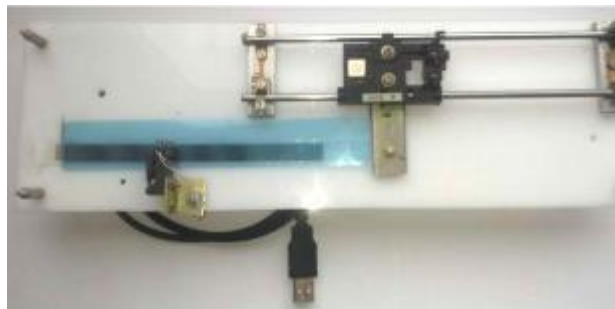


Рис. 2. Загальний вигляд датчика лінійних переміщень на муаровому ефекті

Діюча модель датчика лінійних переміщень на муаровому ефекті може бути встановлена на панелі керування робочими органами сміттєвоза.

В статті [19] на основі аналізу методів обробки сигналів та вимірювання фізичних величин запропоновано засіб на базі мікроконтролерної плати Arduino Uno R3 та ультразвукового сенсора відстані HC-SR04 для вимірювання відстані між сміттєвозом і контейнером ТПВ, який враховує параметри середовища сенсором температури та відносної вологості повітря DHT11, захищений патентом [20] та може бути використаний під час розробки високоефективних спецавтомобілів для транспортування відходів, як основної ланки в структурі машин для збирання та первинної переробки ТПВ. Запропоновано структурну схему засобу та блок-схему алгоритму програми [21] керування мікроконтролером пристрою для вимірювання відстані. Наведено основні характеристики запропонованого засобу, а також показано результати експериментальних випробувань для вимірювання відстані із урахуванням параметрів середовища, які підтвердили достовірність параметру, що вимірюється [19].

В статті [22] запропоновано удосконалений засіб для вимірювання відстані між сміттєвозом і контейнером ТПВ, в якому параметри середовища враховуються сенсором температури та відносної вологості повітря підвищеної точності DHT22 і високоточний сенсором атмосферного тиску і температури навколишнього середовища BMP280, захищений патентом [23], а керуюча програма свідоцтвом [24].

В матеріалах статті [25] запропоновано засіб на базі мікроконтролерної плати Arduino Uno R3 та інкрементального енкодера KY-040 для вимірювання параметрів обертального руху шнека для зневоднення ТПВ, який захищений патентом [26] і може бути використаний під час розробки високоефективних сміттєвозів, як основної ланки в структурі машин для збирання та первинної переробки ТПВ. Запропоновано структурну схему засобу та блок-схему алгоритму програми [27] керування мікроконтролером для реалізації пристрою для вимірювання параметрів обертального руху.

Наведено основні технічні характеристики запропонованого засобу. Показано результати експериментальних випробувань для вимірювання параметрів обертального руху, які підтвердили достовірність параметрів, що вимірюються.

### ВИСНОВКИ.

Розглянуті засоби удосконалення керування механізмами робочих органів сміттєвозів за допомогою мікроконтролерів дозволяють забезпечити більшу точність керування, підвищити надійність і знизити ризик поломок, а також значно покращити якість послуг комунальних підприємств зі збирання та транспортування твердих побутових відходів.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Khrebtii H. et al. *Innovative ways of improving medicine, psychology and biology*. Primedia eLaunch, 2023. 305 p.
2. Alieva M. et al. *Conceptual options for the development and improvement of medical science and psychology*. International Science Group, 2023. 117 p.
3. Kozlov L., Burennikov Yu., Piontkevych O., Paslavskaya O. *Optimization of design parameters of the counterbalance valve for the front-end loader hydraulic drive*. Proceedings of 22nd International Scientific Conference «MECHANIKA 2017». Kaunas University of Technology, Lithuania, 19 May 2017. P. 195-200.
4. Petrov O., Kozlov L., Lozinskiy D., Piontkevych O. *Improvement of the hydraulic units design based on CFD modeling*. In: *Lecture Notes in Mechanical Engineering XXII*, 2019. P. 653-660. DOI: 10.1007/978-3-030-22365-6\_65
5. Kozlov L., Polishchuk L., Piontkevych O., Purdyk V., Petrov O., Tverdome V., Tungatarova A. *Optimization of Design Parameters of a Counterbalance Valve for a Hydraulic Drive Invariant to Reversal Loads*. *Mechatronic Systems*, Vol. 1, Routledge, London, 2021. P. 137-148. DOI: 10.1201/9781003224136-12
6. Polishchuk L., Khmara O., Piontkevych O., Adler O., Tungatarova A., Kozbakova, A. *Dynamics of the conveyor speed stabilization system at variable loads*. *Informatyka, Automatyka, Pomiarowy W Gospodarce i Ochronie Środowiska*. 2022. Vol. 12. No. 2. P. 60-63.
7. Polishchuk L. K., Piontkevych O. V., *Dynamics of adaptive drive of mobile machine belt conveyor*. 22nd International Scientific Conference «MECHANIKA 2017». Kaunas University of Technology. 19 May 2017. P 307-311
8. Лозінський Д. О., Козлов Л. Г., Піонткевич О. В., Кавецький О. І. Оптимізація електрогідравлічного розподільника з незалежним керуванням потоків. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2023. №17(1). С. 87-91.
9. Піонткевич О. В. Математична модель гідроприводу фронтального навантажувача з гальмівним клапаном. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2015. №2. С. 83-90.
10. Піонткевич О. В., Сухоруков С. І., Сердюк О. В., Домославський В. М. Про лазерний технологічний комплекс на машинобудівному підприємстві. *Вісник машинобудування та транспорту*, 2022. № 16(2). С. 96-100.
11. Козлов Л., Репінський С., Паславська О., Піонткевич О. *Характеристики мехатронного приводу під час просторового руху маніпулятора*. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2017. № 2. 9 с. Електронний ресурс: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/507>
12. Kornylko I., Gnyp O. *Scientific foundations in research in Engineering*. Primedia eLaunch, 2022. 709 p.
13. Kazachiner O., Boychuk Y., Halii A. *Theoretical foundations of pedagogy and education*. International Science Group, 2022. 602 p.
14. Hladyshch D., Hnat H. *Prospective directions of scientific research in engineering*

and agriculture. *International Science Group*, 2023. 464 p.

15. Бугреєв С. С., Яремчук Н. А. Вимірювач рівня сміття в підземній урні з використанням нечіткої системи для обробки інформації. *Науково-технічна конференція викладачів, науковців, аспірантів та студентів, присвячена Дню Науки*, 27-29 травня 2017 р. К.: НТУУ «КПІ», 2017. С. 15-16.

16. Гринчук В. В., Березюк О. В. Контроль місцеположення сміттєвозів на основі сучасних технологій зв'язку. *Прикладні науково-технічні дослідження: матер. III міжнар. наук.-прак. конф.*, 3-5 квіт. 2019 р. Івано-Франківськ: Симфонія форте, 2019. С. 111.

17. Мельничук О. І., Березюк О. В. Датчик малих лінійних переміщень для управління сміттєвозом. *Прикладні науково-технічні дослідження: матер. III міжнар. наук.-прак. конф.*, 3-5 квіт. 2019 р. Івано-Франківськ: Симфонія форте, 2019. С. 115.

18. Білинський Й. Й., Білинська М. Й., Кухарчук В. В. Пристрій вимірювання амплітуди малих лінійних переміщень. Патент 68904 А Україна. МПК G01H 9/00. Заявник і патентовласник: ВНТУ. Опубл. 16.08.04. Бюл. № 8.

19. Bereziuk O., Lemeshev M., Bogachuk V., Wójcik W., Nurseitova K., Bugubayeva A. Ultrasonic microcontroller device for distance measuring between dustcart and container of municipal solid wastes. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2019. No. 4. P. 146-150.

20. Березюк О. В. Ультразвуковий далекомір. Патент України № 139123 U, МПК(2016.01) G01S 15/02, G01S 15/08. Заявник і патентовласник: ВНТУ. u201905374. Заявл. 20.05.2019. Одерж. 26.12.2019. Бюл. № 24.

21. Березюк О. В. Комп'ютерна програма "Керуюча програма ультразвукового далекоміра для вимірювання відстані між сміттєвозом і контейнером твердих побутових відходів із урахуванням параметрів середовища на базі мікроконтролерної плати Arduino Uno R3". Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 89720. К.: МЕРТ України. Дата реєстрації: 12.06.2019.

22. Bereziuk O. V., Lemeshev M. S., Bogachuk V. V., Kisala P., Tungatarova A., Yeraliyeva B. High-precision ultrasonic method for determining the distance between garbage truck and waste bin. *Mechatronic Systems I: Applications in Transport, Logistics, Diagnostics, and Control: collective monograph*. London (UK): Routledge, 2021. P. 279-290.

23. Березюк О. В., Лемешев М. С., Віштак І. В. Високоточний ультразвуковий далекомір. Патент України № 153956 U, МПК G01S 15/02, G01S 15/08. Заявник і патентовласник: ВНТУ. u202107458. Заявл. 20.12.2021. Одерж. 27.09.2023. Бюл. № 39. 4 с.

24. Березюк О. В. Комп'ютерна програма "Керуюча програма високоточного ультразвукового далекоміра для визначення відстані між сміттєвозом і контейнером". Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 100462. К.: Міністерство економічного розвитку і торгівлі України. Дата реєстрації: 10.11.2020.

25. Wójcik W., Bereziuk O. V., Lemeshev M. S., Bohachuk V., Polishchuk L., Bezsmertna O., Smailova S., Kurmagazhanova S. Metrological Aspects of Controlling the Rotational Movement Parameters of the Auger for Dewatering Solid Waste in a Garbage Truck. *International Journal of Electronics and Telecommunications*. 2023. Vol. 69, No. 2. P. 233-238.

26. Березюк О. В. Тахометр. Патент України № 147427 U, МПК G01P 3/484. Заявник і патентовласник: ВНТУ. u202007990; Заявл. 14.12.2020. Одерж. 05.05.2021, Бюл. № 18. 5 с.

27. Березюк О. В. Комп'ютерна програма "Керуюча програма вимірювача параметрів обертального руху шнека для зневоднення твердих побутових відходів у сміттєвозі на базі мікроконтролерної плати Arduino Uno R3". Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 93685. К.: Міністерство економічного розвитку і торгівлі України. Дата реєстрації: 05.11.2019.



**Андрієнко Є.А.**, науковий керівник: к.т.н., доцент Задорожня І. М.  
(Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ –  
Тернопіль, Україна)

## **ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ОПТИМІЗАЦІЯ ТА ПЕРЕДБАЧЕННЯ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ ВИРОБНИЦТВА**

**Анотація:** Стаття розглядає використання сучасних технологій у машинобудуванні для оптимізації та передбачення виробничих процесів. Зосереджуючись на впровадженні штучного інтелекту та Інтернету речей, досліджуються методи аналізу та моніторингу стану обладнання, спрямовані на підвищення ефективності та зниження витрат у виробничих умовах. Робота пропонує підхід до використання інтелектуальних систем для передбачення відмов та підтримки проактивного технічного обслуговування обладнання, що може сприяти покращенню якості виробництва та зменшенню незапланованих зупинок.

**Abstract:** This article examines the use of modern technologies in mechanical engineering for the optimization and prediction of manufacturing processes. Focusing on the implementation of artificial intelligence and the Internet of Things, it explores methods of analysis and monitoring the condition of equipment aimed at enhancing efficiency and reducing costs in production environments. The work proposes an approach to using intelligent systems for predicting failures and supporting proactive equipment maintenance, which can contribute to improving production quality and reducing unplanned downtimes.

**Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами.** У сучасному машинобудуванні ефективно керування обладнанням та передбачальне обслуговування відіграють вирішальну роль у забезпеченні безперебійної роботи виробничих процесів. Проте на практиці передбачення можливих відмов обладнання та вчасне проведення його технічного обслуговування залишається складною задачею. Це обумовлено кількома факторами, включаючи змінність робочого навантаження, технічні особливості обладнання, а також обмеження в ресурсах та часі.

Отже, основною проблемою є пошук та знаходження рішень для оптимізації обслуговування обладнання та інтеграції штучного інтелекту в сучасне машинобудування.

**Аналіз останніх досліджень і тенденцій.** Протягом багатьох років застосовуються системи SCADA, які дозволяють візуалізувати виробничий процес та всі його етапи для оператора управління. Для цього виробничий процес впроваджують датчики для збору показників стану використовуваних машин та виробленого товару. У підприємствах для обробки цими даними використовуються наперед підготовлені комп'ютерні алгоритми, які можуть за необхідності реагувати на зміну технічного завдання, виконувати запрограмовані дії у випадку аварій або помилок оператора. Зазвичай з такими системами використовується об'єднана інформаційна мережа, яка дозволяє людині дистанційно керувати обладнанням та реєструвати всі зміни, які відбулися на ділянці. Це

дозволить спеціалістові у майбутньому проаналізувати всі події та, за потреби, внести зміни у технологічні процеси виробництва або, наприклад, здійснити обслуговування промислового вузла.

Такий підхід дозволяє оптимізувати обслуговування та взаємодію з обладнанням, а також вести статистику роботи. Проте, в той же час, велика кількість організаційних та технічних питань лягає на плечі окремого фахівця, які він може вирішити, опираючись на свій досвід роботи та деякі усереднені стандартизовані дані.

**Формулювання невирішених частин загальної проблеми.** Для виробництва важливо, щоб стійкість до відмов обладнання була максимальною, а час його ремонту та непередбачуваного простою – мінімальним. За статистикою, витрати на технічне обслуговування за різними джерелами оцінюються у діапазоні від 15% до 40% від загальних виробничих витрат. Крім цього, часто на підприємствах є виробничі лінії, які необхідно часто змінювати та пристосовувати під нове технічне завдання та вимоги виробництва. Зазвичай, у таких випадках знову необхідний фахівець, який буде проектувати нове виробництво.

**Цілі статті та постановка задачі.** Ціль статті є розповсюдження сучасних підходів до вирішення питань обслуговування обладнання, масової оптимізації та комп'ютеризації. Мета полягає у вивченні впливу інноваційних технологій, таких як Інтернет речей (IoT) та штучний інтелект (AI), на виробничі процеси в галузі машинобудування. Основною метою є дослідження можливостей використання датчиків IoT для моніторингу стану обладнання, а також застосування методів передбачення відмов та профілактичного обслуговування на основі аналізу даних з цих датчиків. Дослідження включає аналіз ефективності використання технологій IoT та AI в забезпеченні надійності та продуктивності виробничих процесів, а також розгляд можливостей застосування цифрових двійників для моделювання та оптимізації роботи обладнання

**Виклад основного матеріалу дослідження.** У епоху автоматизації, розумно якомога швидше впроваджувати нові технології. Наприклад, такі як збір та зберігання інформації. Так, суміжним кроком із SCADA системами є побудова Інтернету речей (IoT). Використання датчиків IoT різних типів для віддаленого моніторингу стану обладнання в комплексі з можливістю проводити аналітику експлуатації машин та роботів значно скорочує час простою обладнання, тим самим мінімізує витрати на утримання машин та оптимізує продуктивність робіт.

Перевагами Інтернету речей порівняно зі звичайними датчиками є його доступ до об'єднаної промислової мережі виробництва та передача інформації у підготовленому цифровому вигляді [1]. Це зменшує навантаження на розшифрування інформації "на іншому боці". Також завдяки цьому будь-який пристрій у цій мережі може у будь-який момент отримати показання з необхідного датчика для подальшого його застосування. Для забезпечення надійного сигналу та передачі даних, необхідно, щоб всі пристрої передачі даних працювали за одним і тим самим протоколом. Наприклад, в Україні, Київстар надає можливість

використання технології NB-IoT на базі LTE. А проект іотї компанії DEPS пропонує датчики з відкритим стандартом бездротового зв'язку LoRaWAN.

На цій базі доступним до реалізації може бути предиктивне обслуговування, або іншими словами, передбачуване (англ. Predictive Maintenance), а також профілактичне обслуговування, засноване на фактичному стані об'єкта. Воно полягає в аналізі даних, які надходять з датчиків, встановлених на машині, роботі тощо. На їх основі комп'ютер за допомогою готового алгоритму може виявити відхилення в роботі. Ці методи включають в себе моніторинг вібрації, термографію, трибологію, параметри процесу, візуальний контроль, ультразвук та інше. На рухомих машинах зазвичай використовують аналіз вібраційних сигналів, термометрію та акустичний моніторинг. Це можуть бути значення вібрацій головки фрезерного верстата, нестандартні коливання температури дугової печі та інше. Ці відхилення можуть вказувати на потенційні проблеми, такі як збої, помилки, дефекти чи несправності, які необхідно виявити та усунути, перш ніж вони призведуть до серйозного пошкодження або простою. Реєстрація таких аномалій дозволяє попередити несправність, а не дізнатися про неї постфактум, коли через поломку неможливо виконати технічне завдання або відбувається невідкладний ремонт.

Виділяють три основні типи предиктивного обслуговування:

- Непряме передбачення відмов
- Виявлення аномалій
- Залишений термін корисного використання (з англ. Remaining useful life – RUL)

IOT Analytics у своєму звіті зобразила їх основні відмінності [2]. Ілюстрація з цього звіту наведена на рисунку 1.

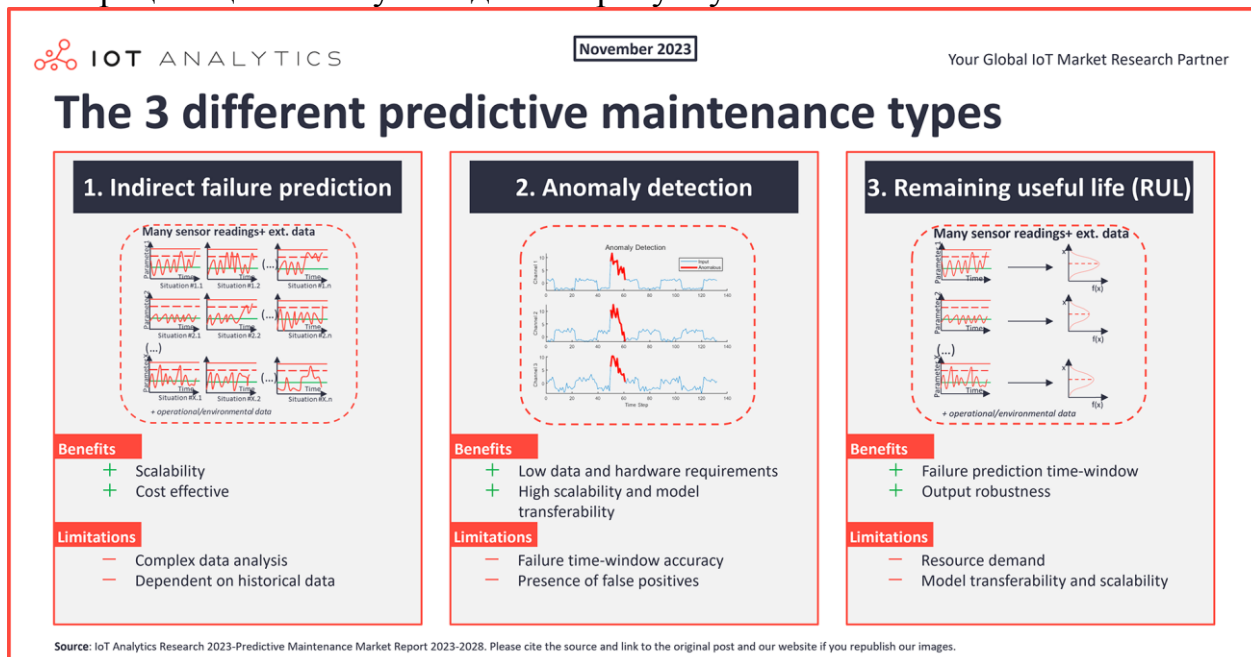


Рис. 1 – Підходи до виявлення необхідності профілактичного обслуговування

Збір інформації у вигляді безперервного потоку даних з датчиків дозволяє надати аналіз цієї інформації спеціально навченому штучному інтелекту. Основним плюсом такого підходу є швидкість виявлення дефектів у роботі обладнання та прогнозування його стану в найближчому майбутньому, що може оптимізувати профілактичне обслуговування, застосовуючи його там, де воно дійсно необхідне. Машинне навчання дозволяє виявити оптимальний підхід під кожний окремий випадок. Так, наприклад, аналіз даних про вібрацію є складним процесом обробки інформації, оскільки значення дуже динамічні і складаються з великої кількості шумів [3]. Навчений штучний інтелект може виявляти шуми та їх джерела на основі попереднього досвіду, завдяки чому може ефективно проводити аналіз.

Згідно з брошурою Deloitte, подібна методика може знизити незапланований час простою до 53%, зменшити кількість браку на 21%, та знизити витрати на зберігання та придбання запасних частин обладнання до 2 разів [4].

Для цього штучний інтелект необхідно підготувати – «навчити». Існують різні підходи до машинного навчання [5], між якими вибирають підходяще рішення для компромісу між точністю та гнучкістю. Для цього, як вже згадувалося, використовують показання датчиків у реальному часі, записи бази даних. Для зменшення витрат на навчання штучного інтелекту у кожному індивідуальному випадку можна використовувати передбачено підготовлені, навчені моделі штучного інтелекту. Ці моделі включають в себе базові шаблони для конкретних активів або видів відмов.

Для точного уявлення стану цільового об'єкта штучному інтелекту надається математичну модель обладнання. Для аналізу роботи електродвигуна, розрахункові математичні моделі використовують досить довго. Існує велика кількість доступних інструментів цифрового проектування САПР. Наприклад, частою практикою є симуляція поведінки електродвигуна за допомогою Matlab Simulink. Отримуючи такі моделі та пов'язуючи їх між собою, штучний інтелект отримує повну віртуальну модель керованого об'єкта. Віртуалізація фізичного об'єкта у вигляді цифрової копії дозволяє створити цифрового двійника. Цей підхід вважається однією з передових технологій розвитку автоматизації машинобудування та виробництва взагалі. Технологія цифрових двійників може і повинна максимально точно моделювати фізичні компоненти, структури, стани та операції об'єктів. Оптимальні параметри, отримані шляхом аналізу та прогнозування динамічних змін віртуальних моделей, переносяться на фізичні об'єкти для оптимізації всього виробничого процесу. Цифровий двійник може використовуватися як для навчання штучного інтелекту – навчити його шляхом копіювання реального об'єкта, так і для регулювання фізичної моделі на основі проведеної симуляції у цифровій копії [6]. Додатковим плюсом цієї технології є налагодження готового штучного інтелекту не на справжньому обладнанні, від чого

підприємство може зазнати збитків, а на віртуальній моделі. Це перспективна технологія. Очікується, що до 2025 року світовий ринок цифрових двійників досягне \$26,07 млрд при загальному щорічному темпі зростання 38,2% [7], а за дослідженнями Дослідницького інституту Capgemini, на основі опитування 800 організацій, вони почали спостерігати покращення показників сталого розвитку в середньому на 16% за рахунок впровадження цифрових двійників у різних сферах використання [8].

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** У сумі, використання сучасних технологій в машино- та виробничому процесі дозволяє підвищити ефективність обслуговування, знизити витрати та забезпечити точне управління. Застосування штучного інтелекту та інтернету речей сприяє покращенню процесів моніторингу та підтримки обладнання, зменшуючи час перебоїв та витрати. А подальше дослідження цих технологій може спрямовуватися на розвиток адаптивних систем управління, що дозволить пристосовувати процеси виробництва до змінних умов. Також варто досліджувати можливості поєднання різних типів даних для ще точнішого аналізу та прогнозування роботи обладнання.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Сметко Д. Д. Інноваційні рішення в енергетиці та виробництві на базі концепції IoT / Д. Д. Сметко, М. Р. Шевченко, І. М. Задорожня // *Пріоритетні шляхи розвитку науки і освіти: матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції: м. Львів, 29-30 липня 2023 року.* – Львів: Львівський науковий форум, 2023. – С. 34-36.
2. IoT Analytics [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://iot-analytics.com>
3. Mobley, R. Keith. *An Introduction to Predictive Maintenance.* Нідерланди, Elsevier Science, 2002.
4. Deloitte. *Інфографік. Передбачуване обслуговування 2023.* [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www2.deloitte.com>
5. Ucar A, Karakose M, Kırımça N. *Artificial Intelligence for Predictive Maintenance Applications: Key Components, Trustworthiness, and Future Trends.* *Applied Sciences.* 2024; 14(2):898. <https://doi.org/10.3390/app14020898>
6. Jiang, Yuchen & Yin, Shen & Li, Kuan & Luo, Hao & Kaynak, Okyay. (2021). *Industrial applications of digital twins.* *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences.* 379. 20200360. 10.1098/rsta.2020.0360.
7. Lee J, Azamfar M, Singh J, Siahpour S (2020) *Integration of digital twin and deep learning in cyber-physical systems: towards smart manufacturing.* *IET Collab Intell Manuf* 2:34–36
8. Capgemini Research Institute *WebReport* [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.capgemini.com>

**Бабаков Д.О.**, науковий керівник: к.т.н., доцент Ковалевська О.С.  
(Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ –  
Тернопіль, Україна)

## РОЗРОБКА МЕХАНОСКЛАДАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ МЕТАЛУРГІЙНИХ МЕХАНІЗМІВ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ

***Анотація:** У статті представлено результати дослідження, спрямованого на розробку ефективного та оптимального технологічного процесу для виготовлення механізмів листогибів. Робота акцентує на аналізі поточного стану виробництва та впровадженні інноваційних технологій і автоматизації, які дозволяють підвищити продуктивність та знизити собівартість продукції.*

***Abstract:** This article presents the results of research aimed at developing an efficient and optimal technological process for the manufacturing of bending machines. The work focuses on the analysis of the current state of production and the implementation of innovative technologies and automation, which allow for an increase in productivity and a reduction in the cost of production.*

У сфері машинобудування, розвиток технологій тісно взаємопов'язаний із постійним удосконаленням виробничих процесів, особливо в контексті виробництва складних механізмів. Важливе місце в цьому процесі займає вдосконалення обладнання для металургійного виробництва, наприклад, листогибів, де вимоги до точності та надійності особливо високі.

Розширена аналітика поточного стану виробництва: Детальний огляд сучасного стану в металургійній галузі виявляє критичні виклики: застаріле обладнання, недостатня автоматизація, і низька продуктивність. Ці виклики вимагають негайного впровадження передових технологій для обробки матеріалів, розвитку роботизованих систем та підвищення екологічних стандартів виробництва.

Інноваційні рішення та їхній вплив: Розроблений механоскладальний комплекс є відповіддю на ці виклики, інтегруючи в себе високоточне обладнання з ЧПУ, автоматизовані системи контролю якості та гнучкі виробничі лінії. Завдяки цим інноваціям знижується ризик людських помилок, підвищується якість продукції, та оптимізується загальна продуктивність.

Економічна та екологічна ефективність: Впровадження інноваційного комплексу дозволяє знижувати виробничі витрати, енергоспоживання, та час на виготовлення продукції. Екологічна складова також грає важливу роль, оскільки використання енергоефективного обладнання та зменшення обсягу відходів сприяють підвищенню екологічної безпеки.

Перспективи для металургійної промисловості: Реалізація розробленого інноваційного комплексу відкриває нові можливості для

металургійної промисловості, включаючи підвищення конкурентоспроможності, зменшення залежності від людського фактора, та забезпечення високого рівня якості продукції.

Майбутні дослідження: Для подальшого удосконалення механоскладального комплексу актуальними є розробка і інтеграція інтелектуальних систем управління виробництвом, вивчення нових матеріалів для використання в процесах виготовлення, та розширення можливостей роботизованих систем для забезпечення більшої адаптивності виробничих процесів.

Висновок: Розробка та впровадження інноваційного механоскладального комплексу стає ключовим елементом для досягнення нових рівнів продуктивності, ефективності та екологічної безпеки в металургійному виробництві. Це не лише сприяє оптимізації виробничих процесів, але й відкриває широкі перспективи для подальшого розвитку галузі, зміцнення її позицій на світовому ринку та впровадження принципів сталого розвитку.

Це узагальнення підкреслює значення інновацій у розвитку металургійної промисловості, наголошуючи на необхідності постійного пошуку нових шляхів для оптимізації виробництва, підвищення його ефективності та екологічної безпеки.

**Бабаш А.В.** (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна)

## **РОЗРОБКА, АНАЛІЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПРИ РІЗНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ**

***Анотація:** Наведено опис існуючих систем керування асинхронним електроприводом. Представлено аналіз та особливості функціональної схеми системи векторного керування асинхронним електроприводом. Наведено опис структурної схеми системи векторного керування асинхронним електроприводом. Представлено математичну модель системи векторного керування. Наведено результати моделювання векторної системи керування асинхронного електроприводу у вигляді графіків перехідних характеристик вихідних координат. Представлено дослідження роботи математичної моделі системи векторного керування асинхронним електроприводом при зниженні сигналу завдання за швидкістю.*

***Abstract:** A description of the existing control systems of the asynchronous electric drive is given. The analysis and features of the functional diagram of the vector control system of an asynchronous electric drive are presented. A description of the block diagram of the vector control system of an asynchronous electric drive is given. A mathematical model of the vector control system is presented. The results of modeling the vector control system of an asynchronous electric drive in the form of graphs of the transient characteristics of the output coordinates are presented. An investigation mathematical model's of the vector control system of an asynchronous electric drive work when the speed task signal is reduced is presented.*

**Вступ.** Асинхронний двигун має багато переваг перед двигуном постійного струму. При однаковій потужності асинхронний двигун значно легший та має менші габарити. Також асинхронний двигун не має колектора. Але довгий час регулювання швидкості обертання ротора асинхронного двигуна було складним завданням. З появою частотних перетворювачів проблема регулювання швидкості обертання була вирішена. На сьогодні сучасні частотні перетворювачі містять у собі також певні алгоритми керування. Для задач, де не потрібна висока точність позиціонування використовуються скалярні системи керування асинхронним електроприводом [1]. Якщо потрібна висока точність позиціонування, використовуються системи векторного керування [2].

**Мета роботи** – аналіз, розробка та дослідження математичної моделі системи векторного керування асинхронним електроприводом у різних режимах роботи.

Задачі дослідження:

- огляд та аналіз існуючих систем векторного керування;
- розробка та дослідження математичної моделі системи векторного керування асинхронним електроприводом у різних режимах роботи.

**Об'єкт дослідження** – математична модель векторного керування асинхронним електроприводом.



**Предмет дослідження** – аналіз, дослідження математичної моделі системи векторного керування у різних режимах.

### ОПИС ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ

Векторна система керування згідно із законом  $\psi = \text{const}$  дає можливість отримати електромеханічні властивості асинхронного двигуна аналогічні двигуну постійного струму. При цьому значно збільшується швидкодія та збільшується надійність приводу.

Функціональна схема системи векторного керування частотним електроприводом згідно із законом  $\psi_2 = \text{const}$  у координатах  $x$ - $y$  з вимірюванням швидкості [3] наведено на рис. 1.

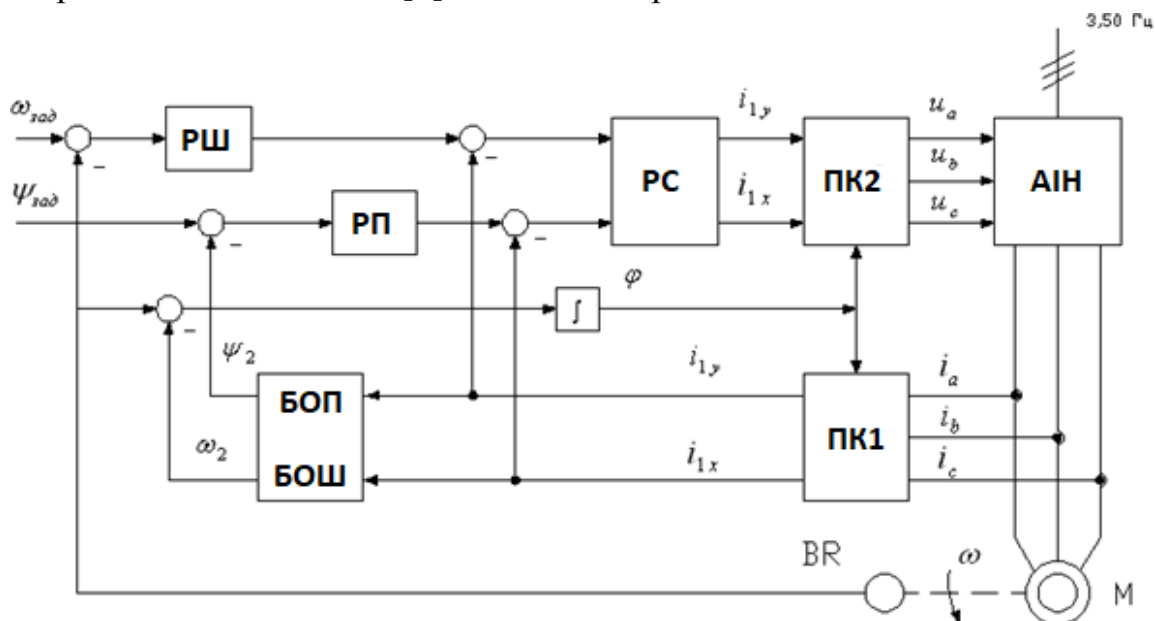


Рис.1 – Функціональна схема векторної системи керування

На функціональній схемі (рис.1) наступні позначення:

- РШ – регулятор швидкості;
- РП – регулятор потокозчеплення;
- БОП – блок обчислення потокозчеплення;
- БОК – блок обчислення ковзання;
- РС – регулятор струмів;
- ПК1 – перетворювач координат із трифазної системи у двофазну;
- ПК2 – перетворювач координат з двофазної системи на трифазну;
- BR – датчик швидкості;
- М – асинхронний двигун.

Струми статора в трьох фазах вимірюються датчиками струму і в перетворювачі координат ПК1 перетворюються на двофазні, при цьому визначаються проекції статора струму на осі  $x$  і  $y$ .

У блоці БВП обчислюється поточне значення потокозчеплення.

Система керування швидкості побудована за двоканальним підпорядкованим принципом регулювання.

Підлеглими контурами регулювання є контур регулювання струму  $i_{1y}$  та контур регулювання струму  $i_{1x}$ .

Таким чином система регулювання забезпечує стабілізацію заданого потокозчеплення та регулювання динамічного моменту.

### ОПИС СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ

Відповідно до математичної моделі системи управління та векторних діаграм встановлено, [4] що:

- потокозчеплення пропорційно струму  $i_{1x}$  ( $\Psi_2 \equiv i_{1x}$ );
- електромагнітний крутний момент  $M$  пропорційний  $i_{1y}$  ( $M \equiv i_{1y}$ );
- струм  $i_{1x} \equiv U_{1x}$ ;
- струм  $i_{1y} \equiv U_{1y}$ .

З урахуванням співвідношень та функціональної схеми системи керування електроприводом без урахування прямих та зворотних координатних перетворень, обчислень  $\Psi_2$  і  $\omega_2$  структурна схема є аналогічною структурою двозонного електроприводу постійного струму. Структурну схему представлено на рис.2.

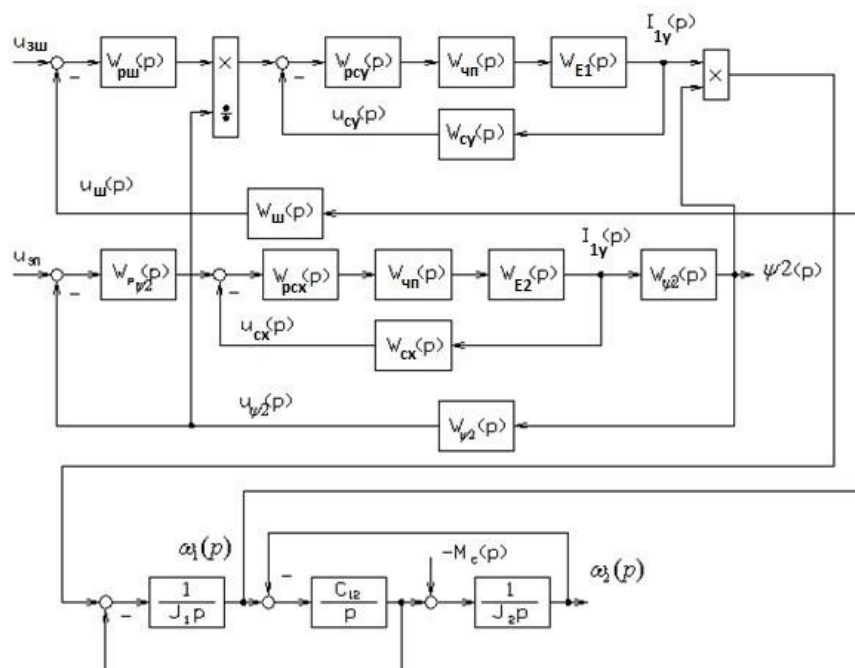


Рис.2 – Структурна схема векторної системи керування

В основу математичної моделі системи векторного керування у якості прикладу був обраний асинхронний двигун AIP280S4 [5] потужністю 110 кВт. Також було ураховано вплив другої маси на динаміку перехідних процесів. Параметри схеми заміщення асинхронного двигуна, такі як

активний, реактивний опір обмоток статора та ротора, а також індуктивності розсіювання були визначені з використанням методики [6]. Математична модель двомасової системи векторного керування представлена на рис.3.

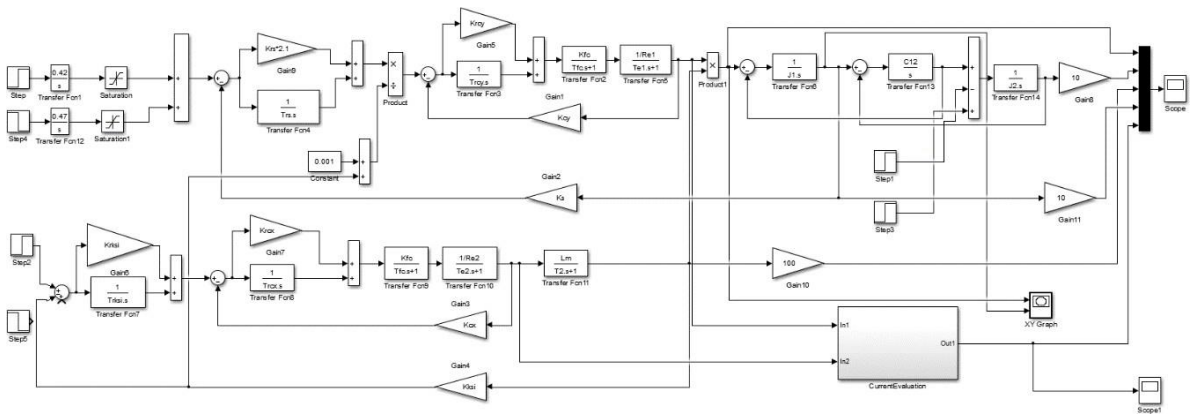


Рис.3 – Математична модель векторної системи керування асинхронним електроприводом

Перехідні характеристики кутової швидкості першої (асинхронний двигун) та другої мас (виробничий механізм), моменту, струму обмотки статора, потокозчеплення наведені на рис.4.

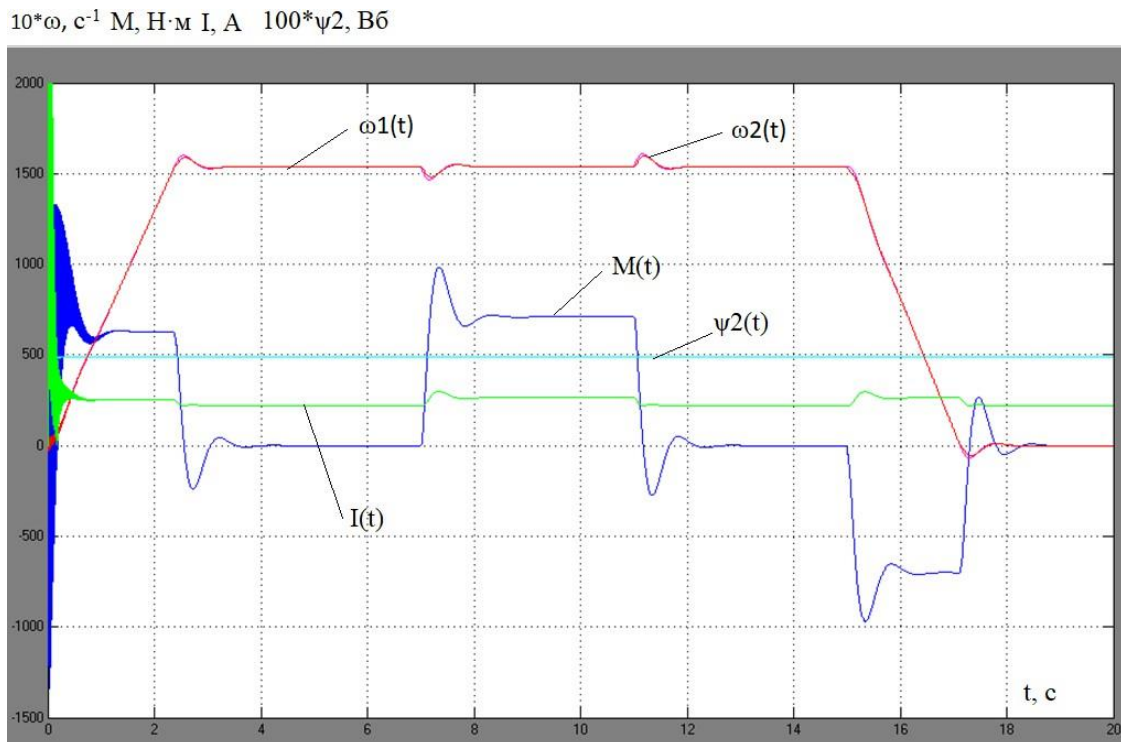


Рис.4 – Перехідні характеристики кутової швидкості першої та другої мас, моменту, струму обмотки статора, потокозчеплення

Залежність кутової швидкості першої маси від моменту (“фазовий портрет”) наведено на рис.5.

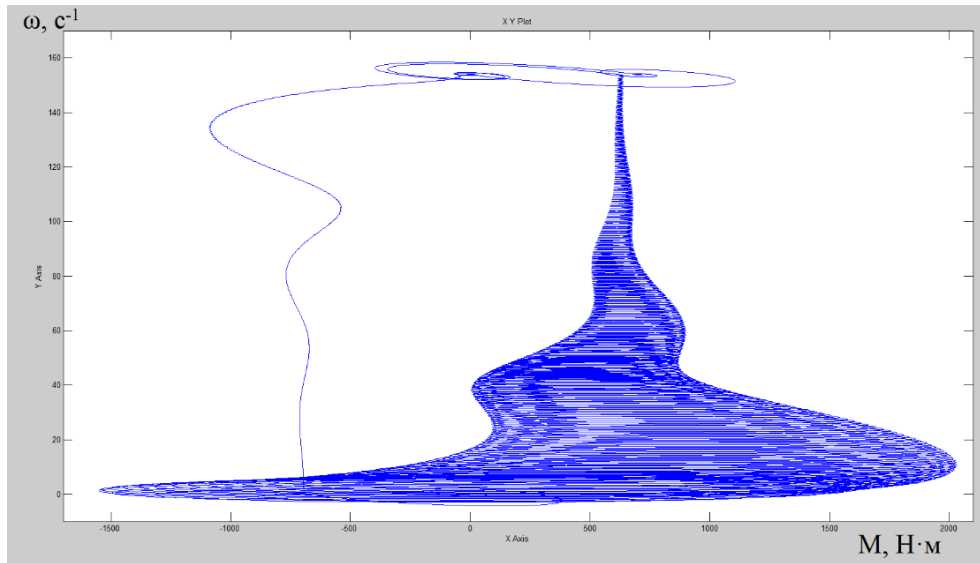


Рис.5 – Залежність кутової швидкості першої від моменту (“фазовий портрет”)

Дослідження роботи векторної системи керування асинхронним електроприводом при змінній сигналу завдання швидкості  $U_3=7$  В. Перехідні характеристики кутової швидкості першої та другої мас, моменту, струму обмотки статора, потокозчеплення при змінній сигналу завдання швидкості  $U_3=7$  В наведені на рис.6. Залежність кутової швидкості першої від моменту (“фазовий портрет”) наведено на рис.7.

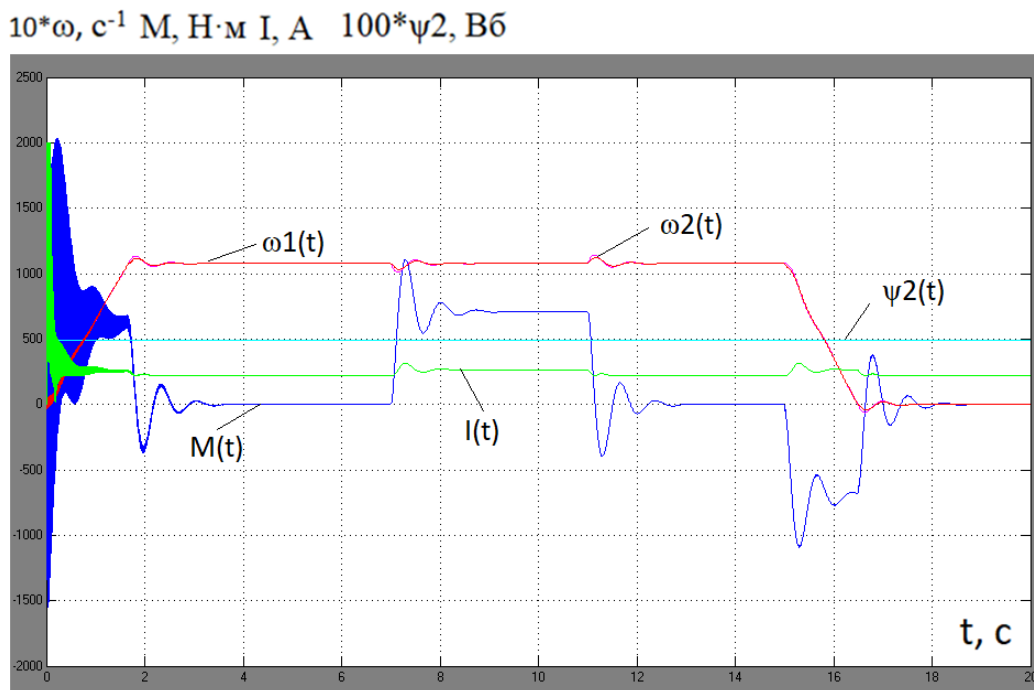


Рис.6 – Перехідні характеристики кутової швидкості першої та другої мас, моменту, струму обмотки статора, потокозчеплення ( $U_3=7$  В)

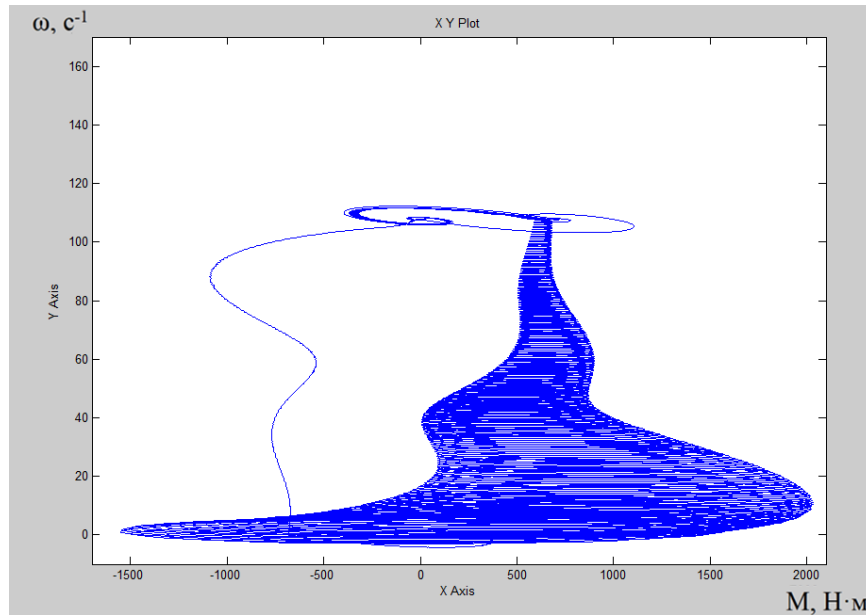


Рис.7 – Залежність кутової швидкості першої від моменту (“фазовий портрет”) при  $U_3=7$  В

Дослідження роботи векторної системи керування асинхронним електроприводом при змінній сигналу завдання швидкості  $U_3=2$  В. Перехідні характеристики кутової швидкості першої та другої мас, моменту, струму обмотки статора, потокозчеплення при змінній сигналу завдання швидкості  $U_3=2$  В наведені на рис.8. Залежність кутової швидкості першої від моменту (“фазовий портрет”) наведено на рис.9.

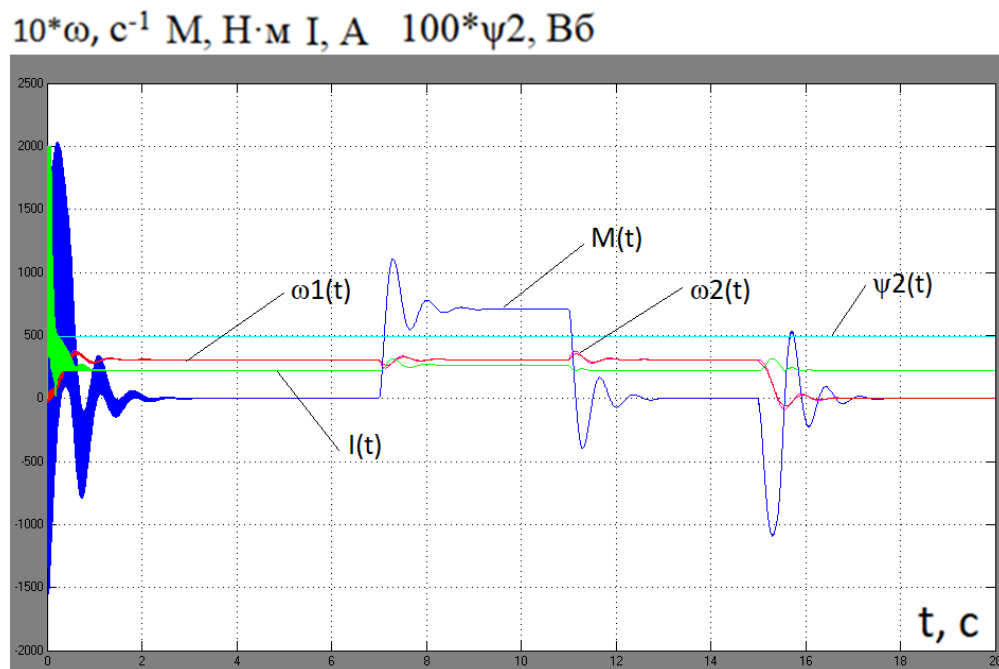


Рис.8– Перехідні характеристики кутової швидкості першої та другої мас, моменту, струму обмотки статора, потокозчеплення ( $U_3=2$  В)

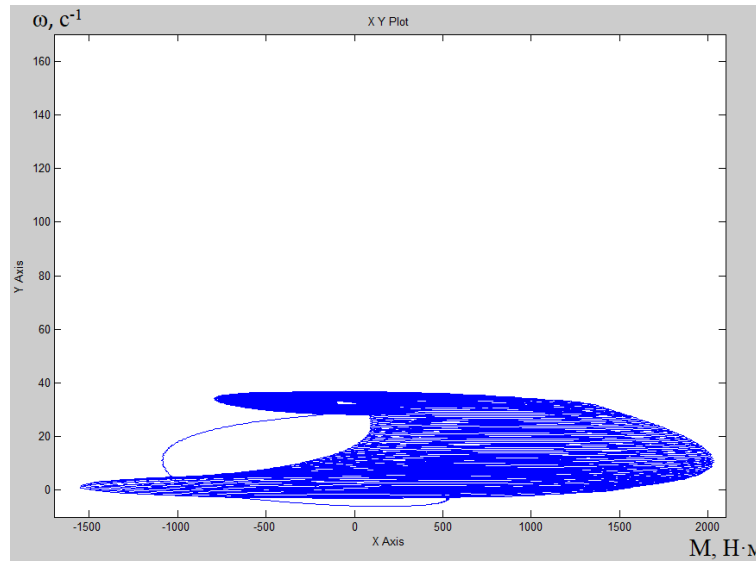


Рис.9 – Залежність кутової швидкості першої від моменту (“фазовий портрет”) при  $U_3=2$  В

### ВИСНОВКИ

В результаті виконаної роботи було представлено та проаналізовано функціональну та структурну схеми системи векторного керування асинхронним електроприводом.

На основі функціональної та структурної схем було розроблено математичну модель. Результати у вигляді перехідних характеристик вихідних координат (кутова швидкість першої та другої мас, момент та струм статора, потокозчеплення) були отриманні при моделюванні. Також було здійснено дослідження математичної моделі системи векторного керування при зниженні значення сигналу завдання за швидкістю (10, 7, 2 В).

На понижених швидкостях математична модель системи векторного керування показала адекватні результати моделювання.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Колб Ант. А., Колб А.А. Теорія електроприводу: Навчальний посібник –Д., Національний гірничий університет, 2006. – 511 с
2. Панкратов А.І. “Системи керування електроприводами” – Краматорськ: ДДМА, 2007.–228 с.

**Балицький К. Е.**, науковий керівник: Крьока С. В. (ВСП «Дружківський фаховий коледж Донбаської державної машинобудівної академії» м.Дружківка, Україна)

## **ОРГАНІЗАЦІЯ ПРОПУСКУ ПЕРСОНАЛУ НА ТЕРИТОРІЮ ПІДПРИЄМСТВА НА БАЗІ ПЛАТФОРМИ ARDUINO**

***Анотація:** Досліджено будову платформи Arduino, на базі якого розроблена система управління організацією пропуску персоналу на територію підприємства. Виконаний проєкт сучасної недороговартісної системи контролю працівників на підприємстві з NFS рідером на базі Arduino.*

***Abstract:** The structure of the Arduino platform was studied, on the basis of which a management system for the organization of personnel access to the territory of the enterprise was developed. Completed project of a modern low-cost employee control system at the enterprise with NFS reader based on Arduino.*

Одним з найважливіших пунктів нашого життя є його збереження. Для цього використовується багато технологій як вдома так і за його межами і не важливо чи то електронні двері, камери чи інші способи забезпечити безпеку себе та оточуючих. І якщо на безпеку на вулиці ми вплинути ми не можемо то на підприємстві є багато заходів безпеки які служать для забезпечення якісного робочого простору такі як камери, високі паркани, охоронці та багато іншого. Прохідна - це приміщення при вході на підприємство, через яке проходять робітники та службовці. Мета прохідної: не дозволяти потрапляння людей без належного дозволу на його територію. Прохідна може виглядати по різному і в неї можуть бути різні механізми контролю за персоналом.

Один із видів організації прохідної це - турнікет з NFC рідером який допомагає не тільки не пускати незнайомців але ще може фіксувати час роботи або час коли робітник прийшов або вийшов на роботу. Це не тільки підвищить безпеку а й ще полегшить і уточнить підрахунок робочого часу робітників що в свою чергу покращить точність і справедливість оплати, якщо зарплата нараховується від часу роботи. А також турнікет можна комбінувати з камерою спостереження що забезпечить контроль співробітників без участі додаткових людей яким потрібно за ними спостерігати.

### **Загальний опис та призначення проєктованої системи**

Призначення проєктованої системи полягає в тому, щоб зібрати та дослідити схему роботи системи контролю руху працівників на підприємстві на базі мікроконтролера Arduino. Проєкт буде реалізований на

системі Arduino в емуляторі Tinkercad, де буде повністю функціонуюча схема, яка буде фіксувати час та факт присутності того чи іншого працівника.

Дана система контролює пропуск персоналу на виробництві а також фіксує час перебування людини в робочій зоні і використовує такі елементи як:

1. *Зчитуючий пристрій «RFID RC522 ArduinoKit».*

Застосовується для читання особистої картки працівника. Номер з картки заздалегідь закріплений за працівником в системі.



Рис. 1 - Зовнішній вигляд RC522 ArduinoKit

2. *Розхідники «NFC картка NTAG213».*

Видаються особисто кожному працівнику для ідентифікації його системою. З плюсів даного рішення є дешевизна картки, її компактні розміри і надійність NFS антени яку неможливо відділити від картки. З мінусів можна виділити велику вірогідність загубити або переплутати з іншими картками через універсальний розмір. Щоб відновити картку потрібно скопіювати унікальний код співробітника на іншу картку і вивести нову та ввести нові дані в базу.

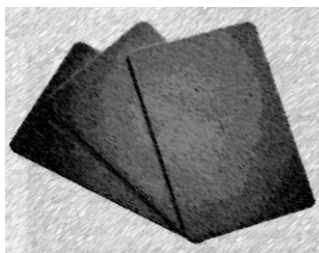


Рис. 2- «NFS картка»

3. *Індикація «RGB діод».*

Світлодіод буде показувати яку операцію виконує мікросхема в даний момент синій - чекає, зелений - підтверджує та відкриває, червоний – помилка.



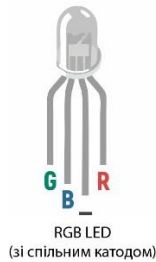


Рис. 3 - «RGB діод зі спільним катодом»

### **Аналіз існуючих систем управління**

Одним з доволі популярних рішень є «PM 6000 Drop Arm Turnstile System Technical Features» та «PM 5000 Drop Arm Turnstile System Technical Features». Найголовнішою проблемою представлених цих апаратів є їх складність та дороговартість. Монтаж можуть виконувати лише досвідчені люди, а також за їх станом важко доглядати так як при незначній поломці треба визивати досвідченого майстра, тому що втручання в їх систему потребує високих технічних знань. Також є такі види як «DPS Бізант-5.1». Мінусом таких прохідних є підключення їх до конкретної кнопки або пульта, що зовсім не входить в концепцію самостійної прохідної, так як потребує втручання другої людини : такої як охоронець або тощо. А також не дозволяє введення автоматичного електронного обліку.

Гарним вибором буде НФС ридер через безпеку та комфортність використання, так як навіть сучасні смартфони можуть подавати НФС сигнал таким чином працівники зможуть заходити на виробництво за допомогою свого телефона, що в наших реаліях є великим бонусом, так як картку можна зламати чи загубити, а телефон знаходиться біля нас постійно і важко уявити що хтось прийде на роботу без смартфона.

Відмінність від інших виробників таких систем полягає в простоті монтажу та налагодці. Зміна даних за потреби не стане проблемою через спосіб підключення до мікроконтролера, який має сучасний та популярний роз'єм USB-B, який використовується в великій кількості повсякденної техніки. Через цю доступність його можливо підключити до будь-якого комп'ютера для налагодки та зміни даних. Однією з переваг цієї схеми безперечно є її дешевизна через простоту та доступність. Цю систему може дозволити собі будь-яке підприємство. Також важливою особливістю буде максимально проста та не занадто витратна робота схеми при належному використанні, і вона буде працювати достатньо довго та стабільно.

### **Постановка завдання проєктування:**

У процесі конструкторської розробки системи контролю руху працівників на підприємстві на базі мікроконтролера Arduino проведено докладний порівняльний аналіз різних типів мікроконтролерів. Обрано Arduino через його оптимальні технічні характеристики, високу широту функціоналу та широку спільноту користувачів, що сприяє доступності інформації та можливості отримання підтримки.

Для забезпечення безперебійної роботи системи було вивчено питання живлення електронно-обчислювальної машини (ЕОМ). Обрано оптимальне джерело живлення, враховуючи вимоги мікроконтролера та

інших компонентів системи. Розроблено ефективну систему живлення, забезпечуючи надійність та довговічність роботи.

Детально розглянуто та обрано оптимальні параметри пам'яті мікроконтролера Arduino, враховуючи обсяг інформації, яку система повинна обробляти та зберігати. Визначено стратегії використання пам'яті для ефективної роботи системи контролю руху працівників.

Ретельно вивчено та документовано характеристики портів мікроконтролера Arduino, визначено їхню придатність для взаємодії з різними компонентами системи. Розроблено оптимальні схеми підключення, забезпечуючи ефективний обмін даними та управління.

Визначено принципи взаємодії системи з зовнішніми пристроями, такими як датники, картридери та інші. Розроблено механізми введення та виведення даних, забезпечуючи стабільний обмін інформацією між системою та зовнішніми пристроями.

Вивчено та реалізовано механізми завантаження та перезавантаження програмного забезпечення системи. Розроблено інтерфейс та процедури, що забезпечують легку та надійну актуалізацію програмного забезпечення без перерви у роботі.

Описано структуру лабораторного стенду, включаючи призначення основних функціональних груп. Визначено вхідні та вихідні сигнали, розроблено схему взаємодії між компонентами стенду, що дозволяє ефективно контролювати рух працівників на підприємстві.

Детально визначено умови експлуатації лабораторного стенду, зокрема, температурні та вологосні параметри, що гарантують стабільну роботу системи контролю. Забезпечено необхідні заходи для збереження ефективності стенду в різних умовах експлуатації.

Розроблено програмне забезпечення для лабораторного стенду, враховуючи вимоги системи контролю руху працівників. Реалізовано алгоритми обробки даних, взаємодії з введенням/виведенням та забезпечено можливість налагодження та модифікації програми.

Вивчено та реалізовано оптимальний алгоритм програмного забезпечення стенду, забезпечуючи ефективний контроль руху працівників та виявлення аномалій. Розроблено алгоритми обробки даних для точного визначення місцезнаходження працівників.

Виконано налагодження лабораторного стенду в реальних умовах експлуатації, забезпечивши його стабільну та надійну роботу. Проведено тестування та виправлення неполадок для забезпечення оптимальної продуктивності системи контролю.

Детально проаналізовано можливі види неполадок під час експлуатації стенду та розроблено ефективні методи їх виявлення та усунення. Розроблено систему моніторингу, що дозволяє оперативно реагувати на будь-які проблеми та забезпечує надійну роботу системи контролю руху працівників.

### **Обґрунтування вибору мікроконтролера та порівняльний аналіз**

Найкращим варіантом буде використання контролера марки Ардуіно, бо вони найкраще підходять для бюджетних схем через дешевизну та простоту використання, також ці контролери досить універсальні через

сумісність з великою кількістю компонентів та велику спільноту через яку є багато бібліотек у відкритому доступі.

Модельний ряд Ардуіно досить великий і включає в себе такі моделі як: Mega, Nano, Leonardo, Uno, Due, YUN, Micro, Esplora, LilyPad та багато інших. Їх основні відмінності полягають у формі, кількості портів, компоновка схеми, спеціальні можливості або наявність унікальних портів є ще багато відмінностей між моделями але деякі з них не суттєві якщо на цих деталях не зав'язані ключові елементи проекту.

Існує кілька видів Arduino-плат, кожна з яких призначена для конкретних завдань. Наприклад, універсальні моделі, такі як Uno, Mega та Nano, призначені для різноманітних застосувань. Для текстильних проектів використовують LilyPad, Leonardo та Esplora можна використовувати як USB-пристрої, а Due підходить для складних завдань.

Крім того, існують спеціальні електронні плати, відомі як шилди. Ці плати відрізняються тим, що вони можуть змінювати положення всіх або певних портів відносно головної плати мікроконтролера, додаючи необхідні електронні компоненти. Один з прикладів - CNC Shield (Шилд для ЧПК).

Порівнюємо Uno, Leonardo, Mega та Nano. Mega призначена для проектів більшої складності, ніж Уно та Нано а у Leonardo найбільша проблема це відсутність потрібного для підключення порта USB. Різниця між Уно та Нано полягає у формі. Нано (Рис. 4,б) менша за Уно (Рис. 4,в), проте розрахована на ту ж саму складність проектів. Також для прикладу приведено Леонардо (Рис. 4,а). Під обидва МК розроблено ЧПК шилд. Данні взяті за посиланням [1].

Обираємо Arduino Uno, так як її ЧПК шилд більш дешевий та має можливість у керуванні на 1 привід більше. Проектована система потребує використання одного джерела живлення 12 В. Це імпульсне джерело живлення, так як воно має захист від різних проблем, що може дати мережа. Наприклад, відсутність стабілізації напруги може призвести до поломки системи.

Мікроконтролер ATmega328P, згідно з інформацією з джерела [2], володіє наступними параметрами пам'яті:

1. Об'єм флеш-пам'яті: 32 кілобайти. Ця пам'ять призначена для зберігання програмного коду (скетчу), що виконується на мікроконтролері.
2. Об'єм статичної оперативної пам'яті (ОЗУ): 2 кілобайти. Ця пам'ять використовується для зберігання змінних та обробки різноманітних даних під час виконання програми.
3. Об'єм енергонезалежної постійної пам'яті (EEPROM): 1 кілобайт. Цей тип пам'яті використовується для зберігання постійних значень, які можуть зберігатися навіть при вимкненні живлення мікроконтролера.

Таким чином, дані специфікації пам'яті надають важливу інформацію про можливості ATmega328P для зберігання та обробки коду та даних у системі.



а) Arduino Leonardo



б) Arduino Nano



в) Arduino Uno

Рис. 4- Зовнішній вигляд контролерів Ардуіно

### Порти мікроконтролера та їх характеристика

Піни з номерами від 0 до 13 є цифровими. Це означає, що ви можете зчитувати та подавати на них лише два види сигналів: HIGH та LOW. За допомогою ШІМ також можна використовувати цифрові порти для керування потужністю підключених пристроїв. Аналогові піни Arduino Uno призначені для підключення аналогових пристроїв і є входами для вбудованого аналого-цифрового перетворювача (АЦП), який у Arduino Uno десятирозрядний. Додаткові піни на платі: AREF – видає опорну напругу для вбудованого АЦП. Може керуватися функцією `analogReference()`. RESET – подача низького сигналу на цьому вході призведе до перезавантаження пристрою.

### Структурна схема пропускового пункту

У процесі розробки системи контролю руху працівників на базі мікроконтролера Arduino важливо обговорити способи зв'язку з комп'ютером та іншими елементами системи. На цьому етапі використовується інтерфейс USB для забезпечення зручного програмування мікроконтролера та обміну даними між ним та комп'ютером.

Для взаємодії з мікроконтролером Arduino використовується стандартна програма ArduinoIDE (Integrated Development Environment). ArduinoIDE надає зручний графічний інтерфейс для написання, компіляції та завантаження програм на мікроконтролер. В процесі розробки, розширений функціонал ArduinoIDE також дозволяє моніторити вивід мікроконтролера, що дозволяє здійснювати налагодження та відладку.

Окрім програмування, інтерфейс USB може використовуватися для обміну даними між мікроконтролером та комп'ютером. Це може бути корисно для передачі зібраних даних, таких як інформація про рух працівників або стан системи, для подальшого аналізу на комп'ютері. У процесі розробки програми для системи контролю руху працівників на базі мікроконтролера Arduino використовується інтегроване середовище розробки ArduinoIDE. Це середовище надає зручність у програмуванні та взаємодії з мікроконтролером.

ArduinoIDE - це спеціально розроблене інтегроване середовище для програмування мікроконтролерів Arduino. Воно забезпечує зручний графічний інтерфейс для написання коду, компіляції програми та її завантаження на мікроконтролер. ArduinoIDE підтримує мову

програмування C/C++, спеціально адаптовану для мікроконтролерів AVR, які використовуються в Arduino.

У системі на основі RFID технології застосовуються наступні модулі: мікроконтролер, RFID-рідер, реле , соленоїд, джерело живлення на 12В, комп'ютер, індикація.

Мікроконтролер зв'язуємо з комп'ютером лише тоді, коли необхідно завантажити або перезавантажити програму. тому на структурній схемі зв'язок з мікроконтролером показано пунктирною лінією, бо у роботі система не буде пов'язана з комп'ютером. RFID-рідер усі сигнали, які з'являються після читання картки, передає на мікроконтролер. Мікроконтролер керує положенням реле. Якщо реле включено, тоді живлення від БЖ йде на соленоїд. Джерело живлення до соленоїду підключається через реле, і цей зв'язок показано тонкою лінією. Мікроконтролер живиться від блоку живлення. Індикація отримує живлення та сигнали на основі даних отриманих або не отриманих з RFID-рідер (Рис. 5).

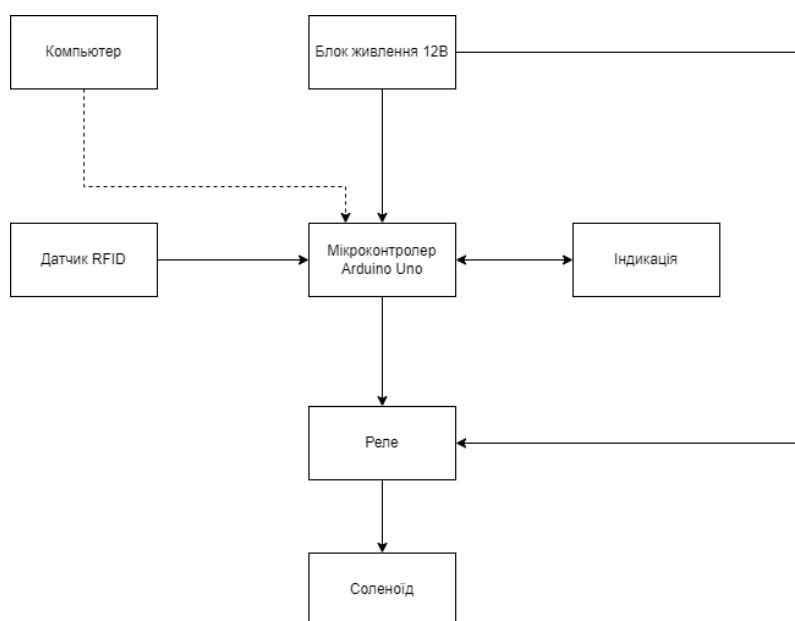


Рис. 5 - Структурна схема пропускного пункту

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Grbl, за посиланням на сайт GitHub .Електронний ресурс [<https://github.com/gnea/grbl>].
2. UGS Platform, за посиланням на сайт UGS. Електронний ресурс [[http://winder.github.io/ugs\\_website/download/](http://winder.github.io/ugs_website/download/)].

**Бахтін І.Д.** (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна)

## МОДЕРНІЗАЦІЯ БАШТОВИХ КРАНІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА СТАЛОСТІ

***Анотація:** Стаття присвячена аналізу основних напрямків модернізації баштових кранів, з акцентом на впровадженні автоматизованих систем управління, використанні легких матеріалів, екологічності та інтеграції з сучасними інформаційними технологіями. Розглянуто важливість автоматизації для адаптації кранів до змінних умов роботи, підвищення їх продуктивності та безпеки. Окреслено роль використання новітніх матеріалів і альтернативних джерел енергії у зменшенні екологічного впливу та експлуатаційних витрат. Підкреслено значення освіти та міжнародної співпраці для успішної модернізації та впровадження інновацій у будівництві та машинобудуванні.*

***Abstract:** This article focuses on the key directions for the modernization of tower cranes, emphasizing the implementation of automated control systems, the use of lightweight materials, environmental considerations, and integration with modern information technologies. It highlights the importance of automation in adapting cranes to variable working conditions, enhancing their productivity and safety. The role of using cutting-edge materials and alternative energy sources in reducing environmental impact and operational costs is outlined. The significance of education and international collaboration for successful modernization and innovation in construction and engineering is underscored.*

На основі наданого тексту проектування та модернізації баштових кранів, можна скласти детальний огляд, акцентуючи увагу на ключових аспектах, таких як автоматизація, використання легких матеріалів, екологічність, та інтеграція сучасних технологій. Це дозволяє не тільки підвищити продуктивність і безпеку роботи кранів, але й сприяє зменшенню витрат на обслуговування та експлуатацію. Нижче представлено детальний огляд основних аспектів модернізації баштових кранів.

Впровадження автоматизованих систем управління на базі штучного інтелекту та Інтернету речей (ІоТ) в баштових кранах відкриває нові можливості для оптимізації робочих процесів. Автоматизація дозволяє кранам адаптуватися до змінних умов роботи, ефективніше використовувати енергію, а також забезпечує високу точність та безпеку при вантажопідйомних операціях.

Заміна традиційних матеріалів на легкі, такі як алюміній та вуглецеві композити, значно зменшує загальну вагу кранів. Це не лише полегшує їх пересування та монтаж, але й сприяє підвищенню енергоефективності та знижує навантаження на інженерні конструкції будівельних об'єктів.

Модернізація баштових кранів з акцентом на екологічність передбачає зниження енергоспоживання та впровадження екологічно чистих технологій. Використання альтернативних джерел енергії, таких як

сонячні панелі та вітрові генератори, а також оптимізація маси кранів сприяє зниженню викидів вуглецю.

Модернізація баштових кранів не обмежується лише механічними та енергетичними аспектами, а також охоплює інтеграцію з інформаційними технологіями, такими як системи BIM та автоматизоване управління. Використання цифрових технологій і алгоритмів штучного інтелекту дозволяє оптимізувати робочі процеси, покращує координацію між різними етапами будівництва, та сприяє точному плануванню і використанню ресурсів.

Враховуючи глобальні тенденції до зменшення впливу на довкілля, екологічність стає ключовим аспектом у модернізації баштових кранів. Використання матеріалів, які менш навантажують довкілля, та застосування альтернативних джерел енергії, наприклад сонячних панелей та вітрових генераторів, допомагають знизити енергоспоживання та вуглецевий слід. Крім того, впровадження систем рекуперації енергії може додатково підвищити енергоефективність та зменшити витрати на експлуатацію.

Розвиток технологій і модернізація обладнання також вимагають уваги до соціальних аспектів та освіти. Підвищення кваліфікації працівників, освітні програми та тренінги щодо новітніх технологій і методик безпеки є важливими для забезпечення безпеки праці та ефективного використання нових можливостей кранів. Це також сприяє підвищенню рівня задоволеності працівників та їхньої мотивації.

Модернізація баштових кранів у контексті глобальних стандартів та тенденцій вимагає активної міжнародної співпраці, обміну досвідом та інновацій. Співпраця з міжнародними партнерами, участь у наукових конференціях та виставках дозволяє не лише слідувати сучасним трендам, а й адаптувати передові світові практики до місцевих умов, сприяючи технічному прогресу та інноваціям в галузі.

Модернізація баштових кранів є комплексним процесом, що охоплює не лише технічні удосконалення, а й інтеграцію з інформаційними технологіями, екологічні ініціативи, соціальну відповідальність, та міжнародну співпрацю. Цей процес вимагає системного підходу та спільних зусиль наукової спільноти, промисловості, та освітніх інституцій для реалізації інноваційних рішень, забезпечення безпеки та ефективності роботи кранів, та створення сталого майбутнього в галузі будівництва та машинобудування.

**Безродній І.О.**, науковий керівник: д.т.н., професор Ковалевський С.В.  
(Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ –  
Тернопіль, Україна)

## **ІННОВАЦІЙНИЙ МЕХАНОСКЛАДАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ГУСЕНИЧНИХ ХОДОВИХ ЧАСТИН**

***Анотація:** Ця робота присвячена розробці інноваційного механоскладального технологічного комплексу для виготовлення гусеничних ходових частин, використовуваних у гірничодобувній промисловості. Дослідження зосереджено на інтеграції передових методів обробки, роботизованих систем і гнучких виробничих систем, а також на оптимізації технологічних процесів. Включено техніко-економічне обґрунтування проекту, оцінку конкурентоспроможності, а також аналіз витрат і економічної ефективності. Особливу увагу приділено охороні праці та екологічній безпеці. Реалізація проекту може значно підвищити продуктивність виробництва та якість продукції, забезпечити безпеку робочих умов та зменшити собівартість продукції.*

***Abstract:** This work is dedicated to the development of an innovative assembly-technological complex for the production of tracked undercarriage parts used in the mining industry. The study focuses on the integration of advanced processing methods, robotic systems, and flexible manufacturing systems, as well as the optimization of technological processes. It includes a techno-economic substantiation of the project, an evaluation of competitiveness, and an analysis of costs and economic efficiency. Special attention is paid to labor protection and environmental safety. The implementation of the project can significantly increase production productivity and product quality, ensure the safety of working conditions, and reduce the cost of production.*

Сучасний прогрес в машинобудуванні тісно пов'язаний з розвитком і впровадженням інноваційних технологій, що забезпечують підвищення продуктивності виробництва та оптимізацію виробничих процесів. Однією з галузей, де актуальною є потреба в інноваціях, є виробництво гусеничних ходових частин для прохідницьких комбайнів, які використовуються у гірничодобувній промисловості.

Дослідження спрямоване на розробку інноваційного механоскладального технологічного комплексу, що інтегрує передові методи обробки, роботизовані системи та гнучкі виробничі системи для виготовлення механізмів гусеничної ходової частини. Аналіз поточного стану виробництва виявив основні проблеми, які впливають на ефективність виробничого процесу, та зосереджено увагу на оптимізації технологічних процесів використання.

Важливою частиною роботи є техніко-економічне обґрунтування досліджень, яке включає аналіз витрат і підвищення економічної ефективності проекту, оцінку конкурентоспроможності виробництва. Крім того, було приділено увагу питанням охорони праці, що є актуальним аспектом при розробці та впровадженні нових технологічних рішень.



Реалізація інноваційного механоскладального технологічного комплексу для виготовлення механізмів гусеничної ходової частини може значно підвищити продуктивність та знизити собівартість виробництва, забезпечити високу якість готової продукції. Впровадження передових технологій, роботизації систем і гнучких виробничих ліній становить основу для досягнення цієї мети. Окрім технічного вдосконалення, проект наголошує на необхідності екологічної безпеки та забезпечення оптимальних умов праці для операторів обладнання.

Застосування інноваційних матеріалів і методів обробки, зокрема використання технологій поверхневого зміцнення, ціанування, нітрування та лазерної обробки, забезпечує підвищення міцності, зносостійкості та тривалості служби гусеничних механізмів. Також важливим аспектом є розробка ефективних методів контролю якості виробів, які дозволяють своєчасно виявляти дефекти та забезпечувати високу надійність механізмів.

Інтеграція роботизованих систем в процес виробництва не лише знижує трудомісткість виробничих операцій, але й підвищує точність і повторюваність процесів, що є ключовим для виготовлення високоточних компонентів гусеничних механізмів. Автоматизація процесів дозволяє зменшити виробничі витрати та підвищити конкурентоспроможність продукції на ринку.

Техніко-економічне обґрунтування досліджень показує, що впровадження розробленого комплексу дозволить не лише покращити якість та ефективність виробництва, але й забезпечити значні економічні переваги для виробника. Оцінка конкурентоспроможності проекту вказує на його високий потенціал на внутрішньому та міжнародному ринках.

Все це свідчить про важливість та актуальність розробки і впровадження інноваційних технологічних рішень у сфері машинобудування, що сприятиме не тільки підвищенню продуктивності та ефективності виробництва, але й зміцненню позицій виробника на ринку, відкриваючи нові можливості для розвитку галузі. Особливе місце у дослідженні займають методи поверхневого зміцнення та хіміко-термічної обробки, які сприяють значному підвищенню зносостійкості та корозійної стійкості деталей гусеничних ходових частин.

Технологічні інновації, запропоновані у роботі, включають використання сучасних матеріалів, ефективних методів лиття та штампування, що дозволяє отримувати високоякісні гусеничні траки з підвищеними експлуатаційними характеристиками. Аналіз та розробка інноваційного механоскладального комплексу також включає розгляд можливостей застосування борування, ціанування, нітрування та інших методів зміцнення поверхні, що забезпечує додаткові переваги у підвищенні довговічності та надійності готових виробів.

Проект також акцентує на важливості охорони праці та створення безпечних умов праці на виробництві, включаючи впровадження систем вентиляції, забезпечення відповідності обладнання стандартам безпеки та організацію навчання персоналу з питань дотримання норм охорони праці.

**Біляк К. С.**, науковий керівник: д.т.н., професор Новіков Ф. В. (Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, м. Харків, Україна)

## РОБОТИЗАЦІЯ І ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ В СУЧАСНОМУ МАШИНОБУДУВАННІ

***Анотація:** Сучасне машинобудування характеризується стрімким розвитком та впровадженням новітніх технологій, таких як робототехніка та ШІ. Ці технології мають значний потенціал для підвищення продуктивності, гнучкості та ефективності виробничих процесів. Останнім часом все більше наукових досліджень та публікацій присвячено темі використання робототехніки та ШІ в машинобудуванні. Дослідники вивчають нові способи застосування цих технологій для автоматизації виробничих процесів, підвищення продуктивності та покращення якості продукції. Мета статті - охарактеризувати основні переваги та недоліки використання робототехніки та ШІ в машинобудуванні; описати останні дослідження та публікації в цій галузі; визначити невирішені проблеми, пов'язані з використанням робототехніки та ШІ в машинобудуванні.*

***Abstract:** Modern mechanical engineering is characterized by rapid development and introduction of the latest technologies, such as robotics and AI. These technologies have significant potential to increase the productivity, flexibility and efficiency of manufacturing processes. Recently, more and more scientific research and publications are devoted to the topic of using robotics and AI in mechanical engineering. Researchers are studying new ways to use these technologies to automate production processes, increase productivity, and improve product quality. The purpose of the article is to describe the main advantages and disadvantages of using robotics and AI in mechanical engineering; describe the latest research and publications in this field; identify unsolved problems related to the use of robotics and AI in mechanical engineering.*

### **Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами**

Сучасне машинобудування характеризується стрімким розвитком та впровадженням новітніх технологій, таких як робототехніка та штучний інтелект (ШІ). Ці технології мають значний потенціал для підвищення продуктивності, гнучкості та ефективності виробничих процесів.

Роботизація вже давно використовується в машинобудуванні для автоматизації рутинних та небезпечних завдань. Завдяки розвитку ШІ, можливості роботів значно розширюються. Роботи стають більш автономними, гнучкими та здатними до адаптації до мінливих умов.

ШІ також використовується для автоматизації інших аспектів машинобудування, таких як проектування, планування виробництва, контроль якості та технічне обслуговування. Впровадження ШІ може призвести до значного скорочення витрат, підвищення якості продукції та покращення конкурентоспроможності машинобудівних підприємств.

## Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останнім часом все більше наукових досліджень та публікацій присвячено темі використання робототехніки та ШІ в машинобудуванні. Дослідники вивчають нові способи застосування цих технологій для автоматизації виробничих процесів, підвищення продуктивності та покращення якості продукції.

Деякі з останніх досліджень в цій галузі включають:

- Розробку нових алгоритмів управління для роботів, які дозволяють їм більш точно та гнучко виконувати завдання.
- Впровадження систем машинного бачення для контролю якості продукції.
- Використання ШІ для прогнозування поломок обладнання та оптимізації планування технічного обслуговування.

## Формулювання невирішених частин загальної проблеми

Незважаючи на значний прогрес, все ще існує ряд невирішених проблем, пов'язаних з використанням робототехніки та ШІ в машинобудуванні. Деякі з цих проблем включають:

- Висока вартість роботів та систем ШІ.
- Необхідність у кваліфікованих кадрах для обслуговування та програмування роботів.
- Етичні питання, пов'язані з використанням роботів та ШІ, такі як ризик заміни людської праці.

## Цілі статті та постановка задачі

Метою цієї статті є дослідження та аналіз сучасних тенденцій впровадження робототехніки та ШІ в машинобудуванні. Завданням статті є:

- Охарактеризувати основні переваги та недоліки використання робототехніки та ШІ в машинобудуванні.
- Описати останні дослідження та публікації в цій галузі.
- Визначити невирішені проблеми, пов'язані з використанням робототехніки та ШІ в машинобудуванні.

## Виклад основного матеріалу дослідження

### Переваги використання робототехніки та ШІ в машинобудуванні:

- **Підвищення продуктивності:** роботи можуть працювати цілодобово безперервно, що значно підвищує продуктивність.
- **Підвищення гнучкості:** роботи легко переналаштовуються на виконання різних завдань, що робить виробництво більш гнучким.
- **Підвищення якості:** роботи можуть виконувати завдання з високою точністю

## Недоліки використання робототехніки та ШІ в машинобудуванні:

- **Висока вартість:** роботи та системи ШІ можуть бути дуже дорогими, що робить їх недоступними для деяких підприємств.
- **Необхідність у кваліфікованих кадрах:** Для обслуговування та програмування роботів потрібні кваліфіковані кадри, яких може бути не вистачати.
- **Етичні питання:** Використання роботів та ШІ може призвести до заміни людської праці, що викликає етичні питання.

Переваги	Недоліки
Підвищення продуктивності	Висока вартість
Підвищення гнучкості	Необхідність у кваліфікованих кадрах
Підвищення якості	Етичні питання
Зниження ризику травмування	Ризик заміни людської праці
Скорочення вирішення	Можливі проблеми з адаптацією

## Останні дослідження та публікації

Останнім часом все більше наукових досліджень та публікацій присвячено темі використання робототехніки та ШІ в машинобудуванні. Дослідники вивчають нові способи застосування цих технологій для автоматизації виробничих процесів, підвищення продуктивності та покращення якості продукції.

Деякі з останніх досліджень в цій галузі включають:

- **Розробку нових алгоритмів управління для роботів, які дозволяють їм більш точно та гнучко виконувати завдання.** Наприклад, дослідники з Каліфорнійського університету в Берклі розробили новий алгоритм, який дозволяє роботам виконувати складні завдання збирання з високою точністю.
- **Впровадження систем машинного бачення для контролю якості продукції.** Системи машинного бачення можуть використовуватися для автоматичного виявлення дефектів продукції, що значно підвищує якість

продукції. Наприклад, компанія Siemens використовує системи машинного бачення для контролю якості лопаток турбін.

- **Використання ШІ для прогнозування поломок обладнання та оптимізації планування технічного обслуговування.** ШІ може використовуватися для аналізу даних про роботу обладнання та прогнозування ймовірності поломок. Це дозволяє підприємствам оптимізувати планування технічного обслуговування та запобігати аваріям. Наприклад, компанія General Electric використовує ШІ для прогнозування поломок авіадвигунів.

## Невирішені проблеми

Незважаючи на значний прогрес, все ще існує ряд невирішених проблем, пов'язаних з використанням робототехніки та ШІ в машинобудуванні. Деякі з цих проблем включають:

- **Висока вартість робіт та систем ШІ.** Роботи та системи ШІ можуть бути дуже дорогими, що робить їх недоступними для деяких підприємств.
- **Необхідність у кваліфікованих кадрах.** Для обслуговування та програмування робіт потрібні кваліфіковані кадри, яких може бути не вистачати.
- **Етичні питання.** Використання робіт та ШІ може призвести до заміни людської праці, що викликає етичні питання.

## Висновок

Роботизація та ШІ мають значний потенціал для трансформації машинобудування. Ці технології можуть допомогти підвищити продуктивність, гнучкість та ефективність виробничих процесів

*Підвищення продуктивності:* роботи можуть виконувати рутинні та небезпечні завдання значно швидше та точніше, ніж люди, що веде до кращого використання ресурсів та скорочення часу простою.

*Збільшення гнучкості:* роботизовані системи легко адаптуються до нових завдань та продуктів, що робить виробництво більш гнучким та динамічним.

*Покращення ефективності:* ШІ-алгоритми можуть оптимізувати виробничі процеси, прогнозувати поломки обладнання та мінімізувати відходи, що веде до значного економії коштів.

*Підвищення безпеки:* роботи та ШІ-системи можуть брати на себе небезпечні та шкідливі для здоров'я завдання, роблячи робоче середовище безпечнішим для людей.

*Створення нових робочих місць:* роботизація та ШІ створюють нові можливості для кваліфікованих фахівців, які володіють знаннями в галузі програмування, робототехніки, обробки даних та штучного інтелекту.

## Перспективи подальших досліджень

Подальші дослідження в галузі робототехніки та ШІ для машинобудування:

- Розробка більш доступних роботів та систем ШІ.
- Підготовка кваліфікованих кадрів для роботи з роботами та системами ШІ.
- Розробка етичних норм використання роботів та ШІ.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. *Recent Advances in Robotics and AI for Manufacturing.*

URL: <https://www.planettogether.com/blog/the-rise-of-advanced-robotics-and-artificial-intelligence-ai-a-revolution-in-manufacturing>

2. *Штучний інтелект у виробництві – як автоматизація та інновації змінюють гру правил.*

URL: <https://mediacom.com.ua/shi-u-virobnitstvi-avtomatizatsiya-ta-innovatsii-vazhlivista-perevagi/>

3. *Unresolved Issues in the Use of Robotics and AI in Manufacturing.*

URL: <https://www.americanmachinist.com/enterprise-data/article/21149328/the-6-challenges-of-implementing-ai-in-manufacturing-dotdata>

4. *The Future of Robotics and AI in Manufacturing.*

URL: <https://standardbots.com/blog/the-future-of-robotics-in-manufacturing-a-game-changing-revolution>

5. Яровий Р.М., Дербаба В.А. Роль штучного інтелекту в машинобудуванні: революція у вирішенні проблем

URL: [https://ir.nmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/165662/Збірник\\_Молодь\\_2023\\_том\\_1\\_final-127-128.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ir.nmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/165662/Збірник_Молодь_2023_том_1_final-127-128.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

6. Муляр Ю. І., Репінський С. В. Автоматизація виробництва в машинобудуванні

URL: [http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/IRVC/Mulyar\\_P2\\_2020\\_123.pdf](http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/IRVC/Mulyar_P2_2020_123.pdf)

**Близнюк О.О.**, науковий керівник: к.т.н., професор Третяк В.В.  
(Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ»,  
Харків, Україна)

## **АВТОМАТИЧНЕ ФОРМУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ І СТРУКТУРИ ТП ЗА ДОПОМОГОЮ СТРУКТУРНО-АНАЛІТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБРАЗІВ**

***Анотація:** Визначені класи функцій і можливості математичних моделей для вирішення задач автоматичного проектування ТП. Виділені групи алгоритмів для методів розпізнавання образів для задач автоматичного генерування ТП. Названі недоліки виявлених алгоритмів. Названі переваги структурно-аналітичного метода розпізнавання образів для задач технологічного проектування. Визначені основні етапи роботи метода. Представлено розроблений програмний модуль. На прикладі групового ТП «Колесо зубчасте» автоматично сформована таблиця предикатів і маршруту.*

***Abstract:** Definite classes of functions and possibilities of mathematical models for the decision of tasks of the automatic planning TP. Selected groups of algorithms for the methods of pattern recognition for the tasks of automatic generation TP. Adopted lacks of the exposed algorithms. Adopted advantages of structural-analytical method pattern recognition for the tasks of the technological planning. Definite basic stages of work of method. The developed program module is presented. On the example of group TP «Wheel toothed» automatically formed table of predicative and route.*

Задача синтезу і автоматичного генерування ТП є найбільш складною і важкоформалізованою задачею в технологічному проектуванні. При виявленні різноманітних функціональних залежностей технологічної системи можуть бути виділені різні постановки задач, які зводяться до однієї і тієї ж математичної схеми — мінімізації середнього ризику за емпіричними даними. Ці постановки розрізняються тим, в якому класі функцій ведеться відновлення вишуканої залежності.

1. Якщо вирішується задача для найпростішого класу — класу індикаторних функцій — це типова задача розпізнавання образів. В такій задачі вихідна функція може бути представлена лише строковою ознакою (назва операції, переходу, тип оснащення тощо).

2. Якщо в класі функцій складнішої природи, що належить множини з квадратом функцій, що інтегруються (задача відновлення регресії). В таких задачах вихідна функція представлена лише кількісною ознакою[1].

3. А якщо задача в класі функцій, які є чином деякого іншого класу функцій (задача інтерпретації результатів непрямих експериментів). Проте ці особливості задач відновлення залежності є приватними, і тому основний напрям досліджень в кожній з них пов'язаний з вивченням загальної схеми мінімізації середнього ризику за емпіричними даними.

В теперішній час існують різні численні методи побудови правил класифікації із заданого параметричного сімейства різних правил

класифікації (ПК), які використовуються в сучасних САПР ТП.

Залежно від вибраного класу і методу побудови ПК можна виділити наступні основні групи алгоритмів:

– методи вибору ПК з класу простих (лінійних і кусково-лінійних ПК);

– методи обчислення оцінок і тестові процедури;

– алгоритми перебору кон'юнкцій;

– методи побудови дерев рішень;

– теоретико-графічні моделі.

Необхідно відмітити, що всі ці методи досить складні і їх важко використовувати спеціалістами різних галузей.

Для цих методів повинна використовуватись досить презентативна вибірка даних, яка не завжди існує.

Також всі ці методи використовують тільки кількісні показники для вхідних даних таблиці імперичних даних (ТЕД) - рис. 1.

Методи складно підлягають алгоритмізації, тому їм важко використовувати для комп'ютерної обробки даних.

Також ці методи використовують або мислені моделі, або графічні без їх об'єднання.

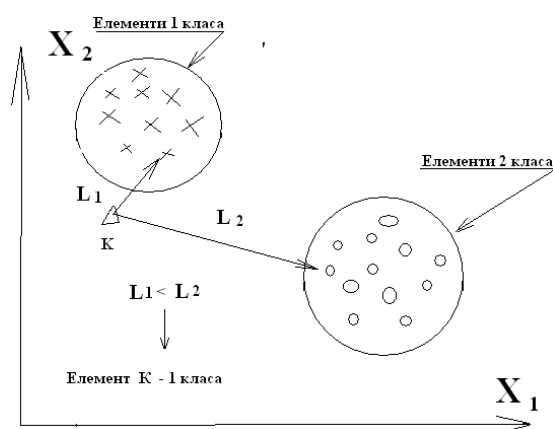


Рис. 1. Правило класифікації для метода най ближнього сусіда

Також рішення має складну, не завжди адекватну форму, тому складно оцінюється спеціалістами.

Слід відмітити, що ці методи погано працюють на малих вибіркових даних, а інтерпретація і перевірка рішення спеціалістами і вірогідність нових результатів проблематична.

Для вирішення задачі класифікації можна використовувати структурно-аналітичний метод розпізнавання подоби, розроблений в ХАІ проф. І. Б. Сіроджею[2].

Метод має такі суттєві переваги:

- логічні закономірності легко інтерпретуються бінарним деревом рішень (БДР) і його табличною формою - таблицею істинності предикатів;

- логічні закономірності, які описують віття БДР, достатньо прості і



зручні для інтерпретації фахівцями;

- будь-які логічні і аналітичні знання експерта-технолога можуть бути легко пристосовані і є використані при побудові БДР;

- розрахункові правила (РП) можуть бути просто реалізовані у вигляді пирогового пристрою;

- одночасно з побудовою РП проводиться скорочення ознак початкової системи;

- використання в кожній вершині оптимальної підмножини замість повного ознакового простору обумовлює стійкість РП при малих об'ємах навчальних вибірок;

- РП легко інтерпретуються в базах знань і базах умов (рис. 2).

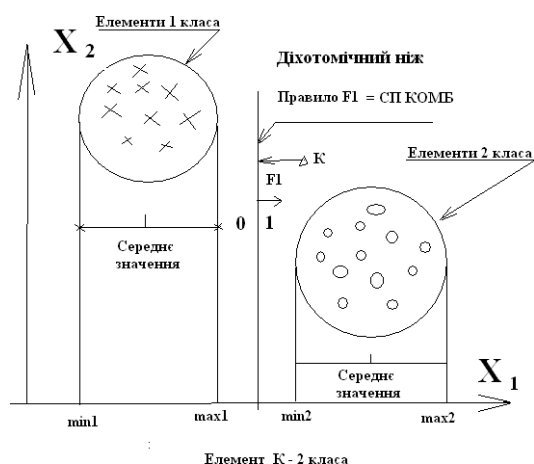


Рис. 2. Правило класифікації методом СА моделі

Метод легко може використовуватися для автоматизованого отримання елементів ТП і оснащення.

Змінні ознаки ТЕД можуть бути представлені в наступних шкалах кількісній, бінарній, порядковій і строковій (рис.3).

Вчитель (клас) для кожного елемента заданий в строковій шкалі.

Потрібно отримати таке правило F, яке б класифікувало новий елемент Y за отриманим правилом класифікації F.

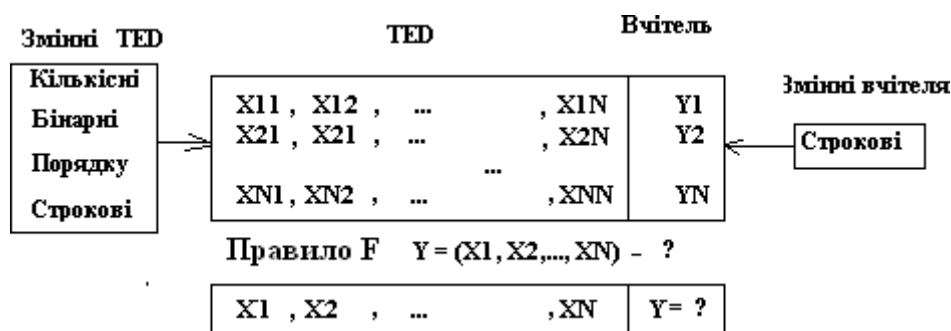


Рис. 4. Завдання на класифікацію

У межах постановки загальної задачі оптимізації структурно-аналітичних моделей алгоритм класифікації проводиться за 7 етапами:

- Етап 1. Попередня обробка вхідних даних.
  - Етап 2. Автоматична генерація термінальних РП безпосередньо за ТЕД.
  - Етап 3. Формування синтаксичного зразка й оцінювання його структурної повноти з допустимою помилкою.
  - Етап 4. Визначення критеріальних оцінок ознак ТЕД.
  - Етап 5. Визначення базового набору ознак ТЕД.
  - Етап 6. Формування інформативної системи ознак ТЕД.
  - Етап 7. Побудова правила класифікації.
- На рис. 5. як приклад зображено результат вигляду простішого бінарного дерева рішень і його складальні.

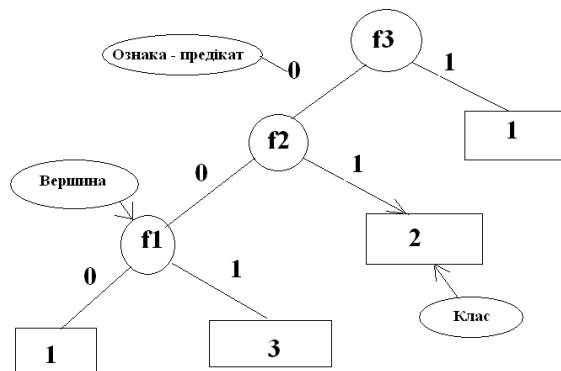


Рис. 5. Варіант форми бінарного дерева

Розглянемо механізм використання СА моделі на прикладі побудови маршрута для деталі типа «Колесо зубчасте». Графічне зображення маршрута для групового ТП виглядає за рис.6. Хоча дерево і не бінарне, але його можна вкласти в простий бінарний граф і однією з форм є таблиця даних предикатів створеного дерева.

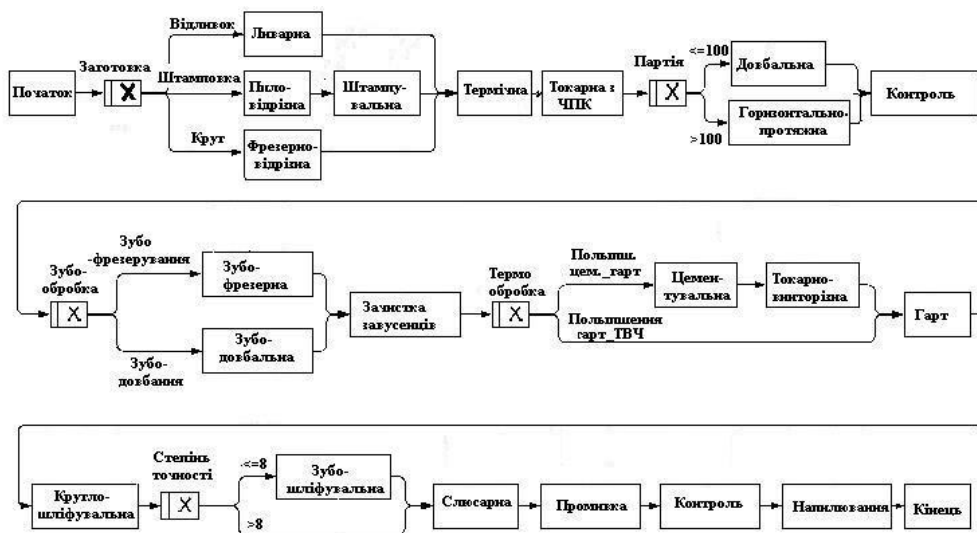


Рис. 6. Дерево для проектування маршрута групового ТП

Для використання дерева спочатку треба організувати введення даних. На рис. 7. представлена екранна форма розробленої авторами програми для введення даних про деталь (на прикладі деталі «Колесо зубчасте»). Маємо 5 змінних (заготовка, партія, тип зубооброблення, тип темооброблення і степінь точності зубців) для вхідних даних і в якості строкової змінної - операція.

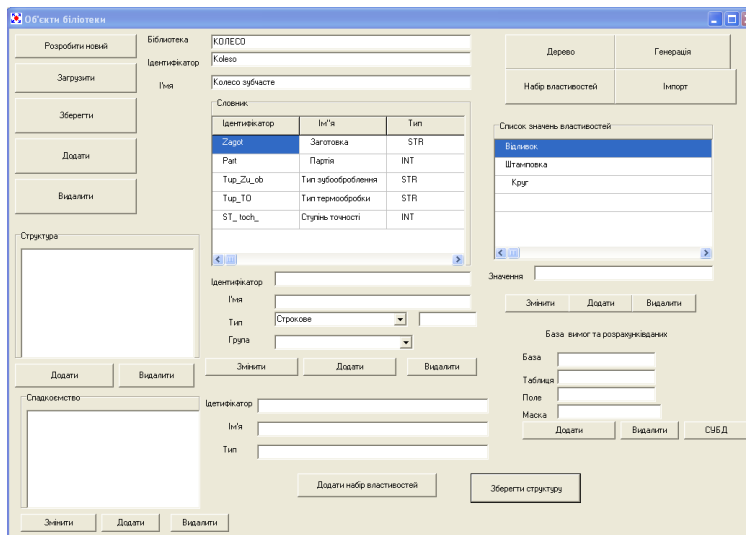


Рис 7. Екранна форма для введення даних про деталь на прикладі деталі - « Колесо зубчасте».

Перебудуємо рис.5 і пронумеруємо операції. Отримуємо дерево з означенням номерів вершин графа (операцій) для формування таблиці предикатів (рис.8).

Далі представлений граф перетворюємо в таблицю, яка створюється за допомогою модуля «Будівник дерева рішень» (рис. 9) .

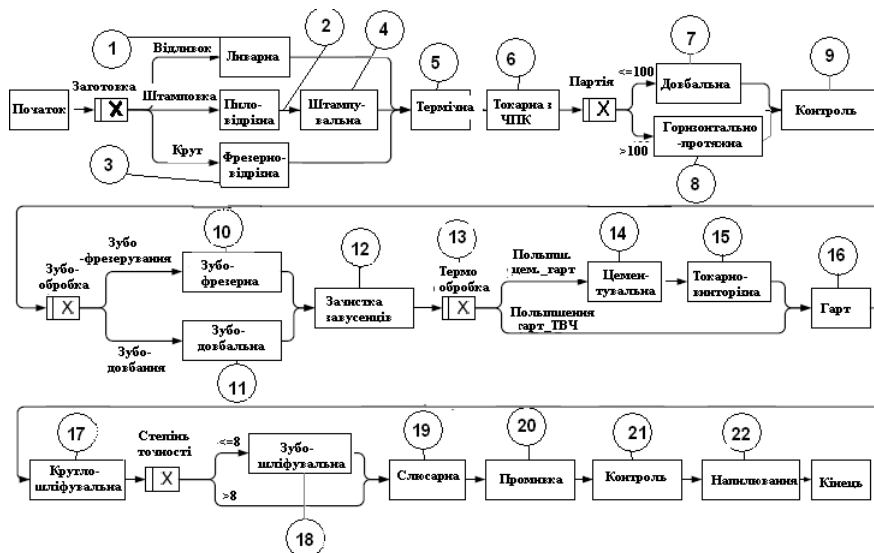


Рис.8. Перетворена форма дерева ТП.

На рис 9. показана форма і наведений приклад формування першої строки таблиці.

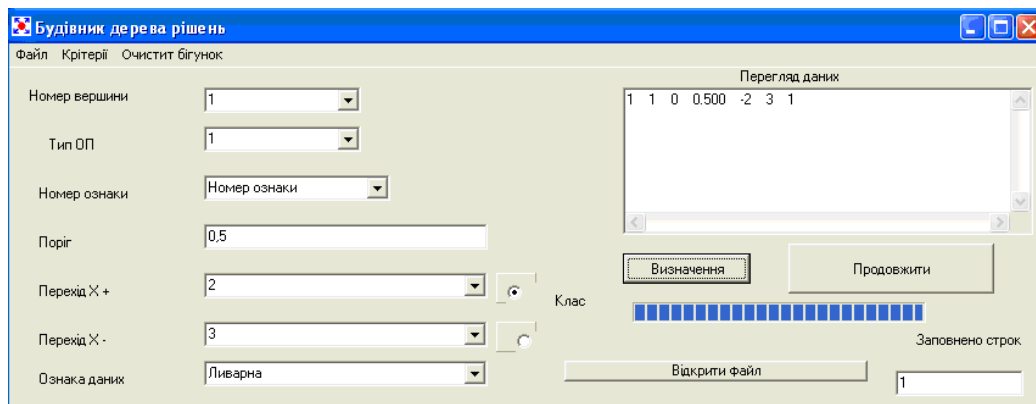


Рис. 8. Формування першої строки дерева

Фрагмент повністю перетвореного дерева в таблицю зображено на рис.10.

Рис. 10. Результат перетвореного дерева в таблицю

Далі потрібно ввести конкретні дані про деталь, згідно рис. 7 і провести клафікаційний аналіз даних за допомогою модуля «Класифікатор».

На рис. 11 зображено результат роботи модуля - сформований маршрут по одному з варіантів змінних.

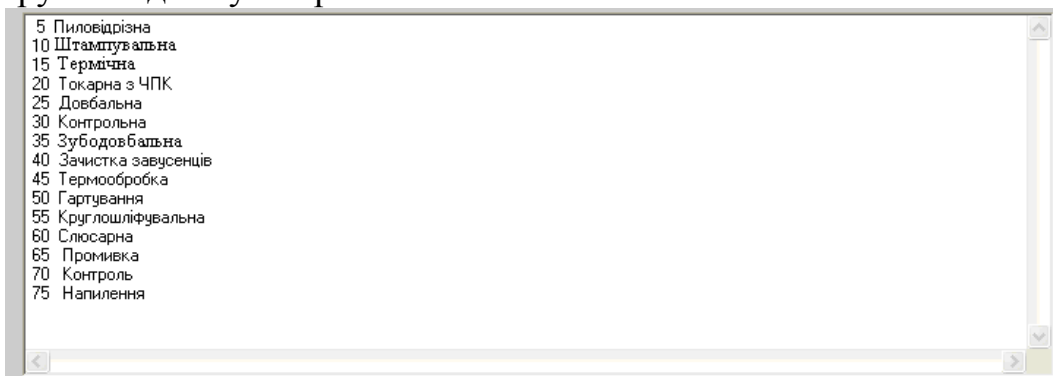


Рис.11. Варіант автоматично сформованого маршрута

На рис.12. зображений фрагмент розробленої форми маршрутної карти для одного з варіантів змінних для автоматично сформованого маршрута.

Розробив	Близнюк О.О.			ХАІ	Колесо зубчасте														
Перевіряв	Третяк В.В.																		
Нордував	Третяк В.В.																		
Н.Контр	Третяк В.В.			4															
М 01	Штамповка																		
М 02	Код	ЕВ	МЛ	ЕН	Н.Расс.	КРМ	Кол загот.	Профіль і розміри	КЛ	МЗ	+								
	10000000	кг	0.82	1	0.464	0.4	Штамповка		1	12									
А	Цех	Уч.	РМ	Опер.	Код, найменування операції			Обозначення документа											
Б					Код, найменування обладнання			СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОЛД	ЕН	ОП	Кит.	Т.п.	Т.шт.	
А	61	04	22	005	Пиловідризна														
Б	Дискова пила							1728						0,132			0,047		
А	55	03	22	010	Штампувальна														
Б	Кривошипний гарячештампувальний прес																		
А	41	35	34	15	Термічна														
Б	Електропіч камерна СНЗ-14.28.9.0/10																		
А	67	12	32	20	Токарна з ЧПК														
Б	Токарно-винторезний с ЧПК 16A20Ф3																		
А	34	25	17	25	Довбальна														
Б	Довбляк																		
А	14	17	13	30	Контрольна														

Рис.12. Автоматичне введення даних в маршрутну карту

Таким чином автоматично сформована маршрутна карта для ТП деталі «Колесо зубчасте». За аналогом можна сформувати елементи операційної технології і елементи оснащення для цієї та інших деталей [3].

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Третяк В. В. Розроблення програмного забезпечення для технологічних розрахунків в об'єктно-орієнтованому середовищі : навч. посіб. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. С. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2021. – 80 с.
2. Третяк В. В., Близнюк О. О. Синтез технологічних процесів для об'ємних деталей з використанням структурно-аналітичного методу розпізнавання подібностей // XXVIII - міжнародний конгрес двигунобудівників: тези доповідей. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2023 – С. 40.
3. Третяк В. В., Близнюк О. О. Можливості формування елементів ТП за допомогою структурно-аналітичного методу розпізнавання подоби в САПР ТП // Нові нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбереженні: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 6-7 грудня 2023 р., м. Одеса. – Одеса: 2023. – С. 324-326.

**Бочковой Д.О., Шустова В.М.** (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна)

## ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МОДИФІКОВАНОЇ СТАНИНИ КОЛОННОГО ТИПУ ДЛЯ ГІДРАВЛІЧНИХ ПРЕСІВ З ВИКОРИСТАННЯМ САПР SOLIDWORKS

**Анотація:** У статті проводиться комплексне дослідження напружено-деформованого стану модифікованої станини колонного типу для гідравлічних пресів, використовуючи можливості САПР SolidWorks Simulation. Робота зосереджена на вивченні та оптимізації конструкційних параметрів станини, щоб покращити її надійність та жорсткість. За допомогою SolidWorks Simulation детально аналізуються різні аспекти конструкції, включаючи виявлення слабких місць, оцінку впливу навантажень і визначення оптимальних шляхів для досягнення максимальної ефективності експлуатаційних характеристик.

**Abstract:** The article conducts a comprehensive study of the stress-strain state of a modified column-type frame for hydraulic presses, utilizing the capabilities of SolidWorks Simulation CAD software. The focus is on examining and optimizing the structural parameters of the frame to enhance its reliability and stiffness. SolidWorks Simulation is used to thoroughly analyze various aspects of the design, including identifying weak points, assessing the impact of loads, and determining the optimal paths for achieving maximum operational efficiency.

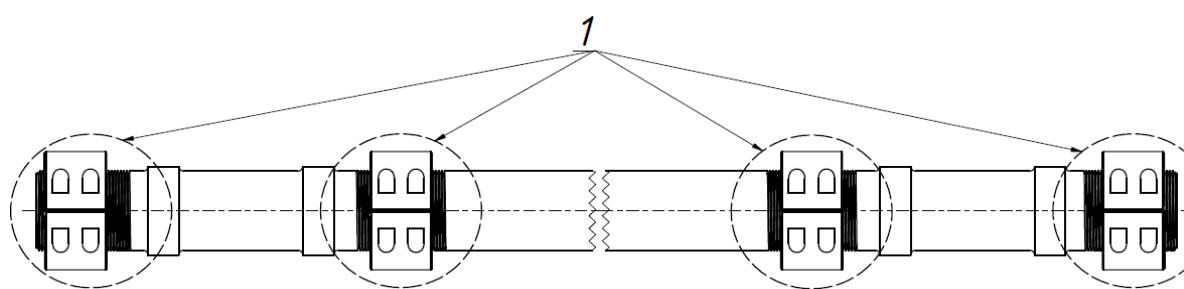
Станини колонного типу гідравлічних пресів, що знаходять застосування у широкому спектрі галузей промисловості, включно з автомобільною, авіаційною та суднобудівною, відіграють важливу роль у забезпеченні високої точності і якості виробничих процесів. Надійність та жорсткість цих станин безпосередньо корелюють із ефективністю обладнання та рівнем безпеки операторів. У цьому контексті, використання САПР SolidWorks для віртуального моделювання станин дозволяє інженерам здійснювати глибокий аналіз напружено-деформованих станів компонентів, вдосконалюючи їхні конструкції.

Наукові дослідження, спрямовані на підвищення ефективності, довговічності станин колонного типу, які потребують розробку нових теоретичних та практичних підходів та методик моделювання. Саме такі дослідження надають можливість отримання оптимальних конструктивних параметрів, що допомагає розширювати межі продуктивності, довговічності та безпеки обладнання. Зокрема, застосування програмного забезпечення SolidWorks а саме його модуля Simulation дозволяє реалізувати ці завдання з новою точністю та ефективністю, значно підвищуючи впевненість в результатах проектування.

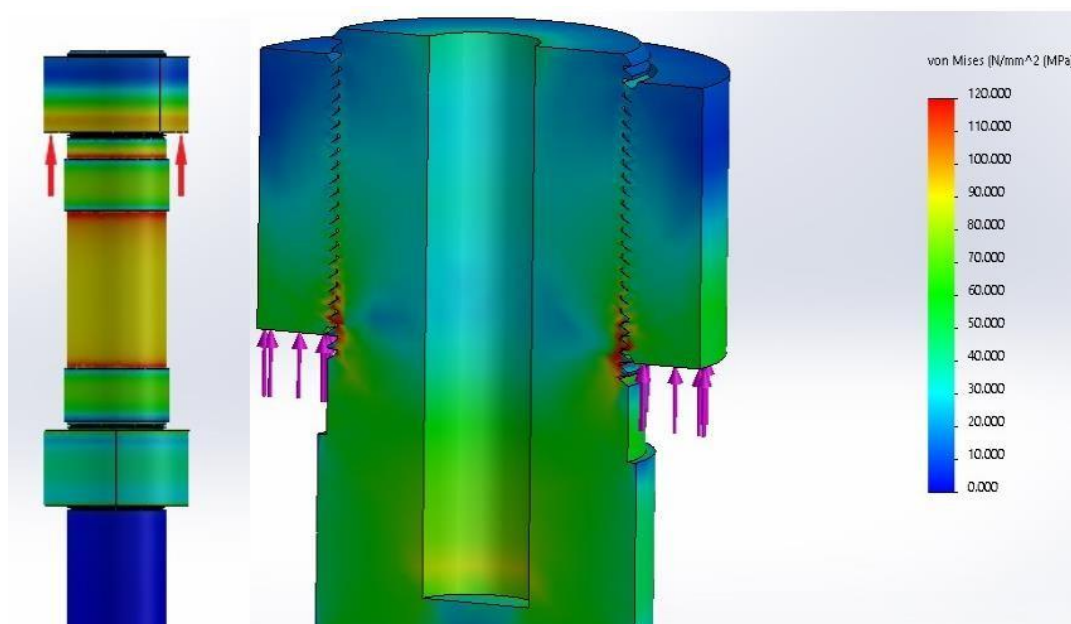
У цій роботі ми прагнемо дослідити та продемонструвати практичну придатність нової конструкції станини колонного типу для гідравлічних пресів, використовуючи САПР SolidWorks Simulation. Основна увага

зосереджена на аналізі авторського вузла колони, з метою визначення його впливу на збільшення надійності та жорсткості конструкції. Це дослідження включає глибоке моделювання вузла для оцінки напружень і деформацій, а також вироблення стратегій оптимізації конструкції, щоб підвищити експлуатаційні характеристики та підтвердити можливість застосування такої конструкції в реальних умовах.

Вивчення особливостей роботи кувальних комплексів під час кування, рухома поперечина завжди працює з деяким кутовим перекосом. Ексцентриситет спричиняє нерівномірний розподіл сил у станині, точніше в колонах де знаходиться різьбова зона (рис. 1), підвищуючи ризик її перевантаження та деформацію. З урахуванням особливостей роботи станини колонного типу, пропонується використання нової конструкції кріплення та колони загалом [1]. Конструкція представлена на рисунку 2.



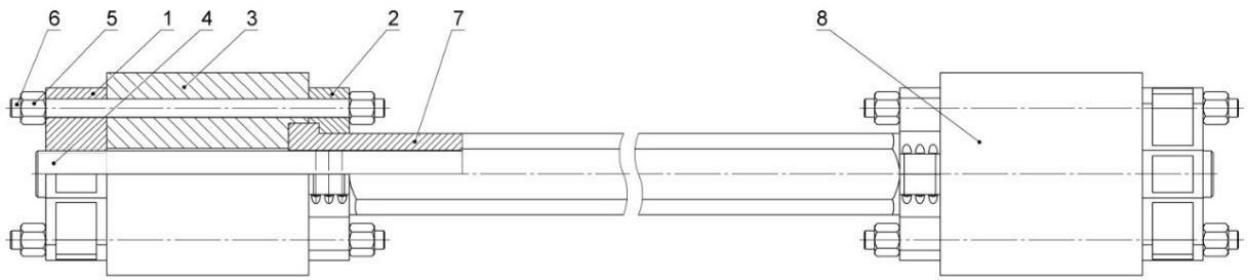
a)



б)

1 – місця концентраторів напружень

Рис. 1 – Типова конструкція колони (а), візуалізація напружень у різьбовій зоні: пік 120 МПа (б).



1 – ригель верхній; 2 – нижній збірний ригель; 3 – ВВП;  
4 – стяжка; 5 – гайка; 6 – шпилька; 7 – проставка, 8 – ННП.

Рис. 2 – Конструкція збірної колони

У рамках дослідження збірну колону, розділяємо на модульні компоненти, які складаються з трьох основних елементів: стягуючого вузла, стяжки, і полої проставки яка має квадратний переріз. Конструктивно, кожен модуль призначений для сприйняття певних навантажень. На рисунку 3 представлено графічне зображення розподілу напруг, що виникають під час навантаження та напрямки діючих сил.

Стягуючий вузол слугує фіксатором, запобігаючи послабленню затяжки гайки та перевантаженню різьбової зони стяжки при ексцентричному куванні. Стяжка, у свою чергу, спроектована для сприйняття виключно розтягуючих напружень, що виникають від затягування гайок. Проставка на відміну від класичної колони круглого перерізу має більший момент супротиву та не працює умовах підвищеного навантаження, забезпечуючи додаткову стабільність та розподіл напруг у складній конструкції збірної колони.

Напруження які виникають від сили затяжки гайки нейтралізуються згинальними напруженнями, особливо при високому ексцентриситеті. При максимальному навантаженні вплив затяжки на проставку падає. У дослідженні застосовано сітку скінченних елементів з високою щільністю. Важливо врахувати, що через специфічну геометрію проставки та ригелів, при створенні сітки в районах радіусів та переходів необхідно адаптувати масштаб, зменшуючи щільність елементів, щоб уникнути створення точок сингулярності. Ці точки можуть викривити результати, викликаючи появу неправдоподібних показників під час симуляції [2].

З урахуванням компенсаційних сил, які виникають у процесі кування, спостерігається зниження зусилля затягування ригелів. Тому на рис. 3 (ліве зображення) не показано діючу вертикальну силу, яка стискає проставку. Сили, прикладені до проставки з бокових сторін, є результатом кувального процесу і передаються рухомою поперечиною. Епюра відображає розподіл напружень, де червоний колір позначає максимальні, а синій — мінімальні напруження.



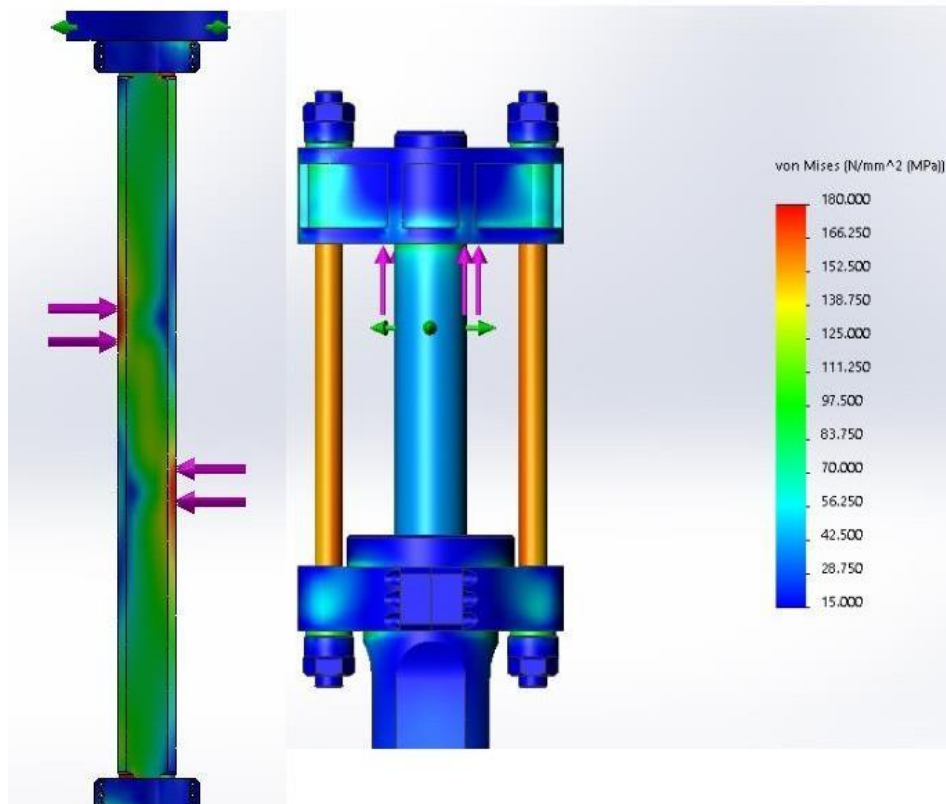


Рис. 3 – Аналіз напружень у проставці та вузлі стягування при навантаженні в 1,8 разів вище ніж прикладені зусилля до класичної колони: пік 180 МПа

## ВИСНОВКИ

Застосування САПР SolidWorks та модуля Simulation дозволило здійснити моделювання та аналіз міцнісних характеристик збірної колони. Ця колона відрізняється від класичної збільшеною жорсткістю, підвищеною стійкістю до перевантажень та можливістю модульної заміни елементів. Однак, модульний аналіз не забезпечує повної картини роботи колони під навантаженням. Таким чином, подальші дослідження передбачають моделювання цілісної конструкції станини для детального вивчення статичних та динамічних навантажень, що допоможе виявити потенційно слабкі зони та напрямки для оптимізації конструкції.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Пат. 148036 Україна, МПК (2006) B21J 9/12. Пристрій для підвищення надійності та жорсткості станини колонного типу гідравлічного преса. О. Є. Марков, Я. Є. Пуц, Д. О. Бочковий № u202008128; Заявл. 18.12.2020; Опубл. 30.06.2021.
2. Nudehi, S. S., & Steffen, J. R. (2023). *Analysis of Machine Elements Using SOLIDWORKS Simulation 2023*. Mission, KS: SDC Publications. ISBN 978-1-63057-563-2.

**Бровко А.М.**, науковий керівник: д.т.н., професор Ковалевський С.В.  
(Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ –  
Тернопіль, Україна)

## ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ГІДРОАПАРАТУР У КОНТЕКСТІ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ І ЗНИЖЕННЯ ВИТРАТ

***Анотація:** Стаття присвячена аналізу та оптимізації технологічних процесів виготовлення гідروапаратури, що є актуальним напрямком у сфері машинобудування. Основна увага приділяється впровадженню сучасних методів та інноваційних рішень для підвищення ефективності виробництва, які дозволяють не тільки збільшити продуктивність, але й знизити витрати на виробництво. Аналізується вплив автоматизації, застосування новітніх матеріалів та методів контролю якості на оптимізацію виробничих процесів. Висвітлено ключові рекомендації щодо інтеграції технологічних новинок у виробництво та перспективи подальших досліджень у даній області.*

***Abstract:** This article is dedicated to the analysis and optimization of technological processes in the manufacturing of hydraulic equipment, which represents a relevant direction in the field of mechanical engineering. The main focus is on the implementation of modern methods and innovative solutions to enhance manufacturing efficiency, which not only increase productivity but also reduce production costs. The impact of automation, the application of the latest materials, and quality control methods on the optimization of manufacturing processes is analyzed. Key recommendations for the integration of technological innovations into production and prospects for further research in this area are highlighted.*

У сучасному виробничому середовищі підвищення продуктивності та зниження витрат є ключовими факторами конкурентоспроможності підприємств машинобудування. Оптимізація технологічних процесів, зокрема виробництва гідроапаратури, відіграє стратегічну роль у досягненні цих цілей.

Аналіз наукових джерел вказує на широкий спектр методів оптимізації технологічних процесів, від автоматизації виробництва до застосування інноваційних матеріалів і методів контролю якості. Зокрема, важливість комплексного підходу до виробництва гідроапаратури, що включає в себе вдосконалення конструкцій, вибір оптимальних матеріалів та модернізацію обладнання.

Дослідження базується на аналізі існуючих технологічних процесів виготовлення гідроапаратури, включаючи визначення основних критеріїв ефективності, таких як якість виробів, витрати сировини та енергії, а також ергономічність робочих місць.

У фокусі дослідження – оптимізація виробництва гідроциліндрів, як одного з ключових елементів гідроапаратури. Розглядаються інноваційні технологічні рішення, зокрема використання сучасного обладнання і

інструментів, які дозволяють підвищити точність і якість обробки, знизити трудомісткість виробництва та покращити екологічні показники.

Дослідження підтверджує значущість оптимізації технологічних процесів у машинобудуванні для забезпечення високої якості та ефективності виробництва. Впровадження інноваційних рішень дозволяє не тільки підвищити продуктивність роботи підприємства, але й значно знизити витрати на виробництво за рахунок зменшення витрат сировини та енергії, оптимізації використання обладнання та покращення умов праці. Особливу увагу слід звернути на автоматизацію процесів та використання сучасних інформаційних технологій для контролю та управління виробничими процесами.

#### Рекомендації

На основі проведеного аналізу рекомендуємо:

1. Інтегрувати сучасні технологічні рішення у виробництво для забезпечення високої якості продукції та оптимізації виробничих процесів.
2. Застосовувати комплексний підхід до управління якістю, включаючи використання сучасного обладнання, інструментів та матеріалів.
3. Підвищувати рівень автоматизації виробничих процесів для зменшення трудомісткості та підвищення ефективності виробництва.
4. Впроваджувати системи контролю та управління виробництвом на основі сучасних інформаційних технологій для оптимізації роботи підприємства та підвищення його конкурентоспроможності.
5. Забезпечувати постійне навчання та розвиток персоналу для роботи з новітніми технологіями та обладнанням.

Подальші дослідження у сфері оптимізації технологічних процесів машинобудування можуть бути спрямовані на розробку комплексних систем управління виробництвом, що інтегрують в себе штучний інтелект і машинне навчання для автоматизації прийняття рішень та контролю якості. Також актуальним є дослідження впливу застосування екологічно чистих технологій і матеріалів на виробничий процес і властивості кінцевої продукції. Особлива увага має бути приділена розробці технологій вторинної переробки та утилізації відходів виробництва, що дозволить не тільки знизити витрати на сировину, але й мінімізувати негативний вплив на довкілля.

#### Заклучення.

Оптимізація технологічних процесів в машинобудуванні відкриває нові можливості для підвищення продуктивності, ефективності та екологічності виробництва. Інноваційні рішення, засновані на сучасних наукових дослідженнях та передових технологіях, забезпечують підприємствам машинобудування необхідні інструменти для досягнення цих цілей. Успіх в реалізації стратегій оптимізації залежить від здатності компаній адаптуватися до швидко змінюваних ринкових умов, впроваджувати інновації та ефективно управляти ресурсами.

**Буковський О.М.**, науковий керівник: к.т.н., доцент Вислоух С.П.  
(Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна)

## **АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ МІЖБЛОКОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ З'ЄДНАНЬ**

***Анотація:** Виконано аналіз використовуваних методів контролю параметрів міжблокових електричних з'єднань, вказано їх особливості та недоліки. Надано обґрунтування розробки автоматизованої системи контролю параметрів міжблокових електричних з'єднань на основі адаптивних алгоритмів. Приведено структурну схему модульного типу системи та її основні складові. Наголошено на перспективності приведеної автоматизованої системи та подальшого її вдосконалення.*

***Abstract:** An analysis of the used methods of controlling the parameters of inter-block electrical connections is performed, their features and shortcomings are indicated. The rationale for the development of an automated control system for the parameters of inter-block electrical connections based on adaptive algorithms is provided. The structural diagram of the modular type of system and its main components is given. Emphasis is placed on the prospects of the given automated system and its further improvement.*

### **Постановка задачі**

Оскільки всі методи контролю міжблокових електричних з'єднань ґрунтуються на вимірюванні струмів і напруг, найбільш загальною класифікаційною ознакою можна назвати ступінь їх автоматизації. Відповідно до цієї ознаки всі методи контролю міжблокових електричних з'єднань можна розділити на ручні і автоматизовані. Подібний поділ характеризує не тільки частку участі людини у вимірювальному процесі, а й засоби, за допомогою яких може проводитися контроль міжблокових електричних з'єднань.

Аналіз конструктивно-технологічних характеристик і перспектив розвитку конструктивних модулів систем контролю параметрів міжблокових електричних з'єднань показав, що комплексне рішення задач їх проектування і виробництва можливо тільки на основі розробки і впровадження методів і засобів математичного синтезу [1,2]. Однак системному дослідженню і розробці цієї актуальної задачі не приділялося достатньої уваги, що підтверджується малою кількістю публікацій за даною тематикою, тому дане дослідження присвячене автоматизації процесу контролю параметрів міжблокових електричних з'єднань на основі адаптивних алгоритмів.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

У сучасному виробництві кабельно-провідникової продукції велике значення має автоматизація процесів контролю її параметрів. У цьому контексті важливим є аналіз досліджень, що розглядають можливості та переваги використання адаптивних алгоритмів в автоматизованих системах

контролю. Загальним питанням розробки систем, що виконують перевірку параметрів міжблокових електричних з'єднань, присвячені окремі наукові праці King, M. S., & Iannello, C. J. [1], Ng, F. M., Ritchie, J. M., Simmons, J. E. L., & Dewar, R. G.

Bi, Z., Pomalaza-Ráez, C., Hershberger, D., Dawson, J., Lehman, A., Yurek, J., & Ball, J. [3] у своїх роботах розглядали питання автоматизації процесу тестування електричних кабелів. Автори вивчали можливості використання роботів та автоматизованих систем для виконання цього завдання і досить детально описали розроблені системи та методику тестування, що може бути корисним для підвищення ефективності та точності виробничих процесів. Можливою перспективою для подальших досліджень цього питання є використання адаптивних алгоритмів. Це дозволило б за допомогою системи автоматичного контролю реагувати на зміни виробничого середовища та на варіабельність властивостей кабелів, що може виникати в процесі виробництва і підвищити надійність продукції.

Мазулевський О.Є. [4] досліджував адаптивний контроль комп'ютерних мереж на основі нечіткої логіки. Цей підхід може бути корисним для розробки систем контролю параметрів міжблокових електричних з'єднань з використанням адаптивних алгоритмів.

Дослідження авторів наведених робіт вказують на перспективність використання адаптивних алгоритмів у приладобудуванні при створенні автоматизованої системи контролю параметрів міжблокових електричних з'єднань. Аналіз результатів цих досліджень вказує на необхідність подальшого розроблення та вдосконалення систем контролю з використанням адаптивних алгоритмів з метою підвищення продуктивності виробництва, а також надійності готових виробів.

### **Формулювання невирішених частин загальної задачі**

На сьогодні контроль параметрів кабельної продукції не виконується в автоматизованому режимі, що призводить до значних витрат часу та ресурсів. Така ситуація, а також відсутність автоматизованих рішень вказує на важливість розроблення автоматизованої системи контролю, яка значно зменшить час, витрачений на цю роботу вручну, що дозволить таким чином підвищити продуктивність, а також надійність готових виробів за рахунок виключення впливу людського фактору на процес виробництва. Тому необхідне подальше розроблення та вдосконалення систем контролю параметрів кабельної продукції з використанням адаптивних алгоритмів для підвищення продуктивності виробництва та надійності виробів.

### **Мета роботи та постановка задачі**

Мета роботи полягає в підвищенні продуктивності виробництва та надійності кабельно-провідникової продукції шляхом розроблення та впровадження системи контролю параметрів міжблокових електричних з'єднань, яка базується на застосуванні адаптивних алгоритмів здатних

динамічно змінюватись відповідно до характеристик конкретних виробів та умов виробництва.

Відповідно до вказаної мети роботи визначено задачі, що підлягають реалізації у даній статті:

– виконати огляд існуючих методів контролю міжблокових електричних з'єднань, виконати детальний аналіз кожного з методів, розглянути їх переваги та недоліки;

– вказати потенційні переваги використання адаптивних алгоритмів і обґрунтувати необхідність розроблення відповідної автоматизованої системи контролю з їх застосуванням.

### Результати дослідження

Автоматизовані методи контролю міжблочних електричних з'єднань реалізуються різними вимірювальними системами, можливості яких обмежені лише елементною базою обладнання. Однак ефективність цих систем значною мірою залежить від характеру вимірювальних впливів, що застосовуються до приладу в процесі контролю міжблочних електричних з'єднань. Тому важливою класифікаційною ознакою методів контролю є характер впливу, які, відповідно, можна поділити на безперервні, імпульсні та комбіновані [5].

Безперервні методи: на пристрій безперервно діють постійні в часі вимірювальні впливи з амплітудами, що поступово змінюються. Форма цих впливів змінюється в залежності від типу пристрою, що перевіряється, і засобів, що використовуються для перевірки з'єднань.

Найбільш поширеним безперервним методом контролю з'єднань є метод, при якому амплітуда вимірювального впливу змінюється ступінчасто (рис. 1а і 1б). При цьому, як правило, використовується цифрова апаратура, а вимірювання електричних з'єднань між блоками здійснюється різними комп'ютерними системами.

Прикладом безперервного методу моніторингу міжблочних з'єднань є осцилографічний метод, при якому в якості джерела впливу для вимірювання набору характеристик використовується аналоговий генератор або спеціальна насадка осцилографа [6]. При цьому вимірювальний вплив може бути синусоїдальним (рис. 1г).

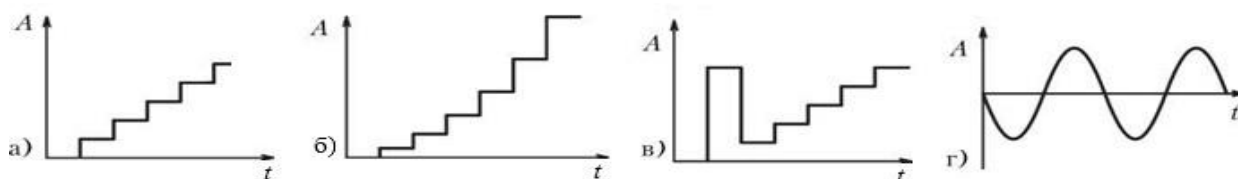


Рис. 1. *Форми вимірювального впливу на пристрій при безперервному контролі з'єднань*

Основним недоліком методів безперервного контролю з'єднань є те, що в процесі вимірювання в тестованому пристрої безперервно протікає струм, амплітуда якого може безперервно зростати. Це призводить до накопичення тепла в структурі пристрою, що тестується, порушуючи

контроль з'єднання і викликаючи методичні помилки. Ця похибка більш виражена при тестуванні силових пристроїв або при багаторазовому вимірюванні одних і тих же характеристик пристрою. Крім того, вплив захоплення носіїв на результати вимірювань найбільш виражений, коли для перевірки з'єднань використовуються безперервні методи [6].

Імпульсний метод: при контролі міжблочних електричних з'єднань на пристрій подаються вимірювальні імпульси різної амплітуди під час паузи, коли на пристрій відсутній електричний вплив. Контроль міжблочного електричного з'єднання досягається шляхом реєстрації реакції пристрою, що перевіряється, під час дії кожного імпульсу. Оскільки струм протікає через випробуваний пристрій тільки під час вимірювальних імпульсів, вплив загального нагріву пристрою і захоплення носіїв в пристрої зменшується в порівнянні з безперервними методами.

Найпоширенішим методом є подача на прилад серії прямокутних вимірювальних імпульсів зростаючої амплітуди. При цьому пауза між імпульсами залишається постійною (рис. 2а) [6].

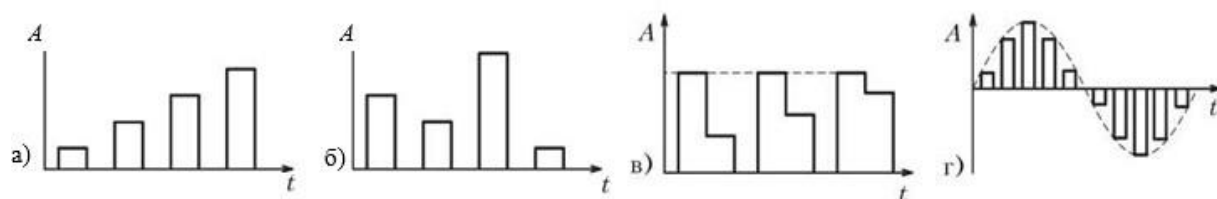


Рис. 2. *Форми вимірювання впливу, що чиниться на пристрій ударним методом для перевірки взаємозв'язку електричних з'єднань.*

Модифікацією описаного методу є метод перевірки електричних з'єднань між блоками. Згідно з цим методом амплітуда імпульсів у процесі вимірювання напруги змінюється випадковим чином у заданому користувачем діапазоні (рис. 2б). Цей метод використовується для експериментального підбору параметрів імпульсного удару.

Імпульсний метод, як і безперервний, використовується при випробуванні взаємопов'язаних пристроїв з ділянками від'ємного диференціального опору. У цьому випадку кожному вимірювальному імпульсу передують імпульси більшої амплітуди (рис. 2в).

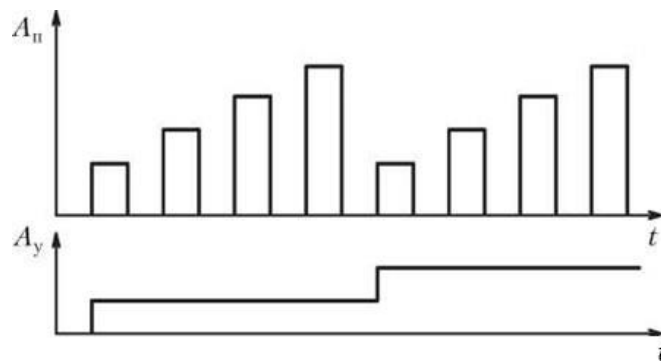
Для перевірки електричних з'єднань між блоками імпульсний метод також застосовується в спеціальних приставках, які дозволяють вимірювати і спостерігати на дисплеї осцилографа серію показників, отриманих за допомогою модуляції імпульсного сигналу (рис. 2г).

Імпульсні методи контролю міжблокових електричних з'єднань широко поширені і реалізуються, як правило, коштовними швидкодіючими комп'ютерними системами, що і є їх значним недоліком.

Комбіновані методи: з точки зору впливу на саморозігрів досліджуваного приладу ці методи вимірювання параметрів міжблокових електричних з'єднань займають проміжне місце між безперервними і імпульсними, оскільки процес вимірювання здійснюється при температурі,

яка визначається величиною постійної складової впливаючого сигналу [6]. Подібно імпульсним, ефективність комбінованих методів вимірювання істотно залежить від вибору параметрів вимірювальної імпульсної послідовності, а також ступеня їх відповідності індивідуальним властивостям досліджуваного приладу.

Одним із прикладів використання комбінованих методів є вимірювання параметрів, що представляє собою функцію двох параметрів, один з яких варіюється, а другий залишається постійним. Наприклад, при вимірюванні характеристик приладу (рис. 3), на його входи подаються впливні сигнали, які можуть змінюватися в часі (сигнал  $A_n$ ), або залишатися постійними (сигнал  $A_y$ ). Вихідні сигнали, у свою чергу, можуть бути імпульсами зі змінною амплітудою.



*Рис. 3. Форма вимірювальних впливів для зняття серій вихідних характеристик комбінованим методом*

Необхідність в таких методах вимірювання обумовлена впливом на характеристики приладу ефекту захоплення носіїв струму. Ступінь цього впливу пропорційний величині постійного електричного сигналу, що впливає на прилад, тому характеристики одного і того ж приладу в різних режимах його роботи можуть відрізнятися [6, 7]. Відповідно, параметри, що виміряні при одному режимі роботи приладу, можуть недостатньо точно характеризувати його роботу в іншому режимі в складі будь-якого іншого пристрою. Тому в контексті контролю міжблокових електричних з'єднань максимально точним буде той режим роботи приладу, в якому він працюватиме в кінцевому пристрої. З цієї причини використовують комбіновані методи вимірювання з точкою спокою. В цьому випадку постійне зміщення впливу дозволяє підтримувати інтенсивність захоплення носіїв в структурі приладу на заданому рівні, а короткі вимірювальні імпульси – досягти меншого саморозігріву приладу в порівнянні з безперервними методами.

За результатами аналізу стану контролю параметрів міжблокових електричних з'єднань поставлена задача створення системи, що дозволить автоматизувати процес контролю. Це значно зекономить час, витрачений на дану роботу вручну, що означатиме підвищення продуктивності виробництва, а також надійності самих виробів за рахунок часткового виключення впливу людського фактору на процес виробництва .



Пропонується автоматизована система контролю параметрів міжблокових електричних з'єднань на основі адаптивних алгоритмів, що ґрунтується на використанні комбінованого методу з математичним обробленням результатів вимірювань. Загальна структурна схема системи представлена на рис. 4.

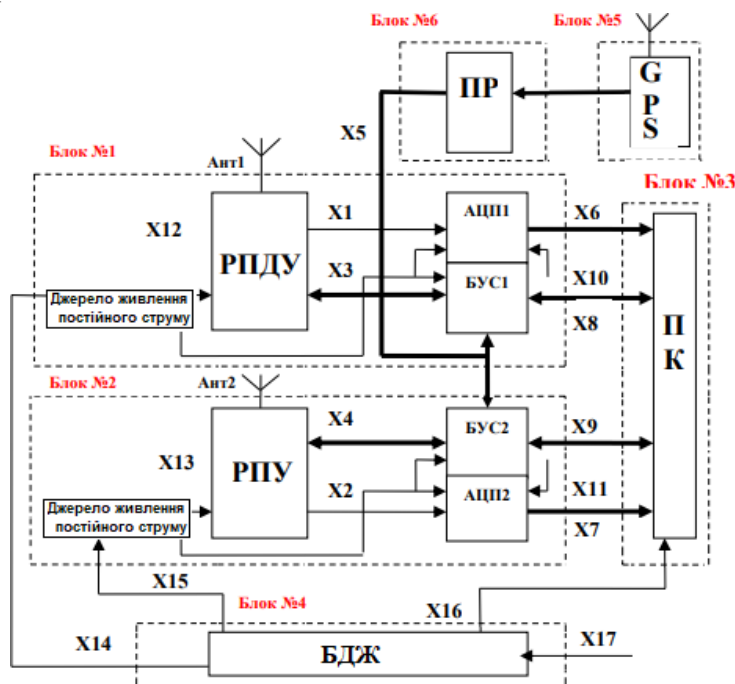


Рис. 4. Загальна структурна схема системи контролю параметрів міжблокових електричних з'єднань

Структурна схема системи автоматизованого контролю побудована за модульним принципом і складається з сукупності взаємопов'язаних блоків.

Приймально-передавальні канали (Блок №1 і Блок №2) включає модернізований трансивер, блок живлення, аналого-цифровий перетворювач (АЦП1), блок управління і синтезу (БУС1), до складу якого входить субблок програмно-керованого цифрового синтезатора, мікропроцесорний субблок управління і субблок високостабільного опорного генератора.

Другий приймальний канал (Блок №2) складається з модернізованого приймача, адаптера змінного струму, аналого-цифрового перетворювача (АЦП2), блока управління і синтезу (БУС2), що включає субблоки програмно-керованого цифрового синтезатора, мікропроцесорного управління і високостабільного опорного генератора.

До складу автоматизованої системи також входить персональний комп'ютер (Блок №3), джерело безперебійного живлення (Блок №4), GPS приймач (Блок №5) і перетворювач (Блок №6).

Процес контролю параметрів міжблокових електричних з'єднань передбачає використання спеціалізованого програмного забезпечення, яке реалізується із застосуванням адаптивних алгоритмів, що забезпечить можливість аналізу та контролю характеристик кабельно-провідникової продукції у режимі реального часу.

## Висновки та перспективи подальших досліджень

В результаті аналізу методів контролю параметрів міжблокових електричних з'єднань встановлено їх недоліки та особливості використання.

Обґрунтована необхідність розроблення відповідної автоматизованої системи контролю міжблокових електричних з'єднань на основі використання адаптивних алгоритмів.

Запропонована структурна схема автоматизованої системи, що має модульний принцип побудови. Це дозволяє виконувати подальше її вдосконалення в напрямках передових технологій електронних комплектуючих виробів, адаптивного зменшення перешкод і корекції спотворень в радіоканалі, а також вдосконалення потоків управління каналами передачі даних. Розробки в двох перших напрямках забезпечать підвищення надійності роботи і оброблення сигналів, а досягнення в третьому напрямку, що має виняткову важливість для мережі, надають їй додаткову гнучкість і живучість.

Використання автоматизованої системи контролю параметрів дозволить підвищити продуктивність процесу виготовлення та надійність електронних виробів.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. King, M. S., & Iannello, C. J. (2011). *Evaluation of Cable Harness Post-Installation Testing*. NASA Technical Reports Server.
2. Ng, F. M., Ritchie, J. M., Simmons, J. E. L., & Dewar, R. G. (2000). *Designing cable harness assemblies in virtual environments*. *Journal of Materials Processing Technology*, 107(1-3), 37-43.
3. Bi, Z., Pomalaza-Ráez, C., Hershberger, D., Dawson, J., Lehman, A., Yurek, J., & Ball, J. (2017). *Automation of electrical cable harnesses testing*. *Robotics*, 7(1), 1.
4. Бондаренко І. М., Бородін О. В., Карнаушенко В. П. (2020). *Сучасна компонентна база електронних систем: навчальний посібник*. Харків: ХНУРЕ.
5. Невлюдов В. А., Демська Н. П., Разумов-Фризюк Є. А., Новоселов С. П. (2020). *Контроль якості електричних міжз'єднань гнучких структур*. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*, (1), 103-112.
6. Bulatov Yu. N., Kryukov A. V. (2016). *Optimization of automatic regulator settings of the distributed generation plants on the basis of genetic algorithm*. In *2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)* (pp. 1–6). IEEE Conference Publications.

**Гребенкін О.О.**, науковий керівник: д.т.н., професор Ковалевський С.В.  
(Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ –  
Тернопіль, Україна)

## **ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО РОЗРОБКИ МЕХАНОСКЛАДАЛЬНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВУЗЛІВ ПРИВОДУ КРУПНИХ СОРТОВИХ СТАНІВ**

***Анотація:** Дослідження присвячене розробці інноваційного механоскладального технологічного комплексу для виготовлення вузлів приводу, спрямованого на підвищення продуктивності та зниження собівартості продукції в умовах сучасного машинобудування. Аналізуючи сучасні технології та виклики виробництва, автори розглядають використання передових методів обробки, роботизованих систем та гнучких виробничих систем для оптимізації технологічних процесів. Робота демонструє значний потенціал для підвищення ефективності виробництва, зменшення часу обробки та підвищення точності виготовлення за рахунок впровадження інноваційного комплексу, що інтегрує в себе передові технології. Техніко-економічне обґрунтування підтверджує високу економічну ефективність впровадження, вказуючи на значні переваги для машинобудівних підприємств.*

***Abstract:** This study is dedicated to the development of an innovative mechossembly technological complex for manufacturing drive units, aimed at increasing productivity and reducing the cost of production in the context of modern mechanical engineering. Analyzing current technologies and manufacturing challenges, the authors consider the use of advanced processing methods, robotic systems, and flexible manufacturing systems for optimizing technological processes. The work demonstrates significant potential for increasing manufacturing efficiency, reducing processing time, and enhancing the precision of manufacturing through the implementation of an innovative complex that integrates cutting-edge technologies. The techno-economic justification confirms the high economic efficiency of the implementation, indicating significant advantages for mechanical engineering enterprises.*

**Вступ.** Сучасне машинобудування стикається з постійним викликом підвищення ефективності та зниження собівартості виробництва. Розвиток інноваційних технологій і автоматизація є ключовими факторами в досягненні цієї мети. Робота присвячена розробці ефективного технологічного процесу для виготовлення вузлів приводу крупних сортових станів, що спрямована на підвищення продуктивності та зниження собівартості продукції.

**Методи дослідження.** Дослідження базується на аналізі сучасного стану виробництва, виявленні основних проблем та викликів у процесі виготовлення вузлів приводу. Особлива увага приділена аналізу сучасних технологій машинобудування, зокрема використанню передових методів обробки, роботизованих систем та гнучких виробничих систем.

**Розробка інноваційного комплексу.** Основою розробки є створення інноваційного механоскладального технологічного комплексу, який

інтегрує в собі передові технології обробки, автоматизацію процесів і гнучкість виробництва. Детально розглянуто підходи до оптимізації технологічних процесів, зокрема через використання багатофункціональних оброблювальних центрів і систем ЧПУ.

**Техніко-економічне обґрунтування.** Проведено оцінку економічної ефективності впровадження розробленого комплексу, включаючи аналіз зменшення собівартості продукції та підвищення продуктивності виробництва. Вказано на потенціал зниження часу обробки деталей та збільшення точності виготовлення.

**Висновки.** Розробка і впровадження інноваційного механоскладального технологічного комплексу для виготовлення вузлів приводу крупних сортових станів демонструє значний потенціал для підвищення ефективності виробництва в умовах сучасного машинобудування. Використання передових технологій, зокрема роботизованих систем і систем ЧПУ, дозволяє не лише оптимізувати виробничі процеси, але й забезпечити високу точність та якість готової продукції. Аналіз верстатів і обладнання, представлених на ринку, підкреслює значні переваги сучасних багатофункціональних оброблювальних центрів перед традиційними верстатами, зокрема в частині швидкості обробки, точності та гнучкості виробничих можливостей.

Окрім технічного аспекту, техніко-економічне обґрунтування дослідження вказує на високу економічну ефективність впровадження інноваційного комплексу. Зниження собівартості продукції, зменшення часу обробки та підвищення загальної продуктивності виробництва є ключовими факторами, що забезпечують високу конкурентоспроможність продукції на ринку.

Завдання, що стояло перед дослідниками, було виконано з високою мірою професіоналізму, демонструючи здатність до інноваційного мислення та глибокого розуміння потреб сучасного машинобудування. Результати дослідження мають велике практичне значення і можуть бути використані як основа для подальшого розвитку та оптимізації виробничих процесів на підприємствах, що спеціалізуються на виготовленні складних механічних систем і комплексів.

Враховуючи все вищезазначене, інноваційний механоскладальний технологічний комплекс представляє собою значний крок вперед у розвитку технологічних систем механообробки, відкриваючи нові можливості для підвищення ефективності виробництва і розширення технологічних горизонтів сучасного машинобудування.

Гринь О.Г., Трембач І.О., Воропаєв Є.В. (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ-Тернопіль, Україна)

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ОКСИДІВ РІДКОЗЕМЕЛЬНИХ МЕТАЛІВ В СКЛАДІ ПОРОШКОВОГО ДРОТУ

*Анотація:* Використання рідкоземельних металів (РЗМ) в металургії в якості розкислювачів, десульфураторів та модифікаторів сталей і сплавів знаходить все більше широке розповсюдження. З іншого боку, висока хімічна активність РЗМ призводить до їх вигорання та значних втрат. В статті розглянуто можливості і результати дослідження протікання реакції відновлення рідкоземельних металів з їх оксидів вуглецем та способу підвищення ефективності цього процесу.

*Abstract:* The use of rare earth metals (REM) in metallurgy as deoxidizers, desulfurizers and modifiers of steels and alloys is becoming more distribution. On the other hand, the high chemical activity of REM leads to their burning and significant losses. The article examines the possibilities and results of the study of the process of the reaction of the reduction of rare earth metals from their oxides of carbon and the method of increasing the efficiency of this process.

**Постановка проблеми, її зв'язок з науковими і практичними роботами.** Відомо використання рідкоземельних металів (РЗМ) в металургії в якості розкислювачів та десульфураторів сталей [1, 2], куди їх вводять у вигляді лігатур, що мають назву мішметалу. Відомо [3-5] про позитивний вплив РЗМ та їх сполук на властивості металу зварного шва, проте в електродних матеріалах використовують їх вкрай рідко. Рідкоземельні метали можуть застосовуватися як розкислювачі, десульфуратори, модифікатори металу зварних швів або наплавленого шару. Разом з тим, використання РЗМ має складність введення в зварювальну ванну через їх високу активність [2], що призводить до вигорання та дезактивацію в зоні горіння дуги в процесі зварювання або наплавлення. Враховуючи те, що РЗМ (R) є похідними від їх оксидів ( $R_2O_3$ ) в результаті процесу дисциляції розплаву [6], є доцільним дослідити використання  $R_2O_3$  в складі порошкового дроту.

Відновлення РЗМ з оксидів за відповідної температури можливо вуглецем [4]. При температурі вище 2400K проходить реакція:



де  $R_2O_3$  – оксид рідкісноземельного металу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Основним вуглецевмісним матеріалом, який використовують в складі осердя порошкового дроту, що застосовується для наплавлення, є графіт або стальна оболонка [9]. Розташування  $R_2O_3$  і графіту по перерізу порошкового дроту випадкове, а їх участь у металургійних процесах недостатньо повна. Плавлення оболонки дроту відбувається під дією температури дуги і нагріву струмом, що проходить через неї. Нагрів та плавлення наповнювача здійснюється за

рахунок його теплопровідності, тепловиділення дуги та конвективного теплообміну з рідким металом електродної краплі на торці електроду і зварювальної ванни. Розподіл температури по перерізу дроту нерівномірний, причому максимальне значення його на оболонці [8]. Суттєво вплинути на повноту використання  $R_2O_3$  можливо за рахунок концентрації його в зоні максимальних температур – поблизу оболонки порошкового дроту.

Можливість протікання реакції відновлення РЗМ з їх оксидів перевіряється розрахунком величини енергії реакції  $\Delta G$ :

$$\Delta G = \Delta H_{298}^0 - \Delta S_{298}^0 \cdot T - \Delta C_p \cdot M_0 \cdot T \quad (2)$$

де  $\Delta H_{298}^0$  та  $\Delta S_{298}^0$  – значення ентальпії та ентропії в стандартних умовах;

$T$  – температура;

$\Delta C_p$  – зміна теплоємності під час реакції;

$M_0$  – коефіцієнт, що враховує зміну температури.

Зміна ізобарно-ізотермічного потенціалу утворення продуктів реакції у досліджуваному температурному інтервалі показано на рис. 1.

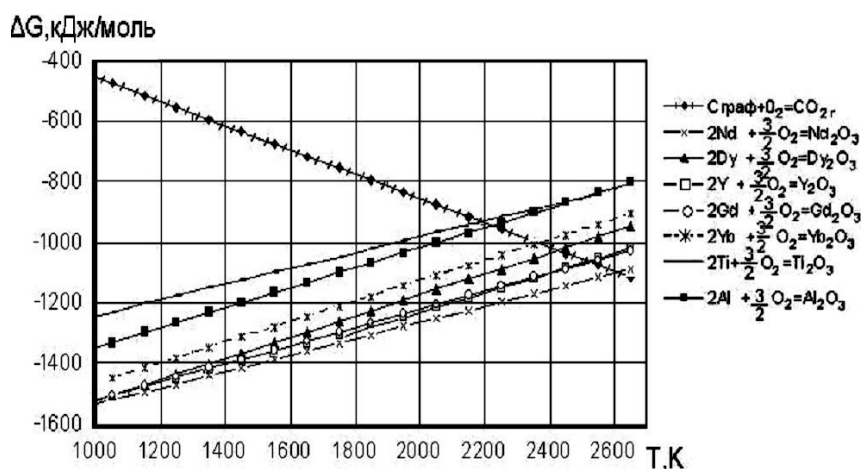


Рис. 1. Температурна залежність ізобарно-ізотермічного потенціалу окиснення деяких РЗМ.

Найбільш активним з розглянутих розкислювачів є вуглець у всьому інтервалі прийнятих для розрахунку температур. З підвищенням температури перебігу реакції спорідненість вуглецю до кисню зростає. При температурі вище 2500К вуглець відновлює РЗМ з їх оксидів. Відновлення РЗМ з оксидів в інтервалі температур, що розглядається, можливе в наступній послідовності: Dy, Y, Nd. Температура поверхні краплі при плавленні порошковим дротом змінюється в межах 2150-2900 К [8].

**Цілі статті та постановка задачі.** Розробити спосіб розміщення РЗМ $_2$ O $_3$  в зоні максимальних температур в процесі плавлення наповнювача порошкового дроту з метою підвищення ефективності їх застосування у складі таких дротів. Для досягнення цілі необхідно дослідити вплив графіту

і  $R_2O_3$  та їх розташування по перерізу порошкового дроту на перехід відновлених РЗМ у наплавлений метал.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Дослідження показали [8], що не весь оксид РЗМ у складі наповнювача порошкового дроту трубчастої конструкції вступає у взаємодію. Аналіз складу шлаків підтверджує, що поряд з сульфідами РЗМ та складними сполуками рідкісноземельних металів, виявлено їх оксиди у вихідному стані [9]. Наявність оксидів РЗМ у шлаку залежить від константи переходу  $K_p$ :

$$K_p = \frac{P^{CO_2} \cdot [R]^4}{(R_2O_3)^2 \cdot [C]^3} \quad (3)$$

де  $P_{CO_2}$  – парціальний тиск діоксиду вуглецю;

$[R]$  та  $[C]$  – вміст РЗМ та вуглецю в наплавленому металі;

$(R_2O_3)$  – вміст оксиду РЗМ в шлаку.

Розподіл РЗМ по фазам відповідає співвідношенню:

$$\frac{[R]^2}{(R_2O_3)^2} \quad (4)$$

Наявність оксидів РЗМ у шлаку можлива через відставання плавлення наповнювача щодо оболонки з подальшим обсіпанням його у зварювальну ванну. Ефективність застосування оксидів РЗМ у складі порошкових дротів можна оцінити коефіцієнтом  $A$ :

$$A = \frac{[R] + (R_2MeO_3)}{R_2O_3} \quad (5)$$

де  $R_2O_3$  – вміст оксиду РЗМ в наповнювачі порошкового дроту.

Запропоновано визначення оптимальної товщини шару суміші «графіт – оксид РЗМ», що забезпечує ефективність протікання процесу відновлення РЗМ і полягає в наступному.

На стадії утворення краплі (рис. 2) в аналізованій реакції бере участь частина наповнювача порошкового дроту, яка розташована на деякій відстані від внутрішньої поверхні оболонки, в напрямку повздовжньої осі дроту, утворюючи шар ефективної товщини (b).

Розрахункова маса краплі  $m$  електродного металу:

$$m = \frac{\rho \cdot \pi \cdot d^3}{6} \quad (6)$$

де  $\rho$  – густина металу;

$d$  – діаметр краплі.

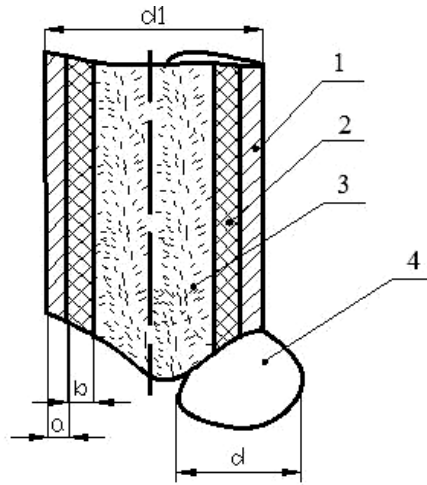
Масу тієї ж краплі  $m$  можна визначити використавши залежність:

$$m = \frac{\pi \cdot d_1 \cdot \sigma}{g} \quad (7)$$

де  $d_1$  – діаметр порошкового дроту;

$\sigma$  – поверхневий натяг металу;

$g$  – прискорення вільного падіння.



1 – оболонка порошкового дроту, 2 – шар суміші «графіт – оксид РЗМ», 3 – наповнювач порошкового дроту, 4 – крапля розплавленого металу

Рис. 2. Перетин порошкового дроту на стадії утворення краплі.

Прирівняємо обидві залежності (6) та (7) визначення маси краплі:

$$\frac{\rho \cdot \pi \cdot d^3}{6} = \frac{\pi \cdot d \cdot \sigma}{g} \quad (8)$$

Із рівняння (8) отримуємо залежність величини діаметра краплі:

$$d = 1,8 \cdot \sqrt[3]{d_1 \cdot \frac{\sigma}{\rho \cdot g}} \quad (9)$$

Якщо прийняти  $\frac{\sigma}{\rho \cdot g} = K$  за постійну величину для даного складу порошкового дроту, то залежність (9) прийме наступний вигляд:

$$d = 1,8 \cdot \sqrt[3]{K \cdot d_1} \quad (10)$$

Допустивши, що вісь краплі співпадає з віссю оболонки, тоді товщина шару суміші «графіт – оксид РЗМ» складе:

$$b = \frac{(d - a)}{2} \quad \text{або} \quad 2 \cdot b = 1,8 \cdot \sqrt[3]{K \cdot d_1} - a \quad (11)$$

Запропоновано спосіб виготовлення порошкового дроту, який дозволяє підвищити ефективність застосування оксиду РЗМ, сконцентрувавши його разом з розкислювачем (суміш «графіт – оксид РЗМ») товщиною  $b$  в області найвищих температур, а саме на внутрішній поверхні оболонки порошкового дроту. Спосіб полягає в тому, що утворення наповнювача порошкового дроту відбувається з двох послідовно розташованих бункерів з дозаторами. Порошкова шихта наповнювача порошкового дроту, яка додається з першого бункера з дозатором, у своєму складі має суміш «графіт – оксид РЗМ», що дозволяє концентровано розмістити цю суміш на внутрішній поверхні оболонки, як частини компонентів шихти у необхідному співвідношенні, що забезпечує можливість утворення ефективного протікання необхідних металургійних



процесів. З другого бункеру з дозатором додається основна частина шихти наповнювача порошкового дроту, до складу якої входять легуючі елементи, газошлакоутворюючі мінерали, екзотермічна добавка, та інше.

Результати дослідження наплавленого металу, що проведені рентгеноспектральним методом на установці VRA-2, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Результати дослідження наплавленого металу.

Досліджений оксид РЗМ	Вміст оксиду в наповнювачі порошковому дроті, %		Вміст РЗМ в наплавленому металі, %	
	по варіанту 1	по варіанту 2	по 1 варіанту	по 2 варіанту
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,0	1,0	0,005	0,009
	1,7	1,7	0,01	0,017
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,0	1,0	0,004	0,01
	1,7	1,7	0,01	0,02
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,0	1,0	0,005	0,007
	1,7	1,7	0,0045	0,01

Для наплавлення виготовлялися порошкові дроти, що містять оксиди неодиму, диспрозію, іттрію у зазначених в таблиці 1 кількостях за двома варіантами. Крім суміші «графіт – оксид РЗМ» до складу порошкових дротів додавали в однаковій кількості фероманган, феросиліцій, феротитан, алюміній та залізний порошок, а також мінерали, що забезпечують газошлаковий захист рідкого металу. В першому випадку (варіант 1) порошкові дроти виготовлялися відомим способом [10], у другому випадку (варіант 2) за вказаним вище способом. Після виготовлення та прокалювання порошкових дротів виконували багатошарові наплавлення на пластини зі сталі ВСт3пс на режимах: зварювальний струм 270-280 А зворотної полярності та напруга на дузі 24-26 В. Вміст РЗМ визначали в передостанньому шарі п'ятишарового наплавлення. Кількість РЗМ у металі наплавленому порошковими дроти, виготовленими за першим варіантом, не перевищує 0,01% при вмісті оксиду РЗМ у порошковому дроті 1,5-1,7 %. На перехід РЗМ до наплавленого металу впливає вміст оксиду РЗМ у складі порошкового дроту. При вмісті оксиду РЗМ до 1,0-1,2 %, швидкість плавлення наповнювача та оболонки практично однакові. При збільшенні вмісту оксиду РЗМ до 1,7 % рівномірність плавлення порушується. Виступ наповнювача, що утворюється при цьому, досягнувши критичної величини, руйнується і потрапляє у зварювальну ванну. Не встигнувши прореагувати, через недостатню температуру і час протікання процесу відновлення, оксид РЗМ відтісняється конвективним і газодинамічним потоками в хвостову частину ванни і потрапляє в шлак або у вигляді включень в наплавлений метал. Чим більший вміст суміші «графіт – оксид РЗМ» в наповнювачі порошкового дроту, тим частіше відбувається руйнування частини наповнювача, що не встигла оплавилася, в результаті чого відбувається зниження ефективності використання оксиду РЗМ.

При наплавленні порошковим дротом, виготовленим за запропонованою технологією, вміст РЗМ в наплавленому металі досягає 0,02%. Збільшення кількості відновленого і перейшовшого в наплавлений

метал РЗМ пов'язане з виведенням суміші «графіт – оксид РЗМ» з центральної частини наповнювача порошкового дроту на внутрішню поверхню оболонки з найбільш сприятливим температурним режимом.

#### **Висновки та перспективи подальших досліджень.**

1. На ефективність використання оксиду РЗМ впливає місце розташування по перерізу дроту оксиду РЗМ та вуглецевмісного елементу. При зміщенні суміші «графіт – оксид РЗМ» до периферії перетину дроту змінюється вміст РЗМ в наплавленому металі з 0,005% до 0,020%, що підтверджує вплив температури на перебіг процесу відновлення.

2. На розрахункову товщину шару суміші оксиду РЗМ та графіту впливає діаметр порошкового дроту, а отже і ширина стрічки, що впливає на щільність струму на дузі та розмір електродної каплі.

3. Перспективним є дослідження впливу усунення відставання плавлення наповнювача від оболонки порошкового дроту за рахунок введення в наповнювач порошкового дроту екзотермічної добавки та виділення додаткового тепла внаслідок протікання екзотермічної реакції. Рівномірність плавлення наповнювача та оболонки дроту забезпечує хімічну однорідність наплавленого металу.

#### **СПИСОК ПОСИЛАНЬ**

1. *Металургія рідкісних металів : підручник / І. Ф. Червоний та ін. Харків : Друкарня Мадрид, 2019. 162 с.*

2. *Куцова В. З., Носко О. А., Ковзель М. А. Спеціальні сплави, РЗМ та благородні метали : навч. посіб. Дніпропетровськ : НМетАУ, 2007. 163 с.*

3. *Калін М. А., Бурцева О. І. Розробка присадних матеріалів для зварювання чавуну з кулевидним графітом. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2011. Vol. 3. No. 5. PP. 32–35.*

4. *Верховлюк А. М., Нарівський А. В., Могилатенко В. Г. Технології одержання металів та сплавів для ливарного виробництва: навч. посіб. / за ред. В.Л. Найдека. Київ : Вініченко, 2016. 224 с.*

5. *Способ изготовления порошковой проволоки: пат. 40076 Україна. Бюл. № 6.*

**Дубова А. Д.**, науковий керівник: д.т.н., професор Новіков Ф. В.  
(Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця,  
м. Харків, Україна)

## **РОЗВИТОК ДУАЛЬНОГО НАВЧАННЯ ЗДОБУВАЧІВ ОСВІТИ В УКРАЇНІ**

***Анотація:** Стаття присвячена дослідженню розвитку дуального навчання здобувачів освіти в Україні та перспективи подальшого впровадження. Дуальний вид навчання сприяє покращенню якості освіти та підготовці кваліфікованих фахівців для ринку праці. Студенти отримують практичні навички і досвід, роботодавець – здібного до праці фахівця. Таким чином здобувачі освіти мають вищі шанси влаштуватися за фахом. Упродовж років виконувалися дослідження з метою визначення змiну стану працевлаштування молоді на краще. Останні дослідження підкреслюють позитивний вплив на студентів, роботодавців та економіку загалом. Проте також були визначені основні складнощі у реалізації дуального навчання в закладах професійної освіти. Мета статті: розкрити умови дуальної освіти в закладах професійної освіти в Україні; охарактеризувати наслідки впровадження дуального навчання; вказати перспективи подальшого розвитку дуального навчання; Зазначити основні проблеми реалізації дуального навчання.*

***Abstract:** The article is devoted to the study of the development of dual training of education seekers in Ukraine and the prospects for its further implementation. The dual type of education contributes to the improvement of the quality of education and the preparation of qualified specialists for the labor market. Students get practical skills and experience, the employer - a capable specialist. In this way, students have higher chances of getting a job in their profession. Over the years, research has been carried out with the aim of determining the change in the state of employment of young people for the better. Recent research highlights the positive impact on students, employers and the economy as a whole. However, the main difficulties in the implementation of dual education in vocational education institutions were also identified. The purpose of the article: to reveal the conditions of dual education in vocational education institutions in Ukraine; characterize the consequences of the implementation of dual education; indicate the prospects for the further development of dual education; To indicate the main problems of the implementation of dual education.*

**Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами.** Дуальний вид навчання сприяє покращенню якості освіти та підготовці кваліфікованих фахівців для ринку праці. Студенти отримують практичні навички і досвід, роботодавець - здібного до праці фахівця. Таким чином здобувачі освіти мають вищі шанси влаштуватися за фахом.

Пріоритетними мають стати поняття професійних стандартів, дуальної системи професійно-технічної освіти, регіонального замовлення, компетентності, які визначають сталість профтехосвіти та її вплив на зайнятість. Позитивну роль має відіграти досвід Німеччини, зокрема, визначення професійного профілю обраної спеціальності. Українські й зарубіжні дослідники мають спільну позицію в тому, що підвищення якості

робочої сили стане головним пріоритетом у забезпеченні конкурентоздатності національної економіки.

В Україні потенціал робочої сили у професійному відношенні не відповідає запитам роботодавців і здебільше рівню міжнародних кваліфікаційних стандартів.

**Цілі статті та постановка задачі.** Стаття має в собі ціль охарактеризувати сучасний стан дуальної освіти в Україні та її реалізацію. Головні завдання статті:

- Розкрити умови дуальної освіти в закладах професійної освіти в Україні.
- Охарактеризувати наслідки впровадження дуального навчання.
- Вказати перспективи подальшого розвитку дуального навчання.
- Зазначити основні проблеми реалізації дуального навчання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** З 2018 року виконувалися дослідження з метою визначення змiну стану працевлаштування молоді на краще після офіційного впровадження дуального навчання. Останні дослідження підкреслюють позитивний вплив на студентів, роботодавців та економіку загалом:

- Покращення шансів на працевлаштування за фахом;
- Позитивний вплив на економіку, особливо вирішується питання працевлаштування молоді;
- Партнерство між навчальними закладами та підприємствами;
- Відповідь на попит молоді до праці.

Проте також були визначені основні складнощі у реалізації дуального навчання в закладах професійної освіти:

- Фінансові труднощі реалізації працевлаштування здобувачів освіти;
- Не всі підприємства готові взяти на себе відповідальність за працевлаштованого здобувача освіти;
- Неправильна реалізація програм дуального навчання;
- Обмежений доступ здобувачів освіти до працевлаштування на підприємства.

**Невирішені частини загальної проблеми.** Дуальна освіта це цілком новий спосіб навчання, який потребує час на його стабільну реалізацію.

- Потрібно вирішити як саме *забезпечити успішне дуальне навчання* в закладах професійної освіти.
  - Чи буде це впливати на якість освіти в закладах.
  - Як залучити підприємства до участі в програмах дуальної освіти, так щоб задовольнити потреби роботодавців.
  - Яким чином можна зробити дуальне навчання доступним для всіх здобувачів освіти.
  - І які заходи повинні бути прийняті для моніторингу процесу навчання та практики та оцінювання результатів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Дуальна форма здобуття професійної освіти – це спосіб навчання, за яким теоретичний матеріал здобувачі опановують в закладі з педагогом, а практичне навчання проходить на виробництві. Такий підхід суттєво відрізняється від «практичних відпрацювань», оскільки в його основі не тільки закріплення теорії на практиці, а саме навчання в умовах виробництва.

Батьківщиною дуальної освіти вважають Німеччину, яка запровадила навчання у пропорції «30% теорії, 70% – практики» ще в минулому сторіччі. Далі цей підхід запозичили в Європі, Канаді, Південній Кореї та Китаї.

У Німеччині щоб потрапити у вищу дуальну школу, абітурієнт має отримати закінчену середню або спеціалізовану середню освіту. Студентів відбирають на конкурсних засадах. Також кожен учень повинен знайти партнера серед підприємств, це головна умова.

У Вищій дуальній школі Гера-Айзенах навчання триває шість семестрів – три роки. Кожен семестр ділять на три місяці теорії і три – роботи на підприємстві. Хоча в інших закладах для отримання теоретичних знань студенту достатньо 1-2 дні на тиждень відвідувати виш, а також працювати самостійно. Решта підготовки – робота на підприємстві. В компанії студент має наставника. Впродовж трьох місяців він займається разом зі студентами проектами, які мають безпосередній зв'язок з підприємством. Але є і традиційні контрольні роботи та домашні завдання. Дуальна освіта закріплена на законодавчому рівні. Однак після завершення навчання випускник не зобов'язаний працювати в компанії, яка його вчила.

№ з/п	Підприємство	Кількість здобувачів, які навчалися за дуальною формою навчання у 2019-2020 н.р. на підприємстві
1	Державне підприємство «Антонов»	100
2	Регіональна філія «Придніпровська залізниця» АТ «Укрзалізниця»	68
3	ТОВ «Глобинський м'ясокомбінат»	20
4	ТОВ «АКБ сервіс»	16
5	ТОВ «ЕДС-Інжиніринг»	16
6	АТ «ФЕД»	15
7	ПАТ Шахтоуправління «Покровське»	13
8	ПАТ «ММК ім. ІЛЛІЧА»	11
9	ПрАТ «МК «АЗОВСТАЛЬ»	11
10	ТОВ НВП «ЗОРЯ»	10
11	АТ «Гідросила МЗТГ»	10

Таблиця 1. Підприємства-учасники пілотного проекту із впровадження дуального навчання в Україні з найбільшою кількістю здобувачів, які навчаються за дуальною освітою.

Підприємства-учасники пілотного проекту із впровадження ДФЗО в Україні з найбільшою кількістю здобувачів, які навчаються за ДФЗО

Джерело: [URL:https://www.researchgate.net/publication/360935716\\_ANALITICNIJ\\_ZVIT\\_DUMKI\\_ROBOTODAVCIV\\_PRO\\_DUALNU\\_OSVITU\\_ZA\\_REZULTATAMI\\_DOSLIDZENNA\\_OBIZNANOSTI\\_ROBOTODAVCIV\\_PRO\\_DUALNU\\_FORMU\\_ZDOBUTTA\\_OSVITI\\_TA\\_DOSVIDU\\_UCASTI\\_U\\_PILOTNOMU\\_PROEKTU\\_IZ\\_II\\_Z\\_APROVADZENNA\\_NA](https://www.researchgate.net/publication/360935716_ANALITICNIJ_ZVIT_DUMKI_ROBOTODAVCIV_PRO_DUALNU_OSVITU_ZA_REZULTATAMI_DOSLIDZENNA_OBIZNANOSTI_ROBOTODAVCIV_PRO_DUALNU_FORMU_ZDOBUTTA_OSVITI_TA_DOSVIDU_UCASTI_U_PILOTNOMU_PROEKTU_IZ_II_Z_APROVADZENNA_NA)

В Україні дуальне навчання пілотували впродовж 2015-2017 років. Тоді здійснювався експеримент з організації навчально-виробничого процесу з елементами дуальної форми навчання на базі Вищого професійного училища №33 м. Києва (професія «Кухар»), Вищого професійного художнього училища м. Львова (професія «Маляр»), Вищого професійного училища машинобудування м. Запоріжжя (професія «Токар»).

Як стверджує МОН, дуальна форма навчання має низку позитивних аспектів:

- організація співпраці політиків, бізнесу, соціальних партнерів;
- розробка законодавчого підґрунтя для визнання стандартів якості професійної освіти;
- навчання учнів під час трудової діяльності;
- залучення кваліфікованого персоналу з виробництва до педагогічної діяльності;
- здійснення інституційних досліджень та консультування;
- врахування конкретних запитів підприємств до змісту та якості професійної освіти.

**Перспективи подальших досліджень.** Перший випуск трьох експериментальних груп у 2015-2017 роках засвідчив позитивні результати впровадження елементів дуальної форми навчання: високий рівень працевлаштування – до 97%, підвищення якості професійної підготовки на 12-17%, додаткові фінансові надходження – до 50 тис. грн. у кожному закладі, зменшення витрат на комунальні послуги та витратні матеріали, більш стійка та взаємовигідна співпраця з роботодавцями.

Подальші дослідження дуального навчання:

- Дослідження можливості впровадження інноваційних підходів у програми дуального навчання в Україні за принципом 30% теорії, 70% практики.
- Дослідження ринку праці для розуміння, яких саме фахівців потребують роботодавці.
- Розвиток співпраці професійних навчальних закладів з підприємствами для забезпечення якісного навчання.

### **Висновок.**

Те, що дуальна форма навчання буде поширюватися і все більше ВНЗ звернуть на неї свою увагу, знайдуть підприємства-партнерів, з якими будуть готувати фахівців нового покоління – це факт. Війна змінила багато

чого в Україні, і ці зміни стосуються ринку праці та вимог роботодавців, які хочуть знання іноземних мов, вміння швидко навчатися та адаптуватися до нових умов, а також хочуть практичний досвід навіть у новачків.

Концепція дуальної форми здобуття освіти передбачає:

- модернізацію освітніх програм;
- підвищення якості підготовки фахівців;
- зближення освіти з вимогами ринку праці;
- посилення ролі та впливу роботодавців на освіту;
- підвищення мотивації до навчання серед учнів та студентів;
- ріст рівня зайнятості молоді;
- скорочення адаптаційного періоду випускників на роботі;
- підвищення конкурентоздатності працівників.

Дуальне навчання надає неперевершену перевагу для здобувачів освіти, одночасно навчатися та закріплювати лекційний матеріал практикою на виробництві, при цьому здобувачі також отримують заробітну плату.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Дуальна освіта: інституціональні особливості реалізації в Україні: кол. моногр./ В.М. Новіков, Ю.О. Каряїн, В.В. Черніченко / за наук. ред. д.е.н., проф. В. Новікова, д.е.н., проф. З. Сіройча, д.е.н., проф. Г. Собчука- Київ-Варшава, 2020. - 79 с.

2. ДУАЛЬНА ОСВІТА офіційний сайт МОН

URL:<https://mon.gov.ua/ua/osvita/profesijno-tehnicna-osvita/reforma-profesijnoi-osviti/derzhavno-privatne-partnerstvo-ta-dualna-osvita/dualna-osvita>

3. Ірина Андрейців, УП 2017р. «Що таке дуальна освіта і навіщо вона українцям»

URL:<https://web.archive.org/web/20180620074107/http://life.pravda.com.ua/society/2017/02/16/222630/>

4. М.І. Дрозач «Розвиток професійного навчання кадрів на виробництві в контексті зарубіжного досвіду» НДІ праці і зайнятості населення Міністерства праці та соціальної політики України і НАН України, Київ

URL:<http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/2465/Drozach.pdf?sequence=1>

5. Олексій Мірошніченко, президент Конфедерації роботодавців України. Дуальна освіта – красивий термін чи...?

URL: <https://osvita.ua/blogs/90240/>

6. "Методологічні підходи і організаційні особливості підготовки кваліфікованих робітників в умовах дуальної системи професійної освіти: досвід країн Євросоюзу та перші реалізації в Україні"

URL:["Методологічні підходи і організаційні особливості підготовки кваліфікованих робітників в умовах дуальної системи професійної освіти: досвід країн Євросоюзу та перші реалізації в Україні"](https://www.researchgate.net/publication/360935716_ANALITICNIJ_ZVIT_DUMKI_ROBOTODAVCIV_PRO_DUALNU_OSVITU_ZA_REZULTATAMI_DOSLIDZENNA_OBIZNANOSTI_ROBOTODAVCIV_PRO_DUALNU_FORMU_ZDOBUTTA_OSVITI_TA_DOSVIDU_UCASTI_U_PILOTNOMU_PROEKTU_IZ_II_ZAPROVAVDZENNA_NA)

7. Аналітичний звіт «думки роботодавців про дуальну освіту» за результатами дослідження обізнаності роботодавців про дуальну форму здобуття освіти та досвіду участі у пілотному проекті із її запровадження на рівні фахової передвищої та вищої освіти України / Ukrainian Employers' View on Dual Studies (1st year)  
URL:[https://www.researchgate.net/publication/360935716\\_ANALITICNIJ\\_ZVIT\\_DUMKI\\_ROBOTODAVCIV\\_PRO\\_DUALNU\\_OSVITU\\_ZA\\_REZULTATAMI\\_DOSLIDZENNA\\_OBIZNANOSTI\\_ROBOTODAVCIV\\_PRO\\_DUALNU\\_FORMU\\_ZDOBUTTA\\_OSVITI\\_TA\\_DOSVIDU\\_UCASTI\\_U\\_PILOTNOMU\\_PROEKTU\\_IZ\\_II\\_ZAPROVAVDZENNA\\_NA](https://www.researchgate.net/publication/360935716_ANALITICNIJ_ZVIT_DUMKI_ROBOTODAVCIV_PRO_DUALNU_OSVITU_ZA_REZULTATAMI_DOSLIDZENNA_OBIZNANOSTI_ROBOTODAVCIV_PRO_DUALNU_FORMU_ZDOBUTTA_OSVITI_TA_DOSVIDU_UCASTI_U_PILOTNOMU_PROEKTU_IZ_II_ZAPROVAVDZENNA_NA)

**Іваненко Р.О.** (Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз, м.Київ), **Волошко О.В.** (Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут” імені Ігоря Сікорського, м.Київ)

## МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ ВИРОБНИЧИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ

***Анотація:** Виконано аналіз методів моделювання і оптимізації виробничих технологічних систем, вибрано найбільш ефективні методи моделювання для дискретного виробництва, теоретично обґрунтовано і практично реалізовано математичні методи моделювання виробничих систем, доведено адекватність математичних моделей та оптимізаційних методів, а також вибрано раціональні методи оптимізації та створено програмне забезпечення, яке реалізовувало вибрані методи на практиці.*

***Abstract:** An analysis of methods of modeling and optimization of production technological systems was performed, the most effective modeling methods for discrete production were selected, mathematical methods of modeling production systems were theoretically justified and practically implemented, the adequacy of mathematical models and optimization methods was proven, and rational optimization methods were selected and software was created, which implemented the selected methods in practice.*

Необхідною задачею сучасного приладобудування є розробка системи торкання при надвисокій швидкодії інструмента до поверхні деталі при виготовленні високоточних деталей приладів. У зв'язку із цим необхідно вирішити наступні задачі, які дозволять здійснити підвищення точності та продуктивності верстатів із ЧПК обробних центрів. Це може бути зроблено на підставі порівняльного аналізу найбільш розповсюджених способів руху при торканні різальним лезом інструмента до поверхні деталі та визначення найбільш оптимальних варіантів з огляду на отримання якості формотворення прецизійної деталі. Недостатньо досліджені можливості сучасних методів імітаційного та математичного моделювання, а також відсутнє наукове обґрунтування вибору використовуваних в даний час методів розв'язання задач технологічної підготовки виробництва.

Тому, необхідно розробити теоретичні передумови отримання високої точності та продуктивності внаслідок використання інструмента в мережі зворотного зв'язку, а також створити узагальнені моделі процесу отримання точності виготовлення деталей у металообробці на обладнанні з ЧПК. Водночас, на підставі аналізу існуючих методів та пристроїв контролю стану зношеного металообробного обладнання можна створити схеми автоматизованих систем і пристроїв контролю стану виготовлення деталі, а також класифікувати критерії якості роботи технологічного металообробного обладнання та контрольно-вимірювальних систем, перспективною задачею є розроблення принципової схеми реалізації розширеної мережі зворотного зв'язку для отримання високої точності та



продуктивності. Отже, запропоновано комплексні заходи та рекомендації, що дозволяють провести модернізацію існуючого технологічного обладнання з обробки металу для досягнення більш високих параметрів точності виготовлення прецизійної продукції підприємств приладобудування. [1]

Проблему підвищення ефективності технологічних процесів обробки і поліпшення якості продукції найбільш успішно можна вирішити шляхом створення і впровадження методів і систем контролю якості виробничого обладнання. Водночас, важливою проблемою є подовження ресурсу високоточного обладнання для підвищення можливостей та економічної ефективності промислового виробництва. Реалізація таких методів і систем особливо важлива для приладобудування, де вимоги до високої точності кінцевого продукту в багатьох випадках отримують першорядне значення. [1-4]

Задача структурного моделювання та оптимізації полягає в тому, щоб дослідити математичний апарат, який би адекватно описував структуру виробничої системи і давав би можливість алгоритмізувати процедури розрахунку найважливіших параметрів цієї системи. Зазвичай при детальному розгляді, ця проблема розпадається на декілька підзадач:

а) проаналізувати роботу виробничого обладнання за різними структурами й дослідити особливості моделювання кожної із них;

б) вибрати методику моделювання роботи обладнання виробничої системи, яка б якнайбільш повно описувала параметри системи та дозволяла б отримати її адекватну модель;

в) вибрати метод оптимізації роботи обладнання, який би задовольняв заданим обмеженням та мав би по можливості якнайкращу збіжність.

При проектуванні технологічних процесів і роботи виробничого обладнання основний комплекс задач пов'язаний з вибором найкращого варіанта виробничої системи по сукупності техніко-економічних показників. Ці задачі мають кілька різновидів, яким відповідають три рівні оптимізації. Перший рівень оптимізації полягає в виборі найкращої технічної ідеї або принципу дії об'єкта, що проектується; другий – в пошуку найкращої структури або схеми в рамках обраного принципу дії; третій – у визначенні найкращих значень параметрів для обраної структури (схеми).

Це обумовлює необхідність створення методик обробки технологічної інформації шляхом використання багатовимірного статистичного аналізу з метою максимального врахування різнобічних параметрів та показників відповідної технологічної задачі проектування, а також обґрунтування доцільності використання сучасних методів імітаційного та математичного моделювання, методів параметричної й структурної оптимізації.

Систематизація задач технологічної підготовки приладо- та машинобудівного виробництва, обґрунтування вибору початкової інформації при розв'язанні задач, обґрунтування та вибір ефективних методів формалізації вказаних задач та методів їх розв'язання, в яких поєднувались би в комплексі всі етапи виготовлення приладів та їх

життєвого циклу є проблемою актуальною і своєчасною. Вирішення вказаної проблеми можливо лише на основі вивчення задач технологічної підготовки виробництва та вимог до їх розв'язання, а також дослідження сучасних методів обробки інформації, імітаційного та математичного моделювання й оптимізації параметрів та характеристик технологічних систем з широким використанням ефективних методів системного аналізу, розпізнавання образів, теорії множин, алгебри логіки, теорії графів, математичного програмування, проектування складних Інтелектуальних систем тощо. Поділ на три рівні є умовним, і суворої границі між ними провести неможливо. Доцільність такого розподілу викликана необхідністю розмежування більш простих від більш складних і трудомістких задач, які належать до різних етапів проектування технології й у той же час істотно відрізняються методами розв'язання. Задачі першого рівня характерні для етапів зовнішнього проектування й розв'язуються з використанням підходів та методів евристичного програмування. Сучасні системи автоматизованого проектування технологічних процесів орієнтовані на етапи внутрішнього проектування. У цьому випадку характерними є задачі другого й третього рівня, які відповідно називаються задачами структурної та параметричної оптимізації.

При розв'язанні даних задач, виробнича технологічна система - це система, метою якої є виготовлення певної кількості виробів за певний час, за допомогою чітко визначеної кількості обладнання. В даному випадку описується виробнича система у термінах теорії масового обслуговування. Система, що у зв'язку з можливими технічними, економічними й іншими застосуваннями, вважається структурною, на відміну від абстрактної системи, що є предметом дослідження загальної теорії систем. Елементом системи є довільний неподільний у даній задачі об'єкт. Неподільність елемента є умовною і викликана прагненням до спрощення задачі. При цьому цілком можливо, що при переході від однієї задачі до іншої буде потрібно розкладання одного елемента або навпаки, об'єднання декількох елементів в один. Об'єкт, який не розкладається в даній, але можливо буде розкладається в іншій задачі, є блоком.

Система є визначеною множиною блоків (елементів), об'єднаних деякою множиною зв'язків для реалізації загальної мети. У системах обслуговування цією метою є виконання заданої множини робіт. Кожна робота складається з деякої кількості різноманітних операцій, виконуваних відповідними блоками. Система в цілому забезпечує послідовне проходження кожної роботи через визначені блоки, сукупність операцій в яких і забезпечує виконання даної роботи. Вважаємо, що операція є найменшою, неподільною частиною роботи. У зв'язку з цим, при дослідженні систем масового обслуговування кількісні характеристики (параметри) операцій повинні бути задані. Ці параметри можна задати матрицею  $A = \|a_{ij}\|$ , де  $a_{ij}$  – кількісний ефект виконання  $i$ -ї операції в  $j$ -й роботі. Величини  $a_{ij}$  – можуть означати або витрати часу ресурсів, або доход тощо. Конкретний зміст цих величин впливає на формулювання задач

вивчення систем. Через параметри  $\square_{\square,\square}$  виражаються кількісні характеристики системи масового обслуговування в цілому.

Функціонування довільної системи є сукупністю правил, яка визначає, що повинна робити система для досягнення поставленої перед нею мети; ці правила не обов'язково використовують знання побудови системи. Відповідно до рівня абстракції, прийнятим при вивченні системи, її функціонування може описуватися докладними правилами. Так, функціонування систем масового обслуговування зазвичай описується на рівні структури системи. Під структурою довільної системи розуміємо сукупність множини блоків (елементів) і множини зв'язків між ними. Структура системи обслуговування зазвичай зображується орграфом, у якому вершини позначають блоки (елементи) системи, а дуги – напрямки руху робіт від блоку до блоку в процесі їх виконання. Для кількісної оцінки ступеня досягнення довільною системою поставленою перед нею мети вводять різні характеристики її функціонування. Кожна окрема характеристика оцінює якусь одну сторону функціонування системи, і лише всі разом вони дозволяють оцінити, наскільки система досягла поставлених цілей.

Вивчення будь-якої реальної системи проводиться на моделі, що представляє собою більш просту систему, ніж вихідна, зі збереженням її істотних рис. Моделі поділяються на фізичні й абстрактні. Останні в свою чергу поділяються на концептуальні і математичні. Концептуальні моделі характеризують лише причинно-наслідкові зв'язки, істотні для опису функціонування системи; при цьому залишаються осторонь кількісний і якісний аспекти зазначеного опису. Математична модель базується на концептуальній і характеризує функціонування системи з кількісної і якісної сторони.

Математична модель безпосередньо виробничої або технологічної системи описується таким чином. Є деяка множина виробів  $B$ , які необхідно виготовити, і деяка множина одиниць технологічного устаткування (верстатів)  $M$ , а також робітників для виготовлення цих виробів. Кожен виріб характеризується своїм технологічним маршрутом, тобто послідовністю проходження визначеної підмножини  $M$ , що приводить до одержання готового виробу. Система в даному випадку є сукупність множин  $B$  і  $M$ , а її мета – виготовлення усіх виробів з множини  $B$ . При цьому верстати є блоками системи, а різноманітні вироби – роботами, що підлягають виконанню в даній системі. Технологічний маршрут виробу є упорядкованою множиною операцій, з якої складається процес виготовлення цього виробу. Кожна операція виконується окремою верстатом (блоком). Ефект виконання операції вимірюється необхідним для цього часом, витратами тощо. Всі верстати зі зв'язками між ними утворюють структуру системи. Спрямований зв'язок між двома верстатами показує, що після виконання операції в одній з них може виконуватися операція в іншій. Функціонування системи полягає в прокладці маршрутів у її структурі, відповідно до заданих технологічних маршрутів окремих виробів, і погодженому проходженні за визначеними маршрутами всіх виробів до їхнього повного виготовлення.

Розвиток сучасних технологій обробки обумовлює необхідність подальшого вдосконалення конструкцій верстатних пристроїв з метою скорочення витрат часу, пов'язаних з їх переналагодженням при переході до обробки деталей іншого типорозміру. Проектування та вдосконалення конструкцій різального та допоміжного інструмента для забезпечення концентрації технологічних переходів дозволяє не тільки підвищити продуктивність верстатів, але й розширити їх технологічні можливості та зменшити собівартість обробки.

Аналіз технологічних процесів складання дозволив визначити основні задачі автоматизації проектування технології механоскладальних робіт та формалізації процесу проектування технології складання виробів. Виконаний аналіз інформаційних зв'язків та враховуючи особливості технології складання виробів приладобудування дозволив розробити основи класифікації та групування, створити алгоритм класифікації та інформаційну модель технологічних процесів механоскладальних робіт. Розроблені інформаційні моделі виробів приладобудування та технології їх складання дозволяють створити узагальнені маршрути складання приладів відповідної класифікаційної групи та представити алгоритм формування операцій складання конкретного приладу. Розв'язання задач класифікації та групування виробів приладобудування, побудови інформаційної моделі технологічного процесу складання дозволяють створити автоматизовану систему проектування технології механоскладальних робіт АСПТ МСР. Для цього розроблені структурна та функціональна схеми, інформаційне, математичне, програмне та методичне забезпечення автоматизованої системи. Перевагою створеної автоматизованої системи є те, що вона не потребує значних ресурсів ЕОМ, має інтуїтивний інтерфейс, тому з легкістю може бути опанована рядовим користувачем комп'ютера без спеціальної підготовки.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Вислоух С.П. Інформаційні технології в задачах технологічної підготовки приладо- та машинобудівного виробництва: Монографія / С.П. Вислоух. – К.: НТУУ „КПІ”, 2011. – 480 с.
2. Глоба О.В., Вислоух С.П., Іваненко Р.О. Комплексна оптимізація процесу фрезерування на верстатах з ЧПК. //РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ № 2(9), 2021, – С. 7-19. <https://doi.org/10.33082/td.2021.2-9.01>
3. Комп'ютерне моделювання процесів та систем. Чисельні методи : підручник / С. П. Вислоух, О. В. Волошко, Г. С. Тимчик, М. В. Філіппова. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2021. – 228 с.
4. Оптимізація механічної обробки тіл обертання : монографія / В. Є. Карпусь, О. В. Котляр, В. О. Іванов.; за ред. В. Є. Карпуся. –Харків : НТМТ, 2012. – 296 с.

**Кінденко М. І.** (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ-Тернопіль, Україна)

## **МЕХАНІЗМ ЗНОШУВАННЯ ТА ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ СВЕРДЛІЗ ШВИДКОРІЗАЛЬНОЇ СТАЛІ, ЗМІЦНЕНИХ МЕТОДОМ ОІМП**

***Анотація:** Надана робота присвячена дослідженню питань пов'язаних з підвищенням експлуатаційних властивостей інструментів з швидкорізальних сталей шляхом магнітно-імпульсної обробки. Кінематику зношування свердел зі швидкорізальної сталі Р6М5 досліджували під час свердління отворів в деталях з нержавіючої сталі Х18Н9Т. Досліджено вплив напруженості магнітного поля на коефіцієнт підвищення стійкості свердел. Встановлено що імпульсна магнітна обробка значно підвищує зносостійкість і ріжучі властивості швидкорізальних сталей. Ефективність магнітної обробки швидкорізальних сталей залежить від напруженості імпульсного магнітного поля. Для кожної марки швидкорізальної сталі існує оптимальна напруженість імпульсного магнітного поля, яка забезпечує найбільше збільшення зносостійкості швидкорізальної сталі після імпульсної магнітної обробки*

***Abstract:** The presented work is devoted to the study of issues related to improving the operational properties of tools made of high-speed steels by means of magnetic pulse processing. Kinematics of wear of drills made of high-speed steel P6M5 were studied during drilling of holes in parts made of stainless steel X18N9T. The effect of magnetic field strength on the coefficient of increase in stability of drills was studied. It was established that pulsed magnetic processing significantly increases the wear resistance and cutting properties of high-speed steels. The effectiveness of magnetic processing of high-speed steels depends on the intensity of the pulsed magnetic field. For each grade of high-speed steel, there is an optimal strength of the pulsed magnetic field, which provides the greatest increase in the wear resistance of high-speed steel after pulsed magnetic treatment*

Найбільш стабільно підвищують стійкість інструменту методи, пов'язані з обробкою самого матеріалу інструменту в постійних, змінних і імпульсних магнітних полях [1].

В цілому результат магнітної обробки розглядається як прояв ефектів післядії в матеріалах, що знаходяться на межах стабільності їх властивостей і піддаються впливу зовнішнього силового поля [2].

Разом з тим поки ще немає і єдиного, всебічно підтвердженого погляду на причини, що викликають зміну експлуатаційних властивостей ріжучого інструменту в результаті впливу імпульсного магнітного поля.

Метою роботи є на базі відомих теоретичних уявлень проаналізувати механізм зношування та працездатність інструменту із швидкорізальної сталі зміцненого методом ОІМП.

Збільшення стійкості магнітно-обробленого інструменту відбувається в результаті магнітострикційного зміцнення і магнітно-дисперсійного твердіння швидкорізальної сталі [3].

Працездатність інструментів зі швидкорізальної сталі досліджували при обробці отворів в нержавіючої сталі Х18Н9Т свердлами Р6М5. Для

експериментів відбирали свердла однакової твердості HRC 63, які поділяли на партії: одна з них складала контрольну групу, на іншій партії свердел була здійснена обробка в імпульсному магнітному полі при оптимальному співвідношенні параметрів процесу ОІМП.

Кінематику зношування свердел з Р6М5 досліджували під час свердління отворів в деталях з нержавіючої сталі Х18Н9Т.

Отримані дані свідчать про те, що свердла, оброблені в імпульсному магнітному полі уповільнює розвиток осередків зносу передньої і задньої поверхонь інструменту. Відзначено практично повна відсутність проточин і вусів зносу у країв контактних площадок інструменту, де найбільш сильно реалізуються хіміко-окислювальні види зносу.

Відсутність додаткових осередків зносу у країв контактних площадок свердла позитивно впливає на стійкість свердла, так як при цьому усуваються джерела інтенсивного тертя і тепловиділення.

Дослідження впливу напруженості магнітного поля на коефіцієнт підвищення стійкості  $K_T$  свердел Р6М5 проводилось у всьому діапазоні полів, створюваних установкою ОІМП-РК1. Як критерій затуплення приймався знос по задній грані  $h_3$ . У свердл  $h_3$  на відстані 0,5 мм від периферії свердла приймався 0,30 мм.

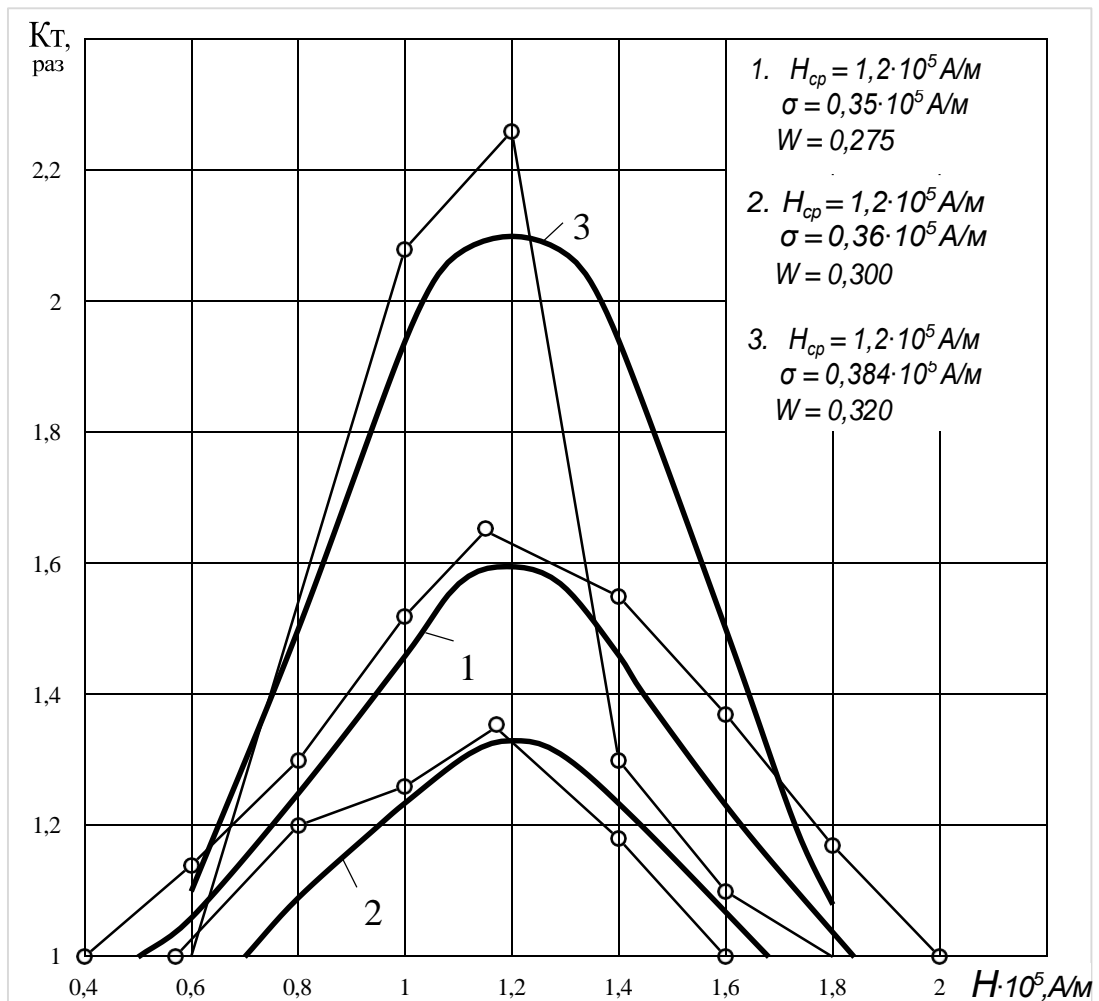
Залежність коефіцієнт підвищення стійкості свердел від напруженості магнітного поля  $K_T=f(H)$  будувалася на підставі закономірностей зносу по задній грані від часу роботи інструменту в початковому стані і після його магнітної обробки (рис. 1).

Напруженість поля при цьому змінювалася в діапазоні  $1,5 \cdot 10^4 - 1,7 \cdot 10^5$  А/м. Час витримки інструменту в обробній котушці для операції свердління було вибрано 1 хвилина.

Вплив магнітного поля напруженістю близько  $0,5 \cdot 10^5$  А/м не привело до підвищення стійкості свердла. Потім коефіцієнт підвищення стійкості почав рости пропорційно значенню напруги магнітного поля і досяг максимуму при  $H \approx 1,2 \cdot 10^5$  А/м. Подальше збільшення значень напруженості магнітного поля призвело до зниження коефіцієнта підвищення стійкості і при напруженості поля  $H \approx 1,75 \cdot 10^5$  А/м,  $K_T=1,0$ , тобто ефект підвищення стійкості дорівнює нулю.

Підвищення значень напруженості поля за  $1,75 \cdot 10^5$  А/м при дуже крутому передньому фронті імпульсу призводило до зниження стійкості інструменту в порівнянні з вихідним станом, а механізм зносу мав характерні ознаки крихкого сколювання. Подальше збільшення напруженості поля приводило до викришування інструменту під час роботи.

Для практичних розрахунків стійкості інструменту використовуємо емпіричні формули ступеневого вигляду. З цією метою при обробці узагальнюючих математичних залежностей для визначення стійкості свердел діаметром 6,2 мм зі швидкорізальної сталі Р6М5 використана методика математичного планування експериментів.



Сталь 12X18H10T. Свердло P6M5.  $S = 0,1$  мм/об  
 $1 - V = 8,8$  м/хв;  $2 - V = 6,3$  м/хв;  $3 - V = 4,5$  м/хв

Рис. 1 – Залежність коефіцієнта підвищення стійкості свердел із швидкорізальної сталі від напруженості магнітного поля

В якості досліджуваної функції або параметра оптимізації  $Y = f \cdot (X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot \dots \cdot X_k)$  вибрали стійкість інструменту, а в якості змінних факторів - режим різання свердлом  $X_1 = V$  м/хв.,  $X_2 = S$  мм/об. і робоча напруга соленоїда при зміцненні інструмента  $X_3 = U$  В.

Функцію  $Y$  апроксимували степеневим поліномом виду:

$$Y = b_0 + b_i \cdot x_i + b_{ii} \cdot x_i^2 + b_{i\ddot{u}} \cdot x_i^3 \quad (1)$$

де  $b_0, b_i, b_{ii}, b_{i\ddot{u}}$  – коефіцієнти регресії.

Для 3-х змінних рівняння (10) приймає вигляд:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (2)$$

Так як рівняння, за допомогою яких описується основна залежність процесу різання, носить статичний характер (логарифмічні функції), то при плануванні експерименту з метою отримання лінійних залежностей визначаємо логарифмічні значення змінних факторів.

$$X_i = \frac{\lg X_i - \lg X_{i\text{cp}}}{\lg X_{i\text{cp}} - \lg X_{i\text{min}}}, \quad (3)$$

де  $X_{i\text{cp}} = \frac{\lg X_{i\text{max}} - \lg X_{i\text{min}}}{2}$  (4)

Стосовно до даних дослідження, значення змінних факторів визначаються залежностями:

$$X_1 = \frac{2 \cdot (\lg V - \lg V_{\text{max}})}{\lg V_{\text{max}} - \lg V_{\text{min}}} + 1 \quad (5)$$

$$X_2 = \frac{2 \cdot (\lg S - \lg S_{\text{max}})}{\lg S_{\text{max}} - \lg S_{\text{min}}} + 1 \quad (6)$$

$$X_3 = \frac{2 \cdot (\lg U - \lg U_{\text{max}})}{\lg U_{\text{max}} - \lg U_{\text{min}}} + 1 \quad (7)$$

Розрахунок коефіцієнтів регресії проведений за формулою:

$$b_1 = \frac{\sum_{n=1}^N X_{1n} \cdot Y_n}{N}, \quad (8)$$

де  $X_{1n}$  – значення 1-го фактора в n-му досліді;

$Y_n$  – значення параметра оптимізації в тому ж досліді;

$N$  – число дослідів.

В таблиці 1 наведені результати дослідів.

Під дією магнітного поля інструмент зазнає своєрідний наклеп, зміцнюється. Магнітострикційний наклеп, на відміну від механічного, являє собою об'ємне зміцнення металу.

Імпульсна магнітна обробка значно підвищує зносостійкість і ріжучі властивості швидкорізальних сталей. Ефективність магнітної обробки швидкорізальних сталей залежить від напруженості імпульсного магнітного поля. Для кожної марки швидкорізальної сталі існує оптимальна



напруженість імпульсного магнітного поля, яка забезпечує найбільше збільшення зносостійкості швидкорізальної сталі після імпульсної магнітної обробки.

Однак, ефективність способу залежить від цілого ряду чинників, що відносяться як до умов впливу на інструмент і зону різання магнітним полем (характер магнітного поля, його напруженість і час витримки в індукторі), так і умов, в яких цей інструмент експлуатується (режими різання, магнітний стан інструменту, операції переточки тощо).

Існує оптимальна напруженість імпульсного магнітного поля, при якій відбувається максимальне збільшення твердості сталі.

В результаті магнітної обробки швидкорізальної сталі відбувається подрібнення і більш рівномірний розподіл карбідів.

Швидкорізальна сталь, як будь-яке тверде тіло, має внутрішнє пружне поле, обумовлене реальною дислокаційною структурою. З накладенням магнітного поля на матеріал на це власне пружне поле накладається пружне поле, викликане магнітострикційною деформацією.

Взаємодія пружного поля, обумовленого магнітострикцією сталі, з пружним полем її реальної дислокаційної структури призводить до появи локальних перенапруг. У цих місцях різко зростає ймовірність термофлуктуаційного розриву міжатомних напружених зв'язків.

У тих місцях, де ці локальні перенапруження перевищують межі пружності матеріалу, формуються осередки пластичної деформації. Саме тут можуть інтенсивно протікати процеси розмноження і переміщення дислокацій. Зі збільшенням щільності дислокацій, коли ліс дислокацій все більш ускладнює їх власний рух в інших площинах ковзання, сталь зазнає своєрідний наклеп, що в разі магнітної обробки виразилося в зміні параметра решітки мартенситу і зниженні температури зворотного мартенситного перетворення.

Це пояснюється тим, що під дією локальних напружень може відбуватися сегрегація домішкових атомів, і перш за все, атомів вуглецю на межах зерен і дислокаціях. Це призводить до зародження дискретних частинок фази карбіду, тобто виявляється своєрідна картина твердіння.

З положення о магнітострикційному зміцненні і магнітнодисперсійному твердінні швидкорізальної сталі випливає, що в результаті впливу на інструмент імпульсними магнітними полями відбуваються зміни структури матеріалу, що сприяють поліпшенню фізико-механічних властивостей.

Проведені експерименти дозволили встановити цілком певний діапазон значень напруженості магнітного поля, обробка в якому помітно покращує експлуатаційні властивості ріжучого інструменту зі швидкорізальної сталі.

Таблиця 1 – Результати експериментів по дослідженню залежності коефіцієнта підвищення стійкості свердел від напруженості магнітного поля  $K_T=f(H)$

№№ дослі да	H, А/м	Коефіцієнт підвищення стійкості $K_1$					$K_1$	n, кількість отворів	lgn	$\sum(K_1-K)^2$	$S_1^2$	$S_1$	$(K_1-K)$
		1	2	3	4	5							
1	$0,8 \times 10^5$	1,23	1,35	1,31	1,38	1,27	1,31	170	2,23	0,0145	0,00363	0,06028	0,03706
2	$0,8 \times 10^5$	1,47	1,35	1,41	1,38	1,44	1,41	240	2,38	0,0090	0,00225	0,04743	0,00856
3	$0,8 \times 10^5$	1,27	1,30	1,20	1,27	1,30	1,27	190	2,27	0,0067	0,00168	0,04093	0,05406
4	$0,8 \times 10^5$	1,50	1,17	1,17	1,33	1,50	1,33	40	1,60	0,1090	0,02725	0,16508	0,02976
5	$1,2 \times 10^5$	1,62	1,69	1,58	1,65	1,54	1,62	210	2,32	0,0545	0,01363	0,11673	0,01381
6	$1,2 \times 10^5$	1,85	1,88	1,82	1,91	1,94	1,88	320	2,50	0,0162	0,00405	0,06364	0,14251
7	$1,2 \times 10^5$	1,60	1,50	1,53	1,52	1,50	1,53	230	2,36	0,0067	0,00168	0,04093	0,00076
8	$1,2 \times 10^5$	1,67	1,50	1,67	1,83	1,67	1,67	50	1,70	0,0545	0,01363	0,11673	0,02806
							12,02				0,04400		0,31458

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

**Кітов О.А.**, науковий керівник: к.т.н., доцент Задорожня І. М. (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна)

## **ВДОСКОНАЛЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОКСОГАСИЛЬНОГО ВАГОНУ**

***Анотація:** В статті приділено увагу питанню комплексності механізації та автоматизації виробничих процесів, застосування засобів дистанційного та програмного керування в коксохімічному виробництві. Висвітлено проблему покращення показників якості регулювання та експлуатаційних характеристик виробничого обладнання, зокрема коксогасильного вагону. Обґрунтовано можливість вдосконалення експлуатаційних характеристик коксогасильного вагону завдяки заміні релейно-контакторної системи керування на систему частотного регулювання, що передбачає застосування перетворювача частоти, який вбудовується між мережею та двигуном. Враховуючи переваги частотного регулювання наголошено на доцільності застосування нової системи електроприводу, яка є енергозберігаючою, більш швидкодіючою та економічною.*

***Abstract:** The article focuses on the issue of the complexity of mechanization and automation of production processes, the use of remote and software control in coke production. The problem of improving the quality indicators of regulation and operational characteristics of production equipment, in particular the coke-extinguishing car, is highlighted. The possibility of improving the operational characteristics of the coke-extinguishing car due to the replacement of the relay-contactor control system with a frequency control system, which involves the use of a frequency converter, which is built in between the network and the engine, is substantiated. Taking into account the advantages of frequency regulation, the expediency of using a new electric drive system, which is energy-saving, faster and more economical, is emphasized.*

**Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами.** В промисловому комплексі України, зокрема Донеччини, значну роль відіграють підприємства металургійної та машинобудівної галузей, діяльність яких неможлива без коксохімічного виробництва, що передбачає використання значної кількості унікальних апаратів та машин для досягнення поставлених задач (коксова піч, обпалювальна машина, коксогасильні вагони). При цьому, продуктивність діяльності зазначених виробництв, а саме поліпшення якості коксу, організація виробництва нових хімічних продуктів коксування, значно залежить від комплексності механізації та автоматизації виробничих процесів, впровадження засобів дистанційного та програмного керування, інтенсифікації промислових процесів. Саме тому уваги вимагають питання покращення показників якості регулювання та експлуатаційних характеристик виробничого обладнання, зокрема коксогасильного вагону.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Питання особливостей організацій металургійного виробництва та обладнання, яке в ньому

використовується висвітлено в ряді літературних та електронних джерел. Враховуюче те, що головною складовою будь-якого обладнання є системи електроприводу, особливості їх функціонування та керування було висвітлено в роботах Бардачевського В., Борисюка М., Бойчука Б., Гаврилюка В., Задорожнього М., Задорожньої І., Зеленова А., Піцана Р., Поповича М. та ін. Проблемам автоматичного керування присвячено роботи Бешти О., Ковальчука О., Лукаса В., Лурье Б., Півняка Г., Поповича М., Фількіна М.

**Формулювання невирішених частин загальної проблеми.** Поряд з цим аналіз наукових доробок доводить необхідність більш детального вивчення питань ефективності коксохімічного виробництва засобами модернізації системи електроприводів, які є невід'ємною частиною майже всіх видів обладнання коксохімічної промисловості.

**Цілі статті та постановка задачі.** Саме тому стаття спрямована на висвітлення організації коксохімічного виробництва, зокрема аналіз альтернативних варіантів обладнання коксогасильного вагону, та передбачає вирішення наступної задачі – розкриття переваг системи частотного регулювання для забезпечення покращення показників якості регулювання та вдосконалення експлуатаційних характеристик коксогасильного вагону.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Коксогасильний вагон використовується на підприємствах галузі чорної металургії і належить до обладнання коксових цехів з мокрим способом гасіння коксу. До складових коксогасильного вагону належать: несуча рама, кузов, виконаний з похилого поду, затвори, торцеві та передні ферми, які змонтовані з можливістю поздовжнього переміщення і з'єднані між собою за допомогою вставок-амортизаторів.

Вивантаження коксу з печі у вагон відбувається при його поступальному русі вздовж коксової батареї з поступовим завантаженням проміжної ємності по всій довжині, при цьому шматки коксу падають у вагон з висоти від 2 до 7 метрів (залежно від їхнього розташування по висоті коксового пирога та розмірів камери коксування).

При попаданні великих шматків коксу на розсікач відбувається їх руйнування та гасіння кінетичної енергії. Траєкторія падіння шматків коксу відхиляється від вертикальної, внаслідок чого сила удару коксу об под, футерований плитами, зменшується. Завдяки розміщенню розсікача над центрами футерувальних плит (зон, найбільш схильних до руйнування), а просвітів між розсікачами над зонами кріплення плит до поду (зон найменш схильних до руйнування), досягається поліпшення ситового складу і міцності коксу, значне підвищення терміну служби футерувальних плит і всього вагона та забезпечується його експлуатація до зупинки на профілактичний та капітальний ремонт.

Після вивантаження коксу у вагон проводиться його тушіння. Система подачі води в кузов знизу через похилу підлогу виконана у вигляді трубопроводу надлишкового тиску, з'єднаного водоводами з поздовжніми рядами труб, які виготовлені з корозійностійкої сталі. Вода подається

переважно знизу і короткочасно затримується в кузові. Це забезпечує повне гасіння і сприяє кращому розтріскуванню шарів розпеченого коксу, покращує його якість і знижує вологість. Короткочасну затримку і швидкий злив технологічної води забезпечує герметичний зовнішній затвор, який повністю перекриває внутрішній гратчастий розвантажувальний затвор.

Комбінований спосіб гасіння коксу в коксогасильному вагоні передбачає створення загальної пароводяної ванни завдяки подачі технологічної води на розпечений кокс одночасно і зверху і знизу.

Більшість коксогасильних вагонів мають, релейно-контакторні системи керування (РКСК), що передбачає наявність логічних систем управління, побудованих на релейно-контакторній елементній базі та призначених для автоматизації роботи двигунів. За допомогою РКСК автоматизують такі операції:

- включення та відключення двигуна;
- вибір напрямку та швидкості обертання;
- пуск та гальмування двигуна;
- створення тимчасових пауз у русі; захисне відключення двигуна та зупинення механізму.

Дані операції необхідні для виконання руху робочого органу механізму за технологічними умовами. Безпосередній об'єкт управління для РКСК – це двигун, що живиться від мережі. Електропривод, виконаний на такій основі, є простим нерегульованим електроприводом, в основному загальнопромислового застосування (наприклад, електропривод кранів, тиххідних ліфтів, конвеєрів, компресорів, вентиляторів, насосів, деяких транспортних пристроїв тощо).

У складі РКСК можна виділити за функціональним призначенням дві частини: керуючу (формує алгоритм управління, що включає різні реле) і виконавчу, що безпосередньо впливає на двигун (контактори та магнітні пускачі). На рисунку 1 наведено виконання силової частини типового вузла пуску в три ступені, що реалізує принцип часу. Пускові резистори R1, R2, R3 якірного ланцюга двигуна постійного струму комутуються контакторами КМЗ-1, КМЗ-2, КМЗ-3. Електромагнітні реле часу постійного струму КТ1, КТ2, КТ3 створюють розраховані витримки часу для перемикання пускових резисторів, забезпечуючи підтримку постійним прискорення.

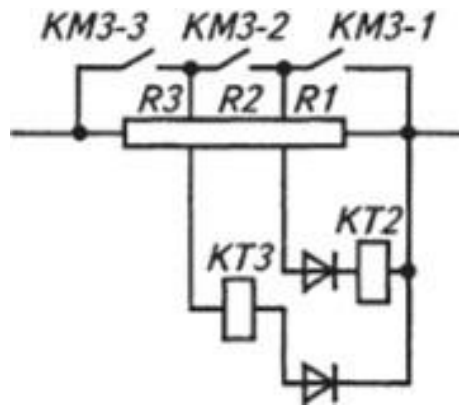


Рис. 1 – Схема силової частини вузла пуску за принципом часу

У схемі управління вузла пуску за принципом часу, яка зображена на рисунку 2 блок-контакти KM1 і KM2 замкнуті, забезпечуючи спрацьовування реле часу KT1, яке розмикає свій контакт в ланцюзі котушки магнітного пускача KM3-1, готуючи схему автоматичного пуску за принципом часу при спрацьовуванні з магнітних пускачів KM1 чи KM2.

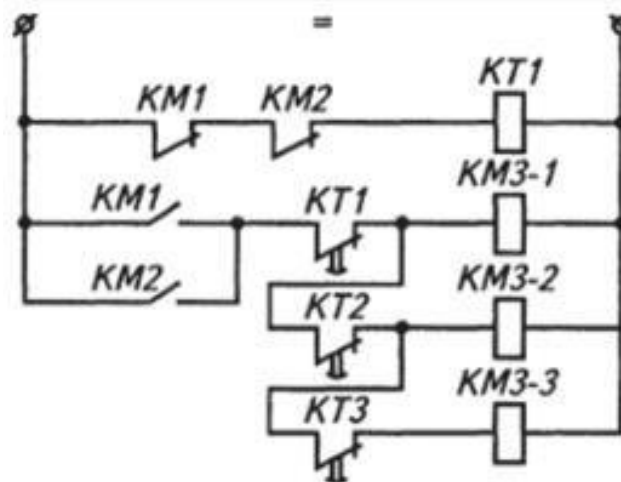


Рис. 2 – Схема ланцюгів керування вузла пуску за принципом часу

Переваги РКСК:

- наявність гальванічної розв'язки ланцюгів; значна комутаційна потужність; висока завадостійкість;
- можливість використання єдиного джерела живлення для силових та керуючих ланцюгів.

Поряд з цим, якщо розглядати кокосогасильний вагон з системою електроприводу, яка виконана на базі асинхронних двигунів з фазним ротором змінного струму 5АНК225М4 з системою рележно-контакторного регулювання швидкості, то можна стверджувати, що до недоліків РКСК належать:

- контактна комутація, що вимагає відповідного догляду за апаратурою та обмежує термін її служби;
- обмежена швидкодія;
- підвищені масогабаритні показники та енергоспоживання;
- досить габаритні розміри, що негативно позначається на пересуванні вагона і його роботі.

Вдосконалення експлуатаційних характеристик коксогасильного вагону, а саме покращення показників якості регулювання, можна досягти завдяки заміні релейно-контакторної системи керування на систему частотного регулювання, що передбачає застосування перетворювача частоти, який вбудовується між мережею та двигуном. Він перетворює незмінну напругу з постійною частотою в змінювану напругу зі змінюваною частотою. Таким чином, можна плавно змінювати швидкість обертання асинхронного двигуна. Звичайний двигун з однією обмоткою перетворюється на систему приводу із змінною частотою обертання.

Електропривод з частотним регулюванням це система управління частотою обертання асинхронного ротора (або синхронного) електродвигуна, яка складається з власне електродвигуна та частотного перетворювача.

Переваги застосування частотного регулювання:

- плавне регулювання швидкості обертання електродвигуна дозволяє в більшості випадків відмовитися від використання редукторів, варіаторів, дроселів та іншої регулюючої апаратури, що значно спрощує керувану механічну (технологічну) систему, підвищує її надійність і знижує експлуатаційні витрати;
- частотний пуск керованого двигуна забезпечує його плавний без підвищених пускових струмів та механічних ударів розгін, що знижує навантаження на двигун та пов'язані з ним передавальні механізми, збільшує термін їх експлуатації, при цьому з'являється можливість щодо умов пуску зниження потужності приводних двигунів навантажених механізмів;
- вбудований мікропроцесорний ПД-регулятор дозволяє реалізувати системи регулювання швидкості керованих двигунів та пов'язаних з ним технологічних процесів;
- застосування зворотного зв'язку системи з частотним перетворювачем забезпечує якісну підтримку швидкості двигуна або регульованого технологічного параметра при змінних навантаженнях та інших впливах збурення;
- перетворювачі частоти в комплекті з асинхронним електродвигуном можуть застосовуватися для заміни приводів постійного струму;
- перетворювач частоти в комплекті із програмованим мікропроцесорним контролером може застосовуватися для створення багатофункціональних систем керування електроприводами, у тому числі із резервуванням механічних агрегатів;



– застосування регульованого частотного електроприводу дозволяє зберігати електроенергію усуненням невиправданих її витрат, які мають місце при альтернативних методах регулювання з технологічних потоків дроселювання, за допомогою гідروмуфт та інших механічних регулюючих пристроїв.

У реальних прикладних задачах перетворювач частоти здебільшого керується зовнішніми сигналами. При цьому або викликаються збережені в пам'яті перетворювача жорстко задані значення, або перетворювач отримує задані значення ззовні в аналоговому вигляді. Команди запуску подаються, наприклад, від контролера або вручну за допомогою вимикача. Випробовуючи роботу перетворювача за допомогою зовнішніх сигналів, можна перевірити функціонування управляючих входів.

Підключений двигун можна запускати, зупиняти і регулювати за частотою обертання без використання зовнішніх сигналів керування, тільки з пульта.

Сутність модернізації коксогасильного вагону полягає в тому, що впроваджується нова система електроприводу та її керування на базі частотного перетворювача серії FR-F800 75 кВт 3-ф/380 (у комплекті є два асинхронні двигуна з короткозамкненим ротором змінного струму серії АИР280S8У2). Запропонована система електроприводу задовольняє всім вимогам до технологічного процесу.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Проектований (новий) електропривод у порівнянні з базовим має наступні переваги:

- двигун 5АНК225М4 не є енергозберігаючим;
- перетворювач FR-F800 75 кВт 3-ф/380 виконаний на базі нових елементів і має більшу надійність і більш високу швидкодію;
- забезпечує значну економію електроенергії;
- сприяє збільшенню ресурсу роботи кранових механізмів;
- продовжує термін експлуатації двигунів та забезпечує їх економічність;
- всі базові захисти електродвигуна реалізовані в середині перетворювача;
- можливе зменшення розряду виконуваних робіт;
- дозволяє зменшити витрати часу для здійснення основної операції на 0,03 год;
- зменшення витрат на ремонт, експлуатацію та обслуговування обладнання, що використовується з 452 до 348 (на 23%);
- мінімізація часу здійснення операції дозволить робочим отримувати преміальні надбавки (до 25%);
- вартість нового придбаного обладнання збільшиться на 23%, проте буде окуплено до встановленого нормативного терміну.

Таким чином, за результатами дослідження та техніко-економічного обґрунтування система електроприводу, що пропонується до впровадження

в коксогасильному вагоні, ефективніша за базову та рекомендується для реалізації робіт з модернізації обладнання коксохімічного виробництва.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. *Теорія електропривода : підручник / [М. Г. Попович, М. Г. Борисюк, В. А. Гаврилюк та ін.]; за ред. М. Г. Поповича. – Київ : Вища шк., 1993. – 494 с.*
2. *Піцан Р. Збірник задач до курсу «Електропривід»: навч. посібник / Р. Піцан, В. Бардачевський, Б. Бойчук. – Львів : Видавництво Державного університету «Львівська політехніка», 1999. – 426 с.*
3. *Задорожня І. М., Задорожній М. О. Оптимізація та взаємозв'язки параметрів двомасових електромеханічних систем [Електронний ресурс] : монографія – Електрон. текст. дані (4,5 Мб). – Краматорськ : ДДМА, 2021.*

**Кириченко А.М., Завгородній Б.М.** (Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна)

## **ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ 3D-ДРУКУ**

***Анотація:** 3D-друк залишається інноваційною технологією в сучасному світі виробництва. Проте, незважаючи на свій потенціал, він стикається з викликами, такими як оптимізація процесів друку. Ця стаття розглядає проблему оптимізації 3D-друку та висвітлює її важливість в контексті сучасного виробництва. Розглянуто складність динаміки процесу друку, чинники, що впливають на якість та продуктивність. Запропоновано метод оптимізації процесів друку використовуючи алгоритми штучного інтелекту.*

***Abstracts:** 3D printing remains an innovative technology in today's manufacturing world. However, despite its potential, it faces challenges such as optimizing printing processes. This article examines the problem of optimizing 3D printing and highlights its importance in the context of modern manufacturing. The complexity of the dynamics of the printing process, the factors affecting quality and productivity. A method of optimizing the of printing processes using artificial intelligence algorithms is proposed.*

### **Вступ**

**Постановка проблеми.** Започаткований на початку 1980-х років, процес 3D-друку став важливою складовою сучасних виробничих технологій, що швидко розвиваються. Проте разом із зростанням популярності цієї технології, зростає і складність оптимізації процесів, пов'язаних з нею. Оптимізація 3D-друку - це ключовий аспект, який визначає швидкість, ефективність та якість виробничого процесу. Але, існують численні проблеми, які перешкоджають досягненню оптимальних результатів у 3D-друці, так як 3D-друк – доволі складний та комплексний процес.

Застосування ШІ для оптимізації цих процесів є доволі вдалим рішенням, так як сучасні моделі ШІ можуть працювати з великим обсягом отримуваних даних і складними рівняннями доволі швидко та успішно, також ШІ може автоматизувати багато рутинних завдань, пов'язаних з розрахунками, прогнозуванням. Це може значно економити час та ресурси, а також зменшити ризик помилок.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Існуючі публікації за темою оптимізації процесів та явищ, пов'язаних з 3D-друком розглядають наступні теми: оптимізація конкретних вузлів принтера, таких як друкуюче сопло для підвищення якості продукції та оптимізації процесу друку [1]; зменшення шкідливого впливу процесу 3D-друку та продукції на навколишнє середовище, використовуючи алгоритми штучного інтелекту [2]; застосування алгоритмів ШІ для оптимізації параметрів 3D-друку на підготовчому рівні 3D-моделі [3]. Важливо зазначити, що

наведені статті є революційними та пропонують нові унікальні методи та підходи, проте в контексті оптимізації процесів 3D-друку розкривають проблему не повністю.

**Формулювання невизначених частин загальної проблеми.** Так, автори в своїх дослідженнях оптимальної форми друкуючого сопла [1] використовують методи оптимізації, не пов'язані з алгоритмами ШІ. Також, хоча друкуюче сопло 3D-принтера виконує ключову роль у формуванні друкованого виробу, в контексті процесу 3D-друку його роль значно зменшується і посувається такими параметрами, як кінематична структура принтера, його кінематичні та динамічні характеристики, вплив яких не розглядається дослідниками в процесі оптимізації.

Автори публікації [2] хоча і розглядають проблему оптимізації в контексті оптимізації ШІ, також вирішують доволі локальні проблеми, такі як вплив процесу друку на навколишнє середовище, які не розглядають вплив параметрів друку чи характеристик системи на процес друку. Дослідження оптимізації параметрів друку [3] пропонує алгоритми машинного навчання для покращення результатів друку та оптимізації процесів, проте оптимізація здійснюється на підготовчому рівні та ніяк не розглядається оптимізація конкретних вузлів чи конструкції принтера.

**Мета статті.** Ця стаття присвячена визначенню основних невирішених проблем, що виникають у процесі оптимізації 3D-друку, розгляду можливих варіантів оптимізації процесу друку шляхом оптимізації параметрів друку та системи 3D-принтера в цілому. Мета статті - проаналізувати ці проблеми, зрозуміти їх вплив на якість та продуктивність 3D-друку, а також надати рекомендації та запропонувати підходи щодо вирішення цих проблемних питань використовуючи алгоритми оптимізації ШІ.

### **Виклад основного матеріалу**

ШІ використовує методи оптимізації для розв'язання різноманітних завдань. Вони включають в себе оптимізацію функцій витрат, пошук оптимальних значень гіперпараметрів моделі, формулювання задач як задач оптимізації, оптимізацію використання обмежених ресурсів та прийняття рішень в умовах невизначеності. Ці методи допомагають моделям математичного ШІ досягати кращих результатів у вирішенні завдань, підвищуючи ефективність і точність їхньої роботи. Математично ШІ може використовувати різні методи оптимізації для вирахування оптимальної кінематичної структури 3D принтера. Ось деякі можливі кроки та підходи:

1. *Визначення функції витрат.* Спочатку потрібно визначити цільову функцію, яка містить критерії, що мають оптимізуватися. У контексті оптимізації кінематичної структури 3D принтера це може бути функція, яка визначає загальний час друку, точність позиціонування, витрати матеріалу тощо. Функція витрат визначається як:

$$J(\mathbf{x}), \quad (1)$$

де  $x$  – вектор параметрів для оптимізації.

2. *Представлення кінематичної структури.* Створення математичної моделі є ключовим етапом для застосування математичної оптимізації кінематики пристрою. Кінематична структура принтера включає всі рухомі елементи пристрою. Кожен з цих елементів може мати свої рухи і обмеження, які повинні бути враховані при оптимізації. Кінематичну структуру принтера можна представити у вигляді математичних моделей, таких як матриці трансформації або кінематичні ланцюги, які описують рух різних частин принтера.

*Матриці трансформації.* Кожен рухомий елемент принтера може бути описаний матрицею трансформації, яка визначає його положення та орієнтацію в просторі відносно певної системи координат. Наприклад, матриця трансформації  $T$  для певного рухомого елемента може мати вигляд:

$$T = \begin{bmatrix} R & \mathbf{d} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де  $R$  – матриця обертання;

$\mathbf{d}$  – вектор зсуву;

$\mathbf{0}$  – вектор-стовпчик нулів.

*Кінематичні ланцюги.* Це моделі, що описують взаємозв'язки між рухомими елементами принтера. Вони можуть бути використані для визначення можливих рухів кожного елемента в залежності від рухів інших елементів. Наприклад, кінематичний ланцюг для простого руху вздовж осі  $x$  може мати вигляд:

$$x = x_0 + d \cos(\theta), \quad (3)$$

де  $x_0$  – початкове положення;

$d$  – відстань руху;

$\theta$  – кут обертання.

Математична модель кінематичного ланцюга, що визначає положення друкуючої головки принтера відповідно до кутів обертання приводів:

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{bmatrix} = \mathbf{F}(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n), \quad (4)$$

Для тривісного принтера, який має три осі руху ( $X, Y, Z$ ), більш складна математична модель може включати динаміку руху в усіх трьох вимірах. Ось приклад більш складної математичної моделі, яка враховує динаміку та інерцію для такого принтера. Припустимо, що  $x, y, z$  – координати друкуючої головки в абсолютній системі координат;  $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$  – відповідні швидкості руху;  $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$  – кутові прискорення. Тоді математична модель може бути виражена у вигляді диференціальних рівнянь руху:

$$\begin{aligned}
 m_x \ddot{x} &= F_x - b_x \dot{x} \\
 m_y \ddot{y} &= F_y - b_y \dot{y}, \\
 m_z \ddot{z} &= F_z - b_z \dot{z}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

де  $m_x, m_y, m_z$  – маса екструдера вздовж кожної з осей;

$F_x, F_y, F_z$  – сили, що діють на екструдер по кожному напрямку (наприклад, сили від електродвигунів);

$b_x, b_y, b_z$  – коефіцієнт згасання (втрати) системи.

Ці рівняння можуть бути використані для прогнозування руху принтера в трьох вимірах відповідно до прикладених сил і врахування динаміки та інерції системи. Більш складні моделі можуть враховувати додаткові фактори, такі як взаємодія з матеріалом, гнучкість елементів структури та інші.

*Моделі взаємодії з оточенням.* Якщо принтер має взаємодіяти з оточенням (наприклад, з іншими пристроями або об'єктами), то ці взаємодії також можуть бути враховані у математичній моделі.

У кожному випадку математична модель допомагає точно описати рухи та залежності між різними елементами принтера, що робить можливим подальшу оптимізацію та керування пристроєм.

*3. Формалізація обмежень.* Необхідно визначити обмеження, які повинні враховуватися при оптимізації. Це можуть бути обмеження щодо розміру, маси, швидкості, динаміки руху тощо.

*4. Вибір алгоритму оптимізації.* Після визначення математичних моделей для кожного елемента та їх взаємозв'язків, можна переходити до подальшої оптимізації кінематичної структури, використовуючи алгоритми оптимізації. Для оптимізації розташування компонентів принтера ШІ може використовувати різні алгоритми, серед яких можна виділити наступні:

*Генетичні алгоритми.* Вони використовують принципи природного відбору, щоб знаходити оптимальні конфігурації, змінюючи та комбінуючи параметри різних рішень математичних моделей. Основні принципи генетичних алгоритмів були запропоновані в роботах Джона Холланда[4]. Генетичні алгоритми можуть бути використані для оптимізації кінематичної структури шляхом еволюції кращих рішень через кілька поколінь. У кожному поколінні генетичного алгоритму створюються нові комбінації кінематичних структур, які обчислюються за допомогою математичних моделей та оцінюються за допомогою цільової функції витрат. Після оцінки структур, вибираються кращі для створення нового покоління шляхом застосування операторів селекції, схрещування та мутації. Цей процес продовжується до досягнення оптимальних результатів.

Алгоритм здійснюється наступним чином:

1. Ініціалізація популяції – створення початкової популяції  $P_0$  варіантів.

2. Оцінка придатності – оцінка якості конкретного рішення  $x$  за допомогою функції придатності  $f(x)$ . Наприклад оцінка якості друку, за певними параметрами, такими як швидкість, точність або якість поверхні.

3. Селекція «батьків», де кращі рішення мають більше шансів на вибір для подальшого поліпшення. Ймовірність вибору кожного рішення  $x_i$  для схрещування визначається як:

$$P(x_i) = \frac{f(x_i)}{\sum_{j=1}^n f(x_j)}, \quad (6)$$

де  $n$  – кількість рішень у популяції.

4. Схрещування та мутація – комбінації різних методів друку або матеріалів для створення нових конфігурацій або випадкових змін у параметрах друку. Пари «батьків»  $(x_1, x_2)$  створюють нове рішення  $x'$  шляхом обміну параметрами:

$$x' = \text{crossover}(x_1, x_2), \quad (7)$$

Мутація – зміна деяких випадкових характеристик рішення  $x$ :

$$x' = \text{mutation}(x). \quad (8)$$

5. Відбір – найкращі рішення обираються для використання у наступних ітераціях оптимізації.

*Серед переваг можна відзначити:* можливість знаходження оптимальних рішень у складних комплексних просторах параметрів; здатність враховувати багато критеріїв оптимізації; можливість роботи з обмеженнями на параметри. *До недоліків можна віднести:* потребу у великій кількості ітерацій та обчислень; залежність від параметрів налаштування, таких як розмір популяції та ймовірність мутації; можливість опинитися в локальному мінімумі або максимумі.

*Метод градієнтного спуску.* Одним з класичних джерел є книга *Numerical Optimization* Хорхе Носедаля [5], де метод градієнтного спуску представлений в контексті оптимізації. Він використовується, щоб знайти найкраще рішення задачі, роблячи невеликі кроки в правильному напрямку. Метод градієнтного спуску використовує *градієнт функції витрат* для керування пошуку в напрямку найшвидшого спуску до мінімуму. Він може бути ефективним для оптимізації параметрів моделі, якщо функція витрат є гладкою та диференційованою.

Суть методу базується на основних принципах диференціального числення та оптимізації. Метод градієнтного спуску може бути використаний для локальної оптимізації розташування робочих органів 3D принтера, якщо функція витрат має добре визначений градієнт. Початкове розташування органів може бути вибране випадково, а потім, шляхом використання математичних моделей та їх похідних, ШІ шукає напрямок найшвидшого спаду функції витрат та оновлює параметри кінематичної структури в цьому напрямку для зменшення значення функції.

Гradient - це вектор часткових похідних функції цільового призначення, що використовується для крокування у напрямку, що зменшує значення функції, можна розглядати як нахил графіку функції якості друку в напрямку, що вказує на найшвидше зменшення якості друку.

Gradient функції витрат  $J$  в деякій точці  $x$  має наступний вигляд:

$$\nabla J(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial J}{\partial x_1} & \frac{\partial J}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial J}{\partial x_n} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

де  $\nabla$  – оператор gradientу;

$\frac{\partial J}{\partial x_i}$  – часткова похідна функції витрат  $J$  за  $i$ -м параметром  $x_i$ .

Після обчислення gradientу параметри друку можуть оновлюватися таким чином, щоб крокувати в напрямку покращення якості друку:

$$x_{n+1} = x_n - \alpha \nabla J(x_n), \quad (10)$$

де  $x_n$  - поточний вектор параметрів;

$\alpha$  - крок навчання;

$\nabla J(x_n)$  – gradient функції витрат в точці  $x_n$ .

*Переваги методу:* ефективність у випадку гладких та неперервних функцій; швидка збіжність до локального мінімуму або максимуму; простота реалізації та налаштування. *Як недоліки,* можна зазначити: непридатність для негладких або дискретних функцій; залежність від вибору початкового значення та кроку навчання.

*Метод імітації відпалу.* Був вперше запропонований Скоттом Кіркпатріком в контексті методів оптимізації [6]. Цей метод імітує поведінку системи у високих температурах, коли система може приймати нові стани з високою ймовірністю, і поступово охолоджується, стаючи більш "фіксованою" у більш оптимальному стані. Метод імітації відпалу може бути застосований для глобальної оптимізації кінематичної структури, роблячи випадкові зміни параметрів і шукаючи кращі рішення. Енергія – це функція цільового призначення  $J(x)$ , яка відображає якість поточного стану системи – якості друку або фізичної властивості виготовленого виробу. Прийняття нового стану – прийняття змін у параметрах друку у випадковому або експериментальному порядку, а потім оцінка впливу цих параметрів на якість друку або виробу. Ймовірність прийняття нового стану залежить від різниці між енергією поточного та нового стану, а також від температури системи. Алгоритм має наступний вигляд:

1. Випадковим чином змінюємо поточний стан з деякою ймовірністю  $P$ :

$$P(\Delta E, T) = \begin{cases} 1, & \text{if } \Delta E < 0 \\ e^{-\frac{\Delta E}{T}}, & \text{else,} \end{cases} \quad (11)$$

де  $\Delta E$  – зміна цільової функції;

$T$  – температура, що знижується з часом на певний крок  $\Delta T$ ;

$e$  – базове число експоненти.



2. Приймаємо новий стан  $x'$ , який залежить від різниці у цільовій функції між поточним і новим станом.

3. Повторюємо цей процес до досягнення умов зупинки.

*Переваги:* здатність уникнути застрягання в локальних мінімумах або максимумах; можливість використання для глобальної оптимізації; масштабованість для великих систем. *Недоліки:* не гарантує збіжності до глобального оптимуму; високі вимоги до обчислювальних ресурсів; не ефективні для негладких або дискретних функцій.

**5. Виконання оптимізації.** Застосування обраного алгоритму оптимізації для пошуку оптимальної кінематичної структури принтера, яка мінімізує цільову функцію витрат при врахуванні обмежень.

**6. Перевірка та аналіз результатів.** Після виконання оптимізації проводиться перевірка та аналіз отриманих результатів для впевненості в їхній придатності та відповідності вихідним вимогам.

### Висновок

Розглянутий підхід до оптимізації пропонує вирішення менш конкретних, глобальних аспектів, таких як оптимізацію кінематичної моделі 3D-принтера, або її окремих параметрів, використовуючи алгоритми оптимізації штучним інтелектом. Кожен з цих методів має свої переваги та обмеження, а їх вибір залежить від конкретних вимог задачі, складності системи та доступних обчислювальних ресурсів. Усі описані алгоритми використовують математичні моделі для вирішення задач оптимізації з різних точок зору: генетичний алгоритм - для глобальної оптимізації, метод градієнтного спуску - для локальної оптимізації, а метод імітації відпалу - для пошуку глобальних мінімумів у нестабільних функціях. Використання штучного інтелекту для оптимізації дозволяє швидко та ефективно знаходити оптимальні рішення в складних просторах параметрів. Подальші дослідження за цією темою можуть включати розгляд оптимізації конструкції 3D-принтера за допомогою ШІ для більш конкретних та вузьких критеріїв, наприклад для оптимізації жорсткості конструкції шляхом дослідження частот динамічної системи 3D-принтера для оптимізації частотних резонансів динамічної системи.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. T. Schuller, M. Jalaal, P. Fanzio. *Optimal shape design of printing nozzles for extrusion-based additive manufacturing*. URL: <https://arxiv.org/html/2401.02298v1>
2. I. Rojek, D. Mikołajewski, M. Macko, Z. Szczepański, E. Dostatni. *Optimization of Extrusion-Based 3D-Printing Process Using Neural Networks for Sustainable Development*. *Materials*, 2021, Volume 14, 273.
3. Phuong Dong Nguyen, Thanh Q. Nguyen, Q. B. Tao, Frank Vogel & H. NguyenXuan. *A data-driven machine learning approach for the 3D-printing process optimization*. *Virtual and Physical Prototyping*, 2022, Volume 17, (Issue 4).
4. J. Holland. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, second edition, 1992.
5. Jorge Nocedal, Stephen J. Wright. *Numerical Optimization*. New York, NY, 1999.
6. S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, Jr., M. P. Vecchi. *Optimization by Simulated Annealing*. *Science*, 13 May 1983, Volume 220, Number 4598.

**Косарєв В.С., Хмарський Д.П.** (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ-Тернопіль, Україна)

## АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПОРОЖНИСТИХ ДЕТАЛЕЙ В ПРОЦЕСІ КОМБІНОВАНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ

**Анотація:** Метою даної роботи є дослідження технологічних режимів у процесі холодного штампування для деталі «Втулка». Основними завданнями дослідження є визначення оптимальних параметрів штампування, а також розробка рекомендацій щодо покращення процесу виготовлення деталі з метою підвищення ефективності та якості продукції. Дослідження буде проведене у програмі QForm 2D. Отримані в ході дослідження результати будуть використані для вдосконалення технологічного процесу штампування та підвищення якості виробництва.

**Abstract:** The aim of this paper is to study the technological modes in the process of cold stamping for the "Bushing" part. The main objectives of the study are to determine the optimal stamping parameters and to develop recommendations for improving the manufacturing process of the part in order to increase efficiency and product quality. The study will be conducted in the QForm 2D software. The results obtained in the course of the study will be used to improve the stamping process and increase production quality.

Видавлювання порожнистих деталей у холодному об'ємному штампуванні є важливою технологією в сучасній виробничій промисловості. Цей процес дозволяє отримати складні вироби зі зниженою вагою та збереженням високої міцності.

Нестача матеріалів, зростання вимог до легкості та міцності конструкцій, а також потреба в енергоефективних výroбах стимулюють розвиток нових технологій видавлювання порожнистих деталей.

Оскільки використання порожнистої структури дозволяє знизити масу виробу, зберігаючи його стійкість та функціональні характеристики, особливого значення набувають перспективні способи видавлювання порожнистих деталей відповідального призначення.

Процеси холодного деформування характеризуються високими питомими і повними зусиллями на інструмент, що знижують його стійкість і стабільність процесу [1,2,3]. Способи деформування, що спрямовані для зниження цих обмежень, передбачають створення більш сприятливих для силового режиму різнойменних схем напружено-деформованого стану, зменшення площі контакту активного деформуючого інструменту із заготовкою, зниження навантажень на інструмент за рахунок забезпечення більшого ступеня свободи витікання металу або розвиненої радіальної течії (роздачі металу) [3]. Комбінування схем поздовжнього і радіального видавлювання може бути методом створення більш складних способів деформування, які можуть дозволити виготовити за одну операцію порожнисті і суцільні деталі з фланцями або відростками, або більш

складних просторових конфігурацій [4]. При цьому в залежності від типорозміру виробів і мети суміщення простих схем деформування можливе застосування того чи іншого поєднання простих схем видавлювання.

Одним з перспективних способів видавлювання порожнистих деталей є технологія гідроформування. Цей процес базується на застосуванні високого тиску гідравлічного середовища для формування деталі в спеціальних матрицях. Гідроформування дозволяє отримувати складні геометрії та високу точність деталей, забезпечуючи високу якість та продуктивність виробництва.

У результаті застосування перспективних способів видавлювання порожнистих деталей досягається значне зниження ваги виробів, покращення енергоефективності та збереження високої міцності. Ці технології використовуються в автомобільній, авіаційній, машинобудівній та інших галузях промисловості, де вимагаються високі стандарти безпеки, якості та ефективності.

У підсумку, перспективні способи видавлювання порожнистих деталей відповідального призначення відіграють важливу роль у сучасній промисловості. Вони дозволяють отримати вироби з оптимальним поєднанням легкості, міцності та функціональності, що сприяє розвитку енергоефективних та стійких конструкцій. Подальший розвиток та вдосконалення цих технологій має великий потенціал для сучасного виробництва та сприятиме досягненню нових вершин у виготовленні порожнистих деталей.

Метою даної роботи є дослідження технологічних режимів у процесі холодного штампування для деталі «Втулка». Основними завданнями дослідження є визначення оптимальних параметрів штампування, а також розробка рекомендацій щодо покращення процесу виготовлення деталі з метою підвищення ефективності та якості продукції. Дослідження було проведене у програмі QForm 2D. Отримані в ході дослідження результати будуть використані для вдосконалення технологічного процесу штампування та підвищення якості виробництва

На рисунку 1. представлено: заготовка (а), ескіз деталі (б) та отримана деталь «Втулка» (в) в процесі комбінованого видавлювання

Для отримання деталі "Втулка" був використаний матеріал АМцМ (алюмінієвий сплав), який відзначається своєю високою міцністю та зносостійкістю. Розрахунки геометричних параметрів деталі були проведені з використанням програмного забезпечення QForm 2D, яке базується на методі скінченних елементів.

Процес отримання деталі включав три послідовні переходи, кожен з яких впливав на її геометрію та характеристики, де перший перехід – пряме видавлювання, другий перехід – радіальне видавлювання та третій перехід – зворотне видавлювання.

На рисунках 2 – 4 представлені результати моделювання процесу.

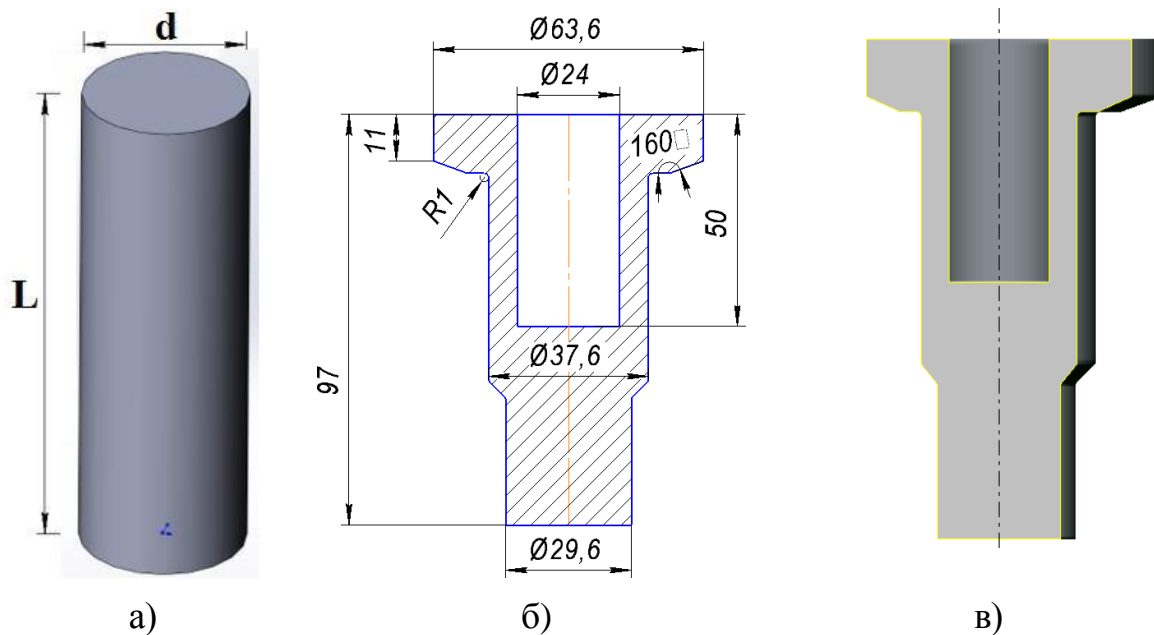


Рис. 1 – Заготовка (а), ескіз деталі (б) та отримана деталь «Втулка» (в) в процесі комбінованого видавлювання

На рисунках 2 – 4 для переходів представлено викривлення діляльної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій  $\varepsilon_i$  (б) та розподіл інтенсивності напружень  $\sigma_i$ , МПа. [5].

У першому переході (рис. 2), був використаний початковий пруток зі розмірами  $L=93$  мм та  $d=37,6$  мм, де  $L$  – висота заготовки, і  $d$  – діаметр заготовки. Для того щоб отримати деталь, було застосовано пряме видавлювання. Цей процес включав деформацію матеріалу, внаслідок якої відбулась релаксація напружень та перерозподіл маси. У даному переході максимальне інтенсивності деформацій було 1,5 і максимальне інтенсивності напружень було 200 МПа на останньому етапі.

У другому переході (рис. 3), була застосована операція підсадження, що полягала у забезпеченні необхідних геометричних розмірів та підвищення міцності. Операція підсадження спричинила інтенсивну деформацію та зміну геометрії деталі, що вплинуло на її фізико-механічні характеристики. У даному переході максимальне інтенсивності деформацій було 3,0 і максимальне інтенсивності напружень було 210 МПа на останньому етапі.

У третьому переході (рис. 4), застосовувалась технологія зворотного видавлювання з метою формування стаканоподібної структури з фланцем. Цей процес спричинив остаточну деформацію матеріалу та забезпечив відповідність до заданих параметрів, результуючих в кінцевих розмірах деталі (рис 1 – в). У даному переході максимальне інтенсивності деформацій було 4,5 і максимальне інтенсивності напружень було 235 МПа на останньому етапі.

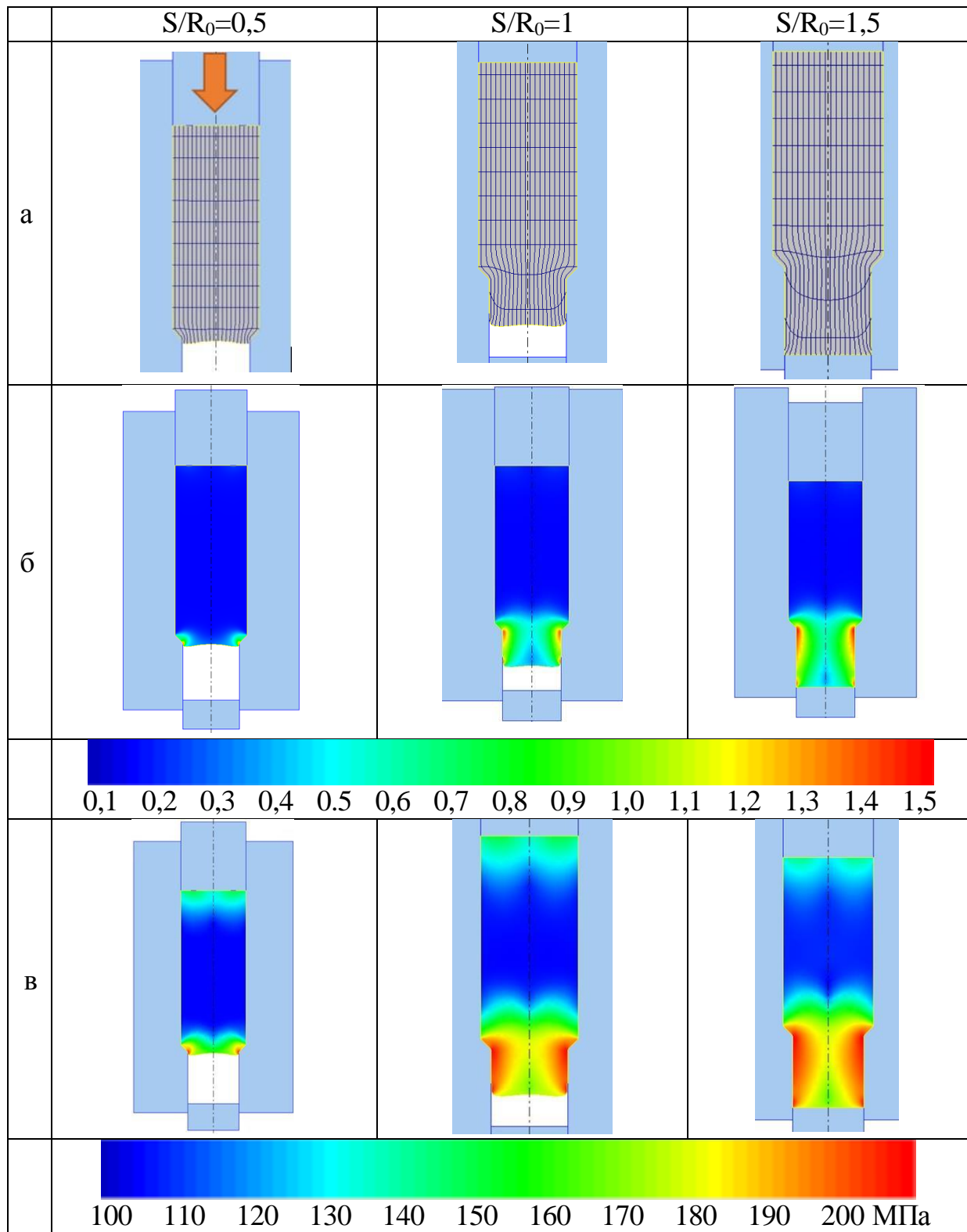


Рис. 2 – Перший перехід: пряме видавлювання. Викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій  $\varepsilon_i$  (б), розподіл інтенсивності напружень  $\sigma_i$ , МПа (в),  $S$  – хід пуансона,  $R_0=d/2$

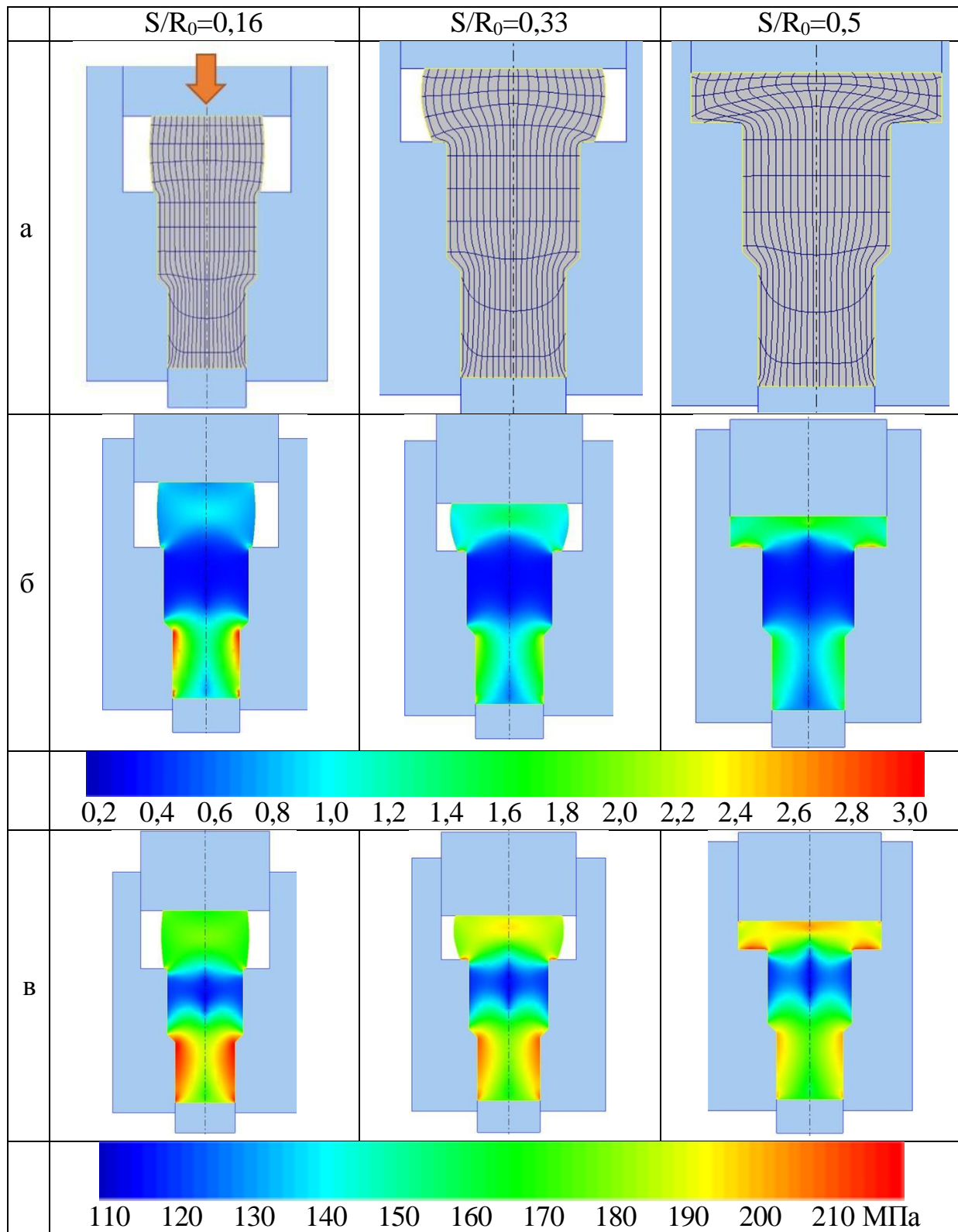


Рис. 3 – Другий перехід: радіальне видавлювання (операція підсадження).  
 Викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій  $\epsilon_i$  (б),  
 розподіл інтенсивності напружень  $\sigma_i$ , МПа (в),  
 $S$  – хід пуансона,  $R_0=d/2$

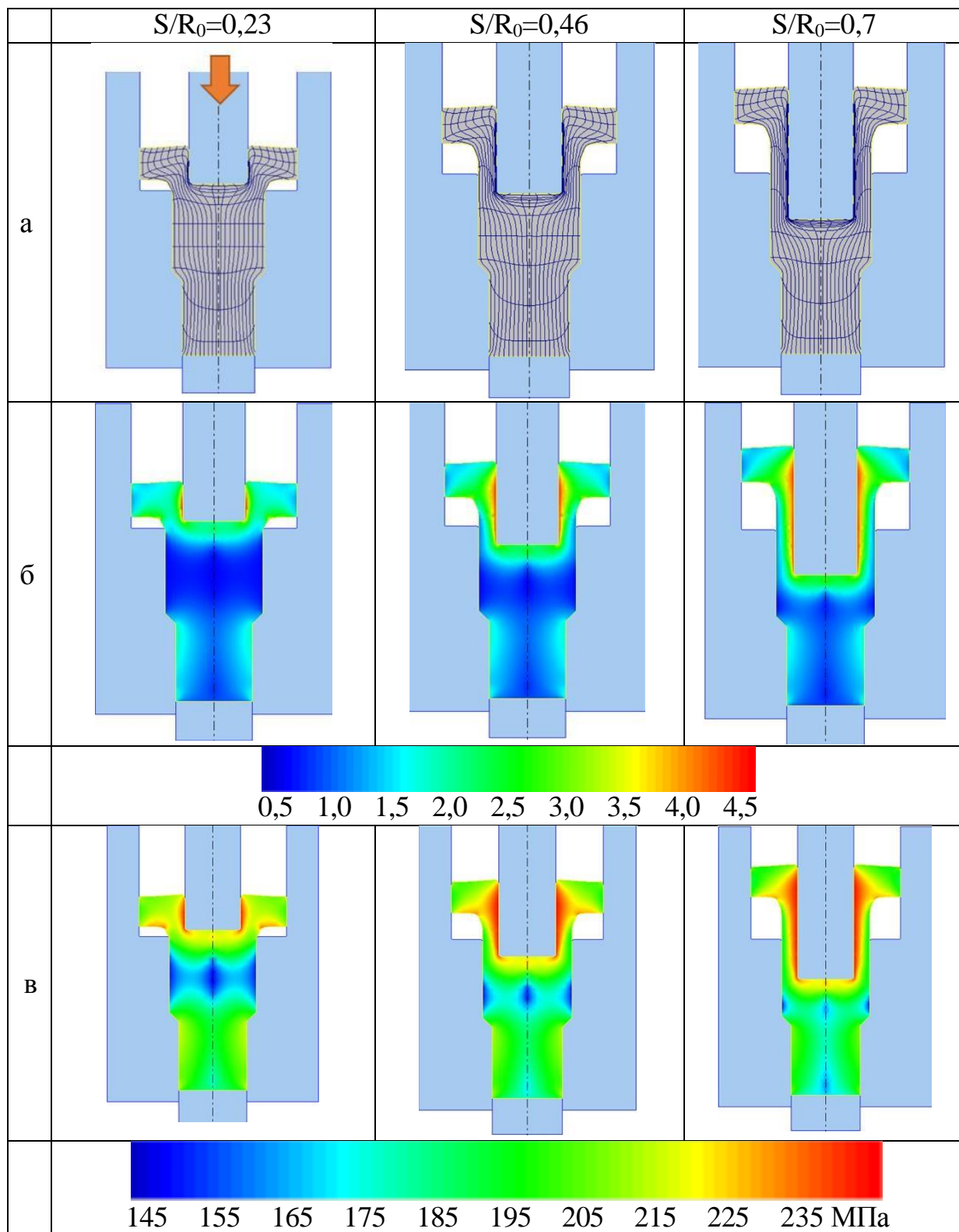


Рис. 4 – Третій перехід: зворотне видавлювання. Викривлення ділальної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій  $\varepsilon_i$  (б), розподіл інтенсивності напружень  $\sigma_i$ , МПа (в),  $S$  – хід пуансона,  $R_0=d/2$

## ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження технологічних режимів у процесі холодного штампування для деталі «Втулка» в програмі QForm 2D дозволило встановити оптимальні параметри штампування, а також розробити рекомендації щодо покращення процесу їх виготовлення. Ці результати можуть бути використані в практичній діяльності для підвищення якості та ефективності виробництва деталей «Втулка».

Згідно з аналізом рисунка 4, можна спостерігати, що найбільша інтенсивність деформації зосереджена в області біля пуансона і має значення  $\varepsilon_i = 4,5$ . Додатково показано розподіл інтенсивності напружень на цьому рисунку, де максимальне значення становить  $\sigma_i = 235$  МПа.

Цей результат свідчить про те, що в області біля пуансона відбувається значна деформація матеріалу. Розподіл інтенсивності напружень також показує, що в цій області матеріал витримує великі навантаження, оскільки максимальне значення напружень досягає 235 МПа.

Ці дані є важливими для розуміння поведінки матеріалу поблизу пуансона та оцінки його механічних характеристик. Дослідження деформації та напружень у таких критичних областях допомагає в проектуванні та вдосконаленні структур та компонентів, забезпечуючи їх надійність та ефективність.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Aliieva L. *Technological possibilities of combined radial – longitudinal extrusion process* / Leila Aliieva, Cristina Goncharuk // XVIII International scientific conference *New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering*. – Series : Monographs. – № 68. – Czestochowa, 2017. – P. 102–107.

2. *Видавлювання з роздачею порожнистих деталей з фланцем* / Алієва Л.І., Чучин О.В., Картамишев Д.О., Косарев В.С. // *Університетська наука–2019: тези доп. міжнар. науково–техн. конф. (Маріуполь, 16–17 травня 2019р.)* Т.1: ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь: ПДТУ, 2019. – С. 64–65.



**Кривошея В.Р.**, науковий керівник: д.т.н., професор Кузнєцов Ю.М.  
(Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна)

## СПОСОБИ ВІДРІЗАННЯ ТРУБ ЗСЕРЕДИНИ І ЗЗОВНІ

***Анотація:** В роботі представлені результати дослідження різноманітних методів та пристроїв для відрізання труб, як ззовні, так і зсередини. Робота охоплює широкий спектр методів від класичних, включаючи використання різців і фрез, до сучасних технологій з використанням лазерів і ультразвуку. Особлива увага приділена фізико-хімічним методам розрізки та методам, що базуються на пластичному деформуванні. Розглянуто плюси та мінуси кожного методу, їх застосовність у різних умовах, а також ефективність і безпеку при відрізанні труб різного розміру та з різних матеріалів. Результати дослідження сприяють підвищенню якості та надійності виробничих процесів у машинобудуванні та суміжних галузях.*

***Abstract:** The work presents the results of the research of various methods and devices for cutting pipes, both from the outside and from the inside. The work covers a wide range of methods from classic, including the use of cutters and cutters, to modern technologies using lasers and ultrasound. Special attention is paid to physico-chemical methods of cutting and methods based on plastic deformation. The pros and cons of each method, their applicability in different conditions, as well as efficiency and safety when cutting pipes of different sizes and materials are considered. The results of the research contribute to the improvement of the quality and reliability of production processes in mechanical engineering and related industries.*

Відрізання труб є одним із найнеобхідніших етапів у багатьох галузях машинобудування та інших галузях, таких як нафтова, газова і т.п. Цей процес вимагає точності, ефективності та безпеки, оскільки правильно відрізані труби є ключовим елементом надійного функціонування будь-якого вузла механізму або системи трубопроводів.

Проблема полягає у пошуку ефективних методів для відрізання труб як зсередини, так і ззовні. Це включає в себе дослідження технологій, інструментів та процесів, які дозволять точно, швидко і безпечно відрізати труби різних розмірів і з різних матеріалів, забезпечуючи збереження їхньої цілісності та якості.

Дослідження включає огляд та аналіз існуючих методів відрізання труб. Це включає в себе класичні методи, такі як використання різальних інструментів, таких як різці і фрези, а також сучасні технології, такі як використання лазерів і ультразвуку.

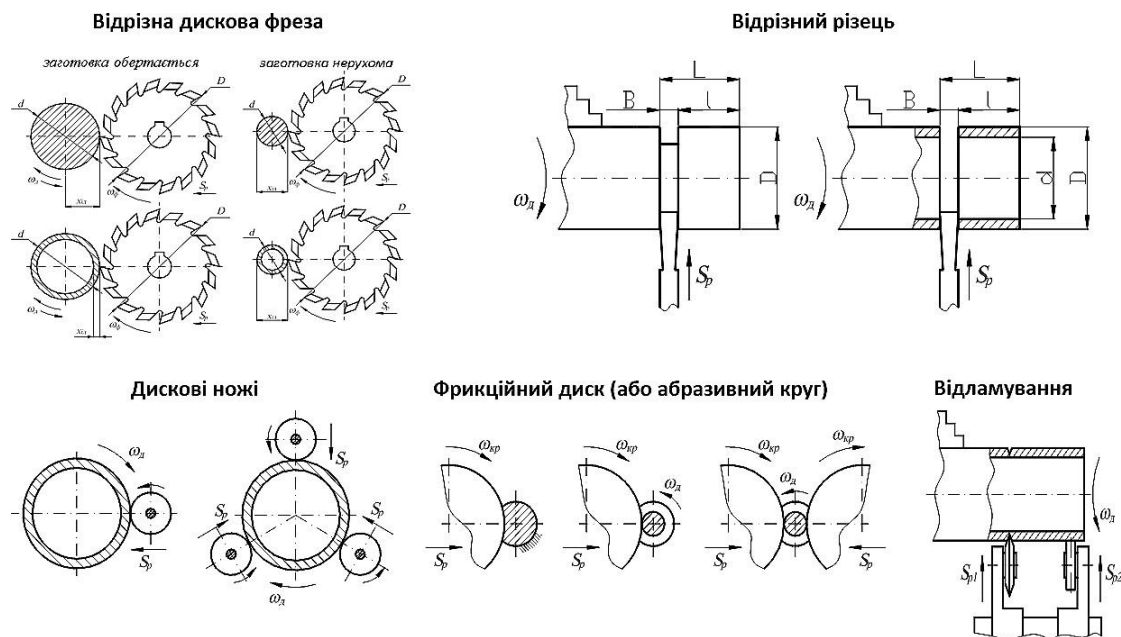


Рис.1 Способи порізки прутково-трубних заготовок класичними методами в металообробці



Рис.2 Відрізання з використанням лазерних технологій

У світовій практиці крім загальноприйнятих методів розрізки (відрізним різцем, дисковою фрезою, стрічковими пилами, абразивними кругами та ін.) дуже широко використовуються фізико-хімічні методи (електроіскровий, електроконтактний, газовий, анодно-механічний, плазмовий, ультразвуковий, водяним струменем, направленим вибухом тощо) та розрізка пластичним деформуванням (клиновими дисковими, плоскими ножами та ін.). Кожен із цих методів має свої сильні та слабкі сторони та певні обмеження у застосуванні [3,4].

Що до відрізання на одношпindelних і багатошпindelних токарних автоматів - найпоширенішим є метод відрізання різцем [2], але в останній час є альтернативою метод відрізання тонкостінною дисковою фрезою, що має свій привод обертання. Причому відрізання може здійснюватися зсередини чи ззовні, що відповідає різним схемам різання [1,5-7].

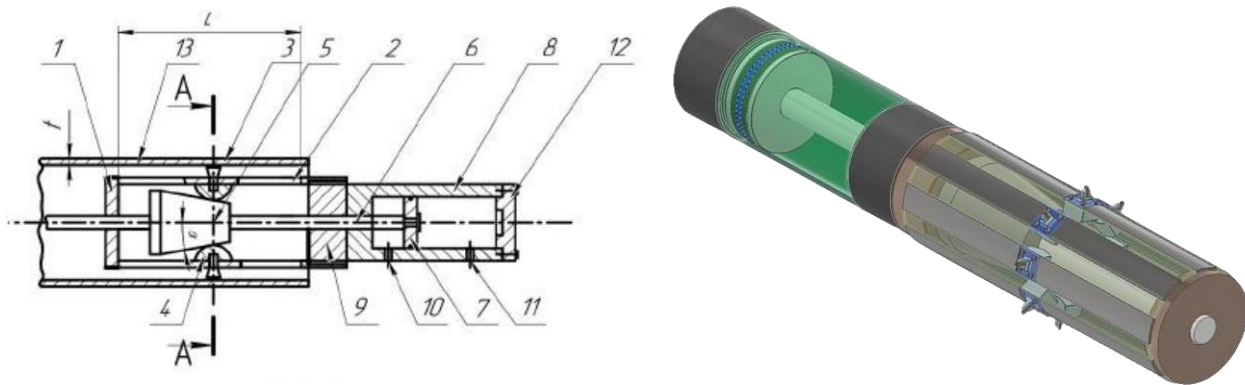


Рис.3 Використання відрізних пристроїв

Кожен з цих методів має свої переваги і обмеження, які потрібно враховувати при виборі найбільш підходящого для конкретної ситуації. Відповідний вибір методу відрізання труб допомагає забезпечити ефективність, безпеку та якість виконаної роботи.

**Висновок.** У даній роботі розглянуті різноманітні методи та пристрої для відрізання труб як ззовні, так і зсередини. Починаючи з класичних методів різання, таких як різці і фрези і т.п., і закінчуючи більш сучасними технологіями, які використовуються в промисловості. Огляд включав аналіз технологій, інструментів та процесів, які дозволяють точно, швидко і безпечно відрізати труби різних розмірів і матеріалів, зберігаючи їхню цілісність та якість.

#### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Кузнєцов Ю.М., Чікін С.В., Мачуга Р.І. Відрізання прутків і труб: теорія і практика; за ред. Ю.М. Кузнєцова. — К.: — ТОВ «Гнозис», 2008. — 333с.
2. Відрізний пристрій для труб : пат. 32270 А Україна : В23В 45/00. № 99020591 ; заявл. 02.02.1999 ; опубл. 15.12.2000. 4 с. URL: <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=67461&chapter=biblio>
3. Відрізний пристрій для труб : пат. 152200 Україна : В23В 45/00 В23С 7/00. № u202107025 ; заявл. 08.12.2021 ; опубл. 05.01.2023. URL: <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=283705>
4. Пристрій для внутрішнього відрізання труб : пат. 54827 А Україна : В23В 45/00. № 2002043270 ; заявл. 19.04.2002 ; опубл. 17.03.2003. 2 с. <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=60783&chapter=biblio>

**Кузнєцов Ю.М., Підгорний Н.А., Столярчу Д. П.** (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна)

## РОБОТИЗАЦІЯ ТА ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ В ІНДУСТРІЇ 4.0

**Анотація:** Індустрія 4.0, четверта промислова революція, характеризується значним впровадженням робототехніки та штучного інтелекту (ШІ) у виробництво. Ця стаття досліджує вплив цих технологій на машинобудування, розглядаючи їхні переваги, виклики, перспективи та вплив на робочу силу.

**Abstract:** The Industry 4.0, the fourth industrial revolution, is characterized by the significant adoption of robotics and artificial intelligence (AI) in manufacturing. This paper investigates the impact of these technologies on mechanical engineering, examining their benefits, challenges, future prospects, and impact on the workforce.

Сучасний світ стрімко розвивається. Четверта промислова революція, відома як Індустрія 4.0, створює нові виклики, але й відкриває безліч перспектив.

Провідні виробники прагнуть до оптимізації своїх виробничих ланцюгів, роблячи їх максимально продуктивними, гнучкими та екологічними. Це потребує кардинально нових підходів до налагодження ефективного виробництва.

Сьогодні виникла тенденція та потреба у впровадженні нових технологічних пристроїв, які мінімізують потребу в людській праці, роблячи виробництво більш енергоефективним, економним (зменшуючи металоємність) та екологічно чистим. Також інженери працюють та враховують нові фактори та виклики при підборі, розробці та виготовленні обладнання.

Ці вимоги, нетипові для ХХІ століття, потребують пошуку інноваційних рішень, а саме:

- Впровадження штучного інтелекту та робототехніки для автоматизації процесів.
- Використання нових матеріалів та технологій, що зменшують металоємність та екологічне навантаження.
- Розробка гнучких виробничих систем, які легко адаптуються до нових потреб та умов.
- Підвищення кваліфікації кадрів, які вміють працювати з новітнім обладнанням та технологіями.

Впровадження цих інновацій дозволить виробництву стати частиною Індустрії 4.0, значно підвищити свою конкурентоспроможність та відповідати викликам сучасного світу.

Індустрія 4.0 – це не просто виклик, це шанс для виробництва зробити крок у нове майбутнє, де панують інновації, економія та екологічна відповідальність.

Такий підхід до сучасного виробництва має безліч переваг, таких, як підвищення продуктивності та ефективності. Автоматизація рутинних завдань може призвести до значного скорочення часу, необхідного для виконання роботи, а ШІ може оптимізувати виробничі процеси, прогнозувати несправності та забезпечувати безперервну роботу 24/7. Також відповідно підвищиться якість продукції. Роботи та ШІ-системи можуть виконувати завдання з більшою точністю, ніж люди, що мінімізує помилки та брак.

Звичайно не забуваємо про економічну складову. Зниження витрат у сучасному машинобудуванні дуже актуальна тема, і в цьому також себе ефективно може себе показати роботизація з ШІ. Заміна людської праці роботами може призвести до значного скорочення витрат на робочу силу. ШІ в свою чергу може допомогти оптимізувати ланцюжки постачання, зменшити енергоспоживання та економити ресурси.

Безпекова ситуація на виробничих лініях також завжди актуальне питання, а роботи можуть виконувати небезпечні та шкідливі для здоров'я завдання, що робить робоче середовище безпечнішим для людей.

Ще однією перевагою застосування роботизації з ШІ є створення нових робочих місць. Впровадження ШІ та роботизації призведе до створення нових професій, пов'язаних з розробкою, програмуванням, обслуговуванням та експлуатацією цих технологій. Зростуть попит на кваліфікованих фахівців у сфері STEM (наука, технології, інженерія, математика).

Та останнє, що варто було б згадати про переваги застосування ШІ та роботизації, це є підвищення екологічної відповідальності. ШІ може допомогти оптимізувати енергоспоживання та ресурсовикористання, що призведе до зменшення викидів парникових газів. Роботизовані системи можуть використовуватися для очищення довкілля та рекультивації земель.

Штучний інтелект (ШІ) стає одним з ключових факторів, що веде машинобудування до епохи Індустрії 4.0. Його впровадження дає можливість автоматизувати багато рутинних завдань, роблячи виробництво більш ефективним та продуктивним, підвищити точність та якість продукції за рахунок комп'ютерного контролю та аналізу, оптимізувати конструкції деталей та вузлів, роблячи їх легшими, міцнішими та дешевшими у виробництві, прогнозувати поломки обладнання та запобігати аваріям за допомогою аналізу даних, а також створити нові продукти та послуги, які раніше неможливо було уявити.

ШІ вже зараз цілком успішно використовується у машинобудуванні. Зараз штучний інтелект виконує завдання по проектуванню та інженерії, до прикладу для оптимізації конструкцій деталей та вузлів роблячи їх легшими, міцнішими та дешевшими у виробництві або як програмне забезпечення на

основі ШІ допомагає інженерам у проектуванні нових продуктів та моделюванні виробничих процесів.

Справжнім прикладом використання ШІ є компанія Siemens, яка використовує ШІ для оптимізації конструкцій турбін, що дозволяє їм бути легшими, міцнішими та ефективнішими.

Також компанія Autodesk розробила програмне забезпечення на основі ШІ, яке допомагає інженерам проектувати нові автомобілі та моделювати їх поведінку на дорозі.

Також роботи з влаштованим ШІ досить широко вже зараз використовуються у виробництві. ШІ використовують у роботизованих збиральних лініях, які забезпечують високу точність та швидкість виробництва (Приклад: Fanuc, що використовує роботизовані збиральні лінії для високоточної та швидкої виробництва електроніки); використання ШІ для контролю якості продукції, виявлення дефектів на ранніх стадіях (приклад компанія АВВ, що використовує ШІ для контролю якості зварних швів, що гарантує їх надійність), а також використання новітніх штучних інтелектів для передбачання поломок обладнання та запобігання аваріям (приклад компанія GE, яка використовує прогностичну аналітику на основі ШІ для передбачення поломки авіадвигунів та запобігання аваріям. ).

Цікаву нішу роботизація та штучний інтелект зайняли у логістиці та складах. Автономні транспортні засоби використовуються для перевезення деталей та готової продукції (приклад компанія Amazon використовує автономні транспортні засоби для перевезення товарів на складах), роботи використовуються для комплектування замовлень та навантаження/розвантаження складів (приклад DHL використовує роботів для комплектування замовлень, що збільшує ефективність цього процесу), ШІ використовується для оптимізації маршрутів та управління запасами (Walmart використовує ШІ для оптимізації маршрутів доставки товарів).

Сервіс та обслуговування також рід, яка тісно зв'язана з машинобудуванням, та вона теж широко почала використовувати роботизацію та штучний інтелект для своїх потреба, до прикладу роботи використовуються для техобслуговування та ремонту обладнання, як у компанії Rolls-Royce, що використовує роботів для техобслуговування та ремонту авіадвигунів, або ШІ використовується для діагностики проблем та прогнозування терміну служби обладнання, до прикладу компанія Caterpillar, яка використовує ШІ для діагностики проблем з будівельною технікою, чи віртуальні помічники на основі ШІ допомагають клієнтам у виборі та обслуговуванні продукції, як у компанії John Deere, яка використовує віртуальних помічників на основі ШІ для допомоги фермерам у виборі та обслуговуванні сільськогосподарської техніки).

Але не перевагами єдиними. Також широко та усюди виникають виклики, з якими стикаються виробники при впровадженні цих технологій, а саме:

1. Висока вартість впровадження: Роботизовані системи та програмне забезпечення ШІ потребують значних інвестицій, що може бути перешкодою для малого та середнього бізнесу.
2. Необхідність у перекваліфікації кадрів: Для роботи з новими технологіями потрібні нові знання та навички у сфері обслуговування роботів, програмування, аналізу даних тощо. Це потребує інвестицій в навчання персоналу та може призвести до тимчасового дефіциту кваліфікованих працівників.
3. Ризик втрати робочих місць: Автоматизація рутинних процесів може призвести до скорочення робочих місць, особливо на низькокваліфікованих посадах. Це може мати негативний вплив на соціальну сферу та потребує розробки програм перепідготовки та працевлаштування вивільнених працівників.
4. Етичні питання, пов'язані з ШІ: Застосування ШІ для прийняття рішень потребує ретельного огляду на предмет потенційної упередженості та дискримінації. Важливо розробляти та дотримуватися етичних норм використання штучного інтелекту.
5. Кібербезпека: Інтелектуальні фабрики з великою кількістю взаємопов'язаних пристроїв є більш вразливими до кібератак. Потрібно забезпечувати високий рівень кібербезпеки для захисту даних та виробничих процесів.

Рішення та перспективи розвитку ШІ та роботизації на машинобудівному виробництві.

Уряди країн можуть стимулювати впровадження Індустрії 4.0 за допомогою фінансових субсидій та пільг для підприємств, спрощення регуляторних норм, Інвестування в розвиток інфраструктури та освіти.

Співпраця бізнесу та науки: Спільні дослідження та розробки між виробниками, науковими установами та технологічними компаніями дозволять пришвидшити створення та впровадження нових технологій.

Підготовка кадрів: Впровадження системи освіти та професійної підготовки, що відповідає потребам Індустрії 4.0. Це дозволить забезпечити наявність кваліфікованих працівників для роботи з новими технологіями.

Інвестування в кібербезпеку: Впровадження ефективних систем кібербезпеки для захисту виробничих процесів та даних від кібератак.

**Висновок:** Розвиток робототехніки та штучного інтелекту в машинобудуванні є дуже перспективним. З'являються більш інтелектуальні роботи здатні до самостійного навчання та адаптації. Широко застосовується ШІ для оптимізації всіх етапів виробництва, від проектування до логістики. Впроваджується штучний інтелект для управління ланцюгами постачання та прогнозування попиту. Зростає співпраця між людьми та роботами на виробництві. Все прямує до переходу до повністю автоматизованих фабрик з мінімальним втручанням людини.

Впровадження роботизованого ШІ в машинобудуванні – це не просто виклик, це шанс для компаній стати лідерами у Індустрії 4.0. Для цього вони

вже інвестують в дослідження та розробки в галузі ШІ, підготовують кваліфіковані кадри, які зможуть працювати з новими технологіями та створюють сприятливі умови для розвитку інновацій.

Україна так само має всі шанси стати одним з лідерів Індустрії 4.0. Машинобудування, з його потужним науково-технічним потенціалом, може стати локомотивом відновлення нашої держави після перемоги!

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. БУСОЛО .ПОТЕНЦІЙНА НЕБЕЗПЕКА ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ. – Режим доступу : [http://ippi.org.ua/sites/default/files/boypnsi\\_14\\_2\\_2015.pdf](http://ippi.org.ua/sites/default/files/boypnsi_14_2_2015.pdf)
2. «Вікіпедія» – Режим доступу : [https://uk.wikipedia.org/wiki/Штучний\\_інтелект](https://uk.wikipedia.org/wiki/Штучний_інтелект)
3. Зленко Н. Аналіз Штучного Інтелекту. – Режим доступу : <https://repository.sspu.sumy.ua/bitstream/123456789/5831/1/Zlenko.pdf>
4. Кайку М. Візії: як наука змінить XXI сторіччя / Мічіо Кайку. – Львів: Літопис, 2004. – 544 с.
5. Карпенко В. Проблема штучного інтелекту в сучасній філософії. – Режим доступу : <http://www.info-library.com.ua/books-text-11661.html>
6. ТЕХНОЛОГІЇ СТВОРЕННЯ ПРОГРАМНИХ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ. – Режим доступу : <https://financial.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2016/09/лекції-1.pdf>
7. Швирков О. Проблема штучного інтелекту і людиновимірність штучних інтелектуальних систем - Житомир, 2006. - 174 с.
8. Штучний інтелект : вчора, сьогодні, завтра : лекція. – Режим доступу : <https://uchika.in.ua/lekciya-shtuchnij-intelekt-vchora-seogodni-zavtra.htm>



**Мартиненко Д.В.**, науковий керівник: к.т.н., доцент Ковалевська О.С.  
(Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ-  
Тернопіль, Україна)

## РОЗРОБКА ІННОВАЦІЙНОГО МЕХАНОСКЛАДАЛЬНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ РЕДУКТОРІВ АГЛОМЕРАЦІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА

**Анотація:** У статті розглядається розробка інноваційного механоскладального технологічного комплексу, спрямованого на оптимізацію процесів виробництва редукторів агломераційного виробництва. Акцент робиться на аналізі існуючих методів, визначенні основних проблем та розробці нових підходів, що включають передові методи обробки, роботизацію та автоматизацію. Основна увага приділена питанням зниження собівартості продукції за рахунок інтеграції новітніх технологічних рішень та покращення ефективності виробничих процесів. Результати дослідження мають значення для оптимізації виробництва в галузі машинобудування, підвищення якості продукції та зміцнення конкурентних позицій підприємств на міжнародному ринку.

**Abstract:** This paper discusses the development of an innovative mechano-assembly technological complex aimed at optimizing the production processes of agglomeration drive reducers. The focus is on analyzing existing methods, identifying main challenges, and developing new approaches that include advanced processing methods, robotics, and automation. Emphasis is placed on reducing production costs through the integration of the latest technological solutions and improving the efficiency of manufacturing processes. The results of the study are significant for optimizing production in the machine-building industry, improving product quality, and strengthening the competitive positions of enterprises in the international market.

Активний розвиток науково-технічного прогресу стимулює пошук шляхів для оптимізації виробничих процесів, зменшення матеріальних витрат та підвищення якості продукції. Одним із ключових напрямків є впровадження інноваційних технологій у виготовлення комплексних механічних систем, зокрема редукторів агломераційного виробництва.

Головною метою дослідження є розробка ефективного технологічного процесу для виготовлення редукторів агломераційного виробництва, спрямованого на зниження вартості їх виробництва при збереженні високої якості продукції.

У дослідженні проведено аналіз існуючих методів виготовлення редукторів та визначено основні проблеми, що впливають на ефективність виробництва. Особлива увага приділена оптимізації технологічного процесу, використанню покращеного інструменту та роботизації процесу складання.

Було розроблено інноваційний механоскладальний технологічний комплекс, що включає передові методи обробки, роботизовані системи та гнучку виробничу систему. Основна увага зосереджена на питаннях зниження собівартості та підвищення ефективності виробництва за рахунок застосування новітніх технологій.

Розробка та впровадження інноваційного механоскладального технологічного комплексу для виготовлення редукторів агломераційного виробництва дозволяє значно підвищити ефективність виробничих процесів, знизити витрати на виробництво та підвищити якість кінцевої продукції. Впровадження передових технологічних рішень, таких як роботизація та автоматизація, сприяє створенню гнучких виробничих систем, здатних швидко адаптуватися до змінних умов ринку та вимог споживачів. Це, в свою чергу, забезпечує підприємствам важливу конкурентну перевагу в галузі машинобудування.

Основними напрямками подальших досліджень у цій області можуть стати розробка адаптивних систем управління технологічними процесами, які базуються на використанні штучного інтелекту та машинного навчання для прогнозування та оптимізації параметрів обробки в реальному часі. Це дозволить не лише забезпечити високу якість продукції, але й значно скоротити час на налагодження виробничих ліній та підвищити їхню гнучкість.

Також актуальним залишається вивчення та застосування нових матеріалів у виробництві редукторів, що може сприяти зниженню ваги продукції, підвищенню її міцності та довговічності. Розвиток 3D-друку та інших адитивних технологій відкриває нові перспективи для виробництва складних деталей з високою точністю та скороченням виробничих витрат.

Результати дослідження мають практичне значення для підприємств машинобудування, зайнятих у виробництві редукторів та іншої високотехнологічної продукції. Впровадження розроблених технологій та підходів дозволить їм оптимізувати виробничі процеси, підвищити продуктивність праці, знизити витрати на виробництво та підвищити конкурентоспроможність на міжнародному ринку.

На основі проведеного дослідження можна сформулювати напрямки подальших наукових розвідок у галузі розробки і впровадження інноваційних технологічних процесів у машинобудуванні. Це включає розробку інтелектуальних систем управління виробництвом, застосування принципів екологічного дизайну для створення енергоефективної та екологічно безпечної продукції, а також розширення застосування цифрових технологій для створення гнучких та автоматизованих виробничих ліній.

Завдяки цьому дослідженню вдалося підтвердити важливість інтегрованого підходу до інновацій в машинобудуванні, що об'єднує в собі розробку передових технологічних рішень, впровадження новітніх матеріалів і застосування сучасних методів управління виробничими процесами. Такий підхід не лише сприяє підвищенню ефективності виробництва, але й дозволяє підприємствам машинобудівної галузі адаптуватися до швидкозмінних умов ринку, відповідати зростаючим вимогам до екологічності та сталого розвитку.

Сучасне машинобудування стикається з рядом викликів, серед яких необхідність зменшення енергоспоживання та впливу на навколишнє

середовище, а також потреба у виробництві високотехнологічної продукції, що задовольняє потреби глобального ринку. Водночас ці виклики відкривають нові можливості для розвитку інноваційних рішень та впровадження принципів "зеленого" виробництва.

Дослідження, представлене у статті, робить значний науковий внесок у розробку методологій та практичних рекомендацій для оптимізації технологічних процесів в машинобудуванні. Результати роботи можуть бути використані для підготовки фахівців у галузі машинобудування, а також слугувати основою для подальших досліджень у цій області.

Розробка і впровадження інноваційних технологічних процесів у виробництво редукторів агломераційного виробництва є ключовим чинником забезпечення їх високої ефективності та конкурентоспроможності. Використання сучасних технологій, новітніх матеріалів та ефективних методів управління дозволяє оптимізувати виробничі процеси, знижувати витрати та підвищувати якість кінцевої продукції. Подальші дослідження у цій області відіграють важливу роль у розвитку машинобудування, сприяючи створенню інноваційних рішень для задоволення потреб сучасного ринку. Інтеграція передових технологій, таких як штучний інтелект, машинне навчання, та робототехніка, відкриває нові перспективи для підвищення точності, ефективності та автоматизації виробничих процесів. Це не лише сприяє покращенню експлуатаційних характеристик виробів, але й забезпечує виробництво більш сталої та екологічно безпечної продукції.

На основі проведеного дослідження можна сформулювати кілька рекомендацій для практичного застосування на виробництві:

1. Автоматизація та роботизація: активне впровадження роботизованих систем та автоматизації процесів для зниження виробничих витрат та підвищення точності виготовлення.

2. Застосування новітніх матеріалів: експериментування з використанням інноваційних матеріалів для покращення експлуатаційних характеристик редукторів.

3. Інтеграція ШІ та машинного навчання: використання алгоритмів штучного інтелекту для аналізу та оптимізації виробничих процесів, а також для попередження поломок та зношування обладнання.

4. Еко-інновації: розробка та впровадження "зелених" технологій для мінімізації впливу на довкілля та підвищення сталості виробничих процесів.

Майбутні дослідження в області виготовлення редукторів та інших високотехнологічних механічних систем можуть зосередитися на наступних аспектах:

- Розвиток технологій адитивного виробництва (3D-друку): дослідження потенціалу 3D-друку для створення складних компонентів з високою точністю та налаштованістю під конкретні потреби.

- Експлуатаційне моделювання: використання комп'ютерного моделювання для прогнозування поведінки та експлуатаційних характеристик редукторів в різних умовах, що дозволить оптимізувати конструкції перед виробництвом.

- Глибший аналіз матеріалознавства: вивчення нових сплавів та композитних матеріалів, які можуть забезпечити підвищену міцність, зносостійкість та легкість редукторів, при цьому мінімізуючи їх вартість та вплив на довкілля.

- Оптимізація процесів контролю якості: розробка інтелектуальних систем контролю якості з використанням машинного зору та автоматизованого контролю, що дозволить забезпечити високий рівень якості продукції та скоротити час на її перевірку.

- Розширення застосування цифрових двійників: створення віртуальних моделей виробничих процесів та продуктів для їх оптимізації, тестування в умовах, які максимально наближені до реальних, без потреби в дорогих фізичних прототипах.

- Енергоефективність та екологічність виробництва: дослідження та впровадження енергоефективних технологій та обладнання, а також розробка виробничих процесів, спрямованих на мінімізацію відходів та використання вторинної сировини.

У світлі постійного прогресу в технологіях та зростаючих вимог до сталого розвитку, інновації у виробництві редукторів та інших складних механічних систем відіграють ключову роль у підтримці конкурентоспроможності та адаптації до змінних ринкових умов. Розробка нових методів виготовлення, які оптимізують виробничі процеси, підвищують ефективність та знижують вплив на довкілля, стає не просто технологічним вибором, а стратегічним напрямком розвитку для підприємств машинобудівної галузі.

Впровадження здобутих знань та результатів досліджень у практику виробництва може значною мірою сприяти досягненню цих цілей, забезпечуючи високу якість продукції, оптимізацію витрат та відповідність сучасним екологічним стандартам.

**Надіч П.В.**, наук. кер. к.т.н., доц. **Онищук С.Г.**, к.т.н. **Тулупов В.І.** (Україна, м. Краматорськ - Тернопіль, Донбаська державна машинобудівна академія)

## **ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНИХ РІЗАЛЬНИХ ІНСТРУМЕНТІВ ДЛЯ ТОКАРНОЇ ОБРОБКИ В МАШИНОБУДУВАННІ**

***Анотація:** В статті розглянуті основні тенденції щодо розвитку різального інструмента та його використання для токарної обробки при виготовленні виробів в машинобудуванні.*

***Abstract:** The article discusses the main trends in the development of cutting tools and their use for turning in the manufacture of products in machine building.*

Сучасне виробництво потребує забезпечення якості виробів, що виготовляються. На даному етапі використовується різноманітне технологічне обладнання, технологічне оснащення, різальний інструмент та засоби вимірювання. Одним з основних елементів, від якості виготовленням та експлуатації якого залежить забезпечення якості виробів, є різальний інструмент.

Одним з головних властивостей, що характеризують якість різального інструмента, є його надійність експлуатації в виробничих умовах.

На сучасному етапі основними тенденціями розвитку інструмента є [1, 3]:

- 1) розробка та освоєння виробництва нових марок ріжучих матеріалів;
- 2) широке застосування зносостійких покриттів;
- 3) розробка нових і вдосконалення існуючих конструкцій, обладнання, технологій виготовлення інструмента.

Метою роботи є дослідження основних напрямків щодо використання сучасних різальних інструментів для токарної обробки.

**Удосконалення конструкцій твердосплавного інструменту.** Удосконалення конструкцій твердосплавного інструменту йде по шляху ускладнення робочих поверхонь і, в першу чергу, перехідних поверхонь змінних ріжучих пластин. Оптимізація конструкцій ріжучих пластин дозволяє підвищити стабільність і надійність механічної обробки. Основною тенденцією вдосконалення робочих поверхонь є універсалізація геометрії з метою розширення діапазону стружкодроблення. Геометричні параметри канавок змінних багатогранних пластин різних фірм розрізняються незначно і їх застосування найчастіше обмежено обробкою вуглецевих і легированих сталей в діапазоні подач 0,25...0,7 мм/об і глибини різання 2...8 мм. Типовим прикладом такої пластини може служити пластина фірми Korloy (Південна Корея), форма якої приведена на рис. 1.

Застосовуються пластини з двома і навіть з трьома стружковими канавками. При малих перетинах зрізу працює перша канавка, при великих

– друга і т.д. Тим самим досягається універсальність пластин, яка забезпечує дроблення стружки при різній глибині різання.

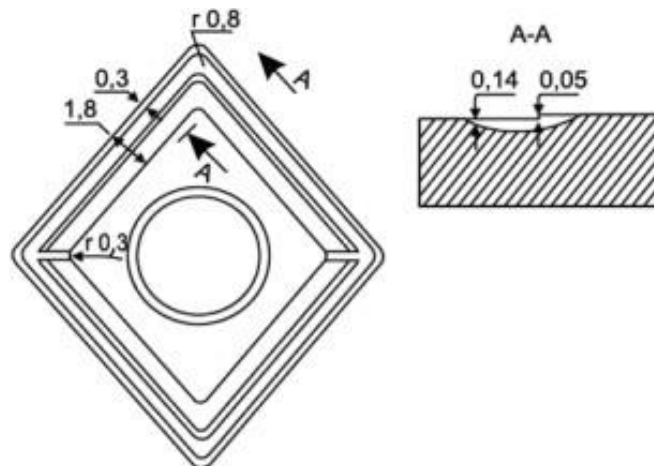


Рис. 1 – Форма пластини фірми Korloy (Південна Корея) [1]

**Застосування змінних твердосплавних пластин з покриттям.** Змінні твердосплавні пластини забезпечують якісну обробку важкооброблюваних, жаростійких сплавів і кольорових металів. Змінні твердосплавні пластини успішно застосовуються при обробці пластмас і чавуну. Легкість монтажу змінних твердосплавних пластин на інструмент і висока зносостійкість забезпечують надійну і тривалу роботу, при цьому досягається відчутний економічний ефект [1].

Використання металорізального інструмента з попередньо нанесеними тонкими (1-5 мкм) зносостійкими покриттями забезпечує ряд важливих переваг: підвищення продуктивності обробки різанням на 20-200%, збільшення терміну служби інструменту до 1,5-10 разів при обробці конструкційних сталей, до 4 разів – при різанні корозійностійких і жароміцних сталей, в 1,5-2,5 рази – при обробці титанових і нікелевих сплавів. Крім того, досягається зниження витрат складнопрофільного інструменту внаслідок зменшення кількості його переточувань [3].

Суттєво зменшити зношення різального інструмента з попередньо нанесеним покриттям можна при дотриманні при його експлуатації наступних рекомендацій:

- правильний підбір співвідношення навантаження на інструмент та механічних властивостей матеріалу; недотримання цієї умови призводить до пластичної деформації різальної пластини;
- правильний підбір співвідношення навантаження на інструмент та в'язкості (пластичності) оброблюваного матеріалу; в результаті недотримання цієї умови з'являється макросколювання;
- правильний підбір співвідношення навантаження на інструмент та ударної в'язкості інструмента; в результаті недотримання цієї умови є тріщиноутворення.

Компанією Sandvic Coromant був розроблений метод нанесення зносостійких покриттів, відомий як CVD (Chemical Vapor Deposition). Сутність його в тому, що покриття були отримані шляхом хімічного процесу

осадження при високих температурах 950-1050°C з парогазового середовища.

Найбільш поширеною практикою є багатошарові покриття на різальних пластинах, отримані методом CVD. Особливістю є нанесення поверх шару карбиду титану TiC шарів оксиду алюмінію Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> і нітриду титану TiN. При цьому перший шар покриттів служив основою для створення якісної адгезії, а наступні шари посилювали захисні функції від різних чинників зносу.

На відміну від CVD-покриттів PVD-покриття мають гарну адгезію, не впливають на міцність основного інструментального матеріалу і, навіть, створюють сприятливі стискаючі напруги в поверхневому шарі. Однією з переваг є підвищена розмірна стійкість та можливість нанесення покриття на дрібнорозмірний інструмент. Інструмент з PVD-покриття може працювати при швидкостях 200-250 м/хв при виконанні токарних робіт [1].

**Багатофункціональний різальний інструмент.** Новим кроком в інструментальному забезпеченні технологічних процесів є створення багатофункціонального різального інструменту [2]. Першими на ринку такий інструмент стали поставляти всесвітньо відомі фірми-виробники Iscar, Sandvik Coromant та інші. Це не є комбінований різальний інструмент в його класичному прояві, який має декілька різних робочих поверхонь для послідовного оброблення однієї поверхні заготовки або однойменні робочі поверхні різного розміру для оброблення ступінчастих заготовок.

В багатофункціональному інструменті в одному корпусі присутні швидкозмінні різальні пластини, які можуть нести різні функціональні навантаження в залежності від положення інструменту відносно поверхонь заготовки та кінематичної схеми оброблення.

Так, наприклад, інструмент лінійки Multifunction tools Iscar для токарного оброблювального центру здатен підрізати торець, просвердлити центральний отвір, розточити цей отвір з утворенням ступіней і фасок, проточити зовнішню поверхню (рис. 2). Інший інструмент окрім свердління і розточування здатен розточити внутрішню канавку і нарізати нарізь. Можливі і інші різноманітні комбінації.



Рис. 2 – Багатофункціональний інструмент фірми Iscar [4]

Такі інструменти мають очевидні плюси [2]:

- багато часу простою можливо скоротити за рахунок зменшення кількості зміни інструменту та допоміжних холостих ходів;

- економія витрат на інструменти;
- вирішує проблему, пов'язану з обмеженим простором в револьверній головці, що врешті може навіть скоротити кількість технологічних операцій.

Недоліками їх застосування можна назвати:

- в верстаті повинен бути наявним робочий орган для установки такого інструменту з додатковою координатою для зміни його орієнтації, що призводить до удорожчання основного обладнання;

- такий різальний інструмент дешевший, ніж сумарна вартість інструментів, які він замінює, але дорожчий ніж кожний окремо. Тому недоцільно його використовувати для оброблення заготовок де немає комбінації всіх поверхонь, для яких він призначений;

- нерівномірний знос різних за розміром та навантаженням швидкозмінних пластинок ускладнює технічне обслуговування, оскільки при їх одночасній заміні будуть викидатися ще придатні слабо навантажені пластини, або необхідно розробити часовий регламент для заміни кожної пластинки окремо.

Показником ефективності застосування подібного оснащення може виступати тільки величина собівартості технологічної операції та економія затрат по новому варіанту технологічного процесу.

## ВИСНОВОК

Використання сучасного металорізального інструмента для токарної обробки дозволяє збільшити продуктивність обробки та зменшити собівартість виготовлення продукції. Однією з умов щодо найповнішого використання переваг таких різальних інструментів є наявність сучасного металорізального обладнання.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1 Ігнат'єв Е., Лисенко О. Основні тенденції розвитку сучасного різучого інструменту. Наукові записки КНТУ. Вип. 11. ч.1. 2011. С. 221-225.

2 Супрунов М. С., Бецко Ю. М. Обґрунтування вибору багатофункціонального різального інструменту. Інновації молоді в машинобудуванні. 2020. URL: <http://imm-tmi.kpi.ua/imm2020/paper/view/21443> (дата звернення: 02.11.2023).

3 Різальний інструмент : Навч. посіб. Київ : Нац. техн. ун-т України «Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського», 2023. 146 с.

4 Електронний каталог фірми Iskar. URL: <https://www.iscar.com/eCatalog/Family.aspx?fnum=3708&mapr=MF&app=242&GFSTYP=M> (дата звернення: 18.03.2024)



**Надіч П.В.**, наукові керівники: к.т.н., доцент Тулупов В.І. і к.т.н., доцент Онищук С.Г. (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ-Тернопіль, Україна)

## МЕТОДИ ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

**Анотація:** В статті розглянуті основні тенденції щодо розвитку методів зміцнення поверхні деталей машин та їх використання для підвищення властивостей металів та сплавів.

**Abstract:** The article discusses the main trends in the development of methods of strengthening the surface of machine parts and their use to improve the properties of metals and alloys.

Зміцнення поверхні деталей машин є важливим аспектом інженерних технологій, спрямованих на підвищення міцності, довговічності і зносостійкості. У світі сучасних технологій промислові виробники активно використовують різні методи модернізації для забезпечення надійності та ефективності машин і обладнання.

Метою роботи є дослідження основних напрямків використання методів зміцнення поверхонь деталей машин.

**Метод статико-імпульсної обробки.** Для підвищення довговічності і несучої здатності важконавантажених транспортних деталей, використовується методи зміцнення поверхневою пластичною деформацією (ППД). Зміцнення виконується з метою підвищення опору втомі і твердості поверхневого шару металу і формування в поверхневому шарі напруги стискування, а також регламентованого мікрорельєфу. Зміцнюючу обробку ППД застосовують на фінішних операціях технологічного процесу, замість або після термообробки, і часто замість абразивної обробки. [2]

Метод статико-імпульсної обробки (СІО), це новий вид обробки поверхневою пластичною деформацією, що відрізняється способом підведення енергії в зону деформації. СІО є вдосконаленим процесом ударної чеканки - впорядкованої ударної дії на зміцнювану поверхню. Виконується спеціальними бойками за допомогою механізованого інструменту. Запропоновано пристрій для статико-імпульсної обробки поверхонь, який виконаний у вигляді корпусу на зовнішній частині якого, за допомогою кріпильної планки, встановлено деформуючі елементи. Деформуючі елементи виконані у вигляді витків сталюї пружини подвійної навивки із дроту круглого січення з внутрішніми опорними і зовнішніми робочими витками. Внутрішні опорні витки закріплені в корпусі, а зовнішні робочі витки контактують з оброблювальною поверхнею. У внутрішній частині деформуючих елементів встановлено скобу імпульсного генератора, який розміщений на осі. [2]

Робота пристрою для статико-імпульсної обробки здійснюють на свердлильних або фрезерних верстатах. У шпинделі верстату встановлюють інструмент і надають йому обертовий рух  $V_i$ . Заготовку закріплюють на столі верстату. Після чого пристрій підводять до оброблюваної поверхні із забезпеченням попереднього натягу за рахунок якого зовнішні робочі витки знаходяться в стані статичного підтиску. Після чого включають імпульсний генератор, який через скобу передає на зовнішні робочі витки імпульс, що формує динамічну складову сили деформації, яка інтенсифікує процес поверхневого пластичного деформування і зміцнює поверхневий шар оброблюваної поверхні. Одночасно пристрій отримує обертовий рух, що забезпечує можливість обробки та виходжування за всією поверхнею. [2]

**Загартування з нагріванням струмами високої частоти.** Це поверхневе загартування при нагріванні металу індукованим у ньому змінним струмом високої частоти. При такому способі високу твердість і нову структуру одержує поверхневий шар, а серцевина зберігає початкову твердість і структуру. Для високочастотного загартування використовують машинні та лампові генератори. [1]

Високочастотне загартування застосовується у всіх галузях машинобудування. У результаті загартування нагріванням струмами високої частоти міцність сталей на втомлюваність зростає на 40-100%, стійкість проти спрацювання деталей після обробки струмами високої частоти значно вища, ніж при нагріванні у печі. Нагрівання струмами високої частоти показало, що в умовах окислювального спрацювання з невеликою швидкістю ковзання високочастотне загартування підвищує стійкість проти спрацювання майже удвічі. Цей тип загартування отримав найбільше розповсюдження при обробці зубчастих коліс, а також для зміцнення внутрішніх поверхонь глибоких отворів. [1]

Перевагою високочастотного загартування є те, що за допомогою цього процесу можна загартувувати шари товщиною від сотих часток міліметра до десяти міліметрів. Цей метод найпродуктивніший у порівнянні з іншими методами загартування, він може бути автоматизований та включений у поточну автоматизовану лінію. Крім того, цей метод дозволяє замінити леговані марки сталей на вуглецеві, що значно зменшує вартість деталей, а також не утворює окалини на поверхнях деталей, що дозволяє виключити з технологічного процесу дробоструминні операції. [1]

**Метод дифузійного зміцнення.** Існує багато способів поверхневого зміцнення сталі та сплавів: напилення, лазерне зміцнення, наплавлення, накатка, застосування різних технологій покриття. Однак використання таких прийомів вимагає використання складного, часто унікального, дорогого та енергоємного обладнання, дорогих зміцнювальних сплавів, висококваліфікованого персоналу. Тому розробка нових ефективних методів представляє особливий інтерес зміцнення деталей машин за рахунок

дифузійного насичення хіміко-термічною обробкою обробляють поверхні металів і сплавів, що містять різні хімічні елементи. [4]

Хіміко-термічна обробка (ХТО) істотно змінює фізико-хімічні властивості поверхневих шарів. До перспективних методів ХТО належать процеси багатокомпонентного насичення, які дозволяють сформувати багатофазну структуру поверхневого шару, що володіє комплексом корисних властивостей. У ряді випадків ХТО є єдиною можливим способом отримання необхідних експлуатаційних властивостей не тільки поверхні, але і виробу в цілому. Більш того, хіміко-термічною обробкою можна отримувати таке поєднання властивостей зміцненого виробу, яке іншими методами отримати неможливо. У цьому випадку ХТО можна розглядати не як певну операцію виготовлення деталі, а як метод отримання принципово нового конструкційного матеріалу. Багатокомпонентне насичення різними елементами або насичення ними зовнішньої і внутрішньої поверхні виробу дає можливість створювати багатошарові композиційні матеріали з унікальними властивостями. [4]

Багатокомпонентні дифузійні боридні покриття володіють цілим комплексом фізико – хімічних і механічних властивостей, що обумовлюють високу зносо-, жаро- і корозійну стійкість виробів, підданих хіміко – термічній обробці. Багатокомпонентні дифузійні покриття перевершують однокомпонентні покриття по експлуатаційних властивостях, при цьому технологія їх отримання практично не ускладнюється. [3]

## ВИСНОВОК

Використання різноманітних технологій зміцнення, таких як термічна обробка, поверхнєве зміцнення, хімічне оброблення тощо, дозволяє підвищити міцність деталей, зменшити їхню вразливість до зношування та корозії, а також забезпечити оптимальні умови для їхньої роботи. Розвиток і вдосконалення методів зміцнення є важливим напрямком наукових досліджень і технологічного прогресу, що сприяє підвищенню якості та конкурентоспроможності виробництва в сучасному світі.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1 Конспект лекцій з дисципліни „Надійність машин” для студентів спеціальності 6.090219 “Обладнання лісового комплексу” машинобудівного факультету денної та заочної форм навчання / М.В. Вржещ, С.І. Пустюльга - Луцьк: ЛНТУ, 2011.- 52 с.

2 Б. Бригадир, С. Пилипець. Зміцнення важконавантажених деталей машин. 2010.

3 С.м Чернега, І.а Поляков, І. Ю. Медова. Підвищення зносостійкості поверхневих шарів металів та сплавів боридними покриттями за участю міді.

4 С.в Григор'єва, О.є Бармін. Дифузійне зміцнення поверхні сталей. 2022.

**Новіков Ф. В.** (Харківський національний економічний університет імені  
Семена Кузнеця, м. Харків, Україна)

## НАНОТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ШОРСТКОСТІ ОБРОБЛЮВАНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПІД ЧАС ШЛІФУВАННЯ

***Анотація.** Обґрунтовано умови суттєвого зменшення висотних параметрів шорсткості оброблюваних поверхонь деталей машин до рівня нанометричних значень. Для цього запропоновано застосовувати схему внутрішнього поздовжнього шліфування торцевою поверхнею круга, яка має форму кола, з перпендикулярним розташуванням осей обертання круга і деталі, що забезпечує найбільшу площу контакту круга із оброблюваним отвором та одночасне зменшення висотних*

***Abstract.** The conditions for a significant reduction of the height parameters of the roughness of the processed surfaces of machine parts to the level of nanometric values are justified. For this purpose, it is proposed to use the scheme of internal longitudinal grinding with the end surface of the circle, which has the shape of a circle, with the perpendicular arrangement of the axes of rotation of the circle and the part, which provides the largest contact area of the circle with the processed hole and simultaneously reduces the height*

**Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами.** Проблема підвищення ефективності виготовлення машинобудівної продукції багато в чому залежить від показників якості та точності виготовлення деталей машин, до яких у сучасних умовах пред'являються високі вимоги. Особливо це стосується параметрів шорсткості оброблюваних поверхонь, які обчислюються кількома десятками нанометрів, а у деяких випадках навіть нанометрами. Звичайно, забезпечити на практиці такі високі показники шорсткості оброблюваних поверхонь надзвичайно складно, навіть застосовуючи вискоелективні технології фінішної абразивної обробки. Для цього необхідно застосовувати сучасні технології механічної обробки на рівні нанотехнологій.

Як відомо, своєму виникненню та розвитку нанотехнології значною мірою зобов'язані створенню безшумних ходових гвинтів для підводних плаваючих об'єктів завдяки суттєвому зменшенню висотних параметрів шорсткості оброблюваних поверхонь  $R_a$ ,  $R_z$  і  $R_{max}$  до рівнів, що обчислюються нанометрами. На цій основі розроблено нові технологічні методи фінішної абразивної обробки (притирання, обробки вільним абразивом тощо), які, за суттю, є нанотехнологіями, що дозволили успішно вирішити важливу та актуальну проблему виготовлення безшумних ходових гвинтів.

Ще одним прикладом ефективного застосування нанотехнологій фінішної абразивної обробки в машинобудуванні необхідно розглядати створення світловідбивних поверхонь на довгомірних пружних виносних елементах у вигляді трубок із тонких пружних пружинних стрічок (антен),

що встановлюються на космічні літаючі апарати для роботи в космічному просторі [1]. У цих умовах температура досягає 150 °С. Під дією світлового потоку це призводить до значного нерівномірного нагрівання антен та їх температурного деформування, що не дозволяє їх ефективно експлуатувати. Для зменшення температурних деформацій на металеві поверхні антен запропоновано наносити різні фарби та світловідбивні покриття, проте це не дозволило у повному обсязі вирішити поставлену проблему. Більш ефективним технічним рішенням стало забезпечення оптичних характеристик світловідбивних поверхонь антен шляхом зменшення параметрів шорсткості оброблюваних поверхонь  $R_a$ ,  $R_z$  і  $R_{max}$  під час фінішної абразивної обробки рівнів, що обчислюються нанометричними значеннями. Іншими словами, шляхом створення дзеркальних поверхонь із коефіцієнтом відбиття, близьким до одиниці. Для цього розроблено технологічні процеси абразивного полірування із застосуванням спеціальних складів абразивних порошків зернистістю 1 мкм і менше (1/0,8; 0,8/0,6; 0,6/0,4...), тобто. на рівні нанотехнологій, які дозволили забезпечити параметр  $R_a < 0,1$  мкм, а відношення параметрів шорсткості оброблюваних поверхонь  $R_{max}/R_a > 30$ . За цих умов обробки досягнуто найбільшого світловідбивного ефекту обробленої поверхні, що дозволило успішно вирішити проблему зниження температурних деформацій тонких пружних стрічок (антен), що працюють у космічному просторі. Дане технічне рішення отримало також застосування під час виготовлення дзеркал лазерних установок, які виготовляються із міді та її сплавів, берилієвих та інших сплавів із забезпеченням високої відбивної здатності оброблених поверхонь.

Слід зазначити, що проблема суттєвого зменшення висотних параметрів шорсткості оброблюваних поверхонь  $R_a$ ,  $R_z$  і  $R_{max}$  і в даний час не втратила своєї значущості. Особливо це стосується виготовлення високоточних виробів, наприклад, отворів у пневмо- і гідроциліндрах, коли потрібно забезпечити параметр шорсткості поверхні  $R_a < 0,1$  мкм. Традиційно при цьому застосовують технології фінішної обробки вільним абразивом. Однак ці технології, як показує практика, дуже трудомісткі, що знижує ефективність обробки. Тому актуальним є завдання нанотехнологічного забезпечення параметрів шорсткості оброблюваних поверхонь за умови суттєвого підвищення продуктивності фінішної абразивної обробки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботі [2] теоретично та експериментально встановлено, що підвищити продуктивність обробки за умови одночасного суттєвого зменшення висотних параметрів шорсткості оброблюваних поверхонь  $R_a$ ,  $R_z$  і  $R_{max}$  можна застосуванням процесу шліфування алмазним кругом на металевій зв'язці із плосковершинними зернами, утвореними у результаті електроерозійного правлення алмазного круга алмазним олівцем. При цьому під час зовнішнього круглого

шліфування твердосплавних виробів досягається значення параметра шорсткості поверхні  $R_a < 0,1$  мкм, що дозволяє поєднати операції попереднього і остаточного шліфування в одну операцію і значно підвищити продуктивність обробки.

Значними можливостями зменшення висотних параметрів шорсткості оброблюваних поверхонь характеризуються процеси обробки імпрегнованими шліфувальними кругами та кругами, виготовленими із застосуванням електрогальванічних методів нанесення алмазних зерен на їх робочу поверхність [3].

Під час обробки внутрішніх поверхонь, як показано у роботі [4], ефективним рішенням є застосування схеми внутрішнього поздовжнього шліфування, встановлюючи вісь обертання шліфувального круга з індивідуальним приводом перпендикулярно осі обертання отвору циліндра (рис. 1). У результаті досягається значне збільшення довжини дуги контакту шліфувального круга із оброблюваною поверхнею деталі, що дозволяє суттєво зменшити параметр шорсткості оброблюваних поверхонь  $R_a$  до значення  $R_a = 0,04$  мкм із забезпеченням високої продуктивності обробки (традиційної для процесів шліфування). Тому цю технологію внутрішнього поздовжнього шліфування слід розглядати достатньо перспективною, оскільки вона одночасно забезпечує високі показники шорсткості обробленої поверхні та продуктивності обробки.



Рис. 1 – Схема обробки шліфуванням отвору у циліндрі

**Формулювання невирішених частин загальної проблеми.** Проведений аналіз останніх досягнень та публікацій показав, що існують значні резерви подальшого вдосконалення процесів шліфування з погляду суттєвого зменшення параметрів шорсткості оброблюваних поверхонь  $R_a$ ,  $R_z$  і  $R_{max}$  та збільшення продуктивності обробки. Однак вони засновані на результатах експериментальних досліджень, які дійсні лише в межах досліджуваних параметрів режимів шліфування, характеристик кругів тощо.

Отримати узагальнені технологічні рішення, які дійсні в широких межах зміни параметрів шліфування, можна на основі теоретичних досліджень із застосуванням розроблених математичних моделей параметрів шорсткості оброблюваних поверхонь під час шліфування. Особливо це стосується схеми внутрішнього поздовжнього шліфування із перпендикулярним розташуванням осей обертання круга і деталі.

**Цілі статті та постановка задачі.** Метою роботи є теоретичне обґрунтування умов зменшення висотних параметрів шорсткості поверхні деталей машин під час внутрішнього поздовжнього шліфування із перпендикулярним розташуванням осей обертання круга і деталі.

Задачі дослідження:

1) розроблення математичної моделі визначення параметра шорсткості поверхні  $R_{max}$  під час звичайного внутрішнього поздовжнього шліфування і внутрішнього поздовжнього шліфування із перпендикулярним розташуванням осей обертання круга і деталі;

2) порівняння значень параметра шорсткості поверхні  $R_{max}$  під час звичайного внутрішнього поздовжнього шліфування і внутрішнього поздовжнього шліфування із перпендикулярним розташуванням осей обертання круга і деталі.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для визначення умов суттєвого зменшення параметрів шорсткості оброблюваної поверхні під час внутрішнього поздовжнього шліфування слід скористатися спрощеною розрахунковою схемою формування шорсткості оброблюваної поверхні із урахуванням впорядкованого розташування одновисотних конусоподібних абразивних зерен на робочій поверхні шліфувального круга (рис. 2).

У цьому випадку параметр шорсткості поверхні  $R_{max}$  визначається за умови:

$$B = 2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n \cdot R_{max} , \quad (1)$$

де  $B$  – ширина шліфування, м;  $2\gamma$  – половина кута у вершини конусоподібного абразивного зерна;  $n$  – кількість абразивних зерен, що приймають участь у формуванні шорсткості оброблюваної поверхні  $R_{max}$ .

Звідки

$$R_{max} = \frac{B}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n} . \quad (2)$$

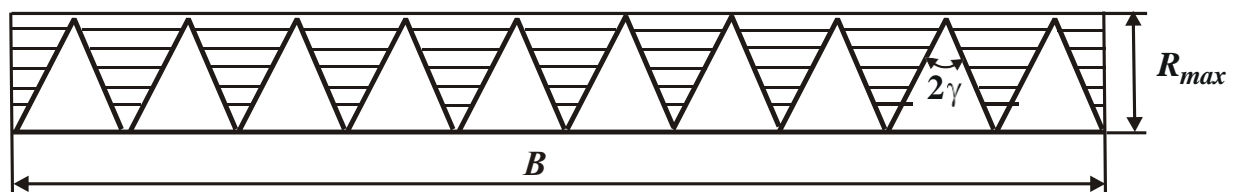


Рис. 2 – Розрахункова схема параметра шорсткості поверхні  $R_{max}$  під час внутрішнього шліфування

Як видно, домогтися зменшення параметра шорсткості оброблюваної поверхні  $R_{max}$  можна, в основному, шляхом збільшення кількості абразивних зерен  $n$ , що приймають участь у формуванні шорсткості оброблюваної поверхні, за умови їх одношарового (одновисотного) розташування на робочій поверхні шліфувального круга. Для визначення величини  $n$  слід скористатися розрахунковими схемами параметрів внутрішнього шліфування, які наведено на рис. 3.

В умовах звичайного внутрішнього поздовжнього шліфування (рис. 3,а) величина  $n$  визначається аналітичною залежністю [5]:

$$n = k \cdot B \cdot V_{кр} \cdot \tau = k \cdot B \cdot V_{кр} \cdot \frac{l}{V_{дет}}, \quad (3)$$

де  $k$  – поверхнева концентрація зерен на робочій поверхні шліфувального круга, шт./м<sup>2</sup>;  $l$  – довжина дуги контакту шліфувального круга із оброблюваною поверхнею деталі, м;  $V_{кр}$ ,  $V_{дет}$  – відповідно, швидкості круга та деталі, м/с;  $\tau = l/V_{дет}$  – час контакту фіксованого поперечного перетину оброблюваної поверхні деталі з шліфувальним кругом, с.

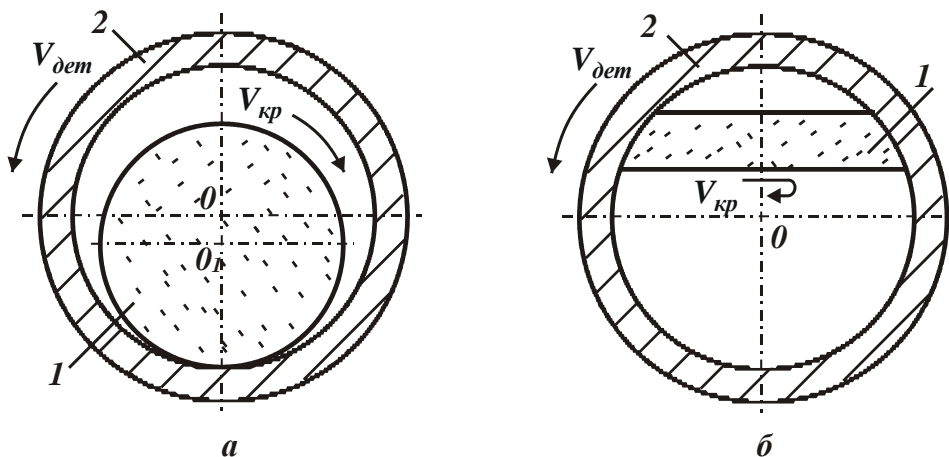


Рис. 3 – Розрахункові схеми параметрів звичайного внутрішнього шліфування (а) і внутрішнього шліфування із перпендикулярним розташуванням осей обертання круга і деталі (б):

1 – круг; 2 – оброблювана деталь

Після підстановки залежності (3) у залежність (2) отримано:

$$R_{max} = \frac{V_{дет}}{2 \cdot tg\gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot l}. \quad (4)$$

Виходячи із залежності (4), основними умовами зменшення параметра шорсткості поверхні  $R_{max}$  є зменшення швидкості деталі  $V_{дет}$  та збільшення параметрів  $k$ ,  $V_{кр}$  і  $l$ .

В умовах внутрішнього поздовжнього шліфування із перпендикулярним розташуванням осей обертання круга і деталі (рис. 3,б) величина  $n$  визначається аналітичною залежністю:



$$n = k \cdot L \cdot V_{кр} \cdot \tau = k \cdot L \cdot V_{кр} \cdot \frac{l}{S_{нозд}}, \quad (5)$$

де  $\tau = l/S_{нозд}$  – час контакту шліфувального круга із площиною, розташованою перпендикулярно до переміщення шліфувального круга уздовж оброблюваного отвору, с;  $S_{нозд}$  – швидкість поздовжньої подачі, м/с;  $L$  – довжина дуги контакту шліфувального круга із оброблюваною поверхнею деталі (у поперечному перетині оброблюваного отвору), м;

Після підстановки залежності (5) у залежність (2) із урахуванням того, що в процесі шліфування відбувається обробка всієї внутрішньої поверхні отвору, довжина якої у поперечному перетині оброблюваного отвору дорівнює  $B = \pi \cdot D$ , маємо:

$$R_{max} = \frac{\pi \cdot D \cdot S_{прод}}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot L \cdot V_{кр} \cdot l}, \quad (6)$$

де  $D$  – діаметр оброблюваного отвору, м.

У даному випадку зменшити параметр шорсткості поверхні  $R_{max}$  можна зменшенням швидкості поздовжньої подачі  $S_{нозд}$  та збільшенням параметрів  $k$ ,  $L$ ,  $V_{кр}$  і  $l$ . Отже, ефект обробки обумовлено, по-перше, завдяки збільшенню площі контакту шліфувального круга з оброблюваною деталлю, по-друге, завдяки одношаровому розташуванню абразивних зерен на робочій поверхні шліфувального круга.

Забезпечити одношарове (одновисотне) розташування абразивних зерен на робочій поверхні шліфувального круга можна, наприклад, шляхом наклеювання абразивного порошку на робочу поверхню м'якого повстяного (фетрового) шліфувального круга. У цьому випадку можливе «утопання» в процесі шліфування абразивних зерен у м'яку зв'язку круга, що призводить до зменшення різновисотного виступу абразивних зерен над рівнем зв'язки круга та, відповідно, до зменшення параметра шорсткості поверхні  $R_{max}$ .

Перетворимо залежність (6) із урахуванням відомого співвідношення для визначення часу обробки за один оберт оброблюваної деталі [5]:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{V_{дет}} = \frac{B_1}{S_{нозд}}, \quad (7)$$

де  $B_1$  – поздовжня подача за один оберт оброблюваної деталі, м/об.

Звідки

$$S_{нозд} = V_{дет} \cdot \frac{B_1}{\pi \cdot D}. \quad (8)$$

Після підстановки залежності (8) у залежність (6) отримано:

$$R_{max} = \frac{V_{дет}}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot l} \cdot \frac{B_1}{L}. \quad (9)$$

Залежність (9) аналогічна залежності (4), яку отримано для визначення параметра шорсткості поверхні  $R_{max}$  під час звичайного внутрішнього поздовжнього шліфування. Відмінність полягає лише у наявності в залежності (9) відношення  $B_1/L$ , яке завжди менше одиниці. Отже, застосування схеми внутрішнього поздовжнього шліфування із

перпендикулярним розташуванням осей обертання круга і деталі (рис. 3, б), порівняно із схемою звичайного внутрішнього поздовжнього шліфування (рис. 3,а), дозволяє суттєво зменшити параметр шорсткості поверхні  $R_{max}$ . Чим менше параметр  $B_1$  і більше параметр  $L$ , тим менше параметр шорсткості поверхні  $R_{max}$ .

Таким чином, найбільший ефект обробки отвору з погляду зменшення параметра шорсткості поверхні  $R_{max}$  можна досягти під час внутрішнього поздовжнього шліфування торцевою поверхнею круга, що має форму кола, та забезпечує найбільшу площу контакту з оброблюваним отвором (рис. 3, б). Впровадження у виробництво даної технології внутрішнього поздовжнього шліфування отворів у пневмо- та гідроциліндрах замість традиційних методів фінішної абразивної обробки дозволило значно підвищити параметри якості та продуктивність обробки, зменшити трудомісткість обробки деталей машин.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Теоретично встановлено, що застосування схеми внутрішнього поздовжнього шліфування із перпендикулярним розташуванням осей обертання круга і деталі дозволяє суттєво зменшити висотні параметри шорсткості поверхні оброблюваних деталей машин до рівня нанометричних величин. Це розширює технологічні можливості процесу внутрішнього поздовжнього шліфування та визначає умови нанотехнологічного забезпечення параметрів шорсткості поверхні оброблюваних деталей машин. Подальшими дослідженнями у цьому напрямі слід розглядати експериментальні дослідження висотних параметрів шорсткості поверхні під час внутрішнього поздовжнього шліфування та визначення умов їх зменшення.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Шкурупій В. Г. Підвищення ефективності технології фінішної обробки світловідбиваючих поверхонь деталей із тонкого листа і стрічок : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / В. Г. Шкурупій. – Одеса, 2006. – 21 с.

2. Дитиненко С. О. Визначення умов забезпечення заданої шорсткості поверхні при абразивній обробці. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. "Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні". Харків: ХНТУСГ, 2010. Вип. 101. С. 251–256.

3. Теплофізика механічної обробки : підручник / О. В. Якимов, А. В. Усов, П. Т. Слободяник, Д. В. Іоргачов. – Одеса: Астропринт, 2000. – 256 с.

4. Спосіб обробки внутрішньої поверхні циліндрів: пат. № 125568 Україна. В. О. Анділахай, Д. Ф. Новіков, Ф. В. Новіков, О. О. Анділахай. Заявл. у 2017 12994, 27.12.2017. Опубл. 10.05.2018, Бюл. № 9. 4 с.

5. Новіков Ф. В. Високопродуктивне алмазне шліфування : монографія / Ф. В. Новіков. – Харків: Вид. ХНЕУ, 2014. – 412 с.

**Нікітенко В.Р.**, науковий керівник: д.т.н., професор Кузнєцов Ю.М.  
(Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна)

### АВТОМАТИЗОВАНА ОБРОБКА БУРШТИНУ

**Анотація** Мета роботи розробити автоматизований верстат з паралельною обробкою для шліфування бурштинових кульок з високою продуктивністю і якістю на модульному принципі з активним контролем і комп'ютерним керуванням.

**Abstract** The aim of the work is to develop an automated machine with parallel processing for grinding amber balls with high productivity and quality on a modular principle with active control and computer control.

**Актуальність проблеми:** 1) Раціональне природокористування при експлуатації природних корисних копалин бурштину. 2) Вилучення людини зі сфери ручної праці з пилом та небезпечними для здоров'я відходами на основі повної автоматизації з застосування цифрових технологій. 3) Висока продуктивність автоматизованого обладнання (щонайменше на порядок вища за ручну працю). 4) Якість і привабливість готових виробів (прикрас), надзвичайно широкий ринок споживання бурштинових кульок для бус, браслетів і кулонів. 5) Використання в техніці (добрий електроізолятор, конкурент фторопласту 4), хімії (бурштиновий лак) і медицині (ліки від різних хвороб).

При обробці природного бурштину необхідно пройти цілий ряд спеціальних підготовчих операцій, щоб обробити бурштин. Спочатку бурштин відчищають і сортують, так як вид у природнього каменю порівняно непоказний, бурштин покритий коричневою окисленою скоринкою. Після ретельного сортування самоцвіт доставляється в цех масового виробництва, де з каменю знімають поверхневу кірочку, полірують і дивляться, що собою являє новий матеріал. Заготовки майбутніх виробів являють собою грубо оброблені шматки природного бурштину. На абразивному верстаті сонячному камінню надається необхідна форма. Така процедура називається грубим шліфуванням.

Серед основних видів обробки бурштину можна виділити: обдирання, формування, вирівнювання, шліфування, полірування і так званий дзеркальний ефект і пресування. Ще один метод обробки бурштину - пресування.

Вивчення літературних джерел і аналіз інформації в Інтернеті показав [1-4,19,21-23], що для виготовлення прикрас різної форми з бурштину в умовах індивідуального, в основному ручного, виробництва технологічний процес складається з п'яти послідовних етапів (рис.1).

Рис.1. Технологічний процес індивідуального виготовлення  
прикраси з бурштину

Для промислового виготовлення бурштинових прикрас технологічний процес складається як мінімум з семи послідовних етапів (рис.2).

Рис.2. Технологічний процес промислового виготовлення  
прикраси з бурштину

**Існуючі технології і обладнання для обробки бурштинових кульок**

В наш час чорнову обробку кульок виконують механізованим способом на шліфувальних верстатах. Прикладом такого верстата може бути верстат шліфувальний SW1 фірми Avalon (Польща) [20], який призначений для ручної шліфовки біжутерії, штамповок, відливок, виробних каменів, бурштину та інших виробів, з подачою охолоджувальної рідини (води). Можлива установка шліфувального круга з алмазним напиленням або зі спеціальною водостійкою шкіркою. Отримання досить точної сферичної форми бурштинових "каліброваних" куль (в подальшому викладі просто куль) здійснюється шляхом шліфування напівфабрикату у вигляді "мятої" кулі на спеціалізованих шліфувальних верстатах. Як правило, це настільні верстати з ручним приводом радіальної подачі  $S_{рад}$  і ручним (або механізованим) приводом кругової подачі  $S_{кр}$ , так звані "шарокрутки"[11]. Деяке поширення отримали верстати-напівавтомати, вироблені, наприклад, польською фірмою "Avalon" (рис.3) [20,21].

При свердлінні отворів у виробих з бурштину отримали в основному верстати з ручним керуванням/ Типовим представником таких верстатів є свердлильний верстат WK1 польської фірми "Avalon"[14].

Представником автоматизованого обладнання для свердління виробів з бурштину є верстат, розроблений і вироблений фірмою "GTV", Каунас (Литва) [21].

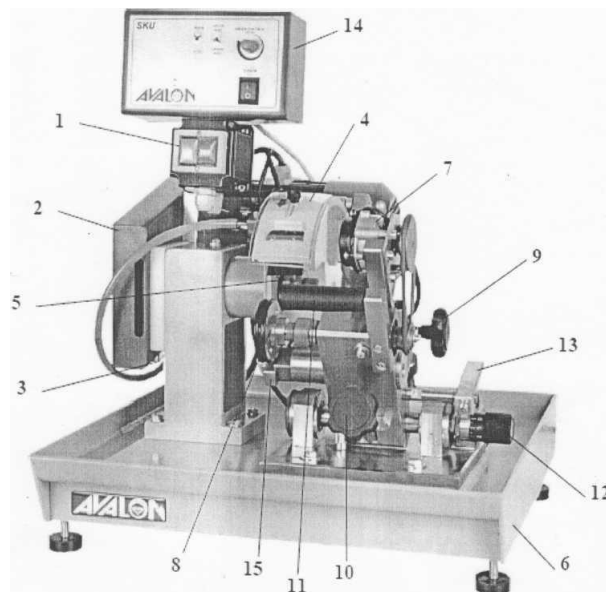


Рис.3. Верстат SKU польської фірми "Avalon" [20]: 1 - пульт управління; 2 - захисний кожух клинового пасу; 3 - кран для підключення води; 4 - захисний кожух для профільного круга; 5 - шліфувальний круг; 6 - станина верстата; 7 - двигун (12V) допоміжний; 8 - роликівна напрямна; 9 - ручка регулювання розміру куль; 10 - блокування переміщення маятникового механізму; 11 - ручка маятникового механізму; 12 - регулювальний гвинт переміщення маятникового механізму; 13 - кінцевий вимикач; 14 - пульт управління; 15 - підпорка під кульку

При свердлінні отворів у виробих з бурштину отримали в основному верстати з ручним керуванням. Типовим представником таких верстатів є свердлильний верстат WK1 польської фірми "Avalon"[14].

Представником автоматизованого обладнання для свердління виробів з бурштину є верстат, розроблений і вироблений фірмою "GTV", Каунас (Литва) [21].

Для надання виробам ще більш привабливого вигляду їх обробляють на шліфувально-полірувальних верстатах. Для шліфування використовують дрібнозернистий шліфувальний папір і круги. Для остаточної поліровки використовують полірувальні круги з бавовняної тканини, на які наносять полірувальну пасту. Прикладом верстатів, що застосовуються при поліруванні бурштинових виробів, є галтувальні верстати фірми Avalon (Польща) [20,22]. Також використовуються вібраційні верстати названої фірми. Прикладом може бути вібраційна установка WE6 (для обробки деталей вібраційним способом в невеликих обсягах. Для забезпечення максимального коефіцієнта використання бурштинової сировини необхідно передбачати два технологічних процеси (рис.4).

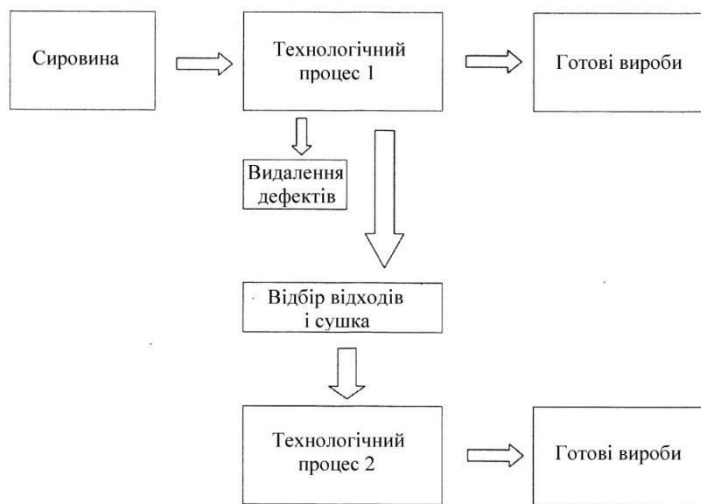


Рис.4. Варіанти технологічних процесів виготовлення кульок

Аналіз існуючих технологічних процесів свідчить про відсутність замкнутого автоматизованого комплексу переробки бурштинової сировини в прикраси і, зокрема, для виготовлення кульок для бус.

Завдяки своїм багатогранним властивостям бурштин все більше привертає до себе увагу з точки зору його добування, обробки та використання, що визначає актуальність вирішення проблеми підвищення продуктивності і якості обробки при зниженні відходів сировини.

Підвищення продуктивності і якості обробки для отримання готового продукту можливо за рахунок заміни ручної праці, використання нових технологій і автоматизованого обладнання [1-4]. Перехід від ручного и частково механізованого виробництва виробів із бурштину до автоматизованого повинен виконуватися поетапним ліквідуванням вузьких місць в технологічному ланцюгу заготовка (бурштин-сировина) – готовий виріб (прикраса). На кафедрі конструювання машин КПІ ім. Ігоря Сікорського виконані розробки і дослідження по створенню високопродуктивних верстатів-автоматів для шліфування бурштинових кульок після автоматичного сортування при мінімальних витратах на виготовлення верстата і його експлуатацію і забезпеченні високої якості за рахунок паралельної багатопозиційної обробки, модульного принципу, активного контролю і комп'ютерного керування. Концептуальна компоновка верстата складається із 3-х секцій, кожна з яких включає в себе 2 модуля обробки (рис.5) [9].

Підвищення продуктивності і якості обробки для отримання готового продукту можливо за рахунок заміни ручної праці, використання нових технологій і автоматизованого обладнання [1-4].

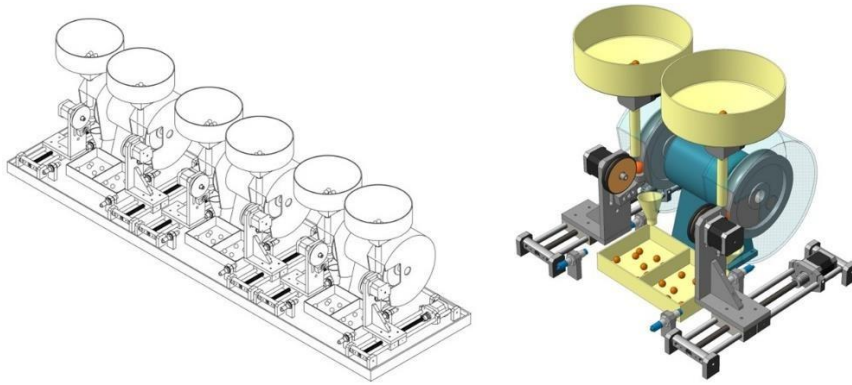


Рис.5. Компоновка багатопозиційного верстата-автомата паралельної дії:  
 а – загальний вид верстата, що складається з 3-х секцій; б – загальний вид  
 однієї секції верстата

При проведенні експерименту на верстаті мод. SKU фірми Avalon (див. рис.3), обладнаним макетом-приставкою автоматичної подачі (рис.7) емпіричним шляхом встановлено, що середній час обробки однієї кульки за один цикл складає 110 секунд.



Рис.7. Верстат моделі SKU фірми Avalon (Польща), обладнаний макетом-приставкою автоматичної радіальної подачі кульок

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Патент України №107052. Спосіб шліфування янтарних кульок, опубл.25.05.2016, Бюл. №10.
2. Патент України №111912. Верстат для шліфування кульок з напівдорогоцінних каменів, опубл.25.11.2016, Бюл. №22.
3. Патент України №129617. Верстат для шліфування кульок з напівдорогоцінних каменів, опубл.12.11.2018, Бюл. №21.
12. Шаповалов Р.Г. Обработка буришину в середньовічному Новгороді ([http:// olaf lod.oi.ua/s79900/obrabotka yantarya v srednevekovom](http://olaf.lod.oi.ua/s79900/obrabotka_yantarya_v_srednevekovom)).
13. <http://www.jewellery.org.ua/stones/sintetica1.htm>
14. <http://www.avalon-machines.pl/>
15. <http://www.gtv.lt>.



**Пірогов Д.О.**, науковий керівник: д.т.н., професор Воронцов Б.С.  
(Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна)

## **ВПЛИВ ШВИДКОСТІ РІЗАННЯ НА СТРУЖКОУТВОРЕННЯ ПРИ ТОЧІННІ ЗАГОТОВОК ІЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ TI-6AL-4V**

***Анотація:** В даній роботі продемонстровані порівняльні результати впливу швидкості різання на утворення стружки при точінні титанового сплаву TI-6AL-4V із використанням пластини із карбід-вольфраму без покриття із застосуванням об'єктно-орієнтованого програмного середовища AdvantEdge.*

***Abstract:** This paper demonstrates the comparative results of the effect of cutting speed on chip formation when turning TI-6AL-4V titanium alloy using an uncoated tungsten carbide insert in the AdvantEdge object-oriented software environment.*

Титанові сплави є високоміцними матеріалами і відносяться до важкооброблюваних та жароміцних сплавів, але незалежно від цього мають все більш широке використання в багатьох областях промисловості. Тому вимоги до якості ріжучого інструмента є підвищеними для забезпечення його високих експлуатаційних характеристик. Отже, передбачити виникнення локального або сегментованого стружкоутворення при різанні металів, а також пов'язані із цим сили різання та температури в інструменті є важливою задачею для забезпечення ефективної обробки і передчасного передбачення виходу інструменту із ладу.

Останні дослідження в області механічного оброблення титанових сплавів орієнтовані на аналіз впливу режимів різання на якість оброблених поверхонь, температури в зоні різання, вібрації в системі та знос ріжучого інструменту, а також проблеми, які ускладнюють їх механічне оброблення. Реалізація ефективного оброблення заготовки, також, в значній мірі залежить від утворення стружки, а саме впливу швидкості різання на стружкоутворення.

В роботах авторів [1,2] представлені експериментальні дослідження процесу стружкоутворення, виявлено ефект розм'якшення при високих температурах різання, досліджено критичну деформацію та час за який відбувається зміцнення і подальше розм'якшення, вплив малих та високих швидкостей різання на утворення стружки. Підтверджено, що при дуже високих швидкостях різання можлива наявність тріщин і формування переривчастої стружки, а також висунуто гіпотезу, що швидкість різання є найбільш важливим фактором в процесі стружкоутворення.

Метою даної роботи є аналіз впливу швидкості різання на утворення стружки при точінні титанового сплаву, характер розповсюдження напружень та температури по поверхні інструменту та заготовки і їх впливу на процес стружкоутворення.

Вихідними даними для моделювання процесу точіння було обрано програмне середовище AdvantEdge та рекомендовані каталогом [3] параметри режиму різання. Була обрана квадратна пластина CNMG 12 04 04 – G13 (рис. 1) із заднім кутом  $0^\circ$  із карбід вольфраму (WC).

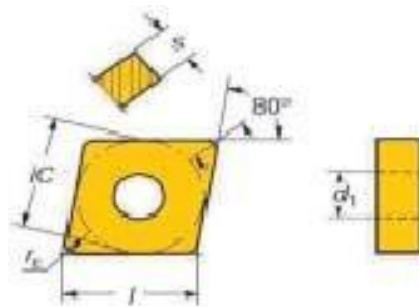


Рис. 1 - Пластина CNMG 12 04 04 – G13

Швидкість різання рекомендована каталогом 45-65 м/хв, подача різання 0,2 мм/об та глибина різання 0,5-2 мм. Для моделювання подача 0,2 мм/об та глибина різання 1 мм, залишається не змінною, швидкість різання обрана 45 мм/хв. та 65 мм/хв. Заготовка “Вал” довжиною 40 мм, діаметром 20 мм. Експериментальна довжина оброблення 10 мм. Отримані графіки сили різання для швидкості різання 45 м/хв., глибина 1 мм, подача 0,2 мм/об (рис.2) та для швидкості різання 65 м/хв., глибина 1 мм, подача 0,2 мм/об (рис.3) демонструють нам поступову стабілізацію і зменшення сили різання під час оброблення, саме це і підтверджує явище термічного розм’якшення заготовки в процесі різання, дозволяючи ріжучому інструменту легше знімати заданий шар матеріалу.

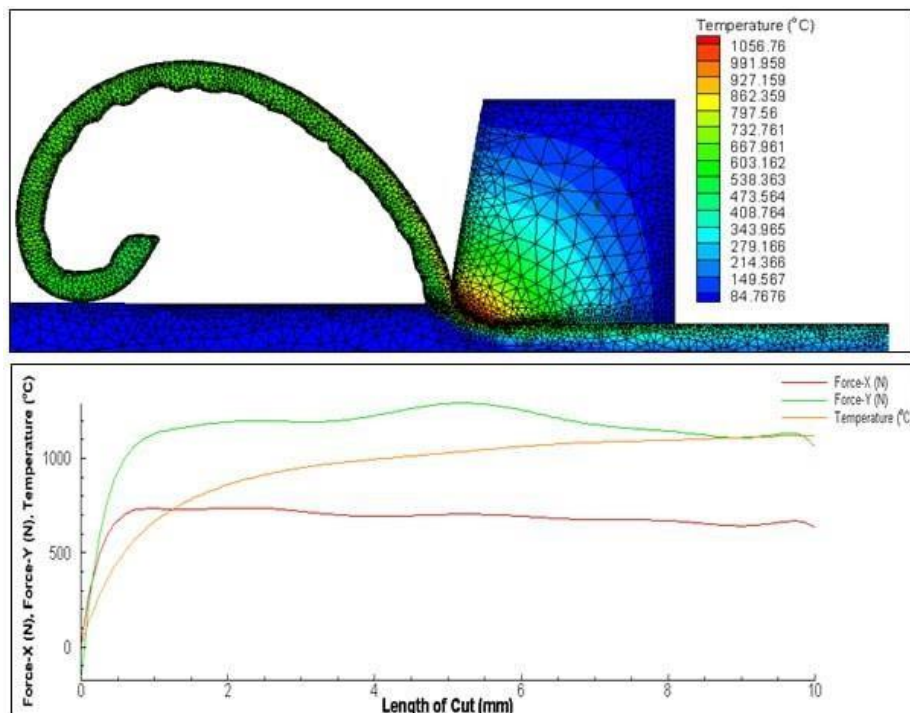


Рис. 1. Оброблення для швидкості 45 м/хв., глибина 1 мм, подача 0,2 мм/об

Як показано на (рис.1) для першої варіації оброблення при швидкості різання 45 мм/хв, температура різання в процесі оброблення збільшується, а сила різання стабілізується і поступово знижується, а також утворюється суцільна (зливна) стружка (рис 3.а), дана стружка є небажаною, так як найбільш складно видаляється із зони різання, пошкоджує поверхню, закриває зону оброблення.

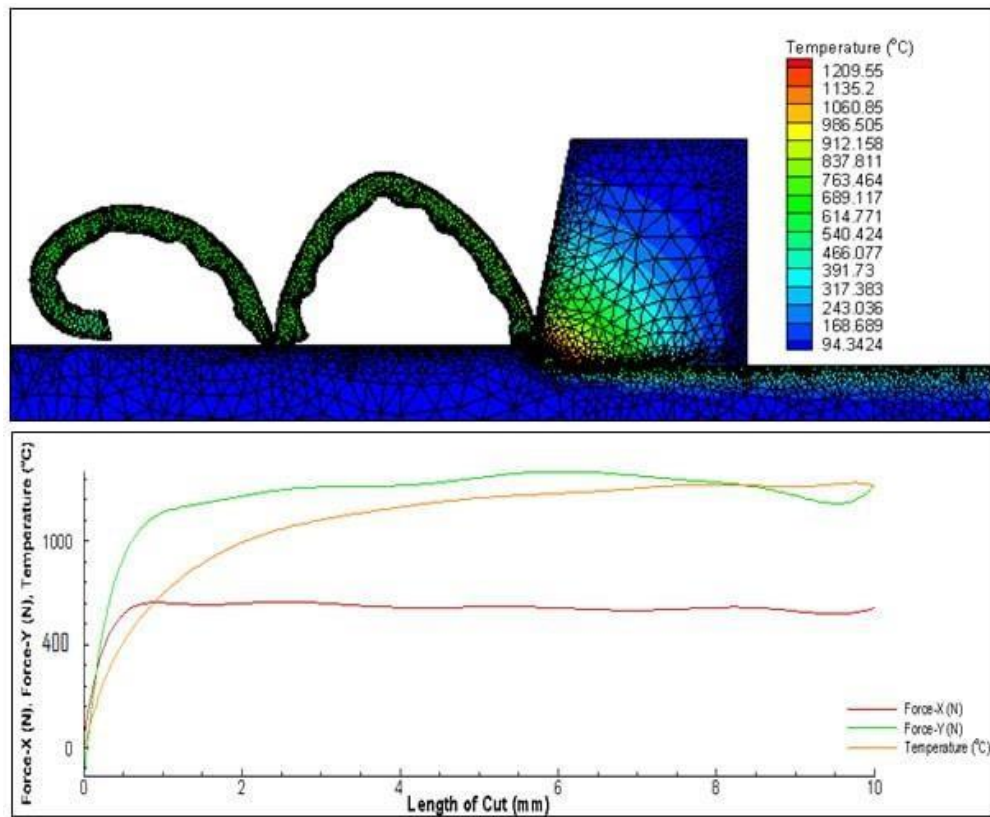


Рис. 2. Оброблення для швидкості 65 м/хв., глибина 1 мм, подача 0,2 мм/об

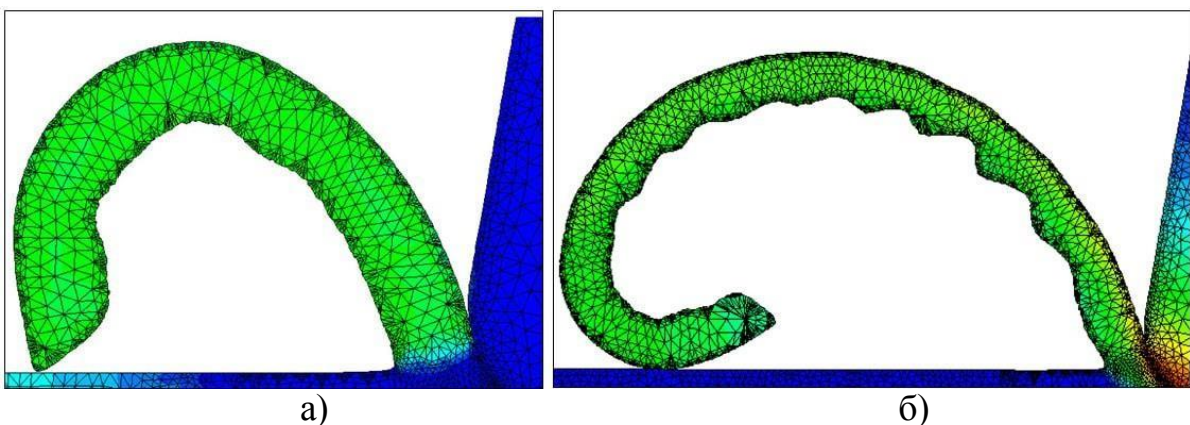


Рис. 3. Геометрія стружки а) зливна для швидкості різання 45 м/хв., б) суглобиста/елемента для швидкості різання 65 м/хв

Результати оброблення для другої варіації при підвищенні швидкості різання 65 мм/хв. (рис.2), демонструють нам стабільні значення сили різання та поступове її зниження, при збільшенні швидкості різання – сила різання залишається незмінною, отже маємо гіпотезу, що виникає явище термічного розм'якшення заготовки при якому зусилля, які проходить

інструмент знижується, а також утворюється стружка, яка візуально схожа на суглобисту/елементу стружку (рис.3б), яка найчастіше виникає при обробленні твердого і міцного матеріалу при збільшенні швидкості різання. Міцність суглобистої стружки, значно менше ніж у зливної.

#### ВИСНОВКИ

Підтверджено гіпотезу виникнення ефекту термічного розм'якшення заготовки в зв'язку із збільшенням швидкості різання. Даний ефект виникає через стабілізацію і поступове зменшення сили різання в процесі збільшення швидкості різання, що саме і пов'язано із ефектом термічного розм'якшення заготовки. Отримані результати можуть бути використані для подальшого вивчення процесу різання та дослідження оптимального діапазону умов різання, а також для оцінки зносу та передчасного виходу з ладу ріжучого інструменту. Хороше розуміння оброблюваності титанових сплавів має вирішальне значення для ефективної обробки.

#### СПИСОК ПОСИЛАНЬ:

1. *Ti6Al4V metal cutting chip formation experiments and modelling over a wide range of cutting speeds* / T. H. C. Childs et al. *Journal of Materials Processing Technology*. 2018. Vol. 255. P. 898–913.
2. Sutter, G., & List, G. (2013). *Very high speed cutting of Ti–6Al–4V titanium alloy—change in morphology and mechanism of chip formation*. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 66, с.37-43.
3. SANDVIK Coromat. *Точіння матеріалів високої твердості [Електронний ресурс] / Coromat SANDVIK // The International Journal of Advanced Manufacturing*. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://polidecktech.com/wp-content/uploads/2021/12/c-2900-24-Точение-материалов-высокой-твёрдости-2019.pdf>.

**Пустовалов В.І.** (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна)

## **ІННОВАЦІЇ У ВИРОБНИЦТВІ РЕДУКТОРІВ ДЛЯ ДРОБАРОК В АСПЕКТІ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ І ОПТИМІЗАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА**

***Анотація:** Ця робота присвячена аналізу та оптимізації процесів виготовлення редукторів для дробарок, з акцентом на розробку і впровадження інноваційного механоскладального технологічного комплексу. Основна увага приділяється застосуванню передових методів обробки, автоматизації та роботизації виробництва, а також впровадженню гнучких виробничих систем. Дослідження підкреслює значення інновацій для підвищення продуктивності, зниження собівартості виробництва та підвищення якості кінцевої продукції. Також розглядаються перспективи використання 3D-друку, адитивних технологій та розробки інтелектуальних систем моніторингу для оптимізації виробництва і підвищення надійності обладнання.*

***Abstract:** This work is dedicated to the analysis and optimization of manufacturing processes for crusher gearboxes, focusing on the development and implementation of an innovative mechanical assembly technological complex. The main attention is given to the application of advanced processing methods, automation, and robotics in manufacturing, as well as the introduction of flexible production systems. The research emphasizes the importance of innovations in increasing productivity, reducing production costs, and improving the quality of the final product. It also explores the prospects of using 3D printing, additive technologies, and the development of intelligent monitoring systems to optimize manufacturing and enhance equipment reliability.*

У сучасному машинобудуванні особлива увага приділяється розробці та оптимізації виробничих процесів, зокрема в галузі виготовлення редукторів для дробарок. Розробка інноваційного механоскладального технологічного комплексу дозволяє підвищити продуктивність та знизити собівартість виробництва, що є актуальним завданням для машинобудівних підприємств.

У звіті про науково-дослідну практику розглядаються ключові аспекти розробки та оптимізації виробничого процесу редукторів дробарок. Зокрема, звертається увага на важливість використання інноваційних технологій та автоматизації виробництва. Вирішальними етапами є аналіз методів виготовлення зубчастих коліс та корпусів редукторів, а також розробка інноваційного механоскладального комплексу, що включає передові методи обробки, роботизовані системи та гнучку виробничу систему.

Реалізація інноваційного механоскладального технологічного комплексу сприяє значному підвищенню ефективності виробництва редукторів дробарок. Оптимізація технологічних процесів, використання сучасного обладнання та впровадження автоматизованих систем дозволяють не лише знизити витрати на виробництво, але й підвищити

якість кінцевої продукції. Особлива увага приділяється розробці ефективних методів захисту редукторів від агресивного зовнішнього середовища, що є ключовим для забезпечення їх надійності та довговічності.

У подальших дослідженнях варто зосередитися на розширенні застосування інноваційних матеріалів і технологій, зокрема 3D-друку та адитивних технологій, для створення зубчастих коліс та корпусів редукторів з унікальними властивостями. Також перспективним напрямком є розвиток інтелектуальних систем моніторингу та діагностики обладнання в реальному часі, що дозволить мінімізувати час простою та оптимізувати процеси технічного обслуговування.

Аналіз діяльності вітчизняних підприємств, таких як ДП «Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро «Прогрес» імені академіка О.Г. Івченка» та Інститут геотехнічної механіки імені М.С. Полякова НАН України, показує високий потенціал української наукової думки та інженерного мистецтва в галузі машинобудування. Ці установи демонструють успішне поєднання наукових досліджень, практичного впровадження інновацій та підготовки висококваліфікованих спеціалістів.

На основі проведених досліджень можна рекомендувати машинобудівним підприємствам активніше впроваджувати інноваційні технологічні рішення, зокрема:

- Розвиток і застосування 3D-друку для виробництва зубчастих коліс і компонентів редукторів, що дозволяє підвищити гнучкість виробництва і знизити витрати на прототипування.
- Впровадження систем автоматизації і роботизації для оптимізації виробничих процесів, зменшення витрат на виробництво та підвищення якості продукції.
- Розробка і застосування інтелектуальних систем моніторингу стану обладнання, що сприятиме своєчасному виявленню та усуненню несправностей, зниженню часу простою та збільшенню терміну служби обладнання.

Інновації у сфері механоскладальних технологічних комплексів для виготовлення редукторів дробарок відіграють ключову роль у підвищенні ефективності та конкурентоспроможності виробництва. Активне впровадження новітніх технологій, автоматизація процесів, розвиток інтелектуальних систем моніторингу та контролю, а також використання інноваційних матеріалів дозволить досягти нового рівня якості та надійності продукції. Водночас, інтеграція цифрових технологій у виробничі процеси відкриває можливості для оптимізації робочих процесів, зменшення енергоспоживання та підвищення екологічності виробництва.

Співпраця між науковими установами та промисловими підприємствами є ключем до успішного впровадження інновацій. Обмін знаннями та досвідом сприятиме розробці ефективних рішень, що задовольняють сучасні вимоги ринку. Також важливо надавати підтримку

молодим фахівцям та науковцям, які працюють над інноваційними проектами, забезпечуючи їх доступ до сучасного обладнання та технологій.

У майбутньому важливо зосередитися на розробці та впровадженні технологій, що забезпечують стале виробництво. Це означає не лише зменшення негативного впливу на довкілля, але й ефективне використання ресурсів, зокрема, за допомогою переробки та повторного використання матеріалів.

Розвиток і впровадження інноваційних механоскладальних технологічних комплексів для виготовлення редуктора дробарки має стратегічне значення для підвищення конкурентоспроможності машинобудівної галузі. Використання передових технологій, оптимізація процесів та впровадження принципів сталого розвитку дозволять виробляти високоякісну продукцію, що відповідає сучасним вимогам безпеки, надійності та екологічності. Успішне впровадження цих інновацій залежить від тісної взаємодії між науковими кругами та промисловістю, а також від підтримки держави в сфері науки та технологій.

Така співпраця створює сприятливі умови не лише для реалізації поточних проектів, але й для розробки перспективних досліджень, що можуть лягти в основу майбутніх технологічних проривів у машинобудуванні. Особливу увагу слід звернути на розвиток цифровізації виробничих процесів, впровадження систем Інтернету речей для моніторингу та управління виробництвом, що забезпечить вищу гнучкість і адаптивність до змінних умов ринку.

Важливим аспектом є також розвиток науково-освітньої бази для підготовки кваліфікованих фахівців, здатних працювати з новітніми технологіями та розробляти інноваційні рішення. Це вимагає не тільки оновлення навчальних програм, але й забезпечення доступу студентів та молодих науковців до сучасного обладнання та лабораторій.

Узагальнюючи, можна сказати, що успіх у впровадженні інновацій у виробництво редукторів для дробарок та іншої високотехнологічної продукції залежить від комплексного підходу, що охоплює технологічні інновації, розвиток наукових досліджень, підготовку кадрів та ефективну співпрацю між науковими установами та промисловістю. Саме такий підхід дозволить забезпечити сталий розвиток машинобудівної галузі та відповідність її продукції вимогам сучасного ринку.

**Рак А.О.** (Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна)

## ПЕРЕВАГИ ЗАСТОСУВАННЯ КЕРАМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ У ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛАХ

**Анотація:** У статті проводиться аналіз теми використання керамічних тіл кочення в підшипникових вузлах. Проаналізовано актуальність використання нітриду кремнію та карбіду кремнію в якості матеріалу керамічних тіл кочення.

**Abstract:** The article analyzes the topic of using ceramic rolling elements in bearing assemblies. The relevance of using silicon nitride and silicon carbide as a material for ceramic rolling elements is analyzed.

Підшипникові вузли в сучасних технічних системах грають ключову роль у підтримці ефективності та продуктивності різноманітних промислових процесів. Тема є дуже цікавою і актуальною, особливо у контексті постійного розвитку технологій у галузі аерокосмічної індустрії. Однак однією з головних проблем їх експлуатації є їх невисока тривалість служби. У цьому контексті виникає необхідність вдосконалення конструкцій та матеріалів, які використовуються для виготовлення підшипникових елементів. Основні аспекти, які вивчаються, включають в себе міцність, стійкість до зношування, термічну стійкість та інші властивості, які можуть зробити керамічні матеріали більш ефективними у певних умовах застосування, ніж традиційні металеві або пластикові матеріали.

Враховуючи технологічний прогрес та постійний розвиток матеріалознавства, однією з перспективних стратегій для підвищення ресурсу підшипникових вузлів є використання керамічних тіл кочення. Кераміка, завдяки своїм унікальним властивостям, стає важливим матеріалом для застосування в критичних елементах агрегатів.

Велика твердість кераміки, мінімальний знос та низький коефіцієнт тертя роблять її ідеальним матеріалом для використання в умовах високих навантажень та температур. Крім того, кераміка володіє відмінною корозійною стійкістю, що робить її особливо привабливою для застосування в умовах роботи турбоагрегатів, де взаємодія з агресивними середовищами є невід'ємною частиною процесу.

Аналізуючи сучасний стан техніки, виявляється, що однією з проблем є обмежений ресурс підшипникових вузлів через знос та високі навантаження. Використання керамічних матеріалів може призвести до



зменшення ваги конструкцій, підвищення стійкості до зношування та корозії, а також покращення термічних характеристик. Керамічні тіла кочення можуть стати ефективним рішенням для підвищення робочого ресурсу.

Низька тривалість служби та часті випадки поломок підшипникових вузлів турбоагрегатів зумовлені інтенсивними навантаженнями, високими температурами та агресивними середовищами. Існуючі матеріали для виготовлення підшипників не завжди можуть витримувати такі умови, що призводить до раннього зносу та втрати ефективності агрегату.

Існують приклади успішного використання керамічних матеріалів у підшипникових вузлах в авіаційній промисловості, автомобільній промисловості, промислових механізмах тощо.

У виробництві літаків та вертольотів, де кожен грам ваги має велике значення, застосування керамічних підшипників може призвести до значного зменшення ваги конструкції. Наприклад, керамічні підшипники використовуються в роторних системах вертольотів для зменшення обертового моменту, що дозволяє збільшити ефективність та підвищити маневреність.

У автомобільній індустрії керамічні підшипники широко використовуються у високопродуктивних автомобілях та гоночних транспортних засобах. За рахунок високої міцності та стійкості до температурних коливань вони забезпечують підвищену продуктивність, а також довговічність та ефективність гальмування.

У важкій промисловості, де обладнання працює під великими навантаженнями та високими температурами, застосування керамічних підшипників може призвести до значних економічних вигід. Наприклад, великі промислові насоси, компресори та інші механізми, обладнані керамічними підшипниками, можуть працювати безперервно протягом тривалого періоду часу без необхідності в сервісному обслуговуванні, що знижує витрати на ремонт та збільшує загальну продуктивність обладнання.

Ці приклади демонструють різноманітні сфери застосування керамічних підшипників та їх позитивний вплив на економіку, продуктивність та безпеку в різних галузях промисловості.

Застосування тіл кочення з карбїду кремнію (SiC) в підшипникових вузлах турбоагрегатів є важливим кроком у напрямку підвищення тривалості служби та покращення робочих характеристик систем. Карбїд кремнію є керамічним матеріалом, який володіє унікальними властивостями, що роблять його ідеальним вибором для підшипникових вузлів:

- 1) Висока твердість та міцність:

Карбід кремнію має високий рівень твердості та міцності, що забезпечує стійкість до зносу та ударних навантажень. Це особливо важливо при високих обертах та екстремальних умовах експлуатації.

2) Висока теплопровідність:

Властивість карбіду кремнію відводити тепло ефективно дозволяє підтримувати стабільну температуру робочих поверхонь, запобігаючи перегріву та покращуючи термічну стійкість.

3) Хімічна стійкість:

Карбід кремнію володіє високою хімічною стійкістю, що дозволяє використовувати його в агресивних середовищах, де може виникати корозія та абразивний знос.

4) Мале тертя та низький коефіцієнт теплового розширення:

Зменшення тертя та коефіцієнта теплового розширення допомагає підшипникам працювати ефективно при великих обертах та температурних коливаннях.

Нітридні наноструктури – це матеріали, які складаються з атомів нітрогену у сполученні з іншими елементами, наприклад, з галієм, алюмінієм чи кремнієм. Ці матеріали привертають увагу завдяки своїм унікальним властивостям, таким як висока термічна стабільність, міцність, а також електронні та оптичні характеристики. Застосування тіл кочення з нітриду кремнію ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) є досить актуальним у різних галузях промисловості, особливо в контексті високотехнологічних приладів.

Нітрид кремнію ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) та карбід кремнію (SiC) - це два різних керамічних матеріали, які мають свої унікальні властивості та застосування. Ось порівняння цих матеріалів за деякими ключовими характеристиками:

Хімічний склад: Нітрид кремнію складається з кремнію та азоту ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), тоді як карбід кремнію складається з кремнію та вуглецю (SiC).

Міцність: Карбід кремнію зазвичай відомий своєю високою міцністю, що робить його відмінним матеріалом для високонавантажених застосувань, таких як ударостійкі компоненти виробництва та захисні покриття. Нітрид кремнію також має високу міцність, але в порівнянні з карбідом кремнію може бути менш міцним.

Термічна стійкість: Обидва матеріали мають високу термічну стійкість, що робить їх відмінними для застосувань у високотемпературних середовищах, наприклад, у виробництві керамічних турбін або паливних елементів.

Провідність: Карбід кремнію відомий своєю високою теплопровідністю та електропровідністю, що робить його популярним матеріалом для виробництва радіаторів, електроніки високої потужності та інших застосувань, де важлива ефективна теплопередача. Нітрид кремнію

має меншу теплопровідність, але може мати кращу діелектричну стійкість, що робить його корисним для деяких електричних застосувань.

Ціна: Карбід кремнію може бути дорожчим за нітрид кремнію через складніше виробництво та більш високі витрати на сировинні матеріали.

В цілому, обидва матеріали мають свої унікальні переваги та застосування, і вибір між ними залежить від конкретних вимог конкретного застосування, включаючи термічні та механічні властивості, вартість та електричні характеристики.

### ВИСНОВКИ

Використання керамічних тіл кочення у підшипникових вузлах є перспективним напрямком, який може суттєво покращити технічні характеристики та ефективність систем, враховуючи вагомі переваги цього матеріалу та його потенціал для вирішення сучасних технічних викликів.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. *Гайдамака А. В. Підшипники кочення. Базові знання та напрямки вдосконалення : навч. посіб. / А. В. Гайдамака. – Х. : НТУ «ХПІ», 2009.*
2. *Jones, A. B., & Smith, C. D. (2019). Ceramic Bearings: A Review of Manufacturing, Properties, and Applications. Materials, 12(15), 2367. [DOI: 10.3390/ma12152367].*

**Сахнюк І.О., Рудак Н.П., Кириленко Л.В., Тітова Г.М., Федосєєва І.К.**  
(Технічний центр НАН України, м. Київ, Україна)

## **АКТУАЛЬНІ ЗМІНИ ЩОДО СТАНДАРТИЗАЦІЇ ТЕРМІНОЛОГІЇ У СФЕРІ НАНОТЕХНОЛОГІЇ**

***Анотація:** Проведено аналіз чинних в Україні національних нормативних документів у сфері нанотехнології, що прийняті методом підтвердження стандартів ISO. Запропоновано розгляд загальних положень опублікованого нового міжнародного стандарту ISO щодо термінології та визначення понять у сфері нанотехнології.*

***Abstract:** The analysis of the national regulatory documents in force in Ukraine in the field of nanotechnology, adopted by the method of confirmation of ISO standards, was carried out. It is proposed to review the general provisions of the published new ISO international standard regarding terminology and definition of concepts in the field of nanotechnology.*

*Постановка проблеми.* Зростання використання нанотехнологій означає, що їхня корисність, ризики та переваги є важливими темами для обговорення. Застосування нанотехнологій практично впливає на всі аспекти життя та сприятиме значному прогресу в комунікаціях, охороні здоров'я, виробництві, матеріалах і технологіях, заснованих на знаннях. Існує потреба забезпечити промисловість і дослідників відповідними інструментами для допомоги в розроблянні, застосуванні та комунікації нанотехнологій.

Стандартизація як інструмент передачі знань відіграє важливу роль під час перегляду ключових термінів. Застосування стандартів надає перевагу інноваційним технологіям у науці та презумпцію відповідності у виробництві, машинобудуванні, приладобудуванні, бізнесі тощо. Завдяки стандартам можна зменшити ризики і затрати, покращити продуктивність, безпеку, демонструвати лідерство на ринку, створити ринки для інноваційної продукції і послуг.

*Аналіз останніх досліджень і публікацій.* Певні дослідження і публікації з питань стандартизації термінології у сфері нанотехнології і наноматеріалів були оприлюднені українськими фахівцями, зокрема: Т.М. Павлиго, Г.Г.Сердюк, В.І. Шевченко [1]. Вони провели аналіз стандартів із нанотехнологій та наноматеріалів різних країн світу та рекомендували прийняття відповідних стандартів Міжнародної організації стандартизації (далі — ISO) методом гармонізації.

*Формулювання невирішених частин загальної проблеми.* На наш погляд, частина невирішеної проблеми полягає у відсутності в Україні технічного комітету стандартизації, сфера діяльності якого була б спрямована на стандартизацію у сфері нанотехнології. Специфічні завдання створеного технічного комітету мали б включати розроблення стандартів щодо: термінології та номенклатури; метрології та приладобудування, включаючи специфікації до стандартних матеріалів; методики тестування;

моделювання; науково обґрунтовані практики охорони здоров'я, безпеки, навколишнього середовища тощо.

Для єдиного розуміння та визначення ключових термінів стандартів серії ISO/IEC 80004 щодо нанотехнологій доречно прийняти відповідні міжнародні нормативні документи в Україні методом перекладу.

*Цілі статті та постановка задачі.* Конкретна мета статті та постановка задачі полягає в тому, щоб звернути увагу наукової спільноти на важливість послідовного використання та виключення неправильного тлумачення термінів, а також сприяння спілкуванню та розумінню в розробці або комерціалізації застосувань нанотехнологій. Вирішальною метою є гармонізація термінології та визначень, щоб сприяти однаковому розумінню та послідовному використанню в спільнотах, де розробляються та використовуються нанотехнології.

*Виклад основного матеріалу дослідження.* У міру того, як нанотехнології продовжують розвиватися, терміни та визначення для полегшення комунікації стають дедалі більш конкретними та точними. Контролюючи матерію в нанорозмірі, нанотехнологія об'єднує процеси та методи, які використовуються для дослідження, проєктування та виробництва матеріалів, пристроїв і систем.

На сьогодні в каталозі нормативних документів України викладено ряд національних нормативних документів (далі — НД) у сфері нанотехнології [2]. Ці національні НД прийняті методом підтвердження стандартів ISO і чинні в Україні. Перелік НД на терміни та визначення понять містить, зокрема:

— ДСТУ CEN ISO/TS 80004-1:2022 (CEN ISO/TS 80004-1:2015, IDT; ISO/TS 80004-1:2015, IDT) Нанотехнології. Словник. Частина 1. Основні терміни;

— ДСТУ CEN ISO/TS 80004-2:2022 (CEN ISO/TS 80004-2:2017, IDT; ISO/TS 80004-2:2015, IDT) Нанотехнології. Словник. Частина 2. Нанооб'єкти;

— ДСТУ CEN ISO/TS 80004-3:2022 (CEN ISO/TS 80004-3:2020, IDT; ISO/TS 80004-3:2020, IDT) Нанотехнології. Словник. Частина 3. Вуглецеві нанооб'єкти;

— ДСТУ CEN ISO/TS 80004-4:2022 (CEN ISO/TS 80004-4:2014, IDT; ISO/TS 80004-4:2011, IDT) Нанотехнології. Словник. Частина 4. Наноструктуровані матеріали;

— ДСТУ CEN ISO/TS 80004-6:2022 (CEN ISO/TS 80004-6:2021, IDT; ISO/TS 80004-6:2021, IDT) Нанотехнології. Словник. Частина 6. Характеристика нанооб'єктів;

— ДСТУ CEN ISO/TS 80004-8:2022 (CEN ISO/TS 80004-8:2020, IDT; ISO/TS 80004-8:2020, IDT) Нанотехнології. Словник. Частина 8. Нановиробничі процеси;

— ДСТУ CEN ISO/TS 80004-11:2022 (CEN ISO/TS 80004-11:2020, IDT; ISO/TS 80004-11:2017, IDT) Нанотехнології. Словник термінів. Частина 11. Наночар, нанопокриття, наноплівка та пов'язані терміни.

Зауважимо, що відповідно до прийнятих практик кожні п'ять років Міжнародна організація стандартизації (ISO) переглядає міжнародні нормативні документи та приймає відносно них певні рішення. Отже, ряд стандартів ISO на терміни та визначення понять у сфері нанотехнології були переглянуті.

На офіційному веб-сайті ISO викладена інформація про те, що в липні 2023 року опубліковано міжнародний стандарт ISO 80004-1:2023 Nanotechnologies – Vocabulary Part 1: Core vocabulary (Нанотехнології – Словник. Частина 1: Основний словник) за Міжнародною класифікацією стандартів (ICS): 07.120 01.040.07. Це перше видання скасовує та замінює стандарти ISO/TS 80004-1:2015, ISO/TS 80004-2:2015, ISO/TS 80004-4:2011 та ISO/TS 80004-11:2017, які були технічно переглянуті [3].

Міжнародний стандарт ISO 80004-1:2023 було підготовлено спільно з Технічним комітетом ISO/TC 229 – Nanotechnologies (Нанотехнології) та Технічним комітетом IEC/TC 113 – Nanotechnology standardization for electrical and electronic products and systems (Стандартизація нанотехнологій для електричних та електронних виробів і систем), а також у співпраці з Технічним комітетом CEN/TC 352 – Nanotechnologies (Нанотехнології) Європейського комітету стандартизації (CEN), відповідно до Угоди про технічне співробітництво між ISO та CEN (Віденська угода). Проєкт було розповсюджено для голосування серед національних органів ISO та IEC.

Міжнародний стандарт ISO 80004-1:2023 визначає основні терміни у сфері нанотехнологій і призначений для полегшення спілкування між організаціями та окремими особами та тими, хто з ними взаємодіє. Зокрема, термін «нанотехнології» подається (за перекладом авторів) як «застосування наукових знань для маніпулювання та контролю матерії переважно в нанорозмірі для використання залежних від розміру та структури властивостей та явищ, відмінних від тих, що пов'язані з окремими атомами чи молекулами, або екстраполяції з більших розмірів того самого матеріалу. Примітка 1. Маніпуляції та контроль включають, наприклад, синтез і обробку матеріалу».

У контексті стандартів серії ISO 80004 термінологія передбачає структуроване і концептуальне представлення лексики, що використовується в нанотехнологіях.

Розробка термінології відбувається інтенсивними темпами та має відповідати потребам зацікавлених сторін. У міру розширення знань термінологія повинна буде ефективно передавати не тільки метрики наноматеріалів, що ґрунтуються на розмірі та формі, але й аспекти, що ґрунтуються на властивостях навмисно створених нанооб'єктів і наноструктурованих матеріалів у їхніх визначеннях.

Для багатьох спільнот значення таких термінів, як нанорозмір, наноматеріал і нанотехнологія, впливають із застосування одиниці вимірювання SI. Префікс «нано» означає міру  $10^{-9}$ . Однак у стандартах серії ISO 80004 такі терміни, як нанооб'єкт і нанорозмір, використовують розмір і геометричні границі для вираження фундаментальних і вимірюваних аспектів наноматеріалів. У випадку терміна «нанорозмір» у визначенні визнається, що діапазон довжини нанооб'єктів може виходити за границі

точних границь, зазвичай пов'язаних із поняттям масштабу, вказуючи, що верхня та нижня границі є приблизними.

Отже, постійним викликом буде передати складні концепції у визначеннях таким чином, щоб це було значущим і практичним для зацікавлених сторін у дослідженнях, комерційних додатках, уряді та споживачах. Підкреслюється, що визначення «нанорозміру» в стандартах серії ISO 80004 є загальним описом, який служить для полегшення спілкування щодо нанотехнологій.

Багато визначень у стандарті ISO 80004-1:2023 визначено такими, що відповідають структурі та ієрархічній системі термінології для нанотехнологій. Крім того, також важливо визнати, що вироби, виготовлені з використанням наноматеріалів, самі по собі не обов'язково є наноматеріалами. Між багатьма різними термінами в цьому документі існує ієрархічний зв'язок. Нанооб'єкти (наприклад, наночастинки, нановолокна та нанопластилини) часто зустрічаються у (великих) групах, а не як ізольовані чи окремі одиниці. Через поверхневу енергію такі співіснуючі нанооб'єкти, ймовірно, взаємодіють. Терміни щодо фізичного розміру та форми включені для повноти та важливості нанорозміру. Наноструктуровані матеріали характеризуються внутрішньою структурою або структурою поверхні на нанорозмірі. Нанооб'єкти (матеріали з одним, двома або трьома зовнішніми розмірами в наномасштабі) можуть бути наноструктурованими.

У стандарті ISO 80004-1:2023 розглядаються п'ять категорій наноструктурних матеріалів: наноструктурний порошок; нанокомпозит; тверда нанопіна; нанопористий матеріал; рідинна нанодисперсія. Для деяких із цих п'яти категорій також визначено ряд термінів підкатегорій. Терміни категорії та підкатегорії не є вичерпними. Додаткові категорії та підкатегорії будуть додані в наступних редакціях цього документа.

Терміни: покриття, шар, плівка та інші споріднені терміни можна згрупувати, розрізняючи покриття, шари та плівки, що мають товщину в нанорозмірі (тобто зовнішній розмір у нанорозмірі) та ті, що мають внутрішню структуру в нанорозмірі (наприклад, наноструктуровані покриття, нанокомпозитні покриття, дисперсійні покриття з дисперсними нанооб'єктами). Відповідно до ієрархії, встановленої в цьому документі, що описує наноматеріали за двома категоріями «нанооб'єкти» та «наноструктурний матеріал», терміни «наношар», «нанопокриття» та «наноплівка» відносяться до «нанооб'єктів», а терміни «наноструктуровані шари, покриття та плівки» — віднесено до наноструктурованого матеріалу. Зазначається, що нанооб'єкти (включаючи наношари, нанопокриття та наноплівки) можуть бути елементами або частинами більшого наноструктурованого матеріалу.

Деякі терміни, що визначені у стандарті ISO 80004-1:2023, також використовуються в інших галузях. Проте, з огляду на спеціальне застосування, ці галузі можуть мати дещо різні визначення цих термінів.

*Висновки та перспективи подальших досліджень.* Розроблення основних термінів та їхніх визначень сприяли дискусії, які протягом тривалого часу стосувалися наукового, нормативного та споживчого

використання. Наука все ще розвивається, як і здатність вимірювати та характеризувати наноматеріали або, загалом, матерію в нанорозмірі.

Отже, основні зміни порівняно з попередніми виданнями:

— міжнародні стандарти ISO/TS 80004-1:2015, ISO/TS 80004-2:2015, ISO/TS 80004-4:2011 та ISO/TS 80004-11:2017 об'єднані в один документ ISO 80004-1:2023;

— переглянуто визначення наноструктури;

— додано термін і визначення «нанооб'єкти та їхні агрегати та агломерати (NOAA)».

Список усіх частин стандартів серії ISO 80004 можна знайти на офіційному веб-сайті ISO. Будь-які відгуки або запитання щодо документа ISO 80004-1:2023 слід направляти до національного органу зі стандартизації користувача. Повний перелік цих органів можна знайти на [www.iso.org/members.html](http://www.iso.org/members.html).

Також термінологічні бази даних для використання у стандартизації підтримують за такими ISO та IEC адресами:

— платформа онлайн-перегляду ISO: доступна за адресою <http://www.iso.org/obp>;

— платформа онлайн-перегляду IEC Electropedia: доступна за адресою <http://www.electropedia.org/>.

На закінчення слід зазначити, що терміни у сфері нанотехнології спрямовані насамперед на розвиток раціональної ієрархічної системи визначень та однакового тлумачення під час їхнього застосування.

Важливо визнати, що пов'язані терміни та їхні визначення йдуть еволюційним шляхом. Науковій спільноті необхідно подбати про те, щоб найновіша наукова інформація була включена в термінологію, щойно вона стане доступною.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1 *Каталог національних стандартів та кодексів усталеної практики [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://katalog.uas.org.ua/name2.php?name=%D0%BD%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D1%96%D1%97>*.

2 *International Standard published. ISO 80004-1:2023 Nanotechnologies – Vocabulary Part 1: Core vocabulary [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/79525.html>*.



Сидюк Д.М., Ганевська В.О., Ковалевський С.В. (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна)

## РОЗМІРНИЙ АНАЛІЗ ЯК ФАКТОР ВПЛИВУ НА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИРОБІВ МАШИНОБУДУВАННЯ

**Анотація:** Сучасне машинобудування стикається з викликами, пов'язаними зі збільшенням вимог до якості, надійності та економічності виробів. Одним із ключових аспектів, що впливають на зазначені характеристики, є точність виготовлення компонентів, що вимагає вдосконалення методів розмірного аналізу та обробки. Робота присвячена розробці методології розмірного аналізу на основі системного підходу, що включає дослідження ефективності фінішної обробки та її впливу на зносостійкість і мікротвердість поверхні деталей.

**Abstract:** Modern mechanical engineering faces challenges associated with increasing demands for quality, reliability, and cost-effectiveness of products. One of the key aspects affecting these characteristics is the manufacturing precision of components, which requires the refinement of dimensional analysis and processing methods. This work is dedicated to the development of a dimensional analysis methodology based on a systematic approach, including the study of finishing treatment efficiency and its impact on wear resistance and surface microhardness of parts.

Вступ. Вироби машинобудування постійно піддаються високим експлуатаційним навантаженням, що вимагає високого рівня надійності та довговічності. Важливу роль у забезпеченні цих параметрів відіграє якість поверхні деталей, яку можна регулювати за допомогою різноманітних методів фінішної обробки.

Літературний огляд показав, що інформаційна модель життєвого циклу виробу машинобудування та актуальність проблеми розмірного аналізу є ключовими для розуміння взаємозв'язку між процесами виготовлення та експлуатаційними характеристиками виробів. Також, він виявив, що попри значний прогрес у розробці технологій фінішної обробки, потребується подальше дослідження впливу різних методів на конкретні експлуатаційні характеристики деталей. Зокрема, це стосується потреби у кількісних оцінках зносостійкості, міцності та інших параметрів, які можуть бути досягнуті завдяки оптимізації параметрів обробки (рис.1).

Методологія дослідження включала аналіз можливостей методів фінішної обробки для забезпечення потрібних властивостей виробів машинобудування. Було визначено, що одним з перспективних методів є електроімпульсне вигладжування, яке позитивно впливає на шорсткість та мікротвердість поверхневого шару деталей.

У зв'язку з цим, основним напрямком подальших досліджень має стати розробка комплексного підходу до вибору технологій фінішної обробки, який би базувався на детальному розумінні механізмів впливу

обробки на структуру та властивості поверхневого шару деталей. Важливим аспектом є також розробка математичних моделей, які дозволяють передбачити зміни в експлуатаційних характеристиках деталей в залежності від умов обробки.

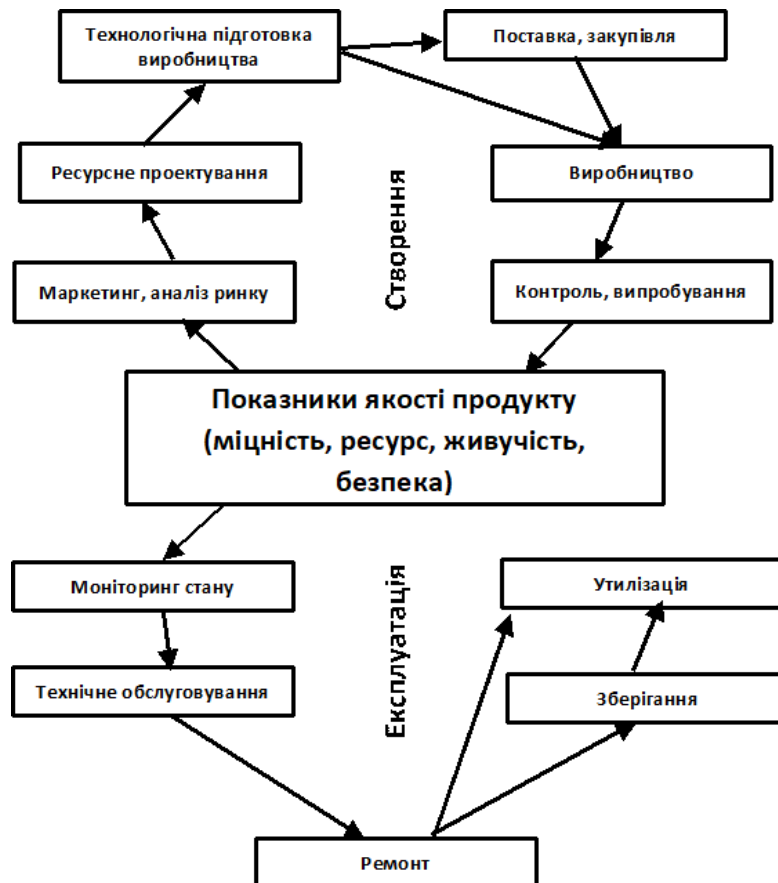


Рис. 1 – Модель життєвого циклу виробу машинобудування

Таким чином, літературний огляд підкреслює значущість комплексного розмірного аналізу та вибору оптимальних методів фінішної обробки як ключових елементів у забезпеченні високої якості та надійності виробів машинобудування.

У методичній частині статті розглядаються підходи та методи, використані для аналізу ефективності фінішної обробки в контексті впливу на експлуатаційні характеристики деталей машин. Особливості методичної частини охоплюють:

1. Здійснено відбір деталей машин, які часто піддаються інтенсивним експлуатаційним навантаженням, для аналізу впливу різних методів фінішної обробки на їх зносостійкість та мікротвердість.

2. Детально описані технологічні процеси фінішної обробки, зокрема електроімпульсне вигладжування, їх технічні параметри та особливості застосування до різних типів деталей.

3. Розроблено та застосовано комплекс експериментальних методик для вимірювання шорсткості поверхонь та мікротвердості матеріалу після обробки. Включено опис обладнання, що використовувалось, та процедур вимірювань.

4. Використання методів статистичного аналізу для обробки отриманих результатів дослідження. Описано підходи до визначення залежностей між параметрами обробки та змінами експлуатаційних характеристик деталей.

5. Розроблено математичні моделі, які описують вплив параметрів фінішної обробки на експлуатаційні характеристики деталей. На основі цих моделей здійснено оптимізацію технологічних параметрів з метою досягнення максимального покращення якості поверхонь.

Методична частина статті демонструє глибокий аналіз використаних методів дослідження та їх адекватність поставленим цілям. Це дозволяє не лише оцінити ефективність конкретних методів фінішної обробки, але й надає можливість для розробки загальних рекомендацій щодо вибору оптимальних технологічних рішень для підвищення експлуатаційних властивостей виробів машинобудування. Підкреслено значення інтегрованого підходу, який поєднує експериментальні дослідження з теоретичним моделюванням, для глибшого розуміння процесів, що відбуваються під час фінішної обробки, та їх впливу на властивості матеріалів.

Важливою особливістю методичної частини є також акцент на важливості вибору раціональних умов обробки, які не лише забезпечують підвищення якісних характеристик деталей, але й сприяють зниженню витрат на виробництво. Аналіз ефективності впливу різних режимів електроімпульсної обробки на мікротвердість та шорсткість поверхонь дозволяє визначити оптимальні параметри для конкретних типів деталей та умов їх експлуатації.

Застосування комплексного підходу до вибору методів фінішної обробки, що базується на детальному аналізі отриманих даних та їх статистичній обробці, відкриває нові перспективи для покращення технологічних процесів в машинобудуванні. Це дозволяє не тільки оптимізувати виробничі процеси, але й забезпечити високу якість та надійність виробів.

У подальших дослідженнях важливо зосередитися на розробці універсальних методик оцінювання впливу різноманітних видів обробки на експлуатаційні характеристики широкого спектру деталей, що буде сприяти розвитку інноваційних технологій у сфері машинобудування та підвищенню конкурентоспроможності виробничих підприємств.

Математична модель розмірного аналізу в контексті управління життєвим циклом виробів машинобудування виходить із необхідності точно прогнозувати розміри деталей і збірок в умовах реального виробництва та експлуатації. Вона дозволяє оцінювати вплив різних факторів на точність

виробів на кожному етапі їхнього життєвого циклу – від проектування до утилізації.

Основні елементи моделі:

1. Визначення базових параметрів: це включає розміри, форму, поверхневі характеристики деталей та їх функціональні вимоги. Базові параметри є вихідною точкою для всіх подальших розрахунків і аналізу.

2. Аналіз допусків: допуски на розміри, форму та розташування деталей визначаються на основі стандартів або вимог до виробу. Математична модель допомагає оцінити, як варіації допусків впливають на збірку виробу і його функціональність.

3. Статистичний аналіз: використовуються методи статистичного аналізу для оцінки розподілу розмірів і форми деталей, виходячи з виробничих даних. Це дозволяє прогнозувати ймовірність відхилень і забезпечити їх відповідність встановленим допускам.

4. Моделювання збірки: використовуються комп'ютерні програми для моделювання збірки виробів з урахуванням реальних допусків на розміри та форму деталей. Це дозволяє ідентифікувати потенційні проблеми зі збіркою або функціонуванням виробу до початку виробництва.

5. Оптимізація дизайну та виробничого процесу: на основі отриманих даних проводиться оптимізація конструкції виробу та виробничих процесів для зниження виробничих витрат, покращення якості та забезпечення відповідності виробу встановленим вимогам.

6. Аналіз надійності: оцінка ймовірності виходу з ладу виробів через невідповідність розмірів або інші дефекти, пов'язані з неправильним розмірним аналізом. Математична модель розмірного аналізу є інструментом для прийняття обґрунтованих рішень на кожному етапі життєвого циклу виробу, від проектування до виробництва, збірки, експлуатації та утилізації. За допомогою цієї моделі можна не лише підвищити якість продукції, але й зменшити вартість виробництва за рахунок мінімізації відходів та оптимізації використання матеріалів.

7. Прогнозування експлуатаційного терміну: визначення меж допустимих навантажень та циклів роботи на основі розмірних характеристик та їх впливу на знос і втому матеріалів. Це дозволяє прогнозувати тривалість служби виробів та розробляти рекомендації для їх обслуговування та ремонту.

8. Оптимізація вибору матеріалів: аналіз можливості використання різних матеріалів для досягнення найкращих експлуатаційних характеристик виробів з урахуванням їх розмірних параметрів. Це допомагає визначити найбільш ефективні комбінації матеріалів та технологій обробки.

9. Управління якістю: реалізація системи управління якістю, заснованої на розмірному аналізі, для постійного моніторингу та контролю якості виробництва на всіх етапах життєвого циклу виробів.

Застосування математичної моделі розмірного аналізу в управлінні життєвим циклом виробів машинобудування є ключовим фактором для забезпечення їх високої якості, надійності та економічності. Вона дозволяє оптимізувати проектні рішення, підвищити точність виробництва, зменшити ризики дефектів і забезпечити відповідність продукції встановленим стандартам і вимогам.

Для ефективного впровадження моделі управління життєвим циклом виробу на основі оптимізації технологічних процесів виготовлення виробів машинобудування необхідно виконати наступні кроки:

1. Здійснити детальний аналіз поточних технологічних процесів на виробництві, визначити "вузькі місця" та потенційні напрямки для оптимізації.

2. Застосувати сучасні програмні засоби для моделювання технологічних процесів, які дозволяють враховувати вплив різних параметрів на кінцеву якість продукції та витрати на її виробництво.

3. На основі математичної моделі провести оптимізацію технологічних процесів, вибравши найбільш ефективні умови виробництва з точки зору зниження витрат і підвищення якості продукції.

4. Реалізувати оптимізовані технологічні процеси на ділянках виробництва та провести експериментальну перевірку отриманих результатів для підтвердження ефективності змін.

5. Здійснювати постійний моніторинг впроваджених змін, аналізувати отримані дані та вносити необхідні корективи для подальшого покращення технологічних процесів.

Реалізація цієї моделі дозволяє компаніям машинобудування ефективно управляти життєвим циклом виробів, оптимізувати технологічні процеси виробництва, підвищити конкурентоспроможність продукції на ринку, знизити витрати та мінімізувати екологічний вплив виробничих процесів.

**Сиротін О.А., Кавецький О.І., Болячок А.Б.,** науковий керівник: к.т.н., доцент Лозінський Д.О. (Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна)

## **ЗАСТОСУВАННЯ РОБОТИЗОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ В МАШИНОБУДІВНОМУ ВИРОБНИЦТВІ**

***Анотація:** Проведено аналіз літературних джерел з метою визначення перспектив впровадження роботизованого обладнання для виконання технологічних задач машинобудівного виробництва.. У роботі розглянуто сучасні тенденції застосування промислових роботів та задачі, які вони вирішують на виробництві. Проаналізовано можливості та переваги використання роботизованих технологічних комплексів, як автоматизованих виробничих одиниць.*

***Abstract:** An analysis of literary sources was carried out in order to determine the prospects for the introduction of robotic equipment to fulfill the technological tasks of machine-building. The possibilities and advantages of using robotic technological complexes as automated production units are analyzed.*

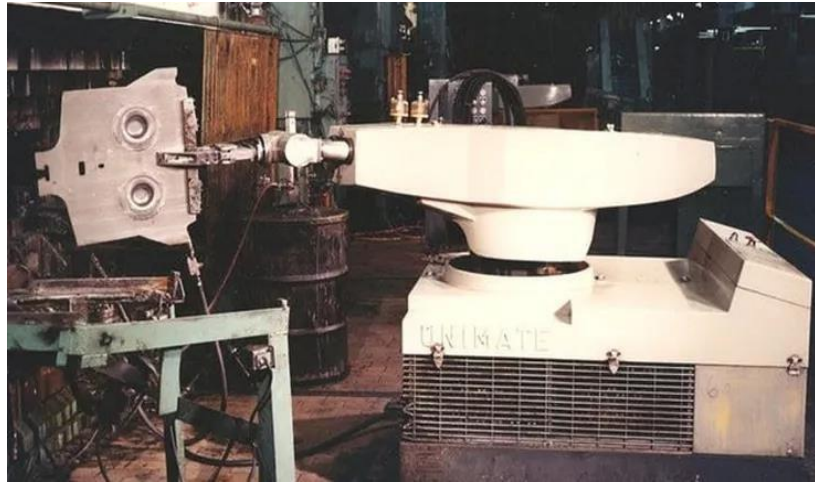
*Постановка проблеми в загальному вигляді.* Сучасне виробництво сьогодні маж швидкі темпи розвитку.

Однією з важливих задач, які висуваються до виробництва є здатність швидкого переналагодження для випуску іншої типової продукції [1-2].

Зазвичай для вирішення даної задачі застосовуються верстатне обладнання з ЧПК, проте в певних випадках слабкою ланкою виробництва може бути людський фактор.

Застосування промислових роботів та відповідного автоматизованого обладнання дозволяє значно скоротити час на переналагодження та водночас покращити стабільність характеристик виробів [3-4].

*Основний матеріал.* Зазвичай застосування роботизованих одиниць використовувалось для виконання DDD робіт (Dull, Dirty and Dangerous) [3]. В основному промислові роботи виконували операції допоміжного характеру пов'язані із установкою чи знаттям виробів, транспортуванням, тощо (рис.1).



*Рис. 1. Виконання завантажувально-розвантажувальних операцій промисловим роботом*

Проте наразі промислові роботи можуть використовуватись для виконання широкого спектру, в тому числі і технологічних задач.

Зокрема робот може виконувати задачі для орієнтації, зміни положення виробу у просторі, часткову обробку виробу (наприклад, зняття заусенців чи притуплення гострих кромek, полірування, тощо), а також операції керування основним та допоміжним устаткуванням [4].

В деяких випадках промислові роботи можуть застосовуватись, як окрема технологічна одиниця [4]. Проте таке застосування обмежене порівняно невисокою жорсткістю промислових роботів та відсутністю різнотипного інструментального забезпечення, тому, в основному, застосування роботів безпосередньо для обробки виконується при обробці з невеликими силами різання, обробці неметалічних матеріалів або у випадках відсутності необхідності високої точності обробки [5, 6].

Впровадження промислових роботів у машинобудівне виробництво отримати ряд переваг: зниження втрат часу, покращення продуктивності, зменшити залучення людських ресурсів, а також розмежувати роботу людини від складних чи небезпечних операцій [6].

Використання роботів в комплексі з технологічним обладнанням дозволяють створити гнучку автоматизовану виробничу одиницю (рис. 2). Яка може бути окремою авторизованою одиницею виробництва з широкими функціональними параметрами та порівняно високими можливостями до переоснащення чи навіть релокації, що практично не можливо застосувати до традиційних автоматизованих комплексів, які є громісткими та, зазвичай, вузько спеціалізованими [7-9].



*Рис. 2. Автоматизована виробнича одиниця*

Покращення ефективності виконання складних операцій та підвищення рівня адаптивності такої одиниці можна досягти за рахунок впровадження систем штучного інтелекту, машинного навчання тощо [10-12].

*Висновки.* Застосування промислових роботів в машинобудуванні може вирішити ряд важливих задач, як покращення ефективності роботи обладнання, зменшення втрат часу та підвищення стабільності якості продукції.

Сучасний розвиток робототехніки дозволяє кооперувати промислові роботи з верстатами з ЧПК в автоматизовані виробничі одиниці, які можуть виконувати широкий спектр технологічних задач та здатні переналагоджуватись за порівняно короткий період часу.

#### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Karabegović, Isak & Karabegović, Edina & Husak, Ermin. (2011). *Industrial Robots and their application in serving CNC machines*.
2. Y. Chen, F. Dong, *Robot machining: recent development and future research issues*, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 66 (9–12) (Jun. 2013) 1489–1497.
3. *The Business Benefits of Machine Tending With Collaborative Robots* <https://www.universal-robots.com/blog/the-business-benefits-of-machine-tending-with-collaborative-robots>
4. Karim A, Verl A (2013) *Challenges and obstacles in robot-machining*, in: *IEEE ISR. IEEE, Seoul 2013:1–4*. doi: 10.1109/ISR.2013.6695731
5. M. Petko et al., *CNC system of the 5-axis hybrid robot for milling*, *Mechatronics* (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechatronics.2016.03.001>
6. Makulavičius, M.; Petkevičius, S.; Rožene, J.; Dzedzickis, A.; Bučinskas, V. *Industrial Robots in Mechanical Machining: Perspectives and Limitations*. *Robotics* 2023, 160. <https://doi.org/10.3390/robotics12060160Academic>
7. F. Leali, M. Pellicciari, F. Pini, A. Vergnano, G. Berselli, *A calibration method for the*



*integrated design of finishing robotic workcells in the aerospace industry, in: Robotics in Smart Manufacturing: International Workshop, WRSM 2013, Co-located with FAIM 2013, Porto, Portugal, June 26-28, 2013. Proceedings, Springer, 2013, pp. 37-48.*

8. K. Vaher, T. Kangru, T. O. J. Riives, *THE MOBILITY OF ROBOTISED WORK CELLS IN MANUFACTURING, Annals of DAAAM & Proceedings, 30 (2019).*

9. Soori, Mohsen & Arezoo, Behrooz & Dastres, Roza. (2023). *Robotical Automation in CNC Machine Tools, A Review. Acta Mechanica et Automatica.*

10. Dzedzickis, A.; Subačiūtė-Žemaitienė, J.; Šutinys, E.; Samukaitė-Bubnienė, U.; Bučinskas, V. *Advanced Applications of Industrial Robotics: New Trends and Possibilities. Appl. Sci.* 2022, 12, 135. <https://doi.org/10.3390/app12010135>

11. M. Soori, B. Arezoo, R. Dastres, *Machine Learning and Artificial Intelligence in CNC Machine Tools, A Review, Sustainable Manufacturing and Service Economics, (2023)*

12. R. Dastres, M. Soori, *Artificial Neural Network Systems, International Journal of Imaging and Robotics (IJIR), 21 (2021) 13-25*

**Соколов М.В.** (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна)

## **ОСОБЛИВОСТІ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ВИРОБНИЦТВІ МЕХАНІЗМІВ ТРАНСМІСІЇ ДЛЯ РОТОРНИХ ЕКСКАВАТОРІВ**

***Анотація:** Стаття присвячена дослідженню та розробці інноваційного механоскладального технологічного комплексу для виготовлення механізмів трансмісії роторних екскаваторів. Основна увага зосереджена на аналізі технологічних процесів, ідентифікації основних проблем виробництва та розробці шляхів їх розв'язання за допомогою інновацій. Результати дослідження підкреслюють важливість інновацій у підвищенні ефективності, якості та конкурентоспроможності продукції, а також надають рекомендації щодо оптимізації виробничих процесів. Дослідження акцентує на перспективах інтеграції елементів штучного інтелекту та машинного навчання для подальшого розвитку технологічних процесів, а також висвітлює екологічні аспекти та потенціал модульних технологічних ліній у машинобудуванні.*

***Abstract:** This article is dedicated to the research and development of an innovative assembly technology complex for manufacturing transmission mechanisms for rotary excavators. It focuses on analyzing technological processes, identifying key production challenges, and developing innovative solutions. The findings emphasize the importance of innovation in enhancing efficiency, quality, and competitiveness of products, offering recommendations for optimizing manufacturing processes. The research highlights the prospects of integrating artificial intelligence and machine learning elements for further technological advancements, and discusses environmental aspects and the potential of modular technology lines in mechanical engineering.*

В умовах сучасного промислового виробництва значну увагу приділяють підвищенню ефективності та зниженню витрат на виробництво складних механізмів. Одним з ключових напрямків є розробка інноваційних технологічних комплексів, здатних оптимізувати та автоматизувати процеси виробництва. Це дозволяє не лише скоротити час виготовлення продукції, але й значно підвищити якість кінцевих виробів.

Основною метою дослідження є розробка інноваційного механоскладального технологічного комплексу для виготовлення механізмів трансмісії роторних екскаваторів. Це дозволить підвищити продуктивність процесів виробництва та знизити собівартість готової продукції.

Об'єктом дослідження виступають технологічні процеси виготовлення механізмів трансмісії роторних екскаваторів, зокрема аналіз сучасного стану виробництва, визначення основних проблем та шляхів їх розв'язання за допомогою інноваційних технологічних рішень.

Результати проведеного дослідження підкреслюють значення інновацій у сучасному виробництві та їх вплив на підвищення ефективності, якості та конкурентоспроможності продукції. Розробка і впровадження інноваційного механоскладального технологічного комплексу для

виготовлення механізмів трансмісії роторних екскаваторів є прикладом успішного застосування сучасних наукових розробок у промисловому виробництві, що відкриває широкі перспективи для подальшого розвитку технологічного комплексу для виготовлення механізмів трансмісії роторних екскаваторів дозволяє значно підвищити ефективність виробничих процесів. Завдяки оптимізації та автоматизації ключових етапів виробництва, можливе досягнення високої точності виготовлення деталей, зниження часу виробництва та покращення якісних характеристик продукції. Це, в свою чергу, сприяє зменшенню собівартості готових виробів та підвищенню їх конкурентоспроможності на ринку.

Окрім технічних аспектів, інноваційний підхід до проектування та впровадження технологічних комплексів має велике значення для стратегічного розвитку підприємств машинобудування. Він дозволяє підприємствам швидко адаптуватися до змінних вимог ринку та ефективно реагувати на виклики сучасності.

На основі проведеного дослідження можна визначити наступні рекомендації для підприємств, що прагнуть оптимізувати виробничі процеси:

1. Застосування високотехнологічного обладнання та новітніх методик обробки може значно підвищити продуктивність та якість виготовлення деталей.
2. Використання автоматизованих систем контролю на всіх етапах виробництва дозволяє мінімізувати ризик виробництва бракованої продукції.
3. Ефективне управління матеріальними потоками і запасами забезпечує безперебійність виробничих процесів та зниження витрат на зберігання.
4. Навчання та підвищення кваліфікації працівників є ключовим фактором успішного впровадження нових технологій та обладнання.

Подальші дослідження у цій галузі можуть бути спрямовані на розробку інтегрованих систем управління виробництвом, що включають елементи штучного інтелекту та машинного навчання для прогнозування та оптимізації виробничих процесів. Це може включати розробку алгоритмів для автоматичного планування виробництва, розподілу ресурсів та управління якістю продукції в реальному часі. Такий підхід дозволить не лише знижувати витрати та покращувати якість, але й забезпечувати більшу гнучкість виробничих систем у відповідь на зміни попиту та вимог ринку.

Крім того, актуальним напрямком є дослідження екологічного аспекту виробництва, зокрема, розробка технологій мінімізації впливу на довкілля, зменшення витрати енергії та використання вторинних ресурсів. Це відповідає глобальним тенденціям сталого розвитку та може забезпечити підприємствам переваги на екологічно свідомих ринках.

Одним з перспективних напрямків є також розробка модульних технологічних ліній, що дозволяють швидко переналаштовувати

виробництво під різні види продукції без значних витрат часу та ресурсів на переобладнання. Такий підхід може бути особливо актуальним для підприємств, що працюють у сфері малосерійного або індивідуального виробництва.

Важливим аспектом подальших досліджень є також розвиток методів цифрової двійникової технології, що дозволяє створювати віртуальні копії виробничих ліній для тестування та оптимізації процесів в цифровому середовищі. Це допоможе скоротити час на розробку та впровадження нових технологій, а також зменшити ризики, пов'язані з переходом на новітнє обладнання.

Узагальнюючи, можна сказати, що майбутнє виробничих технологій в галузі машинобудування полягає у поєднанні інноваційних технічних рішень із сталими виробничими практиками, що забезпечують не лише економічну ефективність, але й відповідають сучасним вимогам екологічності та соціальної відповідальності.

**Тіщенко А.В., Тарасов О.Ф., Коваленко А.К.** (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна)

## **МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРАВКИ МЕТАЛЕВОГО ЛИСТА НА ОСНОВІ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ**

***Анотація.** У роботі проведений комплексний аналіз вітчизняної науково-технічної літератури та закордонних публікацій, методів машинного навчання і технологій штучного інтелекту для вирішення різноманітних технічних задач, на яких засновано управління підприємством. Представлена авторська модель автоматизованої системи управління для правки металевих листів на основі нейронної мережі. А саме, запропонована до використання ефективна нейронна мережа, яка покращує точність та швидкість обробки металевих листів у листопрямуючій машині, що сприяє покращенню продуктивності та якості виробництва металопрокатної продукції.*

***Abstract.** The work includes a comprehensive analysis of domestic scientific and technical literature and foreign publications, machine learning methods and artificial intelligence technologies for solving various technical problems on which enterprise management is based. The author's model of an automated control system for editing a metal sheet based on a neural network is presented. Namely, an effective neural network is proposed for use, which improves the accuracy and speed of processing metal sheets in a sheet straightening machine, which contributes to improving the productivity and quality of the production of rolled metal products.*

**Постановка проблеми.** Аналіз науково-технічної літератури [1-4] показав, що на сучасному підприємстві активно застосовується математичне моделювання профільованого листа, було проаналізовано роботу листопрямуючої машини ЛПМ 2850 конструкції ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод», але правка металевих листів на основі нейронної мережі поки що не впроваджена.

Тому застосування методів машинного навчання (МН) (технології штучного інтелекту) для моделювання правок профільованого листа є однією із невирішених проблем на сучасному виробництві та набуває актуальності.

Існуюча математична модель, яка використовується для розрахунку положення роликів у машині, має численні недоліки такі, як низька швидкість розрахунків та нестійкість до нових матеріалів. У розробці безпечної та надійної програмної забезпечення виникають проблеми, пов'язані з покращенням точності та швидкості обробки металевих листів у листопрямуючій машині. Тому актуальності для власного виробництва металевих листів набуває розробка нової математичної моделі для правки металевих листів та дослідження її ефективності на основі нейронної

мережі, яка здатна швидко та точно розраховувати положення роликів у листоправильній машині.

**Мета роботи:** розробити нову математичну модель для правки металевого листа на основі нейронної мережі та перевірити її ефективність.

**Завдання дослідження:**

1. Дослідити сучасні методи, моделі та інформаційні технології з використанням нейронних мереж .

2. Проаналізувати сучасний стан використання штучної нейронної мережі (ШНМ) при реалізації машинного навчання автоматичних систем управління листоправильних машин.

3. Побудувати модель напружено-деформованого стану із використанням нейронних мереж при навантаженні в пружній області засобами машинного навчання.

Для виконання поставлених завдань використано такі методи наукових досліджень: теоретичні: аналіз науково-технічної літератури, моделювання автоматизованої системи управління для правки металевого листа на основі нейронної мережі; емпіричні (опитування, бесіди з професорсько-викладацьким складом, вивчення та узагальнення досвіду роботи викладачів та науковців); узагальнення результатів дослідження.

**Результати дослідження.** Проведений теоретичний аналіз науково-технічної літератури та закордонних публікацій [1-5] показав, що серед методів і технологій, на яких засновано управління підприємством, нині активно впроваджують методи машинного навчання (МН) (технології штучного інтелекту) на основі штучних нейронних мереж (ШНМ). Штучні нейронні мережі (ANN – Artificial Neural Network) (ШНМ) активно застосовуються для вирішення різноманітних технічних задач в різних галузях. Так, модель прогнозування на основі згорткової нейронної мережі (CNN), використовується для оцінки нестійкості до вигину автомобільних панелей з листового металу [4]. Методи машинного навчання застосовуються у зварювальній промисловості, будівництві. Алгоритми згорткової нейронної мережі (CNN) знайшли застосування в процесах кування металу [5]. Використання алгоритмів машинного навчання та штучний інтелект може знайти рішення для багатьох складних проблем промисловості, у тому числі для покращення точності та швидкості обробки металевих листів на машинобудівному виробництві.

З цією метою нами розроблена удосконалена сучасна ефективна математична модель на основі нейронної мережі, яка здатна швидко та точно розраховувати положення роликів у листоправильній машині. Здійснено моделювання напружено деформованого стану із використанням нейронних мереж при навантаженні в пружній області засобами навчання штучної нейронної мережі. У нейронну мережу вводяться різноманітні параметри листа такі, як розмір, товщина, марка сталі, а також характеристики самої машини, зокрема, кількість роликів і максимальна ширина вхідного листа. Нейронна мережа обробляє надані вхідні дані та

враховує інформацію про межу текучості сталі, яка залежить від марки сталі та розмірів листа [6, 7, 8]. У результаті обробки інформації нейронною мережею користувач отримує налаштування для листоправильної машини, включаючи положення роликів та навантаження на них, що буде використовуватися для коригування форми металевго листа з метою видалення дефектів та його вирівнювання.

Розробка програмного продукту проходить декілька етапів. Здійснюється розробка технічного завдання. Проводиться попередня розробка проєкту ПК із розробкою UML: діаграми прецедентів, класів, послідовності, діяльності, станів, розгортання. Проводиться розробка архітектури програмного комплексу і здійснюється його реалізація щодо моделювання процесу правки листів при навантаженні в пружній області із використанням НМ як засобу вирішення проблеми.

Першим кроком моделювання автоматизованої системи управління правки металевго листа є налаштування нейронної мережі, що здійснюється за алгоритмом:

1. Налаштування топології нейронної мережі.
2. Завантаження data set: параметрів листа та даних листоправильної машини.
3. Навчання нейронної мережі. Здійснюється завантаження тестових даних листа та машини і проводиться навчання НМ, яке базується на створенні оптимальних моделей прогнозування та управління процесом, що дозволяє системі управління листоправильною машиною ефективно реагувати на зміни параметрів та умов роботи.
4. Тестування нейронної мережі: завантажують дані для тестування листа та машини та проводиться її тестування.
5. Здійснення розрахунків положень роликів.

У результаті налаштування користувач отримує готову навчену нейронну мережу. Наступним кроком є моделювання положення роликів у ЛМ із використанням штучної нейронної мережі, яке включає наступні етапи:

1. Завантаження вхідних даних: параметрів листа та даних листоправильної машини.
2. Здійснення розрахунків положень роликів.

У результаті моделювання роботи НМ користувач отримує необхідні результати розрахунків. Алгоритм, який використовувався для моделювання, відтворено у вигляді аналітичної діаграми класів. Ця діаграма відображає загальний вигляд і взаємозв'язки класів, що складають систему, з концептуальної точки зору. Вона описує модель предметної області, в якій визначені лише класи прикладних об'єктів.

Розроблена програма щодо моделювання процесу правки листів, яка забезпечує можливість виконання наступних функцій:

- моделювання даних навантаження на листоправильну машину, навчання та тестування даних;

- завдання усіх необхідних параметрів листа та листопривильний машини для моделювання, тестування, та навчальних параметрів;
- виводу помилок роботи моделі;
- виводу результату моделювання параметрів навантаження.

Функціональним призначенням програми є моделювання даних о навантаженні на деталь через нейрону мережу. А експлуатаційним – те, що програма може застосовуватися на всіх ЕОМ підрозділів приватного підприємства, задовольняючих мінімальним вимогам до програмних і апаратних засобів для нормального функціонування додатку. Програмний комплекс функціонує в середовищі Windows 7 і вище з Microsoft.NET Framework 4.0. Програмний продукт створюється з використанням мови програмування C#.

Навчена нейронна мережа повинна бути інтегрована в автоматичну систему управління листопривильними машинами. Це включає в себе інтегрування в відповідне програмне забезпечення для взаємодії з мережею, а також налагодження механізмів обміну даними та комунікації з іншими компонентами системи управління. Після інтеграції нейронної мережі в систему управління необхідно провести тестування її функціонування в реальних умовах роботи листопривильної машин. Це дозволить виявити і виправити можливі недоліки та оптимізувати роботу мережі. Нейронна мережа вимагає постійного моніторингу та підтримки, а також оновлення моделей на основі нових даних та умов експлуатації. Це включає в себе аналіз результатів роботи мережі, виявлення та усунення недоліків, а також постійне вдосконалення алгоритмів управління.

**Висновки.** Здійснений комплексний аналіз наукових джерел та побудована модель налаштувань для листопривильних машин із використанням нейронних мереж. Здійснена заміна математичної моделі на використання нейронної мережі засобами машинного навчання, яка забезпечує формалізацію зв'язків між структурою технологічного процесу і його параметрами. Перевірка розробленої, удосконаленої моделі автоматизованої системи управління для правки металевго листа на основі нейронної мережі довела її надійність та ефективність.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Грибков, Э. П., Коваленко, А. К., Івчик, Р. С., Титенко, А. А. Дослідження впливу налаштування робочих роликів на якість виправлення листового металопрокату. *Обробка матеріалів тиском*. 2020 (1(50)). 236-242. [https://doi.org/10.37142//2076-2151/2020-1\(50\)236](https://doi.org/10.37142//2076-2151/2020-1(50)236)
2. Тарасов, О. Ф., Білик, Г. Б., Сагайда, П. І., Вінников, М. О., Короткий С. О. (2008) *Системні методи в автоматизації проектування виробів машинобудування : навчальний посібник*. Краматорськ : ДДМА, 2008.
3. Gribkov, E. P., Kovalenko, A. K., & Hurkovskaya, S. S. *Research and simulation of the sheet leveling machine manufacturing capabilities*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. T. 120. 743-759. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-655629/v1>
4. Lee, S.; Quagliato, L.; Park, D.; Berti, G.A.; Kim, N. *A Buckling Instability Prediction Model for the Reliable Design of Sheet Metal Panels Based on an Artificial*



*Intelligent Self-Learning Algorithm. Metals* 2021, 11, 1533. <https://doi.org/10.3390/met11101533>

5. Lee, S.; Quagliato, L.; Park, D.; Kwon, I.; Sun, J.; Kim, N. A New Approach to Preform Design in Metal Forging Processes Based on the Convolution Neural Network. *Appl. Sci.* 2021, 11, 7948. <https://doi.org/10.3390/app11177948>

6. Тищенко А.В. Автоматичні системи управління листопривальних машин із використанням нейронних мереж при реалізації машинного навчання. Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод : матеріали VI-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції 20-22 квітня 2023 року, м. Краматорськ – Тернопіль, ДДМА, 2023. Режим доступу URL: <http://cit.dgma.donetsk.ua/materials.html>

7. Тищенко, А., & Грибков, Е. Дослідження використання нейронних мереж при реалізації машинного навчання автоматичних систем управління листопривальних машин. *Grail of Science*, (24), 2023. 269–277. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.17.02.2023.050>

8. Тищенко А.В. Удосконалення автоматизованої системи управління листопривальної машини на основі використання нейронної мережі. Нові та нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбереженні : матеріали Міжнародної науково-технічної конференції 6-7 грудня 2023 року, м. Одеса, Національний університет «Одеська політехніка», 2023. С. 319-320.

**Товкач А. О., Ковальчук В. А., Козлов С. Л.** (Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна)

## **ПОКРАЩЕННЯ СТАТИСТИЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГІДРОПРИВОДА НА ОСНОВІ РЕГУЛЬОВАНОГО НАСОСА ТА КОНТРОЛЕРА**

***Анотація:** У статті наведено схему гідропривода, що включає регульований насос. Насос оснащений електрогідравлічним регулятором, який забезпечує роботу з чутливістю до навантаження. В гідроприводі застосовано контролер та датчик тиску. Датчик тиску передає сигнал, пропорційний навантаженню на контролер. Контролер на основі сигналу від датчика тиску формує закон зміни напруги на магніті електрогідравлічного регулятора. Запропонована програма роботи контролера забезпечує зменшення похибки стабілізації подачі насоса при зміні навантаження.*

***Abstract:** The article presents a hydraulic drive scheme that includes a regulated pump. The pump is equipped with an electrohydraulic controller, which ensures operation with sensitivity to load. A controller and a pressure sensor are applied in the hydraulic drive. The pressure sensor transmits a signal proportional to the load to the controller. Based on the signal from the pressure sensor, the controller forms a law for changing the voltage on the magnet of the electrohydraulic regulator. The proposed work program for the controller ensures the reduction of the pump delivery stabilization error when the load changes.*

Постановка проблеми.

В промисловості, в будівництві та на транспорті широко застосовуються різноманітні машини з гідроприводом. Тенденцією розвитку машин з гідроприводом є перехід на електрогідравлічне керування з чутливістю до навантаження. В сучасних гідроприводах з електрогідравлічним керуванням широко використовуються регульовані насоси, пропорційні клапани та програмовані контролери. Гідроприводи на основі таких компонентів мають хороші статистичні та динамічні характеристики, а також високу енергоефективність [1]. У Вінницькому національному технічному університеті (Україна) ведуться роботи по вдосконаленню гідроприводів схем гідроприводів, чутливих до навантаження на основі регульованих насосів та контролерів. Характеристики таких насосів багато в чому залежить від схеми та конструкції електрогідравлічних регуляторів, що забезпечують керування [2, 3, 4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Проблеми вдосконалення гідроприводів, чутливих до навантаження на основі регульованих насосів присвячена значна кількість робіт [5-10].

У статті [5] розглядається гідравлічна система з регульованим насосом і електрогідравлічним регулятором. Було проведено порівняння між використанням ПІД-регулятора та регулятора FUZZY для керування гідравлічним приводом. Оцінена ефективність обох типів регуляторів. У

роботі [6] наведено вдосконалену конструкцію однозолотникового регулятора аксіально-поршневого насоса, керованого чутливістю до навантаження. Доведено, що регулятор забезпечує необхідну чутливість і швидкодію в порівнянні з промисловими двозолотниковими регуляторами для LS-керованих гідросистем. У статті [7] розглядається гідравлічна система з LS-регулюванням на основі регульованого насоса та контролера. У застосованому ПД-регуляторі проведено підбір коефіцієнтів, що забезпечують мінімізацію оцінки інтегральної точності. У роботі [8] представлено гідропривод, чутливий до навантаження з удосконаленим регулятором насоса. Модернізація регулятора забезпечує покращення характеристик зниження втрат потужності та коливань. У статті [9] наведено математичну модель автоматичного двозолотникового регулятора для живлення аксіально-поршневого насоса, який керується з чутливістю до навантаження. Розроблено рекомендації щодо вибору зазорів і перекриттів золотників, величин демпфуючих отворів.

Цілі статті та постановка задачі.

Проведений огляд робіт дозволяє зробити висновок, що вдосконалення гідроприводів чутливих до навантаження ведеться у напрямку розроблення нових схем та конструкцій електрогідравлічних регуляторів насосів та застосування контролерів для покращення їх характеристик.

В даній роботі розв'язується задача покращення статичної характеристики гідропривода чутливою до навантаження, створеною на основі регульованого насоса та контролера.

Покращення статичної характеристики гідропривода.

Схема гідропривода на основі регульованого насоса з електрогідравлічним регулятором представлена на рис. 1

Гідропривод включає регульований насос 1 з регулятором 2. Насос 1 подає робочу рідину через регульовані дроселі 3 та 4 до гідромотора 5. Частота обертання валу гідромотора 5 вимірюється тахометром 14. Величина тиску  $p_n$  в гідролінії між насосом 1 та регульованим дроселем 3 вимірюється датчиком тиску 6, а тиск  $p_c$  в гідролінії між регульованими дроселями 3 і 4 вимірюються датчиком 7. Напруга від датчиків 6 та 7 через підсилювач 8 та аналогово-цифровий перетворювач 10 подається і реєструється на комп'ютері 11. Сигнал від датчика тиску 7 поступає на контролер 12, який обробляє цей сигнал за спеціальною програмою і визначає напругу  $U_a$ , яка через підсилювач 9 подається на електромагніт регулятора 2.

На виході насоса 1 встановлено запобіжний клапан 17. Величин тиску і гідролініях гідропривода контролюються манометрами 17, 18 та 19. Робоча рідина від гідромотора 5 зливається в бак 16. У баку 16 встановлено термометр 13. За допомогою регульованого дроселя 3 можна змінювати подачу насоса 1, що подається до гідромотора 5. За допомогою регульованого дроселя 4 можна змінювати величини тисків  $p_c$  та  $p_n$ , що імітує зміну навантаження в гідроприводі.

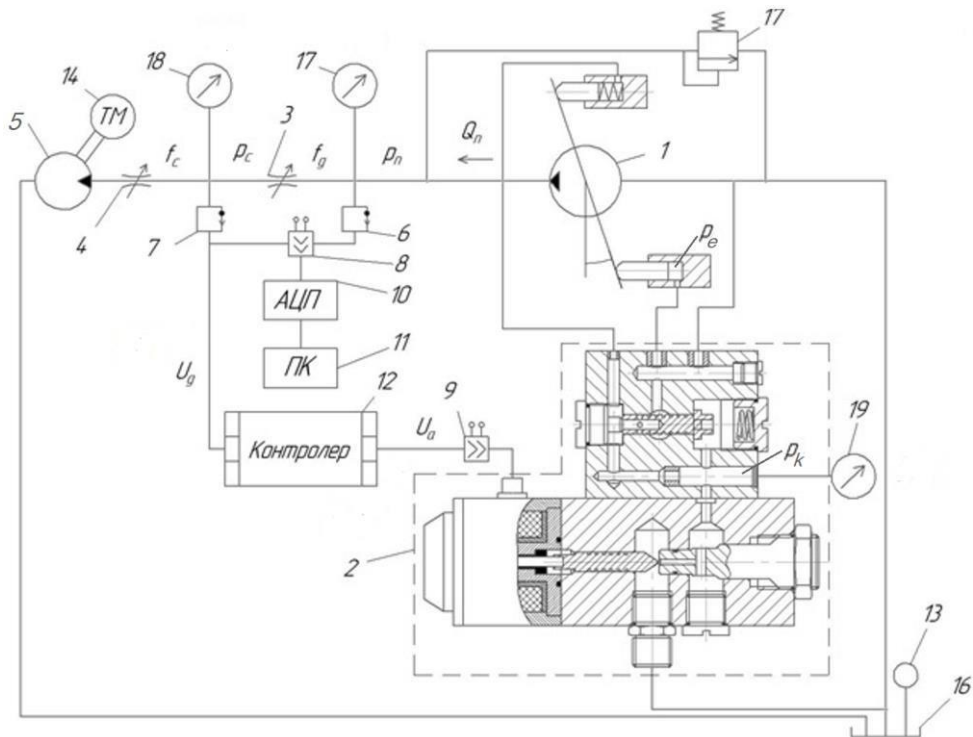


Рис. 1 – Схема гідропривода чутливого до навантаження

За рахунок контролера 12 можна змінювати коефіцієнт передачі ланцюга зворотного зв'язку від датчика 7 до електромагніту електрогідралічного регулятора. Це забезпечує можливість корегування статичної характеристики гідропривода. Статичною характеристикою гідропривода є залежність частоти обертання вала гідромотора 5  $n_m$  від величини тиску  $p_c$ .

На рис. 2 представлено фото електрогідралічного регулятора насоса. Регулятор складається з таких основних частин: пропорційний електромагніт типу MFZ – 1, корпус 2 сервоклапана, сервоклапан 3, корпус 4 золотника регулятора, золотник 5 регулятора.

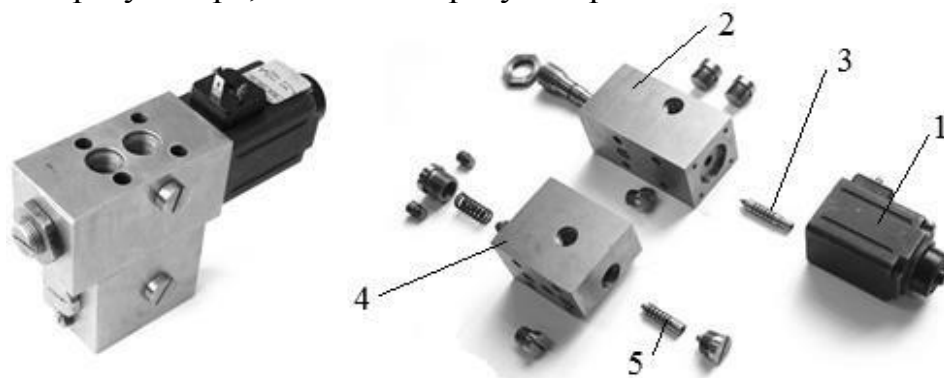


Рис. 2 – Фото електрогідралічного регулятора насоса

При надходженні сигналу напруги на електромагніт 2 (див. рис. 1) він переміщує сервоклапан 3 змінюючи тиск під торцем золотника 5. Золотник, що знаходиться під дією пружини, а також тисків  $p_n$  з виходу насоса та тиску  $p_k$  від сервоклапана буде формувати тиск  $p_e$  в сервоциліндрі насоса, який визначає подачу насоса 1.

На рис. 3 представлено фото експериментального стенда для досліджень гідропривода чутливого до навантаження. Стенд включає насос 1 з електрогідравлічним регулятором. На плиті 7 змонтовано гідромотор 2, регульовані дроселі 3 та 4, запобіжний клапан 5. Стенд оснащений аналогово-цифровим перетворювачем 6 типу L-CARD E14-140 OM, персональним комп'ютером 9, також датчиками тиску Nagano SML-200, підсилювачем, блоком живлення 8, контролером та манометрами.



Рис. 3 – Фото експериментального стенда

На експериментальному стенді представлено на рис. 3 проведено пошук значень величини сигналу  $x_i$  на виході контролера 12 в залежності від величини тиску  $p_c$  на вході в гідромотор 5. Значення величин сигналу  $x_i$  знаходилось за такої методикою.

Налаштовувалось за допомогою регульованого дроселя 3 значення частоти обертання вала гідромотора рівне  $n_{m0} = 990$  об/хв при значенні тиску  $p_{c0} = 2,0$  МПа та  $x_0 = 100$ .

Налаштовувалось значення  $p_{c1} = 2,0$  МПа та в програмі керування контролером змінювалось значення  $x_1$  таким чином, щоб число обертів гідромотора  $n_1$  не перевищувало значення  $n_0$ , більше ніж на 10 об/хв.

Дослід повторювався в діапазоні зміни  $p_c = 4,0 \dots 11,0$  МПа і фіксувались  $x_i$  за умови виконання  $n_i = n_{i-1} - 10$ .

На рис. 4 представлено залежність величини сигналу  $x$  на виході контролера від величини тиску  $p_c$  на вході регульованого дроселя. На основі знайденої залежності  $x = f(p_c)$  створена програма в середовищі IDE для контролера Arduino ATmega 2560, який застосований для керування гідроприводом. Текст програми представлено нижче.

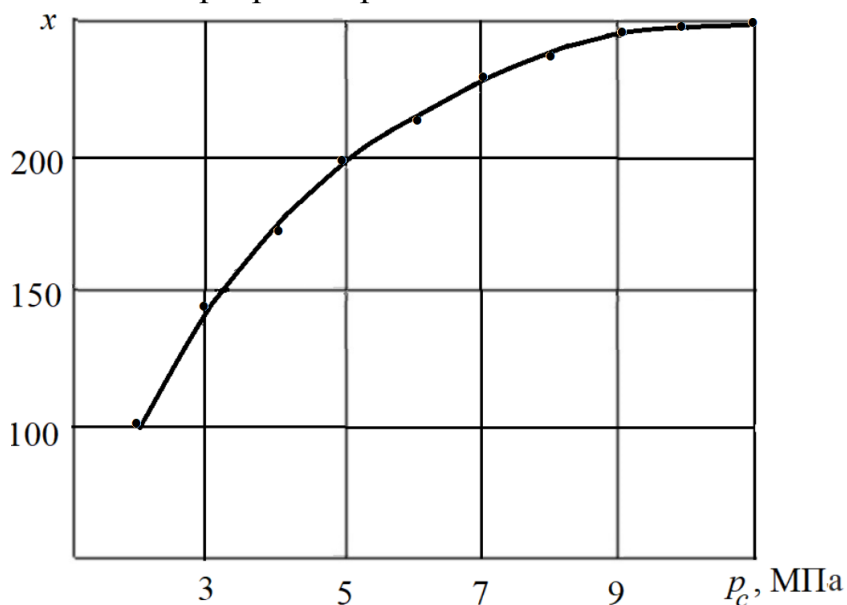


Рис. 4 – Залежність величини сигналу  $x$  на виході контролера від величини тиску  $p_c$

```

const int analogInPin=A0;
const int analogOutPin=3;
int x=0;
int outputValue=0;
void setup() {
  Serial.begin(9600);}
void loop() {
  x=analogRead(analogInPin);
  if(100>=x){outputvalue=100;analogWrite(analogOutPin,outputValue);}
  if((200>=x)&&(x>100){outputvalue=138;analogWrite(analogOutPin,outputValue);}
  if((300>=x)&&(x>200){outputvalue=162;analogWrite(analogOutPin,outputValue);}
  if((400>=x)&&(x>300){outputvalue=198;analogWrite(analogOutPin,outputValue);}
  if((500>=x)&&(x>400){outputvalue=212;analogWrite(analogOutPin,outputValue);}
  if((600>=x)&&(x>500){outputvalue=230;analogWrite(analogOutPin,outputValue);}
  if((700>=x)&&(x>600){outputvalue=240;analogWrite(analogOutPin,outputValue);}
  if((800>=x)&&(x>700){outputvalue=243;analogWrite(analogOutPin,outputValue);}
  if((900>=x)&&(x>800){outputvalue=247;analogWrite(analogOutPin,outputValue);}
  if((1000>=x)&&(x>900){outputvalue=251;analogWrite(analogOutPin,outputValue);}
  Serial.print("sensor=");
  Serial.print(x);
  Serial.print("\t output=");
  Serial.println(outputvalue);
  delay(20);}

```

Із застосуванням розробленої програми виконано визначення статичної характеристики гідروпривода. Статична характеристика гідропривода  $n_m = f(p_c)$  визначено в діапазоні  $p_c$  від 2,0 до 11,0 МПа і представлено на рис. 5.

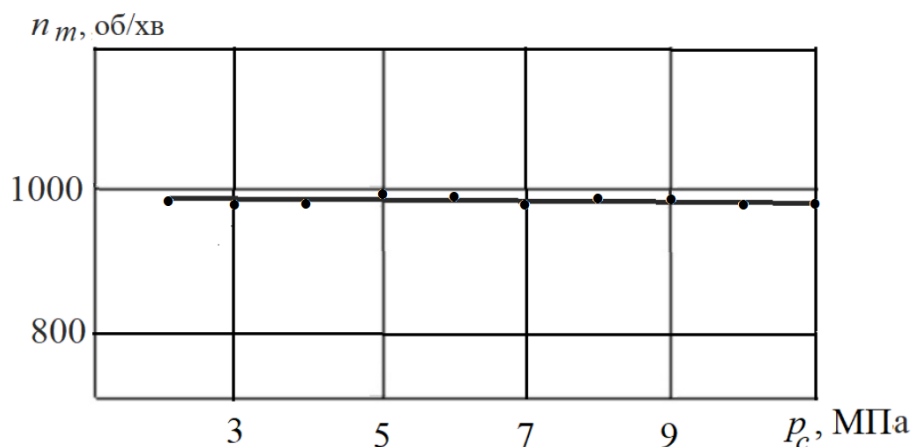


Рис. 5 – Статистична характеристика гідропривода чутливого до навантаження

По статичній характеристиці визначено похибку стабілізації А потоку через регульований дросель 4 за формулою

$$\square = \frac{n_0 - n_1}{n_0} \cdot 100 \%,$$

де  $n_0$  – частота обертання вала гідромотора при  $p_c = 2,0$  МПа;  
 $n_1$  – частота обертання вала гідромотора при  $p_c = 11,0$  МПа.

В даному експериментальні була досягнута похибка стабілізації, що не перевищувала  $A < 4,2$  %. Для порівняння, для гідропривода чутливого до навантаження на базі регульованого насоса та контролера представленого в роботі [10], похибка стабілізації потоку перевищувала 6,2 %.

### Висновок

На основі експериментів по дослідженню гідропривода чутливого до навантаження визначена залежність вихідного сигналу контролера від величини тиску. Створена програма керування гідроприводом на основі цієї залежності, що дозволяє покращити статичну характеристику гідроприводу. Для розглянутого гідропривода похибка стабілізації величини потоку не перевищує 4,2 % при зміні тиску навантаження в діапазоні 2,0...11,0 МПа.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. *Ding, R.; Zhang, J.; Xu, B.; Cheng, M.; Pan, M. Energy efficiency improvement of heavy-load mobile hydraulic manipulator with electronically tunable operating modes. Energy Conversion and Management, 188, pp. 447-461, (2019), doi:10.1016/j.enconman.2019.03.023*
2. *Leonid G. Kozlov, Volodymyr V. Bogachuk, Victor V. Bilichenko, Artem O. Tovkach, Konrad Gromaszek, and Samat Sundetov "Determining of the optimal parameters for a mechatronic hydraulic drive", Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications,*

- Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018, 1080861 (1 October 2018), 10 pages; doi: 10.1117/12.25015280861*
3. Volodymyr V. Bogachuk, Leonid H. Kozlov, Artem O. Tovkach, Valerii M. Badakh, Taras V. Tarasenko, Yevhenii O. Kobylanskyi, Zbigniew Omiotek, Gauhar Borankulova, Aigul Tungatarova «Influence of electrohydraulic controller parameters on the dynamic characteristics of a hydrosystem with adjustable pump», *Collective Monograph: "Mechatronic Systems 1: Applications in Transport, Logistics, Diagnostics, and Control, pp. 267–278", 1st Edition // Leonid K. Polischuk, Waldamar Wojcik. London: Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book, 2021 – 420 P.*
  4. [Kozlov, L.](#), [Bilichenko, V.](#), [Kashkanov, A.](#), [Tovkach, A.](#), [Kovalchuk, V.](#) *Parametric Synthesis of Electrohydraulic Control System for Variable Displacement Pump Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2023, pp. 48–57*
  5. Lovrec, D.; Detiček, E. Improvement of the statical behaviour of pressure controlled axial piston pumps. *J. Mech. Eng.*, 55(12), pp.766-774, (2009).
  6. Mondal, N.; Saha, R.; Sanyal, D. A single stage spool valve for the pressure compensator of a variable displacement pump: design, dynamic simulation and comparative study with a real pump. *Sādhanā*, 47(4), p. 279, (2022), doi:10.1007/s12046-022-02038-3
  7. Kumar Hati, S.; Pada Mandal, N.; Sanyal, D. Energy-saving design of variable-displacement bi-directional pump-controlled electrohydraulic system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 235(7), pp.1218-1236, (2021), doi:10.1177/0959651820973898
  8. Quanyi, H.; Hong, Z.; Shujun, T.; Xuxin, Q. Performances analysis of a novel load-sensing hydraulic system with overriding differential pressure control. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 231(23), pp. 4331-4343. (2017), doi:10.1177/0954406216667760
  9. Mondal, N.; Saha, R.; Mookherjee, S.; Sanyal, D. A novel method to design pressure compensator for variable displacement axial piston pump. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 233(2), pp. 314-334, (2019), doi:10.1177/0954408918783409
  10. Козлов Л. Г. Наукові основи розробки систем гідроприводів маніпулятора з адаптивним регулятором на основі нейромереж для мобільних робочих машин / дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук: спец 05.02.02 // Вінницький національний техн. університет, Вінниця, 2015.



**Трегубов В.О., Соколовський М.С., Ницимайло В.О.,** науковий керівник: к.т.н. Піонткевич О.В. (Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна)

## **УДОСКОНАЛЕННЯ ГІДРОПРИВОДІВ МОБІЛЬНИХ РОБОЧИХ МАШИН ПРОПОРЦІЙНОЮ ГІДРОАПАРАТУРОЮ ТА МІКРОКОНТРОЛЕРОМ**

***Анотація:** Проведено аналіз літературних джерел з перспективою удосконалення гідроприводів мобільних робочих машин. У роботі розглянуто сучасні технології у гідроприводах та ефект від роботи пропорційної гідроапаратури. Проаналізовано вплив мікроконтролера на функціональність та ефективність гідроприводів, а також описано процес проектування системи керування гідроприводами з мікроконтролером.*

***Abstract:** An analysis of literary sources with the perspective of improving the hydraulic drives of mobile working machines was carried out. The work examines modern technologies in hydraulic drives and the effect of proportional hydraulic equipment. The influence of the microcontroller on the functionality and efficiency of hydraulic drives is analyzed, and the process of designing a control system for hydraulic drives with a microcontroller is described.*

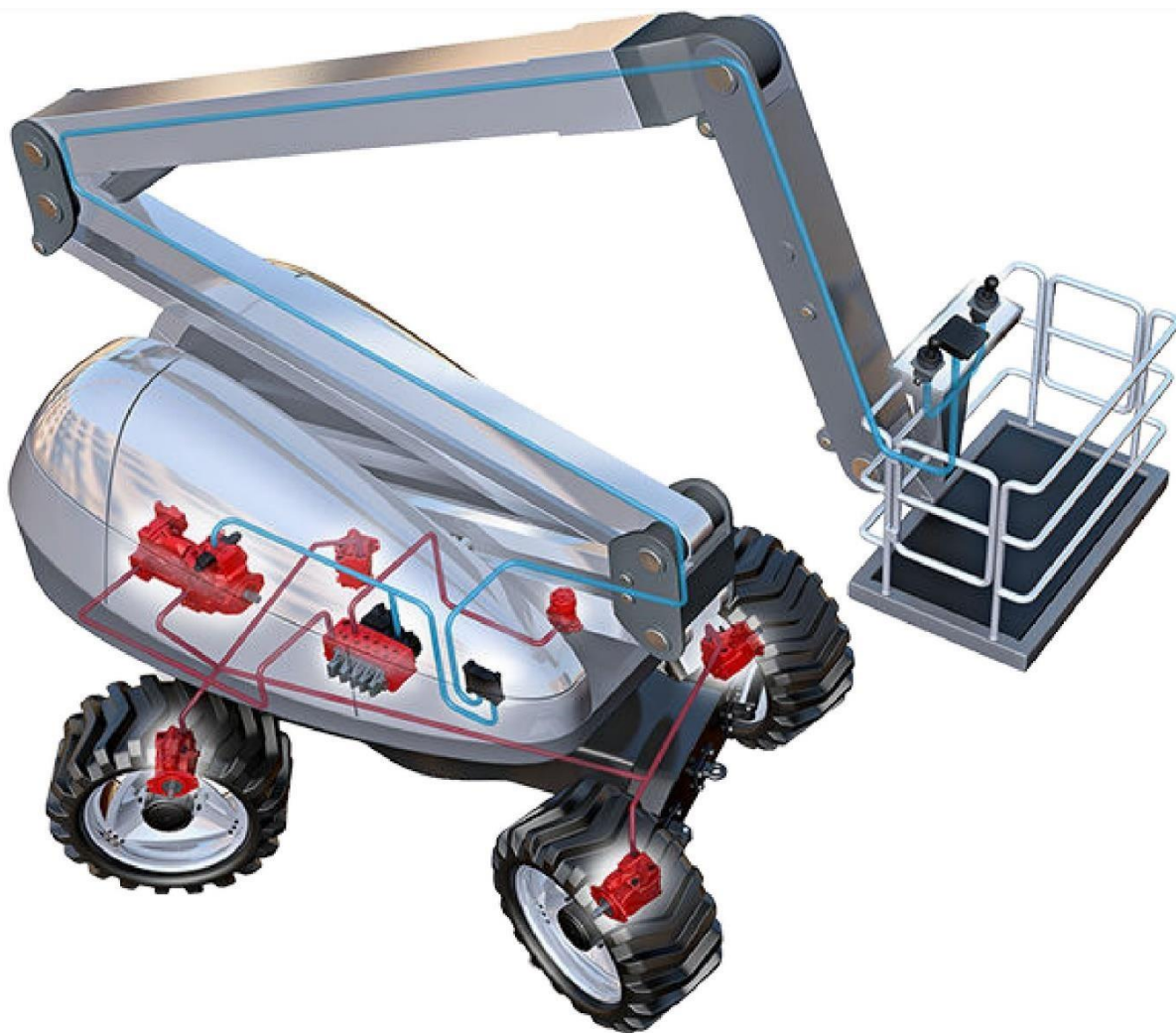
*Постановка проблеми в загальному вигляді.* На сьогоднішній день штучний інтелект та високі вимоги до роботизації відкривають безліч можливостей і задач для оптимізації та удосконалення гідроприводів [1-4]. Перш за все це удосконалення приводів механізмів, на основі гідроприводу, які часто використовуються у мобільних робочих машинах через численну кількість переваг [5-10]. Крім цього гідроприводи використовуються в різних сферах: будівництві, сільському господарстві, машинобудуванні, гірничодобувній промисловості та інші [11-14]. Особлива увага приділяється ефективній роботі, а саме: забезпечення високої продуктивності та надійності обладнання [15-20].

Одним з найперспективніших напрямків удосконалення гідроприводів є використання пропорційної гідравліки та мікроконтролерів [21-24]. Це забезпечує точне і плавне керування виконавчими органами, знижує енергоспоживання та підвищує продуктивність. Дослідження в області пропорційної гідроапаратури та мікроконтролерів показують великий потенціал їх використання для підвищення ефективності та надійності гідроприводів. Впровадження цих технологій сприятиме підвищенню конкурентоспроможності мобільних робочих машин.

*Основний матеріал.* Існує широкий вибір технологій в області гідроприводів для мобільних робочих машин. Вони варіюються від простих релейних систем керування до складних – пропорційних. Однак, сучасні технології потребують використання мікроконтролерів для оптимізації роботи гідроприводів, альтернативних джерел енергії та акумуляторів великої ємності, наявність інтеграції з системами штучного інтелекту.

Однак, прості релейні системи керування не дозволяють ефективно реагувати на раціональні команди мікроконтролерів, тому в подальшому варто орієнтуватися лише на складні пропорційні системи керування.

Пропорційна гідروапаратура дозволяє точно контролювати потік гідравлічної робочої рідини до виконавчих органів, зменшує втрати потужності і кращу динаміку реакції. Продемонстровано систему керування гідроприводами від джойстика через мікроконтролер на пропорційну гідроапаратуру для підйомника на рис. 1 [25].



*Рис. 1. Приклад системи керування для підйомника (Danfoss)*

Використання мікроконтролера у системах керування гідроприводами значно покращує їх функціонування та ефективність у ряді важливих аспектів:

- точність управління: мікроконтролер здатний виконувати точні розрахунки і алгоритми управління, забезпечуючи точне і стабільне управління гідроприводами.
- адаптація до мінливих умов: програмовані функції управління дозволяють мікроконтролеру адаптуватися і оптимізувати вихідний сигнал до різних умов експлуатації та змінних параметрів.
- моніторинг і діагностика: мікроконтролер може безперервно

контролювати гідропривод і діагностувати його стан. Це дозволяє виявити потенційні проблеми і вчасно вжити коригувальних заходів, підвищуючи надійність системи.

- енергоефективність: мікроконтролер використовується також для реалізації різних стратегій управління, які знижують енергоспоживання гідроприводів. До них відносяться оптимізація робочих циклів, контроль швидкості насосів та інші методи енергозбереження.

- інтеграція з іншими системами: мікроконтролер легко інтегрувати з іншими електромеханічними системами керування, такими як навігація, автоматичне керування та системи моніторингу. Це створює можливості для розширення функціональності та автоматизації мобільних робочих машин.

В цілому, використання мікроконтролерів в гідроприводах для мобільних машин підвищує гнучкість управління, точність і надійність, що призводить до підвищення ефективності та продуктивності.

Проектування та розробка систем керування гідроприводами на базі мікроконтролерів – це складний багатоетапний процес, що вимагає ретельного аналізу, проектування, програмування та тестування.

Першим кроком є ретельний аналіз вимог до системи. Це включає визначення функціональних і технічних вимог, а також врахування обмежень і особливостей конкретного застосування. На основі системних вимог обирається відповідний мікроконтролер. При виборі необхідно враховувати: обчислювальну потужність, кількість виводів, можливість розширення та інші технічні характеристики.

Наступний етап – це етап апаратного проектування. На цьому етапі мікроконтролер підключається до гідроприводів і компонентів системи, таких як датчики і пропорційні клапани. Розробляється програмне забезпечення для мікроконтролера, яке включає алгоритми управління, обробку даних з датчиків, зв'язок з іншими системами мобільної робочої машини.

Після цього слідує етап реалізації та програмування. На цьому етапі програмне забезпечення реалізується на обраному мікроконтролері. Розробка включає написання коду, тестування на симуляторі та практичне програмування мікроконтролера. Після того, як система реалізована, проводиться тестування її продуктивності та надійності. Це включає тестування на реальних об'єктах і налагодження системи для вирішення проблем і помилок. Після успішного тестування система впроваджується у виробництво. Крім того, протягом усього життєвого циклу системи керування з мікроконтролером, як правило, необхідна технічна підтримка та обслуговування.

Встановлення та тестування системи керування з мікроконтролером на реальному об'єкті є важливим кроком у перевірці її продуктивності, ефективності та надійності в реальних умовах. Ключовими кроками можуть бути: забезпечення відповідних умов для тестування, включаючи встановлення складних систем на мобільній машині; підключення необхідних датчиків і засобів збору даних, а також встановлення зв'язку з мікроконтролером або системою керування; перевірка основних функцій системи керування, таких як управління гідроприводами, реакція на команди оператора та перевірка систем безпеки та захисту; випробування системи керування під реальним навантаженням для перевірки її

продуктивності та ефективності в різних умовах експлуатації.

Підчас тестування зазвичай збирають дані для подальшого аналізу якості та реакції системи керування на різні ситуації. Це включає в себе збір даних з датчиків і запис подій, усунення несправностей і оптимізація системи керування для підвищення ефективності та надійності. Успішне завершення тестування системи керування підтверджує, що вона відповідає всім вимогам та очікуванням.

*Висновки.* Загальна оцінка ефективності гідроприводів для мобільних робочих машин показує, що застосування більш дорожчої пропорційної гідроапаратури є обґрунтованим та підвищує продуктивність і знижує енергоспоживання. На сучасному етапі удосконалення гідроприводів розробляють системи керування на базі мікроконтролера, які забезпечують більшу точність керування, підвищуючи надійність і знижуючи ризик поломки, а також дозволяють ефективно інтегрувати штучний інтелект та інші системи мобільної робочої машини.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Лозінський Д.О. Оптимізація електрогідравлічного розподільника з незалежним керуванням потоків / Д.О. Лозінський, Л.Г. Козлов, О.В. Пionткевич, О.І. Кавецький // Вісник машинобудування та транспорту, 2023. – №17(1). – С. 87-91. DOI: 10.31649/2413-4503-2023-17-1-87-91
2. Kozlov L. Optimization of design parameters of the counterbalance valve for the front-end loader hydraulic drive / L. Kozlov, Yu. Burennikov, O. Piontkevych, O. Paslavskaya // Proceedings of 22nd International Scientific Conference «MECHANIKA 2017». – Kaunas University of Technology, Lithuania, 19 May 2017. – P. 195 – 200.
3. Kozlov L. Optimization of Design Parameters of a Counterbalance Valve for a Hydraulic Drive Invariant to Reversal Loads / L. Kozlov, L. Polishchuk, O. Piontkevych, V. Purdyk, O. Petrov, V. Tverdomed, A. Tungatarova // Mechatronic Systems, W. Wójcik, S. Pavlov, and M. Kalimoldayev, eds., Vol. 1, Routledge, London, 2021 pp. 137–148. DOI: 10.1201/9781003224136-12
4. Sun H, Tao J, Qin C, Yu H, Xu S, Zhuang Q, Liu C. Optimal energy consumption and response capability assessment for hydraulic servo systems containing counterbalance valves / H Sun, J Tao, C Qin, H Yu, S Xu, Q Zhuang, C Liu // Journal of Mechanical Design; 145(5):053501, 2023. – P. 15. DOI: 10.1115/1.4056497
5. Polishchuk, L. & Khmara, O. & Piontkevych, O. & Adler, O. & Tungatarova, A. & Kozbakova, A. Dynamics of the conveyor speed stabilization system at variable loads. Informatyka, Automatyka, Pomiarы W Gospodarce i Ochronie Środowiska. 2022. Vol. 12. No. 2. P. 60-63. DOI: 10.35784/iapgos.2949
6. Пionткевич О. В. Математична модель гідроприводу фронтального навантажувача з гальмівним клапаном / О. В. Пionткевич. – Вінниця : Вісник машинобудування та транспорту, 2015. – №2. – С. 83 – 90.
7. Березюк О.В. Огляд конструкцій машин для збирання та первинної переробки твердих побутових відходів // Вісник машинобудування та транспорту. – 2015. – № 1. – С. 3-8.
8. Коц І.В., Березюк О.В. Вібраційний гідропривод для пресування промислових відходів // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. – № 5. – С. 146-149.
9. Березюк О.В. Математичне моделювання динаміки гідроприводу робочих органів завантаження твердих побутових відходів у сміттєвози // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2009. – № 4. – С. 81-86.
10. Polishchuk L. K., Piontkevych O. V., Dynamics of adaptive drive of mobile machine belt conveyor, 22nd International Scientific Conference «MECHANIKA 2017», Kaunas

University of Technology, 19 May 2017, 307-311

11. Березюк О.В. Розробка та дослідження нової структури екологічної машини для очистки населених пунктів від твердих відходів // Сучасні технології, матеріали і конструкції у будівництві. – 2008. – № 1. – С. 92-98.

12. Березюк О.В. Науково-технічні основи проектування приводів робочих органів машин для збирання та первинної переробки твердих побутових відходів: автореф. дис. д-ра техн. наук. – Хмельницький, 2021. – 46 с.

13. Дерібо О.В. Електрогідравлічний стежний привод пристрою для обробки поверхневим пластичним деформуванням / О.В. Дерібо, О.В. Сердюк, І.О. Сивак // Вісник Вінницького політехнічного інституту: ВНТУ. – 2010. – №6. – С. 76-79

14. Муращенко А. М. Розрахунок мобільних приводів машин / А. М. Муращенко, О. М. Яхно, О. П. Губарев, В. Г. Василюк, М. Коваленко // Problems of Friction and Wear. – 2019. – Vol. 3(84). P. 83 – 89

15. Березюк О.В. Планування багатофакторного експерименту для дослідження вібраційного гідроприводу ущільнення твердих побутових відходів // Вібрації в техніці та технологіях. – 2009. – № 3 (55). – С. 92-97.

16. Petrov O. Improvement of the hydraulic units design based on CFD modeling. / O. Petrov, L. Kozlov, D. Lozinskiy, O. Piontkevych// In: Lecture Notes in Mechanical Engineering XXII, 2019. – P. 653–660. DOI: 10.1007/978-3-030-22365-6\_65

17. Березюк О.В. Дослідження динаміки гідроприводу вивантаження твердих побутових відходів із сміттєвозів // Машинознавство. – 2008. – № 10 (136). – С. 25-28.

18. Березюк О.В. Дослідження динаміки гідроприводу робочих органів завантаження твердих побутових відходів у сміттєвози // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2009. – № 33. – С. 403-406.

19. Савуляк В.І., Березюк О.В. Дослідження динаміки приводу плити для пресування твердих побутових відходів // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2002. – № 4. – С. 83-86.

20. Пionткевич О.В. Про лазерний технологічний комплекс на машинобудівному підприємстві / О. В. Пionткевич, С. І. Сухоруков, О. В. Сердюк, В. М. Домославський // Вісник машинобудування та транспорту, 2022. - № 16(2). – С. 96-100. DOI: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2022-16-2-96-100>

21. Козлов Л. Характеристики мехатронного приводу під час просторового руху маніпулятора / Л. Козлов, С. Репінський, О. Паславська, О. Пionткевич // Наукові праці Вінницького національного технічного університету, 2017. – № 2. – 9 с. Електронний ресурс: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/507>

22. Перепелиця В.І. Система управління на базі контролера для керування швидкістю руху каретки установки для формування заготовок цегли / В. І. Перепелиця, Л. Г. Козлов // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві, 2023. - №34. С. 190-196. DOI: 10.31649/2311-1429-2023-1-190-196

23. L. Kozlov, Y. Buriennikov, O. Rusu, V. Pyliavets, V. Kovalchuk, O. Petrov, I. Rusu, “Algoritm of controlling an adaptive hydraulic circuit for mobile machines”, International Journal of Modern Manufacturing Technologies, vol. XIII, no. 3, pp. 79- 86, Desember. 2021. <https://doi.org/10.54684/ijmmt.2021.13.3.79>

24. Л. Козлов, Ю. Буренніков, В. Пилявець, А. Товкач, Д. Проценко, “Визначення динамічних характеристик контролера та підсилювача пропорційного електромагніта”, Матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту», Вінниця, 13-15 травня 2021 р. – Електрон. текст. дані. – Вінниця, 2021. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/prmt/pmrt2021/paper/viewFile/13385>

25. Каталог фірми Danfoss "Proportional Valve Group PVG32" від 2017 року. Режим доступу: <https://www.bibus.sk/fileadmin/editors/countries/bibusk/Suppliers/Danfoss/documents/danfoss-pvg-32.pdf>

**Хворостухіна М.Л.**, науковий керівник Беш А.М. (Загально-освітня школа №17, м. Краматорськ, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна)

## ІНФОРМАЦІЙНА МОДЕЛЬ АНТИГРАВІТАЦІЙНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ

**Анотація:** Розглянуто історичні аспекти винаходу антигравітаційного двигуна при дослідженні принципів польоту та процесів, що їх утворюють у світі комах. Дана систематизована оцінка можливості застосування цього принципу при побудові літальних апаратів у найближчому майбутньому.

**Abstract:** The historical aspects of the invention of the anti-gravity engine are considered while studying the principles of flight and the processes that create them in the world of insects. This is a systematic assessment of the possibility of applying this principle in the construction of aircraft in the near future.

Сучасне використання вуглеводнів у транспорті тягне у себе забруднення довкілля, особливо у морському і авіаційному. Вирішення цієї проблеми можна знайти в альтернативних ідеях щодо реалізації нових двигунів, заснованих на принципах використаних комахами в природі. Антигравітація це енергія в гравітаційному полі планети, при обертанні врівноваженої системи матеріальних точок, під дією відцентрових сил інерції виникає компонента, спрямована вздовж осі обертання системи, тобто маса, що притягується до Землі не по вертикалі, а з урахуванням кривизни гравітаційного поля, деяким кутом до неї. Однією з творців антигравітаційних апаратів став В.С.Гребенников [1-3], (Рис. 1).



Рис. 1 – В.С.Гребенников

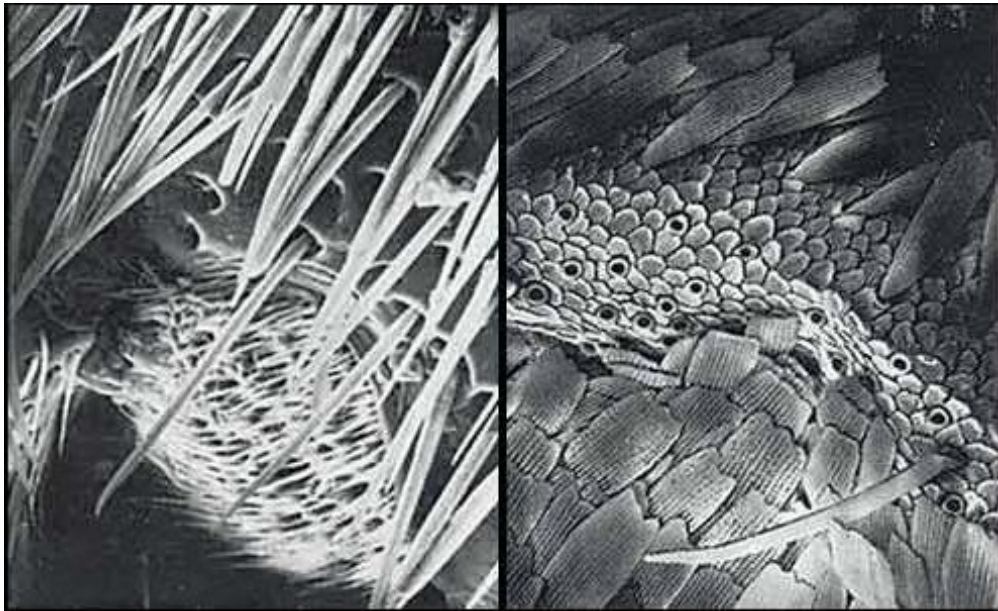
В.С.Гребенников був ентомологом, який вивчав різних комах та його будову. Влітку 1988 року, розглядаючи під мікроскопом покрови комах (Рис.

2), перисті їх вусики, найтонші за структурою лусочки крил метелика з райдужними та ажурними переливами златоочок та інших. Він побачив незвичайну структуру надкрила цієї комахи. Раніше, як каже сам Гребенников «Я не зустрічав такого ні в природі, ні в техніці чи мистецтві». Потім ентомолог заподозрив, що може бути це хвильовий маяк – спеціальний пристрій, що випускає деякі хвилі і імпульси. Якщо це хвильовий маяк, то він повинен мати ефект багатопорожнинних структур подумав Гребенников.

Це була надзвичайно впорядкована, ніби виштампована на якомусь складному автоматі за спеціальними кресленнями та розрахунками, композиція, на мій погляд, ця ні з чим не порівняна пористість явно не була потрібна ні для міцності цієї деталі, ні Нічого такого, навіть віддалено нагадує цей незвичний дивовижний мікро візерунок, я не спостерігав ні в інших комах, ні в іншій природі, ні в техніці чи мистецтві, тому, що він об'ємно багатомірний, повторити його на плоскому малюнку або фото мені досі не вдалося. "

Найбільш вражаючий супутній феномен даного явища - це феномен повної або часткової невидимості або спотвореного сприйняття матеріального об'єкта, що знаходиться в зоні компенсованої гравітації.

На основі цього відкриття, з використанням біонічних принципів, автор сконструював і побудував антигравітаційну платформу, а також практично розробив принципи керованого польоту зі швидкістю до 25 км/хв. З 1991-92 року пристрій використовувався автором як швидкого пересування.



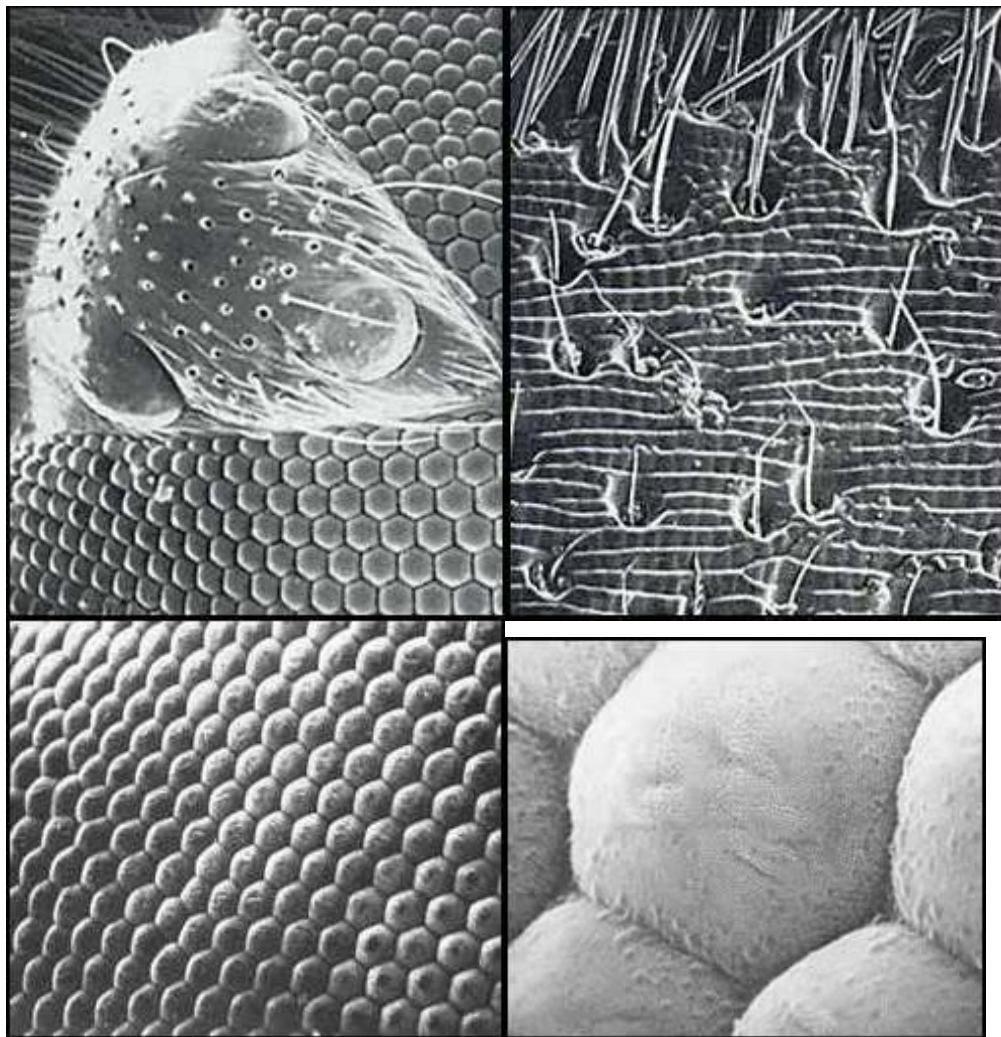


Рис. 2 – Порожністі структури крил комах

Найбільш вражаючий супутній феномен даного явища - це феномен повної або часткової невидимості або спотвореного сприйняття матеріального об'єкта, що знаходиться в зоні компенсованої гравітації.

Мета роботи – побудувати інформаційну модель антигравітаційного апарату.

Об'єкт дослідження - комахи з відсутністю аеродинамічних особливостей свого тіла.

Предмет дослідження – принцип утворення антигравітаційного ефекту у порожнинних структурах.

Спробуємо систематизувати. Отже, Гребенніков підглянув конструкцію в надкрилах у якогось комах. Всі чомусь вважають, що це або златка, або бронзування. Можливо... До речі, хто і чому запустив таке неочевидне припущення? Мені здається, що цих комах, звідки можна взяти принцип гравітації, набагато більше (Рис. 3). Є ціла хмара жуків, які нібито не можуть літати в принципі, якщо спиратися на класичну аеродинаміку. Класичний приклад: травневий жук - занадто важкий для польотів (проте є комахи, що літають, і набагато більше!).



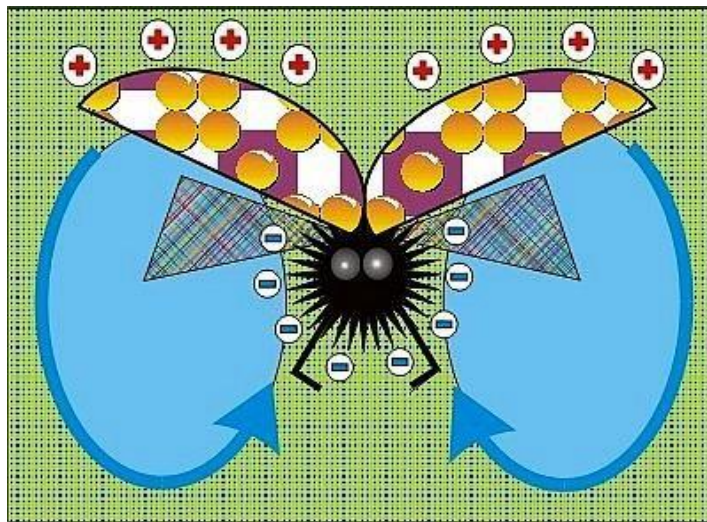


Рис. 3 – Антигравітаційні сили комах

Загалом я хочу підвести теорію, що деякі комах (а може всі?) літають не зовсім так, як про це прийнято думати. Можливо комах "використовують" ефект Біфельда-Брауна (рух зарядженого конденсатора у бік позитивного електрода), накладений на вихровий принцип? Як жарти пропоную таку картинку гіпотетичної комах в польоті. Живий Репульсин Шаубергера у чистому вигляді.

Впевнена, що хоч спочатку Гребенников і побачив, що надкрила деякої комах мають "антигравітаційні" властивості (приблизно в кілька грамів?), навряд чи він міг виготовити свої блок-панелі, поєднавши разом кілька тисяч таких надкрил. Не та людина, щоб занепасти стільки комах. Платформа Гребенникова - це простий і надійний технічний пристрій, що використовує принцип "роботи" надкрил.

Пристрій одночасно простий і функціонально надійний, як і все, що робить природа - наприклад вихор. Бронзівка або златка... Непогана назва для комах, що претендують на прототипи основоположників антигравітації. Тільки швидше за все цією комахою був ...мертвоїд! Доводиться розвінчувати гарні легені. Дивіться на наступну фотографію з музею Гребенникова. Цей стенд весь час висів над моделлю платформи. Вочевидь недарма. Мабуть поглиблення з волоском по центру – і є основа конструкції осередку платформи Гребенникова.

Але набагато цікавіше зробити все це в обсязі [4-6]. Пропоную нижченаведений поперечний розріз "килима-літака". Моторчик з ексцентриком - це своєрідний стартер (аналог дзижчання комах). Саме дзижчання комах - це звичайна вібрація, необхідна для отримання стартових статичних зарядів. А ще вібрацією можна легко отримати обертання в осередках навколо волосків. Є яскравим аналог таких перетворень коливань у обертання - це коли ви виливаєте брудну воду з відра. волосинка. Подаємо кілька кіловольт напруги - на волосинки "мінус", на площину "плюс". Навколо волосинки з'являється "іонний вітер", що поступово переходить у вихор. Вимикач – це гальмо. Скetch у такому вигляді - гаданий пристрій платформи ВСГ:

На віяловій лінійці платформи розміри таких осередків приблизно 25-30 мм. Електрично осередки з'єднані паралельно. Напруга джерела для старту близько 50 кв. Конденсатор (змахує на торт "Наполеон") - ємність

неважливо, головне підвищене робоче напруження (може бути виготовлений з декількох десятків листків фольги прокладених папером і залитих епоксидкою - хоча є ще більш цікаві варіанти). Сусідні міні-вихори осередків обертаються в протилежні сторони, "допомагаючи" один одному. На променях зірочок відбувається концентрація електричного потенціалу.

1. По суті це концентратор енергії (або вихровий МГД-генератор-двигун з можливістю самопідтримки за рахунок поглинання теплової енергії середовища (Рис. 4,5)). Трубка Ранка, вивернута своєю "теплою" частиною в довкілля.

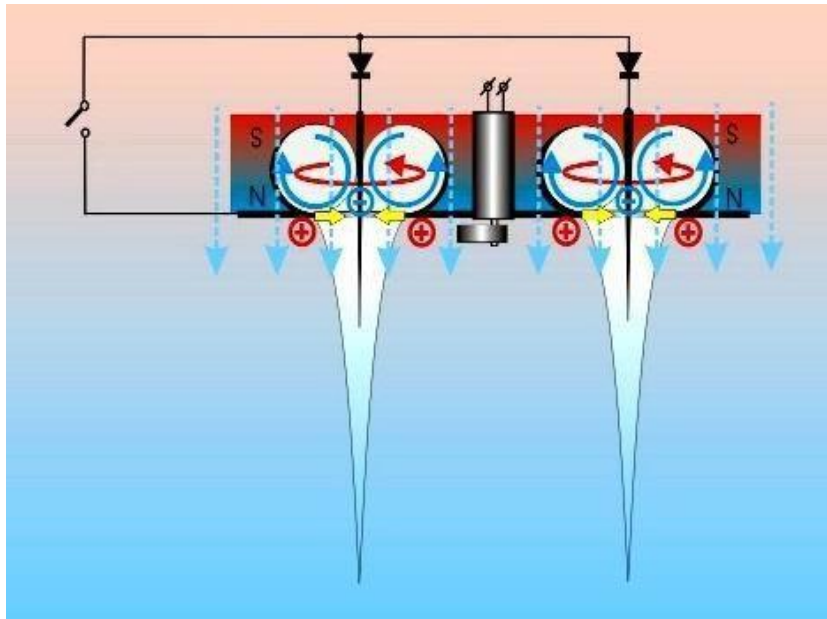


Рис. 4 – МГД-генератор-двигун

2. Левітуючий пристрій (якщо перевернути). Це може бути повноцінний транспортний засіб для 3D і апарат 2D типу судна на повітряній подушці.

3. Пристрій для бездротової передачі енергії (рух заряджених частинок вздовж центрального джгута вихору).

4. Електронно-променева гармата з емісією електронів уздовж джгута вихору (вихор як корпус телевізійної трубки?)

5. Можливо приблизно на таких принципах працювало джерело енергії на знаменитому автомобілі Tesla. Рекомендую покопатися в його атентах, які я собі назвав "принцип вихрової лампочки".

## Рис. 5 – Гіпотетична структура осередків платформи Гребенникова

Висновки. Враховуючи той факт, що Гребенников зміг побудувати антигравітаційну платформу, можна дійти невтішного висновку, що подальше вивчення світу комах може кардинально змінити найближче майбутнє людства. Побудова літальних апаратів на принципах антигравітації зведе нанівець використання транспорту, що спалює вуглеводні. Наслідком цього станеться очищення довкілля, що збільшить термін життя кожної людини. І найголовніше, світ використовуватиме транспорт, який буде не лише екологічним, а й швидшим.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- 1 <http://gltrs.grc.nasa.gov/reports/2006/TM-2006-214390.pdf>
- 2 [https://en.wikipedia.org/wiki/Biefeld–Brown\\_effect](https://en.wikipedia.org/wiki/Biefeld–Brown_effect)
- 3 <https://www.marca.com/en/lifestyle/us-news/2022/04/11/>

**Чурсов С.О., Дмитрієв Д.О.** (Херсонський національний технічний університет, Херсон, Україна)

## **ПРОГНОЗУВАННЯ УМОВ НАКОПИЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОШКОДЖЕНЬ ТА ПОКАЗНИКІВ ВТОМНОЇ МІЦНОСТІ В МАТЕРІАЛАХ ПНЕВМАТИЧНИХ ШИН ЗА РАХУНОК СТЕНДОВИХ ВИПРОБУВАНЬ**

***Анотація:** Задача подовження ресурсу різнокомпонентних матеріалів пневматичних шин спрямована на зменшення експлуатаційних витрат шляхом підвищення ресурсних показників пневматичної шини за рахунок аналізу накопичення пошкоджень при експлуатації. Прогнозування експлуатаційної поведінки пневматичної шини надає значення для вдосконалення параметрів конструкції пневматичної шини та зменшення дефектів які впливають на ресурс.*

***Abstract:** The task of extending the service life of multi-component pneumatic tire materials is aimed at reducing operating costs by increasing the service life indicators of a pneumatic tire by analyzing the accumulation of damage during operation. Forecasting the operating behavior of a pneumatic tire is important for improving the design parameters of a pneumatic tire and reducing defects that affect the resource.*

*Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами.* В даній роботі пропонується та використано підхід щодо втомної міцності як циклових стендових навантажень, що відтворюють подолання перешкод різної геометрії та їх комбінацій з визначенням морфології пружних деформацій гумо-кордних конструкцій матеріалів шин узгоджених з дискретними значеннями механічних характеристик шин та порівнянням зі структурою матеріалу з відповідним ступенем накопичення пошкоджуваності.

*Аналіз останніх досліджень і публікацій.* В науковій літературі незначна кількість авторів приділяла увагу стендовим методам дослідження пневматичних шин, що відтворюють подолання перешкод різної геометрії та комбінацій з визначенням морфології пружних деформацій гумо-кордних конструкцій матеріалів за рахунок аналізу накопичення пошкоджень під час експлуатації.

Основні контрольовані показники деформативності пневматичних шин в цілому на сучасному етапі вивчають поза показниками якості матеріалу шин його ступеня накопичення пошкодження, використовуючи непрямі параметри впливу такі як тиск, геометрія плями контакту, шумові показники зусилля зчеплення, керованість.

В роботах авторів [1] розглядаються питання впливу структурних параметрів шини на показники втомної довговічності, шляхом моделювання за рахунок скінченно-елементної моделі конструкції пневматичної шини та аналізу локальних пошкоджень. Автори [2-4] проводили випробування на зносостійкість в залежності від тиску в шини.

Дослідження [5-7] спрямовані на визначення передумов утворення критичних пошкоджень пневматичних шин, які утворилися в результаті експлуатаційного зношення або в результаті заводського дефекту.

*Формулювання невирішених частин загальної проблеми.* Сучасними авторами недостатньо приділено увагу умовам роботи шини при подоланні перешкод, умов накопичення пошкоджень, які виникають під час експлуатації пневматичної шини, зокрема під час руху по складним дорожнім покриттям та суттєво впливають на зносостійкість матеріалів. При дослідженні впливу пошкоджень різного виду на механічні властивості шин розроблено стенд та методику досліджень властивостей шин при збільшенні кількості дефектів при зміні силових та структурних факторів.

В даній роботі пропонується та використано підхід щодо втомної міцності як циклових стендових навантажень, що відтворюють подолання перешкод різної геометрії та їх комбінацій з визначенням морфології пружних деформацій гумо-кордних конструкцій матеріалів шин узгоджених з дискретними значеннями механічних характеристик шин та співставленням із структурою матеріалу відповідного ступеню накопичення пошкоджуваності.

*Цілі статті та постановка задачі.* Метою роботи є удосконалення стендових випробувань спрямованих на дослідження морфології пружних деформацій гумо-кордних конструкцій матеріалів шин та співставленням із структурою матеріалу відповідного ступеню накопичення пошкоджуваності.

Постає задача розробки стенду для випробування пневматичних шин та методику оцінки механічних властивостей пневматичних шин зі штучно нанесеними пошкодженнями. Задача подовження ресурсу багатокомпонентних матеріалів пневматичних шин вирішується за рахунок використання рухомої керованої платформи як комбінації силових навантажень із різними значеннями та геометрією перешкод у місцях контакту за рахунок чого досягається технічний результат визначення ступеню пошкоджуваності матеріалу шини залежно від результатів навантаження та відтворення реальних умов експлуатації шини.

*Виклад основного матеріалу дослідження.* Стенд для випробування шин відтворює складні умови контакту колеса з поверхнею дорожнього покриття. За рахунок конструкції опорної поверхні колеса у вигляді системи приводних роликів малого діаметру задається висота та відстань розташування типових або найбільш поширених перешкод за рахунок чого можна передбачити і прогнозувати ступінь внутрішньої пошкоджуваності матеріалу шини (рис. 1).



Рис. 1 Залежність циклових стендових навантажень від втомної міцності

Механічні властивості еластичних матеріалів з різних компонентів шини досліджуються за допомогою експериментів із циклічним навантаженням і розвантаженням при різних швидкостях та деформації.

Випробувальний стенд дозволяє відтворювати умови експлуатації шини, в тому числі найбільш екстремальні з точки зору вертикального навантаження, кута заносу і швидкості, призначений для динамічних випробувань пневматичних шин і забезпечує визначення в лабораторних умовах терміну служби шини, залежність його від швидкості руху динамічного радіуса шини та шляху пройденого шиною до руйнування.

Це досягається тим, що система приводних роликів малого діаметру побудована як впадини або виступи з змінною висотою і відстанями між ними та можливістю програмного переміщення в горизонтальній площині по двом координатах уздовж траєкторії руху колеса та в бічному напрямку під час обертання колеса (рис. 2).

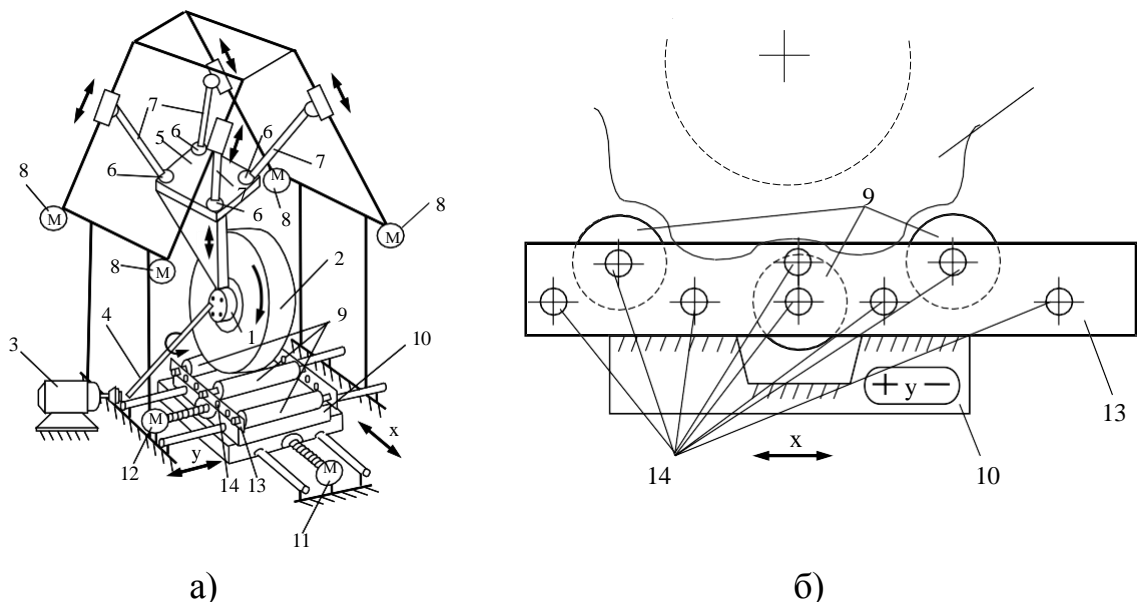


Рис. 2 Рухома керована платформа стенду для випробування пневматичних шин : а) – кінематична схема (загальний вигляд); б) – керована рухома платформа

Пристрій працює наступним чином (рис.2 а). У вузлі кріплення колеса 1 встановлюється шина 2, який з'єднано з електродвигуном 3 через карданний вал 4. Вузол кріплення колеса 1 розташовано на рухомій платформі 5 з шарнірами 6 і чотири стрижнями 7, що приводяться до руху кожен окремо кроковим двигуном 8. Шину 2 вводять в контакт із навантаженням з трьома роликами малого діаметру 9, які закріплено на рухомому програмно-керованому двокоординатному столі 10, що має можливість задавати переміщення за допомогою двох пар гвинт-гайка і крокових двигунів 11, 12 роликів 9 уздовж горизонтальних координат  $x$  і  $y$ . Систему роликів 9 закріплено на металевій опорі 13 із отворами 14, які мають різну відстань і висоту розташування. Ролики 9 можна перевстановлювати в будь якій комбінації в опорних отворах 14 за рахунок

чого формують задану перешкоду для шини 2 (Рис. 2 б). Уявна перешкода, що складається з системи роликів 9 під час випробувань переміщується за потрібною швидкістю і на задану відстань по координатах  $x$  і  $y$  від системи керування (яку не показано на рис. 2 а).

Детальне визначення змін властивостей матеріалу і структури гумокордних композицій передбачає використання комплексу циклічних навантажень у вигляді типових маневрів, які представлені у вигляді чотирьох основних навантажень: вертикальні, обертальні, горизонтальні та комбіновані (рис. 3).



Рис.3 Блок схема послідовності визначення змін втомної міцності при стендових випробуваннях радіальної пневматичної шини

Дані навантаження задаються програмно із штучними перешкодами, вигляду виступ-яма, виступ-виступ, яма-виступ. Наступним кроком є детальна оцінка виду пошкоджень матеріалу у вигляді:

- пластичне, центральне розривне, крихке руйнування корду, металевго дроту;
- руйнування на межі контакту «гумова матриця-волокна металевго корду», та між волокнами корду;
- наявність розколювання матеріалів у вигляді чашок і конусів;
- точкові злами;
- порушення цілісності і щільності тканин;

- порожнини, розшарування і руйнування швів; розрізи порожнин тріщин.

Різні типи руйнування матеріалу детально описуються як механізм фізичного і морфологічного явища. В наслідок заданих деформацій пневматичної шини морфологія буде змінюватись. Показники втомної міцності аналізуються та моделюються математично як показники деформованої пружної оболонки. На межі розподілу металевого дроту із гумовою матрицею спостерігається порушення рівної поверхні з наявністю хвилеподібних нерегулярних порожнин глибиною від 10 до 50 мКм, які визначались експериментально. Розмір і форма порожнин збільшується для циклових навантажень забезпечених у трьох напрямках x, y, z які задаються на стенді. Спостерігаються найбільші порушення периметра в перетині дроту зі зростальним бічним навантаженням.

### ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Виконано аналіз сучасних стендових методів випробувань пневматичних шин з їх впливом на властивості матеріалу, як фактори оцінки критеріїв працездатності гумо-кордної конструкції.

Розроблена методика оцінки механічних властивостей пневматичних шин із штучно нанесеними пошкодженнями яка дозволяє створити умови випробувань, які більш наближені до реальних експлуатаційних умов.

Виготовлено вимірювально-випробувальний комплекс зі здатністю визначення деформацій шин в точках змін її форми при подоланні перешкод різної геометрії з передачею даних в реальному часі на комп'ютерну модель і візуалізацію (записом) усіх станів деформації навантажених дільниць колеса.

Внаслідок створення керованої рухомої платформи стенду для випробування пневматичних шин скорочується час випробувань, а отримані результати є більш коректними та відповідають реальним властивостям шин.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. *A Fatigue Evaluation Method for Radial Tire Based on Strain Energy Density Gradient* / C. Liang et al. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 2021. P. 1–12. URL: <https://doi.org/10.1155/2021/8534954>.
2. *Robustness Classification by Machine Learning from Vehicle Tire Surface Abrasions* / R. GÜRFİDAN et al. *Gazi Journal of Engineering Sciences*. 2023. Vol. 9, no. 4. P. 151–157. URL: <https://doi.org/10.30855/gmbd.0705s15>.
3. Kim K., Park H., Kim T. *Comparison of Performance of Predicting the Wear Amount of Tire Tread Depending on Sensing Information*. *Sensors*. 2023. Vol. 23, no. 1. P. 459. URL: <https://doi.org/10.3390/s23010459>.
4. *A Transfer Learning Approach for Tyre Wear Classification* / S. M. Mansoor Roomi et al. *2023 8th International Conference on Business and Industrial Research (ICBIR)*,



Bangkok, Thailand, 18–19 May 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/icbir57571.2023.10147440>.

5. Експертиза вантажних шин на виявлення пошкоджень, які утворилися в результаті експлуатаційного зношення шин або дефекту виробу. *Теорія та практика судової експертизи та криміналістики*, (2020) Vol. 21, no. 1, P.441-451. [https://doi.org/10.32353/khrife.1.2020\\_31](https://doi.org/10.32353/khrife.1.2020_31).

6. *Analysis of Truck Tractor Tire Damage in the Context of the Study of Road Accident Causes* / K. Drozd et al. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, no. 23. P. 12333. URL: <https://doi.org/10.3390/app122312333>.

7. *Characteristics and investigation of selected manufacturing defects of passenger car tires* / A. Weyssenhoff et al. *Transportation Research Procedia*. 2019. Vol. 40. P. 119–126. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.020>.

**Чучин О.В., Чепеленко О.Ю.** (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна)

## **ВИЗНАЧЕННЯ РОЗПИРАЮЧИХ ТИСКІВ НА ВНУТРІШНІ ПОВЕРХНІ МАТРИЦІ ПРИ РАДІАЛЬНО-ПРЯМОМУ ВИДАВЛЮВАННІ**

***Анотація:** У роботі наводяться формули для визначення розпираючих тисків на внутрішні поверхні матриці в процесі послідовного радіально-прямого видавлювання залежно від геометричних параметрів процесу та умов тертя. Виконано теоретичний аналіз формул. Результати розрахунків за цими формулами надалі використовуються для вибору конструкції, розмірів і матеріалу формозмінювальних матриць.*

***Abstract:** The work provides formulas for determining the expansion pressures on the internal surfaces of the matrix in the process of sequential radial-direct extrusion, depending on the geometric parameters of the process and friction conditions. A theoretical analysis of these formulas has been performed. The results of calculations using these formulas are subsequently used to select the design, dimensions and material of the forming matrices.*

Послідовне радіально-пряме видавлювання відноситься до процесів з розвиненою радіальною течією металу заготовки та дозволяє із суцільної заготовки виготовити порожнистий виріб типу стакану із зовнішнім осьовим відростком або без нього за один перехід. Порівняно з зворотним видавлюванням цей спосіб дозволяє знизити енергосилові параметри та виготовляти порожнисті вироби зі складним зовнішнім та внутрішнім контуром (при зворотному видавлюванні складний контур можна отримати лише на зовнішній поверхні стакану) [1].

Раніше був виконаний теоретичний аналіз даного процесу енергетичним методом і отримано формули для розрахунку приведенного тиску деформування [2].

Подальший теоретичний аналіз обраного кінематично можливого поля швидкостей для опису кінематичного стану на стаціонарній стадії процесу радіально-прямого видавлювання порожнистих деталей дозволив отримати рівняння траєкторій переміщення матеріальних частинок вздовж лінії току [3], формули для розрахунку накопиченої деформації та справжнього напруження в будь-якій точці лінії току [4], формули для розрахунку енергосилових параметрів процесу радіально-прямого видавлювання матеріалу, що зміцнюється, на стаціонарній стадії в залежності від геометричних параметрів і умов тертя [5].

При виборі конструкції, розмірів і матеріалу деформуючих і формозмінювальних інструментів, а також силових параметрів обладнання необхідно робити оцінки навантажень, що сприймаються нерухомими контактними поверхнями інструментів в результаті реакції матеріалу заготовки, який формозмінюється [6].

Метою роботи є отримання формул для визначення розпираючих

тисків на внутрішні поверхні матриці в процесі послідовного радіально-прямого видавлювання залежно від геометричних параметрів процесу та умов тертя, теоретичний аналіз цих формул та подальше використання результатів розрахунків за цими формулами при виборі конструкції, розмірів та матеріалу формозмінювальних матриць (цілісних або бандажованих).

Розрахункова схема процесу радіально-прямого видавлювання представлена на рис. 1. Вона складається з пластичних блоків 1, 2, 3, 4 та пластичного модуля 5а, а також жорсткого модуля 5б. Блоки та модулі розглядаються в циліндричній системі координат  $r, z$ . У розрахунковій схемі інструменти умовно позначені: «М» – матриця, «ПВ» – пуансон верхній, «ПН» – пуансон нижній. У розрахункову схему, крім швидкості активного пуансона  $V_a$ , також входять віртуальні швидкості  $\tilde{v}_1, \tilde{v}_2, \tilde{v}_3$  та швидкість течії металу заготовки з матриці  $V_6$ .

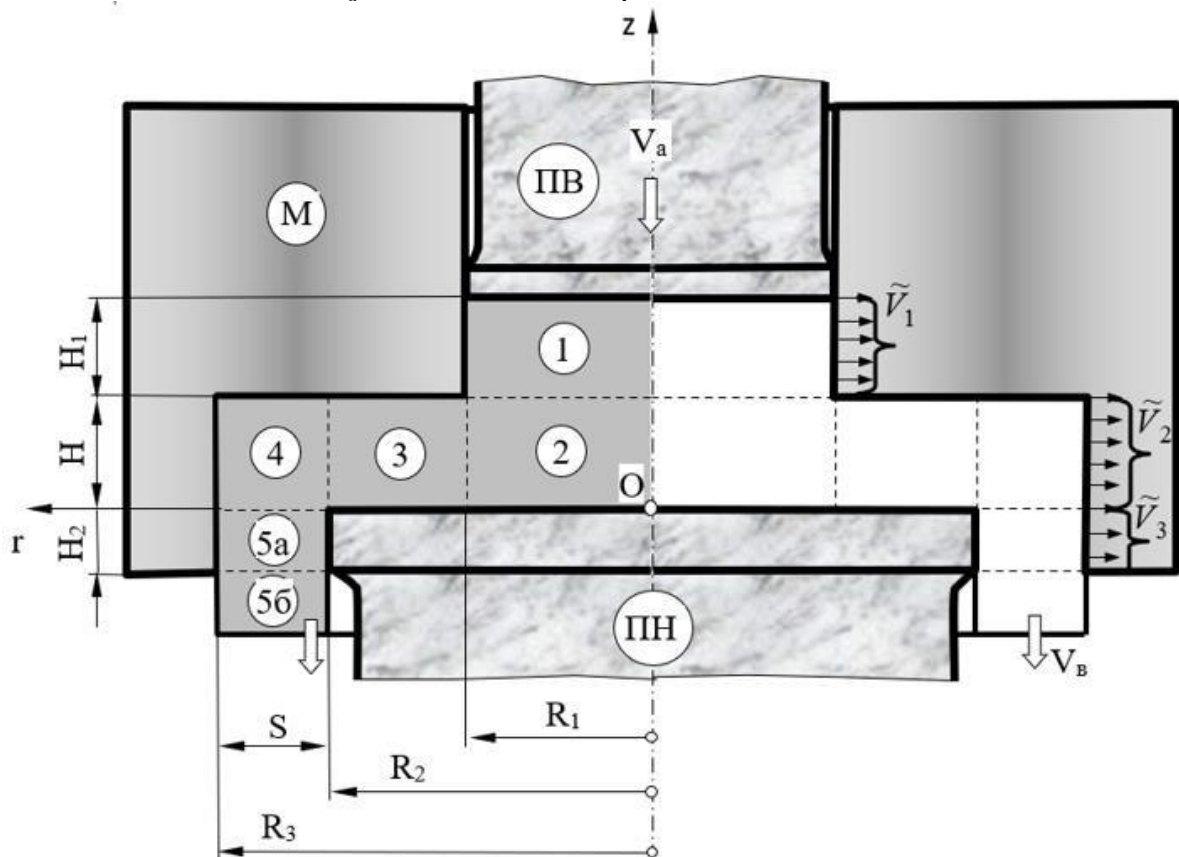


Рис. 1 – Розрахункова схема процесу радіально-прямого видавлювання з віртуальними швидкостями

Правила вибору напрямку віртуальних швидкостей для різних процесів розглянуті у роботі [6]. У разі іншого напрямку віртуальних швидкостей  $\tilde{v}_1$  і  $\tilde{v}_3$  (до осі заготовки) матеріал заготовки, який деформується, додатково б надходив, відповідно, з блоку 1 і модуля 5а, в блоки 2, 3, 4 та модуль 5б і зусилля, що визначаються на даних віртуальних швидкостях, виявилися б активними, що викликало б завищені оцінки радіального тиску у матриці. Інший напрямок віртуальної швидкості  $\tilde{v}_2$ , ніж наведений на рис. 1, призвів

би до появи межі розділу течії металу, яка залежить від величини віртуальної швидкості, яка розглядається, в блоці 4, що є неприпустимим згідно з умовою вибору цих швидкостей.

Кінематично можливі поля швидкостей (КМПШ), які описують течію матеріалу заготовки, що деформується, в блоках 1, 2, 3, 4 та модулях 5a і 5b, представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – КМПШ для блоків та модулів у розрахунковій схемі (див. рис. 1)

Блок (модуль) i	КМПШ	
	$\square_{\square\square}$	$\square_{\square\square}$
1	2	3
1	де $-\square_{12} - (\square_{\square} - \square_{12}) \frac{\square - \square}{\square_1},$ $\square_{12} = \square_{\square} - 2\tilde{\square}_1 \frac{\square_1 \square_1}{\square_1^2 - \square_0^2}$	$\square_{\square}^2 (\square_{12} \square_{\square}^2 - \frac{0}{2\square\square_1})$
2	$-\square_{12} \frac{\square}{\square}$	$\square_{12} \frac{\square^2 - \square_0^2}{2\square\square}$
3	0	$\square_{12} \frac{\square_1^2 - \square_0^2}{2\square\square}$
4	$2\tilde{\square}_2 \frac{\square_3 \square \square - \square - \square}{\square_3^2 - \square_2^2} -$ $-\square_{12} \frac{\square_1^2 - \square_0^2 \square - \square}{\square_3^2 - \square_2^2}$	$2\tilde{\square}_2 \frac{\square_3 \square \square - \square_3^2 - \square^2}{\square_3^2 - \square_2^2} +$ $+\square_{12} \frac{\square_1^2 - \square_0^2 \square_3^2 - \square^2}{\square_3^2 - \square_2^2} +$ $+\frac{\tilde{\square}_3}{2}$
5a	$-\square_{12} \frac{\square_1^2 - \square_0^2}{\square_3^2 - \square_2^2} -$ $-2\tilde{\square}_2 \frac{\square_3 \square \square}{\square_3^2 - \square_2^2} -$ $-2\tilde{\square}_3 \frac{\square_3 \square \square}{\square_3^2 - \square_2^2}$	$\tilde{\square}_3 \frac{\square^2 - \square_2^2 \square_3}{\square_3^2 - \square_2^2}$

Продовження табл. 1

1	2	3
56	$\sigma_6 = -\sigma_{12} \frac{\sigma_1^2 - \sigma_0^2}{\sigma_3^2 - \sigma_2^2} +$ $+ 2\tilde{\sigma}_2 \frac{\sigma_3 \sigma_2}{\sigma_3^2 - \sigma_2^2} -$ $- 2\tilde{\sigma}_3 \frac{\sigma_3 \sigma_2}{\sigma_3^2 - \sigma_2^2}$	0

Представлені вище (див. табл. 1) поля швидкостей задовольняють граничним умовам у швидкостях, умові нестискання, умові безперервності нормальної компоненти швидкості на межах блоків і модулів та умові суцільності матеріалу.

У цих виразах  $\sigma_0$  – радіус оправки для трубної заготовки (на рис. 1 відсутня).

Введення віртуальних швидкостей  $\tilde{\sigma}_1$ ,  $\tilde{\sigma}_2$  та  $\tilde{\sigma}_3$  в кінематично можливу модель деформованого матеріалу в процесі радіально-прямого видавлювання дозволило отримати формули для розрахунку приведених радіальних тисків  $\bar{q}_1$ ,  $\bar{q}_2$  та  $\bar{q}_3$ , а також радіальних тисків на внутрішні поверхні матриці з боку формозмінювального металу в залежності від геометричних параметрів процесу та умов тертя.

Якщо  $\tilde{\sigma}_1 = \tilde{\sigma}_2 = \tilde{\sigma}_3 = 0$ , то КМПШ у табл. 1 вироджуються до КМПШ, наведених у роботі [3].

Верхня оцінка розпираючих тисків на внутрішні поверхні матриці енергетичним методом можлива, якщо в енергетичний баланс входять потужності, що розвиваються реактивними зусиллями на малих віртуальних швидкостях переміщень поверхонь інструменту, що розглядаються, і проведена лінеаризація всіх потужностей щодо віртуальних і реальних швидкостей інструменту [6].

Після підстановки в рівняння енергетичного балансу виразів для розрахунку потужності зовнішніх сил  $\sigma_{\square}$  та для розрахунку складових потужності внутрішніх сил  $\sigma_{\square}$ , перенесення членів з правої частини

рівняння до лівої та подальшого угруповання [6] було отримано чотири формули для розрахунку: безрозмірного приведенного тиску деформування  $\sigma_{\square}$  (як у роботі [5]) і приведених реактивних тисків  $\sigma_{\square_1}$ ,  $\sigma_{\square_2}$ ,  $\sigma_{\square_3}$  з боку заготовки, що деформується, на внутрішні поверхні матриці в залежності від геометричних відносних параметрів процесу та умов тертя (табл. 2).

У формулах табл. 2 і розташованих нижче всі геометричні параметри процесу є відносними безрозмірними (для зручності віднесені до радіусу заготовки  $\sigma_{\square_1}$ ) і представлені малими літерами, на відміну від натуральних параметрів, позначених великими літерами (див. рис. 1).

У цих формулах  $\sigma_{\square_1}$ ,  $\sigma_{\square_2}$ ,  $\sigma_{\square_3}$ ,  $\sigma_{\square_4}$  – коефіцієнти тертя, відповідно, між поверхнею інструментів – матриці «М», нижнього пуансону «ПН», оправки

«О» (на рис. 1 оправка не показана), верхнього пуансону «ПВ» – і матеріалом заготовки, що деформується.

Таблиця 2 – Вирази для розрахунку приведених реактивних тисків  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$

$\sigma$	$\sigma_{\sigma}$
1	$1,08 \left( 0,5 + \frac{\sigma_3^2}{\sigma_3^2 - \sigma_2^2} \frac{\sigma_3}{\sigma_2} \right) + \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{1 - \sigma_0}{3h} \frac{1 + 2\sigma_0 h + h}{h_1} \left( \frac{2\sigma_3 + \sigma_2}{\sigma_3 + \sigma_2} + \frac{\sigma_2 h}{\sigma_3^2 - \sigma_2^2} + \frac{h}{\sigma_1^2 - \sigma_0^2} \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_1 \left( \frac{h_1}{\sigma_1^2 - \sigma_0^2} + \frac{\sigma_2 - 1}{h} + \frac{2\sigma_3 + \sigma_2}{3h} \frac{\sigma_3(h + 2h_2)}{\sigma_3^2 - \sigma_2^2} \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_2 \left( \frac{\sigma_2 - 1}{h} + \frac{1 - \sigma_0}{3h} \frac{1 + 2\sigma_0}{1 + \sigma_0} + \frac{2\sigma_2 h_2}{\sigma_3^2 - \sigma_2^2} \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_3 \frac{\sigma_0(h + h_1)}{\sigma_1^2 - \sigma_0^2} - \frac{2}{3\sqrt{3}} \sigma_4 \frac{1 - \sigma_0}{h_1} \frac{1 + 2\sigma_0}{1 + \sigma_0}$
2	$1,08 \left( 0,5 + \frac{\sigma_3^2}{\sigma_3^2 - \sigma_2^2} \frac{\sigma_3}{\sigma_2} \right) + \frac{1}{\sqrt{3}} \left( \frac{\sigma_2 h}{\sigma_3^2 - \sigma_2^2} - \frac{\sigma_3 + 2\sigma_2}{3h} \frac{\sigma_2}{\sigma_3 + \sigma_2} \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_1 \left( \frac{\sigma_3(h + 2h_2)}{\sigma_3^2 - \sigma_2^2} - \frac{\sigma_3 + 2\sigma_2}{3h} \frac{\sigma_2}{\sigma_3 + \sigma_2} \right) + \frac{4}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_2 h_2}{\sigma_3^2 - \sigma_2^2}$
3	$1,08 + \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_1 \frac{\sigma_3 h_2}{\sigma_3^2 - \sigma_2^2} + \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_2 \frac{\sigma_2 h_2}{\sigma_3^2 - \sigma_2^2}$

У разі оцінки середнього радіального навантаження на внутрішні бічні поверхні матриці формула для розрахунку приведенного тиску буде виглядати наступним чином:

$$\sigma_{123} = \frac{\sigma_1 h_1 + \sigma_2 \sigma_3 h + \sigma_3 \sigma_3 h_2}{h_1 + \sigma_3(h + h_2)}$$

Тиск деформування та реактивні тиски розраховувалися за відповідними формулами:

$$\sigma = \sigma \sigma_{\sigma};$$

$$\sigma_{\sigma} = \sigma_{\sigma} \sigma_{\sigma},$$

де  $\sigma_{\sigma}$  – справжнє напруження, МПа

У якості матеріалу, який деформується, був обраний алюмінієвий сплав АД31, експериментальна крива зміцнення якого була апроксимована

показовою функцією В.М. Розенберг[7]:

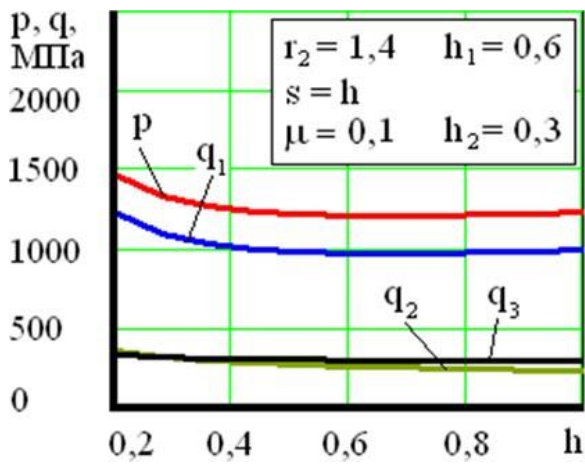
$$\sigma_{\square} = 69,7 + 175,1[1 - \sigma^{-\square}] + 24,1[1 - \sigma^{-19\square}].$$

Інтенсивність накопиченої деформації  $\sigma_{\square}$  визначалася за такою формулою:

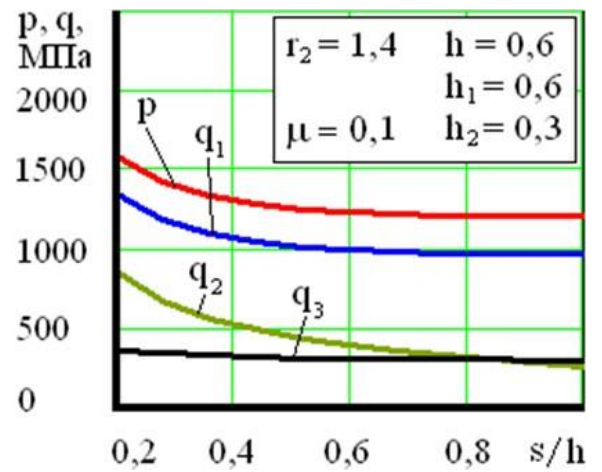
$$\sigma_{\square} = \sigma.$$

Теоретичні дослідження формул (див. табл. 2) дозволили встановити вплив відносних значень геометричних параметрів  $\sigma_2$ ,  $\sigma/h$ ,  $h$ ,  $h_1$ ,  $h_2$  і коефіцієнтів тертя  $\mu$  на реактивні навантаження  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ , що сприймаються нерухомими поверхнями матриці. Результати цих досліджень після складання програм та розрахунків у MathCAD представлені на графіках (рис. 2). На цих графіках крім кривих, що показують реактивні навантаження (тиски  $\sigma_1 - \sigma_3$ ), наведені для порівняння криві, що описують активне навантаження (тиск  $\sigma$ ). У розрахунках було прийнято:  $\sigma_0 = 0$  мм;  $\sigma_1 = 25$  мм;  $\sigma_3 = \sigma_2 + \sigma$ ;  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_4 = \sigma$ , тобто  $\sigma_0 = 0$ ,  $\sigma_1 = 1$ ,  $\sigma_3 = \sigma_2 + \sigma$ . Інші відносні значення геометричних параметрів та їх діапазони, які аналізувались, наведено на графіках (рис. 2).

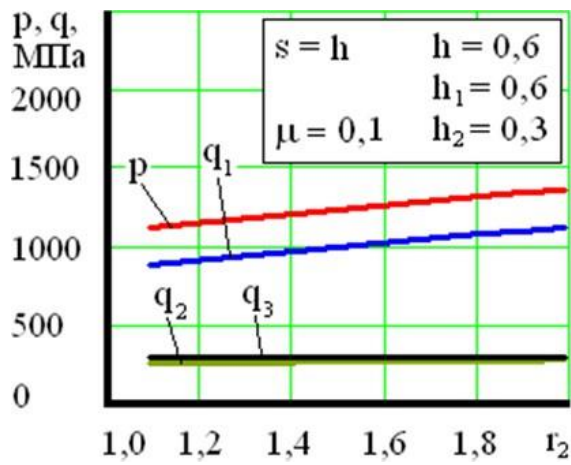
Як видно із рис. 2, на величину реактивного тиску  $\sigma_1$  на внутрішню поверхню матриці радіусом  $\sigma_1 = 25$  мм ( $\sigma_1 = 1$ ) з боку формозмінювального металу істотно впливають всі аналізовані геометричні параметри (за винятком висоти  $h_2$  (рис. 2, д)), і, особливо, коефіцієнт тертя  $\mu$ . Реактивні тиски  $\sigma_2$  та  $\sigma_3$  на графіках рис. 2 практично не відрізняються один від одного, крім графіка на рис. 2, б, де розглядається вплив безрозмірного параметра  $\sigma/h$ , і майже не змінюються в діапазонах відносних геометричних параметрів, які розглядаються, і коефіцієнта тертя  $\mu$ . Однозначно, зі зростанням відносного геометричного параметра  $\sigma_2$  (рис. 2, в) та коефіцієнта тертя  $\mu$  (рис. 2, ж) збільшується реактивний тиск  $\sigma_1$ . При значеннях відносної висоти  $h$  менше 0,4 (рис. 2, а), відносної висоти  $h_1$  менше 0,5 (рис. 2, г) та безрозмірного параметра  $\sigma/h$  менше 0,5 (рис. 2, б) відбувається збільшення значень реактивного тиску  $\sigma_1$ , що у першому випадку можна пояснити збільшенням ступеня деформації у зоні дна порожнини, а в третьому випадку – зростанням ступеня деформації у зоні розвороту течії металу з радіального напрямку на прямий. При значеннях геометричних параметрів  $h$ ,  $h_1$  та  $\sigma/h$  більше розглянутих величина реактивного тиску  $\sigma_1$  змінюється не значно.



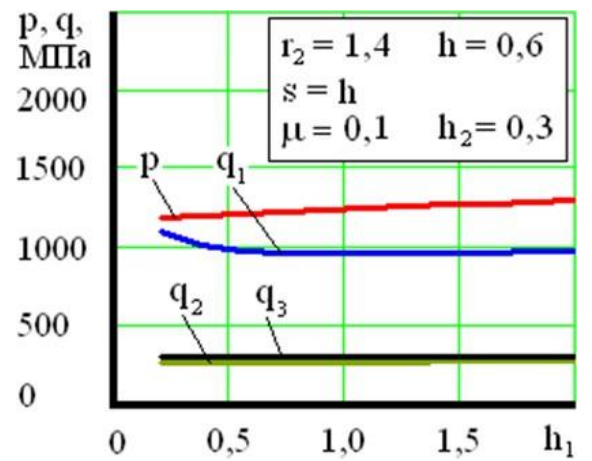
a



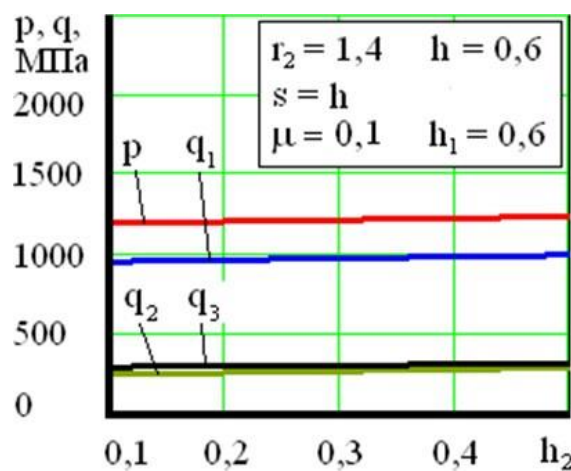
б



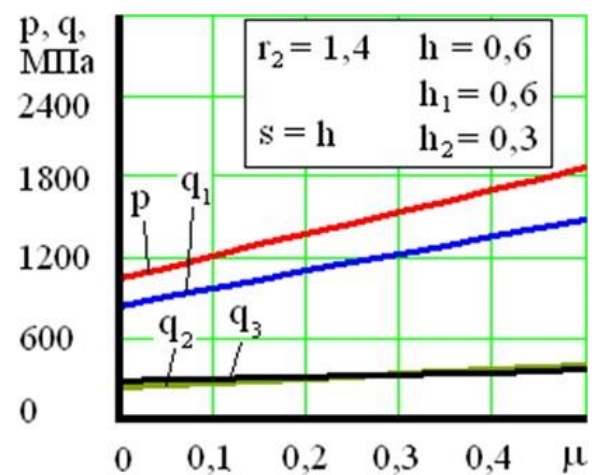
в



г



д



ж

Рис. 2 – Графіки залежності активного  $p$  та реактивних  $q_1, q_2, q_3$  тисків процесу радіально-прямого видавлювання від геометричних



параметрів та умов тертя

Після розрахунку реактивних тисків  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  на внутрішні поверхні матриці з боку формозмінювального металу в процесі радіально-прямого

видавлювання далі необхідно зробити перевірочні розрахунки самої матриці згідно з методикою, викладеною в роботах [8, 9]. При цьому необхідно звертати увагу на: конструкцію матриці (цілісна або складова-бандажована); розміри матриці (поперечні та висотні); матеріал, з якого виготовлено матрицю (або окремі її частини у разі бандажованої матриці).

*Висновки.* Отримано формули для визначення розпираючих тисків на внутрішні поверхні матриці в процесі послідовного радіально-прямого видавлювання залежно від геометричних параметрів процесу та умов тертя. Виконано теоретичний аналіз формул. Встановлено, що найбільше впливають на розпираючі тиски відносні значення геометричних параметрів  $h$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma/h$ , і коефіцієнт тертя  $\mu$ .

Результати розрахунків за цими формулами надалі використовуються для вибору конструкції, розмірів і матеріалу формозмінювальних матриць.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

**Шипа О.В.**, наукові керівники: к.т.н., доцент Онищук С.Г. і к.т.н., доцент Тулупов В.І. (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна)

## ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ В МАШИНОБУДУВАННІ

***Анотація:** В статті розглянуті особливості використання енергозберігаючих технологій в машинобудуванні. Досліджено доцільність використання як додаткового джерела енергії електричного струму та особливості електромеханічної обробки з змінним струмом та чистового точіння з імпульсним струмом.*

***Abstract:** The article examines the features of using energy-saving technologies in mechanical engineering. The expediency of using electric current as an additional source of energy and the features of electromechanical processing with alternating current and finishing turning with pulsed current have been investigated.*

Однією зі складових, що впливають на конкурентоспроможність продукції машинобудування, є вартість енергетичних ресурсів, що витрачаються. За оцінками [1] питома доля вартості енерговитрат в загальній собівартості виготовлення продукції може досягати від 15 до 25%. В зв'язку з цим виникає необхідність використання енергозберігаючих технологій для зменшення загальних енерговитрат.

Метою роботи є дослідження використання енергозберігаючих технологій при виготовленні деталей машин у важкому машинобудуванні.

Особливостями механічної обробки деталей важкого машинобудування, що обумовлюють великі енергетичні витрати на обробку, є наступні [1]:

– великі значення потужності електродвигуна приводу головного руху (ПГР) верстата, що зумовлюють високий рівень абсолютних витрат (втрат) енергії за заданого значення питомих витрат (втрат);

– великі припуски на обробку деталей, що зумовлюють високі силові навантаження у зоні різання;

– великі втрати електроенергії під час роботи електродвигуна ПГР верстата на холостому ходу під час зміни різальної пластини (різцевого) блоку внаслідок відмови, що відбулася.

Для зменшення енергоефективності процесу механічної обробки пропонується зменшення витрат енергії на протікання фізичних процесів в зоні різання за рахунок оптимізації технологічних параметрів обробки.

Загальна структура математичної моделі для визначення оптимальних технологічних параметрів енергоефективних процесів механічної обробки деталей важкого машинобудування передбачає рішення оптимізаційної задачі виду [1]:

$$Q = \text{extr} \{ f(x, w) | x \in D \}, \quad (1)$$

з системою обмежень виду:

$$g(x, w) \leq 0;$$

$$f(x) \leq 0;$$

$$a_i \leq x_i \leq b_i,$$

де  $f(x, w)$  – цільова функція (критерій оптимізації);

$x$  – керовані (варійовані) параметри обробки;

$w$  – постійні параметри обробки;

$D$  – область допустимих значень керованих параметрів  $x$ ;

$a_i = const, b_i = const$ .

Рівень енергозатрат в зоні різання, які витрачається на знімання заданого об'єму матеріалу шару заготовки, що зрізається, найкращим чином відображається питомою енергоємністю різання [1]:

$$e = \frac{A_{piz}}{V} = \frac{N_{ef}}{P_{piz}} = \frac{N}{vSt}, \quad (2)$$

де  $A_{piz}$  – робота різання;

$V$  – обсяг зрізаного шару матеріалу, що перетворюється на стружку;

$N_{ef}$  – ефективна потужність різання;

$P_{piz}$  – продуктивність різання (знімання стружки в одиницю часу);

$v$  – швидкість різання;

$S$  – подача різця;

$t$  – глибина різання.

Питома енергоємність різання не пов'язана з розмірами заготовки, безпосередньо не залежить від часу обробки, і отже, може використовуватися як критерій для порівняння енергетичної ефективності альтернативних процесів обробки, а також параметрів окремих операцій.

Одним з напрямків щодо зменшення енергозатрат при різанні металів є введення в зоні різання додаткових джерел енергії.

Ідеальне штучне джерело тепла, що застосовується у технологічному методі поверхневого зміцнення, повинно забезпечувати швидкісне нагрівання металу, піддаватися контролю та регулюванню в строго нормованих дозах в одиницю часу, забезпечувати широкий діапазон температур. Під час вибору методу оброблення велике значення мають питомі витрати енергії на нагрівання одиниці об'єму металу.

Одним з таких джерел є електричний струм. Реалізацією використання такого джерела енергії є два способи – електромеханічна обробка точінням з використанням змінного струму та чистове точіння з використанням імпульсного струму [2].

Перший спосіб заснований на одночасному впливі на оброблюваний матеріал силової та теплової дії. При цьому в зону різання підводиться змінний електричний струм  $I = 150 - 200$  А при робочій напрузі 3-6 В. Різальний інструмент ізолюється від різцетримача текстолітовими прокладками.

Другий спосіб заснований на пропусканні імпульсного струму через головну задню поверхню різальної кромки інструмента. В результаті утворюється регулярна дискретна структура у вигляді зміцнених фрагментів. Живлення відбувається від генератора імпульсного струму. Основними характеристиками генератора імпульсного струму є: частота імпульсного струму 20...8000 Гц, шпаруватість 20...80%, максимальна робоча напруга 10 В, вихідний імпульсний струм прямокутної форми.

Результатом використання електричного струму в зоні різання є покращення умов різання за рахунок збільшення пластичної зони та, як наслідок, зменшення сили різання.

Проведені експериментальні дослідження складових сил різання з використанням універсального трикомпонентного динамометра свідчать про зменшення їх величини на 20-30% в залежності від оброблюваного матеріалу та режимів різання. В результаті зменшується потужність різання  $N_{\text{еф}}$ , та відповідно й питома енергоємність різання, що визначається за формулою (2).

Запропоновано технологічний процес виготовлення деталі «вал», виготовленої зі сталі 40Х. Базовий технологічний процес передбачає наявність термічної обробки та круглошліфувальних операцій. Використання чистового точіння з нагріванням імпульсним струмом в технологічному процесі дозволяє виключити операції термічної обробки та круглошліфувальних операцій через формування зносостійкого поверхневого шару з шорсткістю поверхні  $Ra = 1,25$  мкм. Використання нового технологічного процесу дозволить зменшити енергоємність процесу виготовлення деталі «вал» на 80%.

## ВИСНОВОК

Використання енергозберігаючих технологій в машинобудуванні дозволяє зменшити загальні енерговитрати виробництва. Запропонований технологічний процес з чистовою токарною операцією з імпульсним нагріванням зони різання дозволяє виключити термічну операцію та круглошліфувальну операцію, що в результаті призведе до зменшення енергоємності процесу виготовлення деталі «вал» на 80%.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1 Тулунов В.І., Онищук С.Г. Дослідження енергоефективних способів обробки деталей машин // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС-2023): матеріали тез доповідей XIII міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 25-26 травня 2023 р.) : у 2-х т. / Чернігівський національний технологічний університет [та ін.]: відп. за вип. Єрошенко А.М. Чернігів: ЧДТУ, 2023. Т.1. С.82-83.

2 Ковалевський С. В., Тулунов В.І. Спеціальні методи оброблення робочих поверхонь деталей машин: монографія. – Краматорськ : ДДМА, 2012. – 100 с.

**Jelena Dimovski<sup>1</sup>, Marina Stanojević<sup>2</sup>** (<sup>1</sup>University of Priština in Kosovska Mitrovica, Faculty of Economic, <sup>2</sup>University of Niš, Faculty of Economics, Niš, Serbia)

## **MODERN EDUCATION CHALLENGES AND OPPORTUNITIES IN THE ERA OF INTELLIGENT TUTORING SYSTEMS**

**Abstract:** *The landscape of modern education is undergoing a significant transformation, driven by rapid advancements in technology and shifting societal needs. Educational systems have become more personalized with a constant technological development where e-learning has been integrated with artificial intelligence techniques. These complex systems, known as Intelligent Tutoring Systems (ITS), apply the concept of artificial intelligence to the challenging demands of teaching and learning. ITS, recognized as a key driver of successful teaching and learning, enable active and practical teaching and learning experience in a certain educational field, while respecting the individuality of users. The paper provides an overview of existing intelligent tutoring systems with regard to the opportunities and challenges they face in modern learning process.*

**Анотація:** *Ландшафт сучасної освіти зазнає суттєвих змін, зумовлених швидким технологічним прогресом і зміною соціальних потреб. Освітні системи стали більш персоналізованими з постійним технологічним розвитком, де електронне навчання було інтегровано з технікою штучного інтелекту. Ці складні системи, відомі як інтелектуальні системи навчання (ITS), застосовують концепцію штучного інтелекту до складних вимог викладання та навчання. ITS, визнані ключовою рушійною силою успішного викладання та навчання, забезпечують активне та практичне викладання та навчання в певній освітній галузі, поважаючи при цьому індивідуальність користувачів. У документі подано огляд існуючих інтелектуальних систем навчання з огляду на можливості та виклики, з якими вони стикаються в сучасному навчальному процесі.*

### **1. INTRODUCTION**

Educational environment has been changed excessively over the past period. Teaching and learning process has moved from traditional methodology and techniques to incorporating technology as an essential part of curriculum, aiming to develop competences based on creative information and communication technologies.

Traditional education was facing difficulties in accommodating diverse learning styles, level of preparation and prior knowledge degree. Accordingly, students who struggled with a single teacher who was unable to respond to their learning needs, were often unsatisfied due to the impossibility to gain learning and academic outcomes. On the other hand, conventional education in big groups of

students led to lower individualization considering limitations of a teacher to prepare a personalized study plan in line with needs of each student in a group[1].

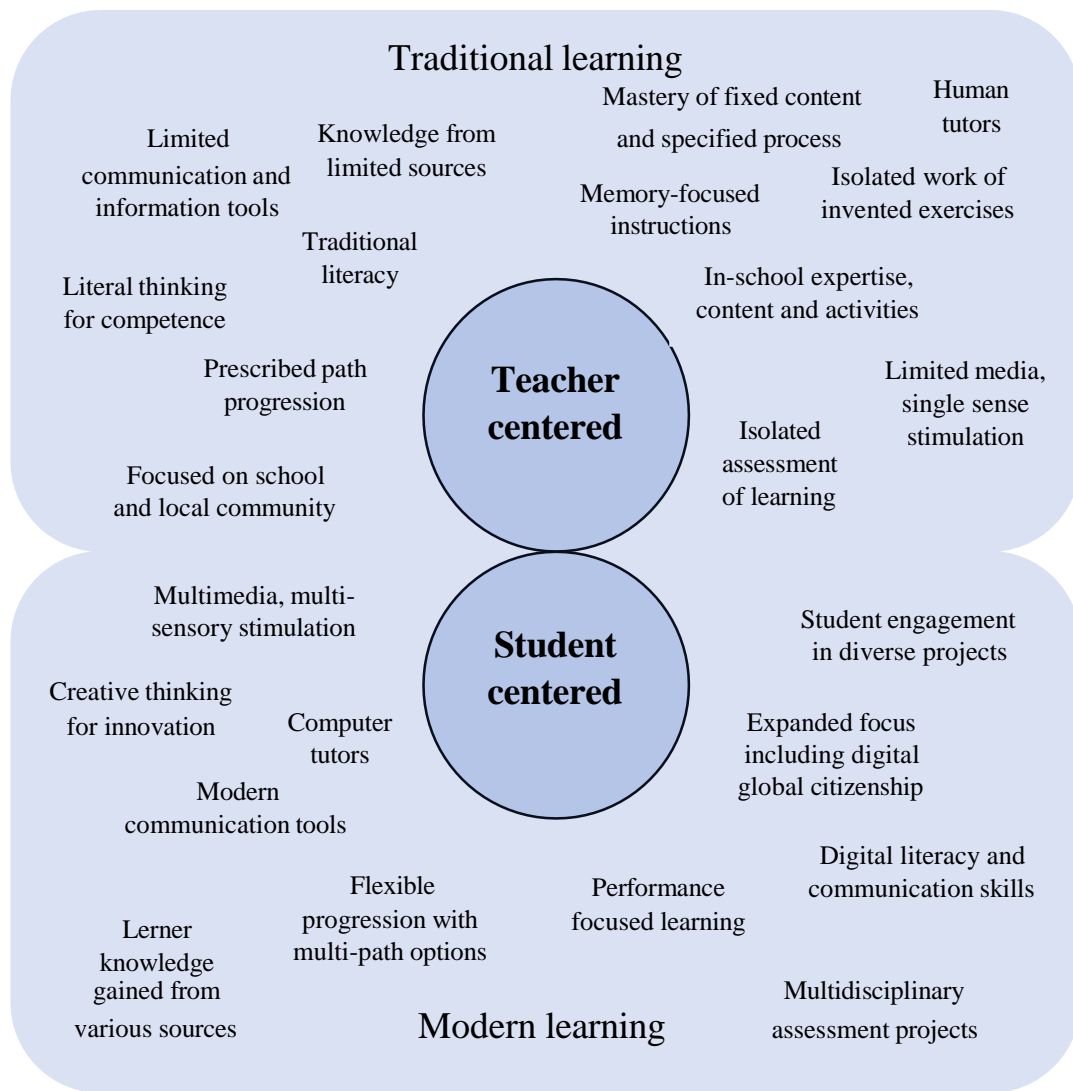
Artificial intelligence (AI) technology in last decades, and modern information technology in general, contributed to the establishment of Advanced Learning Technology (ALT). The use of new technology provides to users various benefits, at the same time making them increasingly reliant on application of new software in many fields [2-6].The most commonly used are in programming, languages, information technology, medicine, programming etc. Based on the independent knowledge databases for educational content, ALT examine the learner's strengths and weaknesses, as well as understanding of topic in order to dynamically adapt learning process [7]. Those learners are better in academic achievements compared to learners who rely only on traditional educational system [8, 9].

This paper aims to explore the multifaceted challenges and opportunities presented by the integration of ITS into contemporary educational frameworks. As we delve into this era of intelligent tutoring, it becomes imperative to assess how these systems are shaping educational outcomes, addressing learning disparities, and transforming the roles of educators and learners alike. Moreover, this examination seeks to identify the barriers to the widespread adoption of ITS and propose strategies to leverage their capabilities fully. By navigating the complexities of modern education in the context of ITS, this paper endeavors to offer insights into creating more engaging, efficient, and equitable learning environments for the future.

## **2. TRADITIONAL VS. MODERN LEARNING**

Modern education, with a focus on new technologies, is now widely applied in educational institutions ensuring multi benefits compared to traditional education. Traditional education, as a teacher centered concept is primary focus on traditional literacy and communication skills. Conventional teaching methods rely on memory instructions, isolated learning activities and experience in a controlled learning environment. Focusing on memorization and repetition of learning material, students in traditional education lacked critical thinking and problem-solving skills, as well as ability to take an active participation in decision making process. This system began to change with an advancement of science and technology and their extensive use in learning process. A technology usage enabled lectures to be more interactive and engaging for students. Contrary to theoretical learning, textbooks and learning by heart, modern education reduced these limitations of traditional education by trial and experience (figure 1).

The new learning process as learner-centered concept in education focuses on students [10; 11]. Surrounded by various learning resources, the learner-centered concept places a student in the center. Learning resources with regard to time, place and learning method refer to organizations, people, multimedia, social media, knowledge, technology, lectures, etc.



**Figure 1.** Differences between traditional and modern learning process [12]

One of the crucial differences in these two approaches are in tutoring systems. Human tutors ensure effectiveness in a students' learning process by guiding them to overcome difficulties in understanding theoretical concepts, encouraging them to learn more by searching for new topics and solutions, challenging them with complex problems, provoking curiosity. Therefore, human tutors lead students through the process rather than giving them explicit solutions, providing regular feedback. Even though, students can also study alone and increase their knowledge, skill and competences, this would require much more time and effort than guided learning [13, 14]. In order to ensure computer tutors to be effective as human tutors and provide similar feedback, there is a need of interaction with students in a way that human tutors have. The learning process need to be monitored step by step aiming to detect potential mistakes students make so the system can support students in solving them. Feedback depends on mistakes and their appearance so instructions can be given to help students to proceed [14].

### 3. INTELLIGENT TUTORING SYSTEM (ITS)

Among various technological innovations, Intelligent Tutoring Systems (ITS) have emerged as a pivotal element, poised to redefine the paradigms of teaching and learning. ITS, with their ability to provide personalized instruction and feedback to learners, represent a leap towards realizing the full potential of digital education. Intelligent tutoring systems (ITS) are complex software systems that apply the main principles of artificial intelligence (AI) and incorporate them with educational methods. These systems customize learning activities based on learner's needs and characteristics [15], supporting the learning process in various fields of knowledge. The most commonly used AI approaches in ITS are computer sciences (36.1%), social sciences (27.7%), medicine (27.7%), engineering (8.3%), mathematics (5.5%), aiming to provide personalized guidelines to learners, develop or update learners model, and cluster learners [1]. Artificial intelligence in ITS simulate human tutors in order to become computer or intelligent tutors.

The research of the use of artificial intelligence has its beginnings in 1970s resulting with ITS as a direct outcome [6]. Respecting individual learner's characteristics such as knowledge, skills, behavior or emotions, ITS provide tutoring or developed guide. Based on the recent research [16], students have achieved 27% higher learning outcomes with personalized ITS. Given the increased productivity and lowered expenses for training instructions, this approach is also welcomed by staff and students since 90% of them are in favor of personalized ITS training method.

Traditional intelligent tutoring systems are focused on the educational field intended to be trained and reworded, using domain as a management technique. On the other hand, modern ITS additionally approach the educational techniques and concepts trying to separate as much as possible architectural, methodological and manipulative disorders from domain [17, 18].

Intelligent tutoring systems focus on: 1) knowledge about the domain, 2) knowledge of the educational principles, 3) methods for modeling a way in which students gain new knowledge and skills. Traditional ITS has been established on four interrelated software modules [4, 6, 3]:

1) *Student module* refers to the all-diverse aspects of students' gaining knowledge and skills in the given area of knowledge. Student module is of crucial importance in the student modeling procedure that encompasses student module and determination of student knowledge. Student module provides information on the current level of student knowledge, while the diagnostic process monitors those data using them in the student evaluation process.

2) *Teacher module* (tutorial skills) is related to the control of gained student knowledge and skills. Therefore, teacher module is in charge for teaching and pedagogical knowledge owned by human tutor.



3) *Domain module* (expert knowledge) or expert module is the key point in every intelligent tutoring system, referring to the domain knowledge that is the main communication tool in a learning process with students.

4) *Communication module* (user interface) represents interaction between students and intelligent tutoring systems.

Artificial intelligence (AI) for computer-assisted instruction firstly was mentioned in 1970s [19] with regard to the development of SCHOLAR system. For that reason, Carbonell is considered as creator or “father” of intelligent systems for teaching and learning. In 1982 Sleeman and Brown [20] equalized intelligent tutoring systems (ITS) and intelligent computer-aided instruction (ICAI). However, e-learning was introduced in 1960s when some experts recognized the potential and benefits of computers in education and their wide room for application. Those experts are mainly psychologists, pedagogues and engineers indicating two groups of research: 1) engineering research approach as the applied research which can be considered as the main contributor in establishing the teaching system based on the use of computer or computer-based instruction (CBI) and 2) advanced research of experts that contributed to the development of intelligent tutoring systems (ITS).

A great contribution to ITS has adaptive hypermedia with its application in educational hypermedia, information and online support system, or institutional information system. Adaptive educational hypermedia serves to modify the content that students see into more adjusted material in line with their goals, needs, knowledge, interest.

Modern education as personalized learning with ITS has been proved as more efficient than traditional education. The opportunities of such a system are various and benefits can be reflected in [16]: high accessibility at any time and from any location, instant feedback that increases performance, knowledge and skills-based assessment and grading, analyses of future performance, personalized learning ensuring higher engagement of students due to inspiring learning environment, better time allocation for both teachers and students, better understanding of learning materials using available technologies, etc. However, despite clear opportunities, there are still some challenges of ITS implementation in education that need to be overcome [16]: large number of stakeholders involved in decision-making process in educational institutions, lack of available information and communication technology in some countries or regions, quality of internet connection, lack of skills that teachers and students need in order to use ITS, language barriers, pedagogical processes reflected in rejection to use new technologies, complicated organizational structure in educational institutions, human resources limitation with regard to a lack of awareness about benefits of new technologies.

#### **4. REVIEW OF INTELLIGENT TUTORING SYSTEMS IN EDUCATION**

Intelligent tutoring systems have successfully been used in all educational area and their opportunities are opened up by extending a volume of learning material that has been under certain standards and available on internet. ITS benefit from applying extensible knowledge scheme which is also on disposal to other systems.

The following ITS have been developed so far:

**Adil** (*Automated Debugger in Learning System*) as ITS is a software system for automated error correction based on knowledge. It supports students in upgrading basic debugging skills of their programs. Considering a syntax error program and its specification, Adil identifies program errors, but if there are no errors, the system explains program itself. Adil has been established on the automated program understanding system Conceiver [21].

**ADIS** (*Animated Data Structure Intelligent Tutoring System*) is Java-based Web-enabled ITS and serves to support teachers in the learning process and challenges regarding students' understanding of diverse data structures (linked-lists, stacks, queues, trees and graphs). ADIS allows data structures to be graphically presented on computer screen, but also to graphically update the created data structures. ADIS provides a guide with necessary instructions and exercises intended for students to learn basic algorithms [22].

**BITS** (*Bayesian Intelligent Tutoring System*), as a Web-based ITS for computer programming guides a decision-making process by Bayesian network. BITS navigates students while using online learning material, suggesting learning goal and purpose and generating suitable learning sequences. BITS helps to identify the minimum knowledge students need in order to understand some new concept without learning in details previously explained related concepts [23].

**DCG** (*Dynamic Courseware Generation*) applies AI planning techniques in order to determine content of instruction. Accordingly, following the certain learning goal, the course plan is prepared individually for a student. The main advantage of DCG is reflected in automatically built goal-directed adaptive Computer Assisted Learning (CAL) courses which is not possible with traditional CAL techniques [24].

**DM-Tutor** is an ITS based on constraints which are incorporated into existing management information system for oil palm plantation. It helps users to apply theoretical concepts of plantation to real-life decision-making process [25].

**ELM-ART** (*Episodic Learner Model – Adaptive Remote Tutor*) integrates intelligent educational system with e book program in a learning environment that enables upgrading the previously gained knowledge [26].

**JITS** (*Java Intelligent Tutoring System*) implies the development of designed for students programming tutor in the first programming course in Java™ at the university level. It is assumed that the developed prototype is sufficient to prove the concept and established Java™ intelligent tutoring system provides an interactive learning environment for students resulting in their learning achievements [27].

**KERMIT** (*Knowledge-Based Entity Relationship Modelling Intelligent Tutoring*) is ITS for entity relationship modelling. Designed database is an open-ended task because there is determined outcome but not precise procedure to reach this outcome [28].

**MBITS** (*Multicriteria Bayesian Intelligent Tutoring System*) is Web-based ITS supported by Bayesian Network, functioning as an interactive Web application easy to be used. It supports students in better understanding the learning process using multicriteria approach for evaluating various solutions and information [29].

**ML-Tutor** (*Machine Learning Tutor*) is a Web-based client server system established to combine Internet technology with educational hypertext [30].

**NORMIT** (*Normalization Intelligent Tutor*) is ITS primarily oriented to teach students about database normalization [31].

**SQL-Tutor** (*Structured Query Language*) is ITS based on knowledge, learning and teaching SQL language database, with an application of modeling based limitation approach to students [32].

**SQLT-Webis** a software ITS based on knowledge, learning and teaching SQL language database [33].

**TEx-Sys** (*Tutor-Expert System*) is a software system for learning, representing copyright for building ITS in the chosen field of knowledge [34].

**WITS** (*Whole-Course Intelligent Tutoring System*) is ITS and expert system that focuses on teaching solid state electronics course without human tutor. Creating inspiring learning environment, it seems to be motivating for learners given useful instant feedback [35].

## 5. CONCLUSION

In conclusion, the era of Intelligent Tutoring Systems (ITS) presents a transformative landscape for modern education, characterized by both challenges and opportunities. As we have explored throughout this paper, ITS offer unparalleled personalization and efficiency in learning, catering to individual student needs and facilitating a deeper, more interactive educational experience. However, the integration of ITS into mainstream education is not without its hurdles, including issues of accessibility, the digital divide, ethical considerations, and the need for comprehensive teacher training.

The opportunities presented by ITS, from adaptive learning environments to data-driven insights into student performance, herald a promising future for education. These systems can potentially bridge educational gaps, enhance student engagement, and prepare learners more effectively for a rapidly changing world. Nevertheless, for ITS to truly fulfill their potential, stakeholders must address the associated challenges head-on. This involves investing in technological infrastructure, ensuring equitable access, safeguarding data privacy, and fostering a collaborative approach between educators, developers, and policymakers. As we move forward, the role of educators will evolve from disseminators of knowledge to facilitators of learning, guiding students through

personalized educational journeys shaped by ITS. The successful integration of ITS into education systems worldwide will require a concerted effort to overcome existing barriers, coupled with a commitment to continuous improvement and innovation.

In well planned and organized learning environment, e-learning as a combination of information and communication technology and education has many benefits. However, a word of caution is necessary since e-learning cannot instantly overcome all the existing challenges in learning process and replace theories, principles and norms. As a new learning paradigm, e-learning is supported by information and communication technology and intelligent tutoring systems in the process of personalized teaching and learning. ITS are viable and advanced technological solutions that using artificial intelligence provide high quality education with a constant intent to overcome limitations of existing not personalized and not enough interactive platforms. Personalized learning would never reach this level of development without ITS considering the ability to perfectly simulate a learning environment, act like a human tutor, provide an interface for information sharing, and provide feedback.

Ultimately, the journey into the era of Intelligent Tutoring Systems is one of both discovery and responsibility. By embracing the opportunities and addressing the challenges, we can unlock the full potential of ITS to revolutionize education, making it more inclusive, effective, and aligned with the needs of the 21st century.

*Acknowledgement:* This research was co-funded by the State Scholarship Foundation (IKY) in Greece (E+ National Agency) in the context of the E+ project: ODLEP- Optimizing Distance Learning Educational Programs (Erasmus+ Programme Cooperation Partnership Key Action 2, 2022-1-EL01-KA220-HED-000089152)

## REFERENCES

- [1] H.A. Alrakhawi, N. J.-N. (2023). Intelligent tutoring systems in education: A systematic review of usage, tools, effects and evaluation. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 101(4), 1205-1226.
- [2] Budin, H. (1999). The computer enters the classroom. *Teachers College Record*, 100(3), 656-669.
- [3] Murray, T. (1999). Authoring intelligent tutoring systems: an analysis of the state of the art. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 10, 98-129.
- [4] P. Phobun, J. V. (2010). Adaptive intelligent tutoring systems for e-learning systems. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2(2), 4064-4069.
- [5] M.C. Rosatelli, J. S. (2004). A collaborative case study system for distance learning. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 14(1), 97-125.
- [6] J. Zhang, F. R. (2005). Intelligent tutoring systems: research status and its development in China. *Proceedings of 12th International Conference on Natural Language Processing and Knowledge Engineering*, (pp. 683-689).
- [7] A. Alkhatlan, J. K. (2018). *Intelligent tutoring systems: a comprehensive historical survey with recent developments*.
- [8] M.J. Mosa, I. A.-N. (2018). Intelligent tutoring system for learning. *International Journal of Academic Pedagogical Research*, 2(2).

- [9] A. Karaci, H. A. (2018). Effects of web-based intelligent tutoring systems on academic achievement and retention. *International Journal of Computer Applications*, 181(16), 35-41.
- [10] Handa, M. (2009). Learner-centered differentiation model: a learner-centered paradigm. *Australasian Journal of Gifted Education*, 18(2), 55-66.
- [11] C.M. Reigeluth, A. A. (2015). Personalized integrated educational system: technology functions for the learner-centered paradigm of education. *Journal of Educational Computing Research*, 53(3), 459-496.
- [12] P. Dašić, J. Dašić, B. Crvenković & V. Šerifi (2016). A review of intelligent tutoring systems in e-learning. *Annals of the Oradea University: Fascicle of Management and Technological Engineering*, 15(3), 85-90.
- [13] D.C. Merrill, B. R. (1992). Effective tutoring techniques: A Comparison of human tutors and intelligent tutoring systems. *The Journal of the Learning Sciences*, 2(3), 277-305.
- [14] VanLehn, K. (2011). The relative effectiveness of human tutoring, intelligent tutoring systems, and other tutoring systems. *Educational Psychologist*, 46(4), 197-221.
- [15] E. Mousavinasab, N. Z. (2018). Intelligent tutoring systems: a systematic review of characteristics, applications, and evaluation methods. *Interactive Learning Environment*.
- [16] Akyuz, Y. (2020). Effects of Intelligent Tutoring Systems (ITS) on Personalized Learning (PL). *Creative Education*, 11, 953-978.
- [17] J.M. Bruce, A. B. (1994). Distance education: A learner-centered paradigm. *Clinical Laboratory Science*, 7(3), 178-182.
- [18] P.Brusilovsky, J. E. (1998). Web-based education for all: A tool for developing adaptive courseware. *Computer Networks and ISDN Systems*, 30(1-7), 291-300
- [19] Carbonell, J. (1970). AI in CAI: An artificial-intelligence approach to computer-based instruction. *IEEE Transactions on Man-Machine Systems*, 11(4), 190-202.
- [20] D. Sleeman, J. B. (1982). *Intelligent tutoring systems*. New York: Academic press Inc.
- [21] A.M. Zin, A. A. (2000). A knowledge-based automated debugger in learning system. *4th International Workshop on Automated Debugging (AADEBUG-2000)*.
- [22] K. Warendorf, C. T. (1997). ADIS - An animated data structure intelligent tutoring system or putting an interactive tutor on the WWW. *8th World Conference on Artificial Intelligence in Education (AI-ED'97)*, (pp. 54-60).
- [23] C. J. Butz, S. H. (2006). A Web-based Bayesian intelligent tutoring system for computer programming. *Web Intelligence and Agent Systems*, 4(1), 77-97.
- [24] J. Vassileva, R. D. (1998). Dynamic courseware generation on the WWW. *British Journal of Educational Technology*, 29(1), 5-14.
- [25] S. Amalathas, A. M. (2012). Decion-making tutor: Providing on-th-job training for oil palm plantation managers. *Research and Practice in Technology Enganced Learning*, 7(3), 131-152
- [26] G. Weber, P. B. (2016). ELM - ART - An interactive and intelligent Web-based electronic textbook. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 26(1), 72-81.E.R.
- [27] Sykes, F. F. (2004). A prototype for an intelligent tutoring system for students learning to program in Java. *International Journal of Computers and Applications*, 1, 35-44.
- [28] P. Suraweera, A. M. (2001). KERMIT: A constraing-based tutor for database modeling. *Lecturs Notes in Computer Science*, 931-940.
- [29] E. Yamna, K. M.-H. (2010). A multicriteria Bayesian intelligent tutoring system MBITS. *10th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications*, (pp. 105-152).
- [30] A.S. Smith-Atakan, a. A. (2003). ML Tutor: An application of machine learning algorithms for and adaptive Web-based information system. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 13(2-4), 235-261.
- [31] Mitrović, A. (2002). NORMIT: A Web-enabled tutor for database normalization. *International Conference on Computers in Education*, (pp. 1276-1280).

- [32] A. Mitrović, S. O. (2016). Implementing CBM: SQL-Tutor after fifteen years. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 26(1), 150-159.
- [33] Mitrović, A. (2003). An intelligent SQL Tutor on the Web. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 13(2-4), 173-197.
- [34] S. Stankov, M. R. (2008). TEx-Sys model for building intelligent systems. *Computers & Education*, 51(3), 1017-1036.
- [35] Callear, D. (1999). Intelligent tutoring environments as teacher substitutes: Use and feasibility. *Educational Technology*, 39(5), 6-8.

**Онищенко С.В., Колосов Д.Л.** (Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна)

## **ВПЛИВ РОЗРИВІВ ЕЛЕМЕНТІВ АРМУВАННЯ ТА НЕЛІНІЙНОГО РОЗПОДІЛУ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН КОМПОЗИТНОЇ БАГАТОШАРОВОЇ ВАНТИ**

***Анотація:** Розроблено алгоритм розрахунку на статичну міцність багатошарової ванти з розривами елементів армування в одному перерізі. Встановлено, що розрив неперервності довільного елемента армування ванти призводить до суттєвої зміни внутрішніх навантажень лише суміжних елементів армування з ушкодженням та практично не залежить від нелінійного характеру деформування складових ванти. Встановлено, що місце розташування елемента армування з розривом неперервності несуттєво впливає на характер відносного зростання деформацій ванти у разі прояву нелінійного характеру деформування еластичної оболонки. Нелінійність деформування складових ванти не впливає на перерозподіл сил у ванті з ушкодженими елементами армування.*

***Abstract:** A static strength calculation algorithm for a multi-layer stay rope with breakages in one cross-section of reinforcing elements is developed. It is established that a continuity breakage of an arbitrary element of a stay rope reinforcement leads to a significant change in internal loads of only the adjacent reinforcing elements and is practically independent of a nonlinear deformation character of cable components. It is established that a reinforcing element location with discontinuity does not significantly affect the character of relative growth of stay rope deformations in a case of nonlinear character of elastic shell deformation. Deformation nonlinearity of cable components does not affect redistribution of forces in stay rope with damaged reinforcing elements.*

**Вступ.** Ванта – важлива складова вантової споруди. Навіть часткова втрата вантою її тягової спроможності впливає на надійність конструкції. Урахування такої втрати – актуальна задача, а її розв’язання забезпечить підвищення надійності вантової споруди. Ванта, здебільшого, складена з системи паралельних волокон, укладених в декілька шарів та з’єднаних еластичним матеріалом. Плоский гумотросовий канат має схожу конструкцію. Багатошарова композитна ванта (рис. 1) – це система розташованих в паралельних площинах та з’єднаних між собою композитних канатів. Розтяг каната рівномірно розподіляється на усі троси.

Відомо, що навіть часткове руйнування деталі призводить до часткової втрати споживчих характеристик. В загальному випадку ванта може мати декілька ушкоджених елементів армування. Розрив одного елемента, відповідно до принципу Сен-Венана, локально збудує напружено-деформований стан ванти. Відповідно [1], внаслідок розриву троса, навантаження зростає практично лише в суміжних тросах та локалізується по довжині каната. В матеріалі частини ванти волоконної конструкції можливе виникнення умов нелінійного деформування її

складових.



Рис. 1 – Багатошарова ванта із композитних канатів

**Основний зміст роботи.** Сформулюємо метод визначення напружено-деформованого стану вантового каната з розривами неперервності групи елементів армування. Нехай ванта має по  $M$  елементів армування, розташованих в  $N$  шарах. В канаті ушкоджено декілька волокон на значних відстанях від його країв. Початок осі  $z$  сумістимо з перерізом ушкодження. Симетричність задачі дозволяє розглянути половину каната. Внаслідок симетричності перерізи неушкоджених елементів армування до навантаження та після нього лежать в одній площині. Кінці ж ушкоджених елементів після навантаження зміщуються. Величини зміщень взаємозалежні і прямопропорційні прикладеному до ванти зусиллю розтягу та заздалегідь невідомі. Система однорідних диференціальних рівнянь рівноваги волокон в їх переміщеннях представлена у виразі (1)

$$\frac{d^2 u_{i,j}}{dz^2} + \frac{G\Omega(z)}{EF} \left\{ \begin{array}{l} \left( \frac{k_a a}{b-d} \right) (u_{i-1,j} - 2u_{i,j} + u_{i+1,j}) + \\ + \left( \frac{k_b b}{a-d} \right) (u_{i,j-1} - 2u_{i,j} + u_{i,j+1}) + \\ + u_{i-1,j-1} + u_{i+1,j+1} + u_{i-1,j+1} + u_{i+1,j-1} - 4u_{i,j} \end{array} \right\} = 0, \quad (1)$$

де  $u_{i,j}$  – переміщення  $i$ -того елемента армування  $j$ -того шару вздовж ванти – осі  $z$ ;  $G$  – модуль зсуву матеріалу, що з'єднує елементи армування;  $E$ ,  $F$ ,  $d$  – модуль пружності матеріалу, площа перерізу та діаметр волоконних елементів армування, відповідно;  $a$ ,  $b$  – кроки укладання елементів армування в шарах та кроки шарів;  $k_a$ ,  $k_b$  – коефіцієнти, що враховують вплив форми перерізу еластичного матеріалу ванти, розташованого поміж елементами армування на її жорсткість;  $1 > K \geq 0$  – коефіцієнт, що враховує відхилення від прямопропорційного відношення переміщень та напружень складових вантового каната.

Розв'язок однорідної системи рівнянь в переміщеннях, шукатимемо у формі добутку функцій, залежних лише від координати  $z$ , та функцій, залежних від місця розташування елементів армування в шарах та номерів шарів. Сформулюємо загальну форму виразу переміщень елементів армування ванти (2)



$$u_{i,j} = \left( \begin{array}{l} M-1N-1 \left[ \left( A_{m,n} e^{\beta_{m,n}\Omega(z)z} + e^{-\beta_{m,n}\Omega(z)z} \right)_{m,n} \right] \\ \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} \left[ \cos(\mu_m(i+0,5)) \cos(\chi_n(j+0,5)) \right] \\ + \sum_{m=1}^{M-1} \left( A_{m,m} e^{\beta_{m,m}\Omega(z)z} + B_{m,m} e^{-\beta_{m,m}\Omega(z)z} \right) \cos(\mu_m(i+0,5)) \\ + \sum_{n=1}^{N-1} \left( A_{n,n} e^{\beta_{n,n}\Omega(z)z} + B_{n,n} e^{-\beta_{n,n}\Omega(z)z} \right) \cos(\chi_n(j+0,5)) \end{array} \right) + \frac{Pz}{EF} + \delta, \quad (2)$$

де  $A_{m,n}, B_{m,n}, A_{mm}, B_{mm}, A_{nn}, B_{nn}$  – масиви сталих коефіцієнтів;  $\delta$  – переміщення ванти як жорсткого тіла.

За законом Гука, з виразу (3) розподіл сил поміж елементами армування ванти у випадку нелінійності деформування лише матеріалу матриці

$$P_{i,j} = EF \left( \begin{array}{l} \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} \left( A_{m,n} \gamma_m(z)_{1,m} + B_{m,n} \gamma_m(z)_{2,m} \right) \cos(\mu_m(i+0,5)) \cos(\chi_n(j+0,5)) \\ + \sum_{m=1}^{M-1} \left( A_{m,m} \gamma_m(z)_{1,m} + B_{m,m} \gamma_m(z)_{2,m} \right) \cos(\mu_m(i+0,5)) \\ + \sum_{n=1}^{N-1} \left( A_{n,n} \gamma_n(z)_{1,n} + B_{n,n} \gamma_n(z)_{2,n} \right) \cos(\chi_n(j+0,5)) \end{array} \right) + P. \quad (3)$$

Максимальні дотичні напруження виникають в прошарках матриці поміж волокнами одного шару та поміж волокнами суміжних шарів. У випадку нелінійного характеру деформування еластичного матеріалу ванти можуть бути визначені за (4)

$$\tau_{i,j} = \frac{2Gk_a(1 - Ke^{-z})}{b-d} (u_{i,j} - u_{i,j+1}); \quad \tau_{i,j} = \frac{2Gk_b(1 - Ke^{-z})}{a-d} (u_{i,j} - u_{i+1,j}). \quad (4)$$

Розв'язання системи (5) дозволяє визначати переміщення елементів армування з розривами неперервності

$$\zeta_v = \left[ \begin{array}{l} \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{v=1}^{\gamma} \cos^2(\mu_m(I_v+0,5)) \cos^2(\chi_n(J_v+0,5)) \gamma_{2,m,n}(x=0) \\ + \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{v=1}^{\gamma} \cos^2(\mu_m(I_v+0,5)) \gamma_{2,m}(x=0) \\ + \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{v=1}^{\gamma} \cos^2(\chi_n(J_v+0,5)) \gamma_{2,n}(x=0) \end{array} \right] = -\frac{PMN}{2EF}. \quad (5)$$

Розглядали вантовий канат з елементами армування діаметром 8,25 мм, укладених з кроком  $1,2d$  в обох ортогональних напрямках. Досліджували випадки, за яких розрив неперервності мають кутовий та центральний елементи армування ванти для вант, складених за схемами  $2 \times M$  та  $M \times M$  (рис. 2) за значень  $M = 5$ .

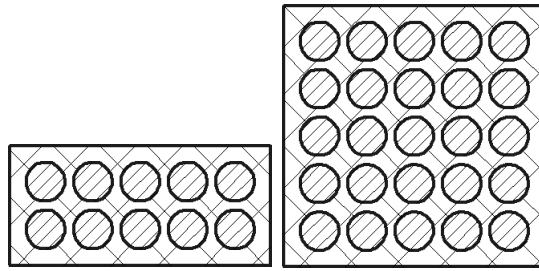


Рис. 2 – Схема вант  $2 \times M$  та  $M \times M$

Розрахунки показали, що нелінійність деформування практично не впливає на розподіл внутрішніх сил навантаження елементів армування в перерізі приєднання вант. Відхилення максимальних значень не перевищує 1 %. Залежності відносних показників напружено-деформованого стану вант, зумовлені нелінійною зміною відношення модулів пружності на зсув та розтяг ( $K = 0,5$ ), від кількості елементів армування в шарах вант  $M$  та за ушкодженого кутового елемента армування, наведені на рисунку 3.

Розглянутий випадок розриву кутового елемента армування співставимо з випадком ушкодження максимально віддаленого від поверхні вант середнього елемента армування вант, складеної за схемою  $M \times M$  представлений на рисунку 4.

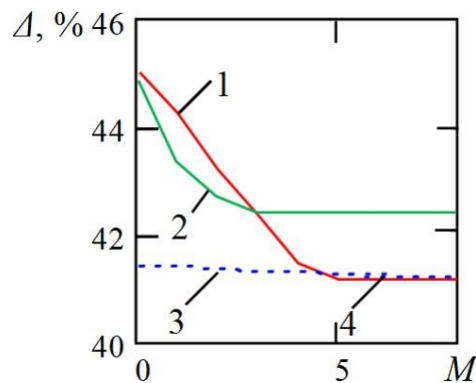


Рис. 3 – Залежності від кількості елементів армування в шарах вант  $M$  відносних показників напружено-деформованого стану  $\Delta$  внаслідок нелінійного закону зміни жорсткості на зсув за  $K = 0,5$  та за незакріпленого кутового елемента армування, де: 1 – відносне переміщення, вант конструкції  $2 \times M$ , 2 – відносне переміщення, вант конструкції  $M \times M$ , 3 – відносний максимальний кут зсуву матеріалу вант, розташованого між елементами армування, вант конструкції  $2 \times M$ , 4 – відносний максимальний кут зсуву матеріалу

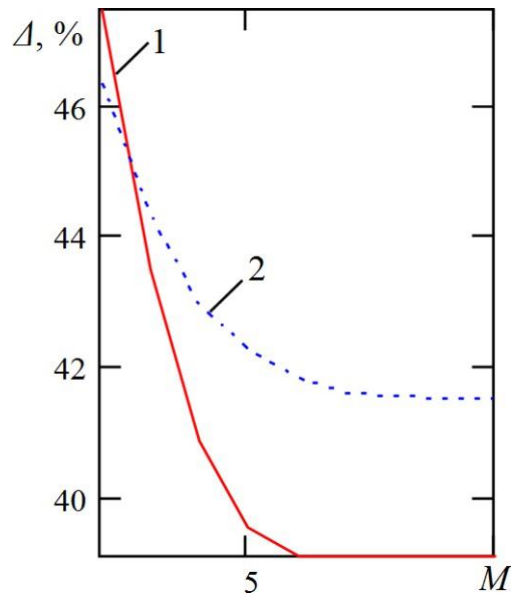


Рис. 4 – Залежності показників напружено-деформованого стану  $\Delta$ , зумовлених нелінійним законом зміни відношення модулів зсуву та розтягу  $K = 0,5$  та з розривом центрального елемента армування, від кількості елементів армування  $M$  ванті, виготовленої за схемою  $M \times M$ , де: 1 – відносне переміщення, 2 – відносний максимальний кут зсуву матеріалу ванті, розташованого поміж елементами армування

**Висновки.** Кількість рядів укладання елементів армування у ванті та місце розташування ушкодженого елемента армування несуттєво впливає на переміщення його кінця та не впливає на розподіл навантажень поміж елементами армування в перерізі ушкодження. Переміщення залежать від змінного по довжині ванті відношення модулів пружності на зсув еластичного матеріалу та елементів армування на розтяг.

#### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Ропай, В.А. (2016). *Shakhtnie uravnovesivayushchie kanati: monografiya. Natsionalnii gornii universitet.*

**Milica Tufegdžić<sup>1</sup>, Predrag Dašić<sup>2</sup>, Milorad Pavlović<sup>3</sup>** (*<sup>1</sup>Academy of Professional Studies Šumadija, Kragujevac, Serbia, <sup>2</sup>Engineering Academy of Serbia (IAS), Belgrade, Serbia, <sup>3</sup>University Clinical Center Niš, Clinic of Thoracic Surgery, Niš, Serbia*)

## **APPLICATION OF NANOPARTICLES FOR BONE FRACTURE HEALING**

**Abstract:** *Bone tissue represents a hierarchical nanocomposite consisting of organic and inorganic components. At the macroscopic level, bones appear as solid structures, but on closer inspection, they reveal a hierarchical structure that spans from the microscale to the nanoscale. Nanotechnology enables the use of biomaterials with a biomimetic structure and texture that closely resemble bone tissue, as well as novel therapeutic approaches in bone fracture treatments. The possibilities for the utilization of nanometals, nanometallic oxides, ceramics, and magnetic nanomaterials are described. Examples of some polymers and nanocomposites are also presented.*

**Анотація:** *Кісткова тканина представляє собою ієрархічний нанокомпозит, що складається з органічних та неорганічних компонентів. На макроскопічному рівні кістки здаються твердими структурами, але при ближчому розгляді вони розкривають ієрархічну структуру, що охоплює від мікроскопічного до наномасштабного рівня. Нанотехнології дозволяють використовувати біоматеріали з біоміметичною структурою та текстурою, що дуже нагадують кісткову тканину, а також нові терапевтичні підходи в лікуванні переломів кісток. Описані можливості використання нанометалів, оксидів, кераміки та магнітних наноматеріалів. Також наведені приклади деяких полімерів та нанокомпозитів.*

### **1. INTRODUCTION**

Nanoparticles are tiny, differently shaped small particles, no larger than 100 nanometers in at least one dimension, made from metals, metal oxides, polymers, or/and biological substances [1]. They possess unique characteristics compared to conventional materials [2], which makes them suitable for biomedical applications [3], especially for treating bone-related diseases. The most common bone-related diseases are osteoporosis, osteoarthritis, rheumatoid arthritis, bone fractures, bone cancer, and bone infection. This group of skeletal disorders is associated with different factors (trauma, infection, aging, etc.) [4], but in the most cases results in bone deterioration and joint deformity [5].

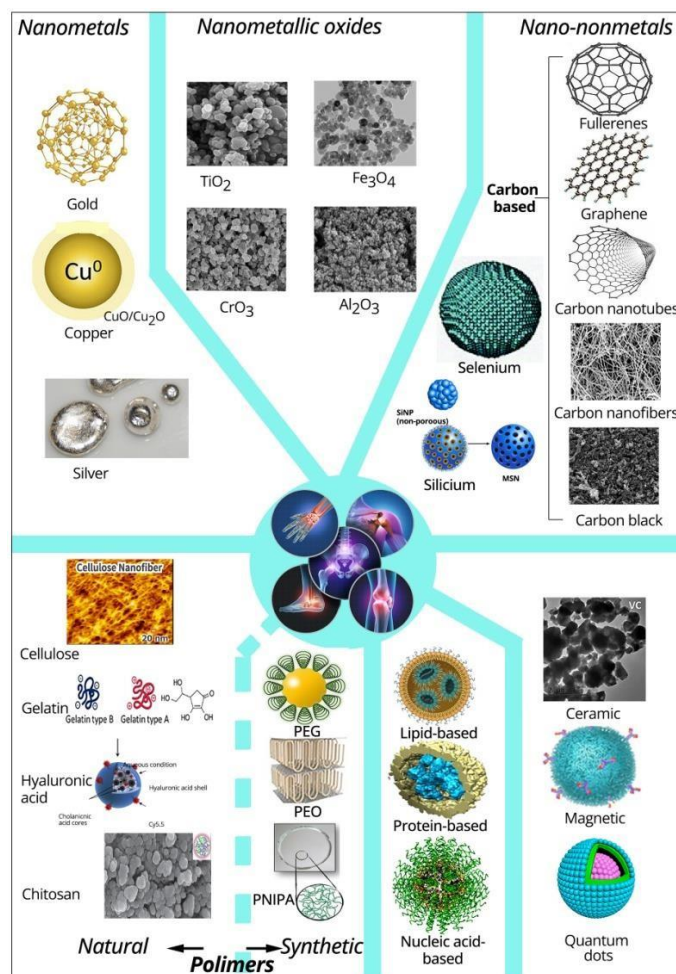
Conventional treatments of bone defects include autografts, allografts, and synthetic grafts, depending on whether the tissue was taken from the patient himself, a donor or it obtained synthetically [6,7]. Autografts prove to be the best solution in terms of compatibility and acceptance, but there are some issues to consider. It primarily refers to limited bone sources, deformities, muscle weakness, and some surgical complications, like infections, inflammations, and

bleeding [2,3,7-10]. In addition, the cost of intervention and patient care must be taken into account [2].

Sometimes, when large-scale bone defects exist due to great trauma, tumor resection, or infection, natural bone-healing process does not work [11], so the structural and functional reconstruction is not possible [2,7]. In such cases, it is necessary to use bone scaffolds as key elements for building the damaged area of bone tissue [1,4]. Scaffolds, as the dominant forms for bone grafts, represents three-dimensional biomaterial structures that serve as carriers for cells [12]. In addition, scaffold should serve as a lattice for cell adhesion, with the design of that mimics the extracellular matrix [13].

Since the bone and its structural parts are made of hydroxyapatite and collagen fibrils, nanotechnology-based biomaterials are ideal candidates for bone grafts [3]. These materials should have proper structural, mechanical, and biological properties, as well as good biocompatibility, osteoconductivity, and osteoinductivity [2,7]. They must also be non-toxic, corrosion resistant, with low elastic modules, and to have wear resistance in order to provide proper hardness and strength [1,14].

Classification of nanomaterials used for bone healing can be done according to various criteria (Fig. 1).



**Fig. 1:** Classification of nanomaterials for bone-related diseases [adapted from 15]

Depending on the chemical composition, there are inorganic and organic nanomaterials [31]. Inorganic nanomaterials show better chemical and mechanical stability than organic nanomaterials. They include nanometals (gold, copper, silver, titanium, etc.), nanometallic oxides (e.g.,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), nano-nonmetals (carbon-based, selenium, silicium), ceramic and magnetic nanomaterials, as well as quantum dots. Organic nanomaterials are lipid-based, polymeric, protein and nucleic acid-based nanomaterials [12,16]. Natural or synthetic polymers are used to form hydrogels. Examples of natural polymers include gelatin, hyaluronic acid, cellulose, and chitosan. The represents of synthetic polymers are polyethylene glycol (PEG), polyethylene oxide (PEO) or polyoxyethylene (POE), poly (N-isopropylacrylamide) (PNIPA) [16].

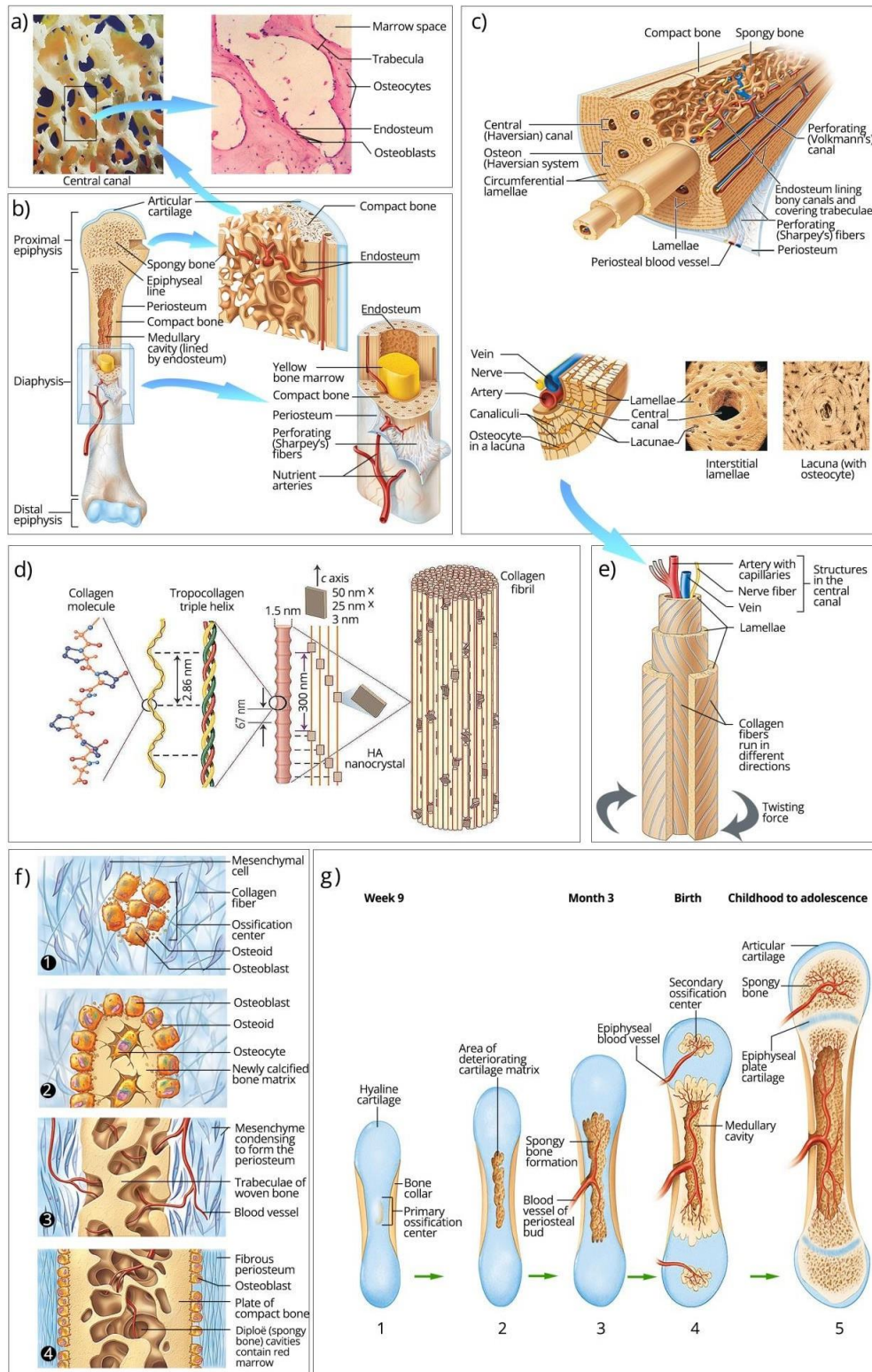
## 2. BONE MICROSTRUCTURE

Knowledge of the bone structure at microlevel is of crucial importance for the selection of the appropriate nanomaterial and scaffold building.

Compact bone builds the surface parts of all bones and therefore is called cortical bone. Spongy bone (trabecular bone, Fig. 2a) is located inside. In Fig. 2a a network of bone trabeculae together with photomicrograph of trabeculae are presented. In long bones spongy bone is mostly represented in the edges (see Fig. 2b). In central canal the greatest proportion of lamellae are arranged in concentric cylinders around neurovascular channels called Haversian canals. Illustration of a section from the diaphysis of a long bone and close-up of a portion of one osteon is presented in Fig. 2c. Osteon presented in Fig. 2e is drawn as a telescope to illustrate the individual lamellae [17,18].

Bone tissue represent unique material, due to the fact that it is composed of inorganic (i.e., minerals) and organic (i.e., collagenous matrix) elements [3]. It consists of specialized cells (bone matrix), intercellular substances (extracellular matrix - ECM), and components of the periosteum, endosteum and marrow. There are different types of bone tissue cells: osteogenic cells, osteoblasts, and osteocytes [17,18].

There are different types of bone tissue cells: osteogenic cells, osteoblasts, and osteocytes. Osteogenic cells are stem cells that have the capability to differentiate into osteoblasts, which are responsible for bone formation. Osteoblasts are cells that produce, deposit and mineralize bone matrix: the ground substance and the collagen fibers. The bone matrix secreted by osteoblasts is osteoid tissue or osteoid. When osteoblasts become surrounded by bone matrix and are no longer actively producing new osteoid, they transform into osteocytes. Osteocytes play a crucial role in maintaining bone matrix's health.



**Fig. 2:** a) Micrograph of spongy bone; b) the structure of a long bone (humerus) in anterior view; c) microscopic structure of compact bone; c) scanning electron microscopy (left) and light photomicrograph (right) of a cross section of one osteon (215x and 200x, respectively); d) the hierarchical structure and main nanostructure of human bone; e) single osteon; f) intramembranous ossification: development of a flat bone of the skull in the fetus; g) endochondral ossification of a long bone [adapted from 17,18,19]

Osteoclasts are specialized cells responsible for the resorption or breakdown of bone tissue. They play a crucial role in bone remodeling, as they help to regulate bone mass by removing old or damaged bone and allowing for the formation of new bone. Osteoclasts are multinucleated cells derived from the fusion of monocyte/macrophage lineage cells. They attach to the bone surface and secrete acids and enzymes that dissolve the mineralized matrix of bone, releasing calcium and other minerals into the bloodstream. This process is essential for maintaining bone integrity, repairing microdamage, and regulating calcium levels in the body [17,18].

Ossification refers to the process of bone formation or the conversion of other connective tissues into bone, and is regulated by osteoblasts along with the bone matrix. It occurs through two main mechanisms: intramembranous ossification and endochondral ossification. Intramembranous ossification (Figure 2f) proceeds in the following way: 1. ossification centers appear in the fibrous connective tissue membrane; 2. bone matrix (osteoid) is secreted within the fibrous membrane and calcifies; 3. woven bone and periosteum form; 4. lamellar bone replaces woven bone, just deep to the periosteum [17,18].

In the process of endochondral ossification (Figure 2g) bone tissue is formed by replacing a cartilage model. The following stages are presented in Fig. 2f: 1. Bone collar forms around hyaline cartilage model. 2. Cartilage in the center of the diaphysis calcifies and then develops cavities. 3. The periosteal bud invades the internal cavities, and spongy bone begins to form. 4. The diaphysis elongates and a medullary cavity form as ossification continues. Secondary ossification centers appear in the epiphyses in preparation for the next stage 5. The epiphyses ossify. When completed, hyaline cartilage remains only in the epiphyseal plates and articular cartilages [17,18].

The organic content of the bone matrix is a complex, biphasic system. The major portion is organic matter, with the most abundant protein collagen type I, organized in fibers. Collagen contributes to the mechanical strength of bone. The inorganic constituents of ECM are bone minerals. Calcium phosphate ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ) in the form of hydroxyapatite (HA) crystals are the most abundant in mineral content of ECM. Therefore, at the micro level (Figure 2d), bone tissue is mainly a three-dimensional (3D) nanostructure composed of HA and self-assembled collagen fibers [6,17,18].

### **3. BONE FRACTURE REPAIR MATERIALS**

Despite its good mechanical properties, bones are prone to fractures, mostly resulting from trauma, such as falls, injuries, or car accidents. Treatment for a broken bone, also known as a fracture, depends on various factors including the severity and location of the fracture, as well as the age and overall health of the individual. However, general steps in treating a broken bone typically involve reduction (alignment) and immobilization, followed by the healing process.



The healing of a simple fracture typically involves several overlapping stages: hematoma formation, fibrocartilaginous callus formation, bony callus formation, and bone remodeling [2,11,17]. This process starts with the proliferation and migration of osteoprogenitor cells, followed by differentiation of osteoprogenitor cells. These cells diverse growth factors and signal mediators to stimulate vascularization and ECM formation [11,20,21].

Bone fracture repair materials vary depending on the type and severity of the fracture, as well as the preferences of the surgeon and patient. Some common materials and techniques used in bone fracture repair include metallic implants, intramedullary nails, external fixators, biodegradable implants, bone grafts, bone cement, and biological stimulants. The selection of fracture repair materials depends on various factors including the location and type of fracture, the patient's age and health status, the surgeon's expertise, and the goals of treatment.

### **3.1 Nanomaterials and nanocomposites used for bone fracture repair**

Nanomaterials and nanocomposites possess the ability to precisely mimic hierarchical and nanoscale features of bones organization of the natural ECM. They can facilitate development of functional bone tissues via osteo-mimetic architecture [22]. Nanoscale materials in bone tissue can serve as a scaffold for superior tissue repair through mechanical stimulation. They are often used for the release of various loaded drugs and mediators, providing a 3D framework for cell growth and the differentiation of bone marrow stem cells into osteocytes [20].

In fracture healing process nanomaterials play a role in enhancing oxidation resistance, exerting antibacterial effects, facilitating the osteogenic differentiation of mesenchymal stem cells (MSCs), and suppressing the differentiation and maturation of osteoclasts [23].

Metallic, metallic alloys, and oxide nanoparticles adhered to orthopedic implants and scaffolds can be released and promptly react to the nearby surroundings when subjected to specific stimuli, such as changes in temperature, pH levels, exposure to a magnetic field, and other related factors [21]. They have been extensively employed as osteogenic/chondrogenic bioactive agents for bone/cartilage tissue regeneration because of their outstanding biocompatibility, unique physicochemical characteristics, ease of surface modification, and numerous biological activities that can influence the destiny of cells [3].

Gold nanoparticles regulate osteoclasts differentiation and therefore were used to facilitate this process [6, 21]. Due to the fact that silver nanoparticles have intrinsic antimicrobial properties, in a composite material such as polydopamine-hydroxyapatite-chitosan hybrids, silver nanoparticles were added. This greatly diminishes microbial infection at the implantation site [6,21]. Copper nanoparticles could be utilized to create materials with great bioactivity and antimicrobial efficacy, thereby offering a promising solution for infection prevention and the management of bone defects. Copper oxide nanoparticles could be used to enhance the mechanical properties, cell viability, and electrical

conductivity of HA scaffold. Applied zinc silicate mineral nanoparticles through coating onto the surface of a nanofibrous scaffold, aided in the augmentation of stem cell proliferation and osteogenic differentiation. Additionally, zinc oxide nanoparticles exhibit antimicrobial properties [21]. Metallic bone substitutes, including titanium and its alloys, are frequently employed in orthopedic applications. These materials are robust and resilient and can be engineered to closely mimic the mechanical characteristics of natural bone tissue [24]. Titanium with nanonetwork structures was sequentially infused with Ag nanoparticles to augment antibacterial efficacy, followed by a coating of N-acetyl cysteine to enhance biocompatibility [25]. "Smart" nanomaterials like magnetic nanoparticles can be employed in hard tissue repair, such as bone regeneration and healing [2,21].

In orthopedic applications, various types of nonmetallic nanotechnology-based biomaterials are utilized, including bioactive ceramics, carbon composites, and polymeric materials. While these materials offer advanced properties suitable for structural implantation, they are often accompanied by drawbacks such as inherent bioincompatibility and inadequate mechanical properties [3].

Allotrope graphene, a crystalline form of carbon, consists of a single monolayer of sp<sup>2</sup>-hybridized carbon atoms arranged in a hexagonal lattice. This monolayer serves as the fundamental structural unit of various carbon allotropes, that enhance the mechanical properties of the bone [23]. A blend of graphene oxide and HA within a polymeric matrix not only increased the mechanical strength but also improved the osteoblasts' adherence capability, resulting in effective osteogenesis. Graphene oxide nanoparticles with carbon nanotubes as fillers enhanced bone regeneration [26]. Graphene oxide nanoparticles (nGO) were applied as a coating on the surface of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> magnetic nanoparticles [12]. Noble metal films combined with Ag or Au nanostructures on titanium implant materials, have been employed to alter the surface of two varieties of carbon-based materials: carbon composite fiber material and carbon-fiber-reinforced polyetheretherketone, with the aim to enhance the properties of carbon-based materials for implantation [27].

When graphene was mixed with polyvinyl alcohol or with chitosan, enhanced mechanical strength of the material is obtained. Carbon nanotubes and nanofibers mimic the ECM and enhance bone cell adhesion by promoting the increased adsorption of proteins. Multi-walled carbon nanotubes incorporated into hydroxyapatite within poly(lactic-co-glycolic acid) has presented good bone healing properties [28]. Combining carbon nanotubes with natural polymers like chitosan and collagen, leads to the formation of an interconnected molecular structure with superior mechanical properties. Chitosan combined with HA was employed in 3D printing scaffolds aimed at enhancing the mechanical strength of bone implants [6].

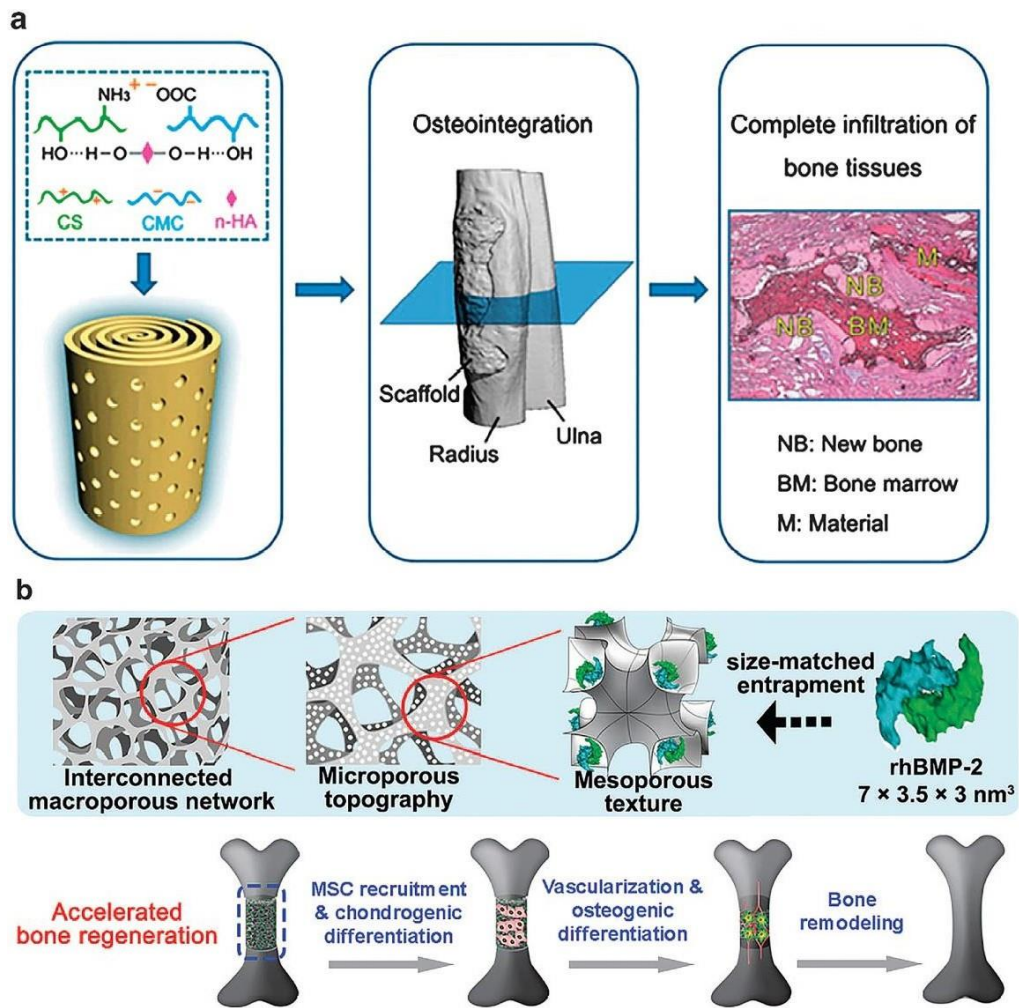
Calcium phosphate-based hydroxyapatite (HAp) matrix is extensively used as a biomaterial or bone substitute because of its resemblance to the ECM. Moreover, it has been discovered to be sufficiently biocompatible to stimulate

osteoblasts to initiate bone formation when incorporated into nanofibers. It is frequently utilized as a filler in polymers to enhance their mechanical properties and as a coating for metal implants with the aim to enhance bioactivity [1,11,23]. Nano-hydroxyapatite and polyamide particles were employed as carriers for agents in chitosan to augment bone regeneration. However, to enhance the behavior of hydroxyapatite (HA), magnetic nanoparticles were integrated. Bioglasses are considered as fillers in bone scaffolds from hydroxyapatite (HA), due the fact that bioglasses improve osteointegrative performance [26].

Black phosphorus nanomaterials demonstrate good biocompatibility and biodegradability. Besides that, they have excellent photothermal and photodynamic therapy effects, which enables their utilization in promoting bone regeneration [8]. A diverse array of materials is employed in nanofibrous scaffolds fabrication for bone and cartilage tissue engineering. Some examples include natural polymers (collagen, chitosan, silk, fibrinogen, etc.), synthetic polymers (polycaprolactone (PCL), poly (L-lactic acid) (PLLA), polyglycolide, PEG, etc.), and hybrid materials (silver with PCL, etc.) [11,29]. Polymers offer significant benefits due to their biological similarity to bone, flexibility, lightweight nature, ease of modification, and the ability to degrade into non-toxic components [21].

Electrospun natural fibers like collagen, gelatin, silk, and chitosan demonstrate exceptional cell attachment to facilitate osteogenesis. However, their behavior is unpredictable, and they pose a risk of infection and inflammation [28]. Chitosan combined with various functionalized materials like silver, magnesium oxide, and bioactive glass has facilitated the management of infected bone defects, exhibiting biodegradable properties at the site of bone defects [6].

Integrating nanomaterials into scaffolds can enhance their mechanical characteristics and establish a nanostructure with increased wettability, surface area and roughness. Thereby fostering cell adhesion and proliferation on the scaffold. Additionally, they can facilitate biomaterial-driven bone regeneration by enhancing protein adsorption, nutrient exchange, and porosity compared to macroscale biomaterials [22,12]. Examples of nanocomposites that could foster bone formation and regeneration include encapsulated zinc silicate into a nanohydroxyapatite/collagen scaffold and strontium-substituted submicrometer bioactive glass [10]. Nano-hydroxyapatite combined with chitosan, introduced a sodium carboxymethyl cellulose hybrid membrane. This membrane exhibited a spiral-cylindrical shape. The cylindrical scaffold, resembling natural bone, facilitated thorough infiltration of bone tissues, leads to osteointegration and functional reconstruction of damaged bone (Fig. 3a). In order to attain prolonged release and attractive bone regeneration capacity, recombinant human bone morphogenetic protein-2 (rhBMP-2) was loaded on a trimodal (macro/micro/nano) mesoporous bioactive glass scaffold [20].



**Fig. 3:** a) Biomimetic spiral-cylindrical scaffold based on hybrid chitosan/cellulose/nano-hydroxyapatite membrane; b) tri-modal macro/micro/nanoporous scaffold loaded with rhBMP-2 for accelerated bone regeneration [adapted from 20]

Montmorillonite clay was altered using chitosan/hydroxyapatite-zinc oxide nanocomposites to replicate the structure of the natural bone matrix. The scaffolds of chitosan/polyvinyl alcohol/graphene oxide/hydroxyapatite/gold films were also produced. These nanocomposites, besides mechanical strength, also exhibit antibacterial properties [6]. Composite SF/GO-Dex-ZnO obtained by coating layered ZnO nanotubes/silk fibroin/graphene oxide nanostructures (SF/GO-ZnO) with the osteogenic drug dexamethasone (Dex) exhibited superb bactericidal and osteogenic efficacy [30]. GO/CS/nHAP (GO/chitosan/nano-hydroxyapatite) scaffolds have very good physical and chemical characteristics, including a three-dimensional porous bone structure, mechanical properties, degradability, and water absorption [30]. Promoting new bone formation and bone repair is enabled by PLGA/MBG/ZIF-8/BMP-2 (porous poly-(lactide-co-glycolide)/mesoporous bioactive glass/ zeolitic imidazolate framework-8/bone morphogenetic protein-2) scaffold [32].

Metallic nanoparticles have additionally been integrated into scaffolds to enhance mechanical strength, cellular adhesion, and bone-forming capability [13]. Coatings composed of HA, incorporating 10% zinc, magnesium, and

strontium ions, enhanced implant osseointegration and optimized the microstructure of the bone implant [21]. A multi-layer scaffold comprised a soft nanosilicate phase and a rigid mineral-based phase crafted from bio glass was designed for bone tissue engineering applications [9].

#### 4. CONCLUSION

Nanoparticles are considered as an almost optimal solution for bone healing because of their capacity to mimic the native bone extracellular matrix (ECM). This capacity makes them ideal candidates for orthopedic implants and scaffolds. The possibilities for the application of gold, silver, copper, copper oxide, and zinc oxide nanoparticles for bone fracture treatments are examined, along with some metallic bone substitutes, like titanium. The potential of various types of nonmetallic nanoparticles, including bioactive ceramics, carbon composites, and polymeric materials is briefly described. Examples of some nanocomposites are also listed.

#### REFERENCES

- [36] Dutt, Y.; Pandey, R.P.; Dutt, M.; Gupta, A.; Vibhuti, A.; Vidic, J.; Raj, VS.; Chang, CM. & Priyadarshini, A.: *Therapeutic applications of nanobiotechnology. Journal of Nanobiotechnology*, Vol. 21 (2023), Article no. 148. doi: [10.1186/s12951-023-01909-z](https://doi.org/10.1186/s12951-023-01909-z).
- [37] Wang, Q.-F.; Yan, J.-H.; Yang, J.-L. & Li, B.-Y.: *Nanomaterials promise better bone repair. Materials Today*, Vol. 19, Issue 8 (2016), pp. 451–463. doi: [10.1016/j.mattod.2015.12.003](https://doi.org/10.1016/j.mattod.2015.12.003).
- [38] Gu, N. (editor): *Nanomedicine. Singapore (Singapore): Springer Nature Singapore Pte. Ltd., 2023. – 895 pp. ISSN 2522-5065 and ISBN 978-981-16-8983-3. doi: 10.1007/978-981-16-8984-0*.
- [39] Liu, X.; Sun, S.; Wang, N.; Kang, R.; Xie, L. & Liu, X.: *Therapeutic application of hydrogels for bone-related diseases. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, Vol. 10 (2022), Article no. 998988. doi: [10.3389/fbioe.2022.998988](https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.998988).
- [40] Zheng, K.; Bai, J.; Yang, H.; Xu, Y.; Pan, G.; Wang, H. & Dechun Geng, D.: *Nanomaterial-assisted theranosis of bone diseases. Bioactive Materials*, Vol. 24 (2023), 263–312. doi: [10.1016/j.bioactmat.2022.12.014](https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2022.12.014).
- [41] Zhao, S.K.; Murugan, S.S.; Dalavi, P.A.; Gupta, S.; Anil, S.; Seong, G.H. & Venkatesan, J.: *Biomimetic chitosan with biocomposite nanomaterials for bone tissue repair and regeneration. Beilstein Journal of Nanotechnology*, Vol. 29, Issue 13 (2022), pp. 1051–1067. doi: [10.3762/bjnano.13.92](https://doi.org/10.3762/bjnano.13.92).
- [42] Peng, Z.; Zhao, T.; Zhou, Y.; Li, S.; Li, J. & Leblanc, R.M.: *Bone tissue engineering via carbon-based nanomaterials. Advanced Healthcare Materials*, Vol. 9, Issue 5 (2020), Article no. e1901495. doi: [10.1002/adhm.201901495](https://doi.org/10.1002/adhm.201901495).
- [43] Qing, Y.; Li, R.; Li, S.; Li, Y.; Wang, X. & Qin, Y.: *Advanced black phosphorus nanomaterials for bone regeneration. International Journal of Nanomedicine*, Vol. 15 (2020), pp. 2045–2058. doi: [10.2147/IJN.S246336](https://doi.org/10.2147/IJN.S246336).
- [44] Keshavarz, M.; Alizadeh, P.; Kadumudi, F.B.; Orive, G.; Gaharwar, A.K.; Castilho, M.; Golafshan, N. & Dolatshahi-Pirouz, A.: *Multi-leveled nanosilicate implants can facilitate near-perfect bone healing. ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 15, Issue 17 (2023), pp. 21476–21495. doi: [10.1021/acsami.3c01717](https://doi.org/10.1021/acsami.3c01717).

- [45] Chen, R.; Hao, Z.; Wang, Y.; Zhu, H.; Hu, Y.; Chen, T.; Zhang, P. & Li, J.: Mesenchymal stem cell-immune cell interaction and related modulations for bone tissue engineering. *Stem Cells International*, Vol. 14 (2022), Article no. 7153584: pp. 1–19. ISSN 1687-966X. doi: [10.1155/2022/7153584](https://doi.org/10.1155/2022/7153584).
- [46] Rothe, R.; Hauser, S.; Neuber, C.; Laube, M.; Schulze, S.; Rammelt, S. & Pietzsch, J.: Adjuvant drug-assisted bone healing: advances and challenges in drug delivery approaches. *Pharmaceutics*, Vol. 12, Issue 5 (May 2020), Article no. 428: pp. 1–39. eISSN 1999-4923. doi: [10.3390/pharmaceutics12050428](https://doi.org/10.3390/pharmaceutics12050428).
- [47] Li, Y.; Xu, C. & Lei, C.: The Delivery and activation of growth factors using nanomaterials for bone repair. *Pharmaceutics*, Vol. 15, Issue 3 (March 2023), Article no. 1017: pp. 1–24. eISSN 1999-4923. doi: [10.3390/pharmaceutics15031017](https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15031017).
- [48] Walmsley, G.G.; McArdle, A.; Tevlin, R.; Momeni, A.; Atashroo, D.; Hu, M.S.; Feroze, A.H.; Wong, V.W.; Lorenz, P.H.; Longaker, M.T. & Wan, D.C.: Nanotechnology in bone tissue engineering. *Nanomedicine*, Vol. 11, Issue 5 (2015), pp. 1253–1263. doi: [10.1016/j.nano.2015.02.013](https://doi.org/10.1016/j.nano.2015.02.013).
- [49] Gautam, S.; Bhatnagar, D.; Bansal, D.; Batra, H. & Goyal, N.: Recent advancements in nanomaterials for biomedical implants. *Biomedical Engineering Advances*, Vol. 3 (2022), Article no. 100029. doi: [10.1016/j.bea.2022.100029](https://doi.org/10.1016/j.bea.2022.100029).
- [50] Zhao, F.; Yao, D.; Guo, R.; Deng, L.; Dong, A. & Zhang, J.: Composites of polymer hydrogels and nanoparticulate systems for biomedical and pharmaceutical applications. *Nanomaterials*, Vol. 5, Issue 4 (2015), pp. 2054–2130. doi: [10.3390/nano5042054](https://doi.org/10.3390/nano5042054).
- [51] Du, C.-C. & Wei, H.: Progress and prospects of nanocomposite hydrogels in bone tissue engineering. *Nanocomposites*, Vol. 8, Issue 1 (2022), pp. 102–124. doi: [10.1080/205550324.2022.2076025](https://doi.org/10.1080/205550324.2022.2076025).
- [52] Standring, S. (Editor-in-Chief): *Gray's anatomy: The anatomical basis of clinical practice*. 42th Edition. Philadelphia (Pennsylvania – USA): Elsevier Health Science, 2020. – 1606 pp. ISBN 978-0-7020-7705-0.
- [53] Marieb, E.N.; Wilhelm, P.B. & Mallatt, J.: *Human anatomy*. 9th Edition. San Francisco (California – USA): Pearson Education, 2019. – 896 pp. ISBN 978-0-13-516805-9.
- [54] Wei, S.; Ma, J.-X.; Xu, L.; Gu, X.-S. & Ma, X.-L.: Biodegradable materials for bone defect repair. *Military Medical Research*, Vol. 7, Issue 1 (2020), Article no. 54: pp. 1–25. doi: [10.1186/s40779-020-00280-6](https://doi.org/10.1186/s40779-020-00280-6).
- [55] Yi, H.; Rehman, F.U.; Zhao, C.-Q.; Liu, B. & He, N.-Y.: Recent advances in nano scaffolds for bone repair. *Bone Research*, Vol. 4 (December 2016), Article no. 16050: pp. 1–11. ISSN 2095-4700. doi: [10.1038/boneres.2016.50](https://doi.org/10.1038/boneres.2016.50).
- [56] Wang, N.; Fuh, J.Y.H.; Dheen, S.T. & Kumar, S.A.: Functions and applications of metallic and metallic oxide nanoparticles in orthopedic implants and scaffolds. *Journal of Biomedical Materials Research, Part B: Applied Biomaterials*, Vol. 109, Issue 2 (2021), pp. 160–179. doi: [10.1002/jbm.b.34688](https://doi.org/10.1002/jbm.b.34688).
- [57] Gong, T.; Xie, J.; Liao, J.-F.; Zhang, T.; Lin, S.-Y. & Lin, Y.-F.: Nanomaterials and bone regeneration. *Bone Research*, Vol. 3 (November 2015), Article no. 15029: pp. 1–7. ISSN 2095-4700. doi: [10.1038/boneres.2015.29](https://doi.org/10.1038/boneres.2015.29).
- [58] Zhang, M.; Xu, F.; Cao, J.-C.; Dou, Q.-Q.; Wang, J.; Wang, J.; Yang, L. & Chen, W.: Research advances of nanomaterials for the acceleration of fracture healing. *Bioactive Materials*, Vol. 31 (January 2024), pp. 368–394. doi: [10.1016/j.bioactmat.2023.08.016](https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2023.08.016).
- [59] Ding, W.; Ge, Y.-X.; Zhang, T.; Zhang, C., Yin, X-F.: Advanced construction strategies to obtain nanocomposite hydrogels for bone repair and regeneration. *NPG Asia Mater*, Vol. 16 (March 2024), Article no. 14: pp. 1–18. doi: [10.1038/s41427-024-00533-z](https://doi.org/10.1038/s41427-024-00533-z).

- [60] Zhang, H.-H., Hatoko, M.; Yin, D.; Yang, Y.-Y.; Zeng, Y.-H.; Komasa, S.-S.; Kusumoto, T.-S.; Nishizaki, H.; Shimizu, H.; Zhao, W.-H. & Okazaki, J.: *Antibacterial activity and biocompatibility of nanoporous titanium doped with silver nanoparticles and coated with n-acetyl cysteine. Journal of Hard Tissue Biology, Vol. 27, Issue 4 (December 2018), pp. 351–358. ISSN 1341-7649. doi: [10.2485/jhtb.27.351](https://doi.org/10.2485/jhtb.27.351).*
- [61] Abdollahiyan, P.; Oroojalian, F.; Hejazi, M.; De La Guardia, M. & Mokhtarzadeh, A.: *Nanotechnology, and scaffold implantation for the effective repair of injured organs: An overview on hard tissue engineering. Journal of Controlled Release, Vol. 333 (May 2021), pp. 391–417. doi: [10.1016/j.jconrel.2021.04.003](https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2021.04.003).*
- [62] Dorovskikh, S.I.; Vikulova, E.S.; Sergeevichev, D.S.; Guselnikova, T.Ya.; Zheravin, A.A.; Nasimov, D.A.; Vasilieva, M.B.; Chepeleva, E.V.; Saprykin, A.I.; Basova, T.V. & Morozova, M.B.: *Biological studies of new implant materials based on carbon and polymer carriers with film heterostructures containing noble metals. Biomedicines, Vol. 10, Issue 9 (September 2022), Article no. 2230: pp. 1–25. eISSN 2227-9059. doi: [10.3390/biomedicines10092230](https://doi.org/10.3390/biomedicines10092230).*
- [63] Brannigan, K. & Griffin, M.: *An update into the application of nanotechnology in bone healing. The Open Orthopaedics Journal, Vol. 10, Suppl. 3: M2 (December 2016), pp. 808–823, doi: [10.2174/1874325001610010808](https://doi.org/10.2174/1874325001610010808).*
- [64] Qasim, M.; Chae, D.S. & Lee, N.Y.: *Advancements and frontiers in nano-based 3D and 4D scaffolds for bone and cartilage tissue engineering. International Journal of Nanomedicine, Vol. 14 (2019), pp. 4333–4351. ISSN 1176-9114. doi: [10.2147/IJN.S209431](https://doi.org/10.2147/IJN.S209431).*
- [65] Du, Z.-P.; Wang, C.-Y.; Zhang, R.-H.; Wang, X.-M. & Li, X.-M.: *Applications of graphene and its derivatives in bone repair: Advantages for promoting bone formation and providing real-time detection, challenges and future prospects. International Journal of Nanomedicine, Vol. 15 (2020), pp. 7523–7551. ISSN 1176-9114. doi: [10.2147/IJN.S271917](https://doi.org/10.2147/IJN.S271917).*
- [66] Dašić, P. & Milosavljević, M.: *Nano-materials and nano-technologies: A new era of digital devices (in Serbian). In: Proceedings of the 3rd International Scientific Conference Agribusiness MAK-2016: "Western Balkans and Europe"; Kopaonik, Serbia; 29-30 January 2016. Kraljevo (Serbia): Etno Centar GEGULA - Center for the Successful Development of Family Agriculture and Tourism & Raška (Serbia): Municipality of Raška, 2016, str. 1–40. ISBN 978-86-80510-00-2.*
- [67] Ma, R.; Su, Y.-W.; Cao, R.-M.; Wang, K.-Z. & Yang, P.: *Enhanced osteogenic activity and bone repair ability of PLGA/MBG scaffolds doped with ZIF-8 nanoparticles loaded with BMP-2. International Journal of Nanomedicine, Vol. 18 (2023), pp. 5055–5072. ISSN 1176-9114. doi: [10.2147/IJN.S423985](https://doi.org/10.2147/IJN.S423985).*

**Проданчук О.О.;** науковий керівник: д.т.н., професор Ступницький В.В.  
(Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна).

## **ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСІВ МЕТАЛООБРОБКИ ВАЖКООБРОБЛЮВАНИХ МАТЕРІАЛІВ ШЛЯХОМ СТВОРЕННЯ ДОСЛІДНОЇ УСТАНОВКИ.**

***Анотація:** У роботі розглянуто проблематику обробки важкооброблюваних матеріалів, складність аналізу даного типу металообробки, його дослідження, збору даних та подальшого аналізу. Запропоновано створення дослідної установки, яка полегшить вивчення даних процесів та дозволить значно оптимізувати дослідження у даній галузі.*

***Abstract:** The paper examines the problems of processing difficult-to-process materials, the complexity of analyzing this type of metalworking, its research, data collection, and further analysis. It is proposed to create a research facility that will facilitate the study of these processes and allow to significantly optimize research in this field.*

Обробка важкооброблюваних матеріалів - це складний процес, що включає безліч взаємопов'язаних етапів і факторів. Розуміння цих процесів та їх взаємодії є критичним для підвищення ефективності у сферах, таких як машинобудування. Ключові завдання для спеціалістів галузі полягають у поліпшенні якості обробки, зменшенні витрат і оптимізації робочого часу[1]. Вивчення параметрів різання, таких як швидкість, температура та силові характеристики, є ключовим у цьому контексті.

Швидкісні характеристики обробки, як от швидкість різання, зазвичай моніторяться за допомогою вбудованих контролерів у металообробних верстатах. Ці контролери автоматично збирають дані про швидкісні параметри обробки, полегшуючи та підвищуючи ефективність контролю над процесом. Отримані від них дані можна легко використовувати для подальшого аналізу у наукових дослідженнях, що сприяє удосконаленню розуміння процесів обробки металів та їх оптимізації.

Для вимірювання температури у зоні різання широко застосовується пірометр - пристрій, спеціально розроблений для безконтактного вимірювання температури непрозорих предметів шляхом реєстрації їх випромінювання в оптичному діапазоні. Використання пірометра дозволяє отримувати точні дані про температуру в важкодоступних місцях обробки без ризику для оператора чи дослідної команди.

Для комплексного вирішення завдання металообробки важкооброблюваних матеріалів неможливо обійтися без ретельного визначити силових параметрів досліджуваного процесу[2]. Однак дослідження цих параметрів стикається з труднощами через складність лабораторних установок, що вимагаються для таких вимірів. Ці установки, виготовлені лише кількома світовими виробниками, мають високу вартість



і є важкодоступними для більшості дослідників. Вирішенням цієї проблеми може стати застосування імітаційних методів досліджень, наприклад, у програмному середовищі DEFORM 2D[3]. Однак результати, отримані цим шляхом, потребують подальшого порівняльного аналізу з реальними експериментальними даними.

Щоб знайти рішення проблеми визначення силових параметрів різання, можливо розглянути створення спрощеного аналогу лабораторної установки. Основними критеріями для такого аналогу є його точність, простота збірки та експлуатації, а також доступність комплектуючих[4]. Ще одним важливим параметром є універсальність застосування дослідної установки, вона повинна підходити для проведення експериментальних досліджень та різни станких, не потребуючи додаткового обладнання, переходників чи будь-яких змін у конструкції. Виконання даних умов забезпечить легкість роботи, універсальність установки незалежно від місця проведення експерименту, отримання коректних, неспотворених даних для подальших досліджень та висновків.

Основою експериментальної установки є тензометричний датчик. Тензометричний датчик - це пристрій, призначений для вимірювання деформації тіла під дією зовнішнього навантаження. Його основним призначенням є вимірювання сили або тиску, який діє на об'єкт, що вивчається. Цей тип датчиків заснований на використанні ефекту тензорезистивності, що полягає в зміні електричного опору матеріалу під впливом механічного напруження. Історично, тензометричні датчики вперше були винайдені у 19 столітті та використовувались у дослідженнях механіки матеріалів. Сучасні тензометричні датчики мають високу точність і можуть вимірювати деформацію з великою чутливістю. Вони широко використовуються в промисловості для контролю за процесами виробництва, такими як тестування матеріалів, моніторинг напружень та ваги.



*Рис.1. Тензометричні датчики*

Однією з переваг тензометричних датчиків є їх невеликі розміри, що дозволяє їх використовувати в обмежених просторах. Ще однією перевагою

є їхній широкий діапазон робочих температур і вологості, що робить їх відмінними для застосування в різних умовах.

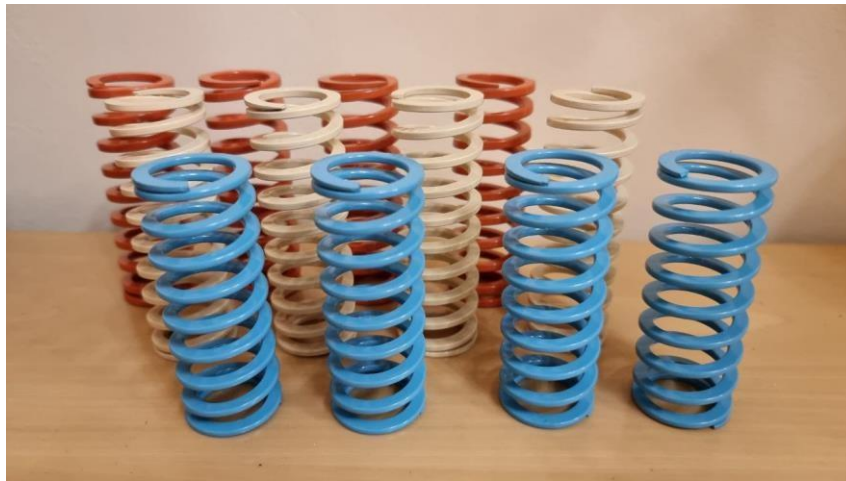
Проте недоліками тензOMETричних датчиків може бути складність калібрування і підтримки їхньої точності на протязі тривалого періоду. Також, вони можуть бути чутливими до зовнішніх впливів, таких як вібрація, що може впливати на точність вимірювань. Усі ці фактори не є критичними у конкретному випадку дослідної установки, але все ж можуть мати негативний вплив, тож це слід враховувати при аналізі одержаних даних.

У випадку даного конкретного призначення дослідної установки тензOMETричний датчик сприйматиме навантаження, при якому зазнаватиме незначної деформації, значення якої передаватиметься на контролер та перетворюватиметься на значення сили, яка діє на датчик через встановлену на установці оброблювану заготовку.

Контролер, який використовуватиметься у дослідній установці, здатен працювати з різними типами датчиків. Дана можливість відіграє важливу роль у підготовці компонентів для моделювання, збірки та застосування експериментальної установки. Використовуючи даний або аналогічний контролер ми отримуємо можливість працювати зі значно більшим об'ємом даних, який можна отримати, по чергово підключаючи датчики з різними характеристиками та чутливістю. Окрім того використання різних датчиків створює можливості для роботи з різними типами заготовок, досліджуючи різноманітні матеріали, об'єми обробки та робочі параметри верстата, на якому проводиться дослідження.

Оптимальним варіантом є застосування трьох типів датчиків. Дане рішення створює достатній робочий діапазон для зручності експерименту та отримання коректного масиву даних для подальшого аналізу. Звісно, використання більшої кількості тензOMETричних датчиків дозволить працювати ще з більшою кількістю заготовок різного об'єму та ваги, але й потребуватиме зміни та збільшення вартості конструкції. Окрім збільшення витрат, до негативних чинників збільшення кількості датчиків можна віднести збільшення розмірів дослідної установки. Дана зміна не є критичною, та все ж може мати негативний вплив, перешкоджаючи встановленню установки на моделі металообробних верстатів з невеликою робочою зоною.

Наступним питанням у створенні дослідної установки для дослідження силових параметрів процесів металообробки важкооброблюваних матеріалів є забезпечення тензOMETричного датчика від дії надмірних навантажень та пошкоджень у наслідок цього. Також необхідно мінімізувати вплив сторонніх чинників, а саме вплив маси робочого стола та елементів кріплення, на отримані контролером значення. Для зниження даного негативного впливу необхідно замінити звичайні для дослідних установок цього типу статичні колони-фіксатори на пружини стиску.



*Рис.2. Пружини дослідної установки*

Принцип роботи пружин стиску ґрунтується на законі Гука, де стискувальна сила пропорційна зміщенню інерційного елемента. Пружини стиску застосовуються для збереження потенційної енергії в системах, де необхідне стиснення або збільшення дії сили. Вони знаходять широке застосування в промисловості, від механічних пристроїв до автомобільного виробництва та будівництва. Різноманітні конструкції пружин стиску можуть бути виготовлені з різних матеріалів, таких як сталь, алюміній або композитні матеріали, залежно від потреб застосування. Параметри пружин стиску, такі як жорсткість, довжина і діаметр, ретельно розраховуються з урахуванням вимог конкретної системи. Одним з основних параметрів є стискаюча сила, яка залежить від геометрії пружини та матеріалу, з якого вона виготовлена. Принципово важливою є інженерна оцінка деформаційних характеристик, таких як стискаючий пружність модуль, а також межа міцності матеріалу. Пружини стиску можуть працювати в широкому діапазоні температурних умов, що робить їх ефективними в різних середовищах. Основні переваги використання пружин стиску полягають у їхній надійності, легкості в обслуговуванні та можливості забезпечення точного рівня стискаючої сили.

Як і у випадку з застосуванням декількох різновидів тензOMETричних датчиків, необхідно використати також декілька типів пружин під кожен з видів датчиків. Дане рішення обґрунтовується використанням різних типів заготовок з різною масою, можливістю дослідження процесів обробки з великими діапазонами сили різання. Відповідно, на більшу дію, потребуватиметься більша протидія. Для даної конкретної дослідної установки обрано три комплекти пружин, відповідно, для кожного типу датчика.

Підбір пружин з необхідними параметрами можна назвати окремим складним процесом з відповідними розрахунками розмірів січення, форми перерізу, типу ті частоти витків та матеріалу самої пружини. Розміри пружин підбираються відповідно до розмірів тензOMETричних датчиків.

Інші елементи корпусу дослідної установки, такі як нижня та верхня плити фіксації, виготовляються з металу. Конструктивні особливості даних плит виконуються відповідно до ергономічних потреб при роботі з кожним окремим станком, або групою однотипного обладнання. Потрібно завчасно врахувати габаритні розміри та вагу зразків важкооброблюваних, які будуть досліджуватись на даній установці. Іншим важливим елементом є забезпечення надійної фіксації як самої дослідної установки на столі верстата, так і заготовки вже на столі дослідної установки. Для зручного та простого забезпечення даної вимоги у плитах виконуються спеціальні фіксаційні отвори, а на нижній плиті вифрезеровуються пази, для надійної фіксації плеча затискного механізму.



*Рис.3. Нижня плита фіксації*

Реалізацію кріплення варто здійснювати надійними затискними механізмами з врахуванням значного запасу міцності, для забезпечення безпечної роботи оператора верстата та дослідної команди.

Після монтажу основних елементів, етапу припасування основних корпусних елементів слідує перевірка функціонування механічних вузлів. Якщо жодних несправностей не виявлено – потрібно переходити до наступного етапу, а саме підключення контролера до установки. Підключення відбувається згідно з рекомендованими схемами від виробника та з дотриманням техніки безпеки при роботі з електроприладами.

Підключені тензометричні датчики калібруються відповідно до рекомендацій виробника, які можуть різнитись, залежно від компанії та країни виробництва. Так як тензометричні датчики розраховані під різні потреби та мають різні характеристики, варто точно дотримуватись вказаних інструкцій до кожного окремого типу датчика, щоб не вплинути на результати досліджень або не пошкодити сам тензометричний датчик.



*Рис.4. Дослідна установка у зборі*

Дослідна установка для дослідження силових параметрів процесів металообробки важкооброблюваних матеріалів є простим у використанні та збірці пристроєм, який може забезпечити дослідну команду чітким масивом даних для проведення дослідних робіт у галузі металообробки та машинобудування. Завдяки своїй простоті та дешевизні пристрій дає змогу проводити експериментальні дослідження без значних фінансових вливань та пошуку спонсорів. Використання даної дослідної установки дає можливість не тільки отримати дані для подальших досліджень, але й застосувати їх для порівняння з масивом даних імітаційних досліджень отриманих у програмному середовищі, що відкриває нові можливості для дослідників галузі.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. *Vadym Stupnytskyy, Xianning She, Egidijus Dragašius, Saulius Baskutis, Oleh Prodanchuk "SIMULATION AND ANALYTICAL STUDIES OF CHIP FORMATION PROCESSES IN THE CUTTING ZONE OF TITANIUM ALLOYS", in UKRAINIAN JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING AND MATERIALS SCIENCE Vol. 9, No. 1, 2023, Lviv, Ukraine.*
2. *J. P. Davim, (Ed.), Machining of hard materials. London: Springer Science & Business Media, 2011.*
3. *Stupnytskyy, V., Prodanchuk, O., Stupnytska, N. (2022). Simulation Studies of High-Speed Machining. In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Rauch, E., Peraković, D. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing V. DSMIE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, pp. 332-344.*
4. *V. Stupnytskyy and I. Hrytsay, "Simulation Study of Cutting-Induced Residual Stress", Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE-2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 1, pp. 341-350, 2020.*

Stetsko A.E. (Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine)

## **FORMATION OF HIGH-QUALITY SURFACES OF THE MAIN PARTS OF COGENERATION MACHINES BY A COMPLEX METHOD WITH FINISHING MECHANICAL PROCESSING**

***Abstract:** In the article, research was carried out in the direction of solving the problems of ensuring the durability of the main parts of cogeneration machines; a new progressive approach was proposed to ensure the wear resistance of the responsible units of cogeneration machines at the stage of final mechanical processing during repair and production.*

***Анотація:** У статті проведено дослідження в напрямку вирішення проблем забезпечення довговічності основних частин когенераційних машин; запропоновано новий прогресивний підхід до забезпечення зносостійкості відповідальних вузлів когенераційних машин на етапі остаточної механічної обробки під час ремонту та виробництва.*

The main direction of industrial development is the development of new or improvement of already existing energy-saving technologies in order to reduce the cost of manufactured products and increase the productivity of machines designed for the generation of thermal and electrical energy. The current state of equipment of energy supply enterprises, including cogeneration machines, does not allow rational use of fuel and energy resources. This leads to a low efficiency of the machines involved and the profitability of the production process in general. Therefore, there is an urgent task related to ensuring the durability of the main parts of cogeneration machines [1-10].

In order to solve the problems of ensuring the reliability of the machine for the cogeneration of thermal and electric energy based on the internal combustion engine, the main parts should be systematized and modern technologies of their production should be determined.

In works [3], the scientific principles of the theory of reliability of internal combustion engines are outlined, modern methods of forecasting indicators of their physical and parametric reliability, ensuring operational reliability and durability are described. Ways to increase the reliability of internal combustion engines of various types and purposes are considered. The classification of failures and reliability indicators of internal combustion engines is proposed. The need to improve the technological processes of finishing the relevant surfaces of parts and assemblies of internal combustion engines was noted. However, the authors of the work [3] did not establish the relationship between the durability of the machine for the cogeneration of electric and thermal energy and the reliability indicators of the internal combustion engine.

In works [3], the scientific principles of the theory of reliability of internal combustion engines are outlined, modern methods of forecasting indicators of their physical and parametric reliability, ensuring operational reliability and

durability are described. Ways to increase the reliability of internal combustion engines of various types and purposes are considered. The classification of failures and reliability indicators of internal combustion engines is proposed. The need to improve the technological processes of finishing the relevant surfaces of parts and assemblies of internal combustion engines was noted. However, the authors of the work [3] did not establish the relationship between the durability of the machine for the cogeneration of electric and thermal energy and the reliability indicators of the internal combustion engine.

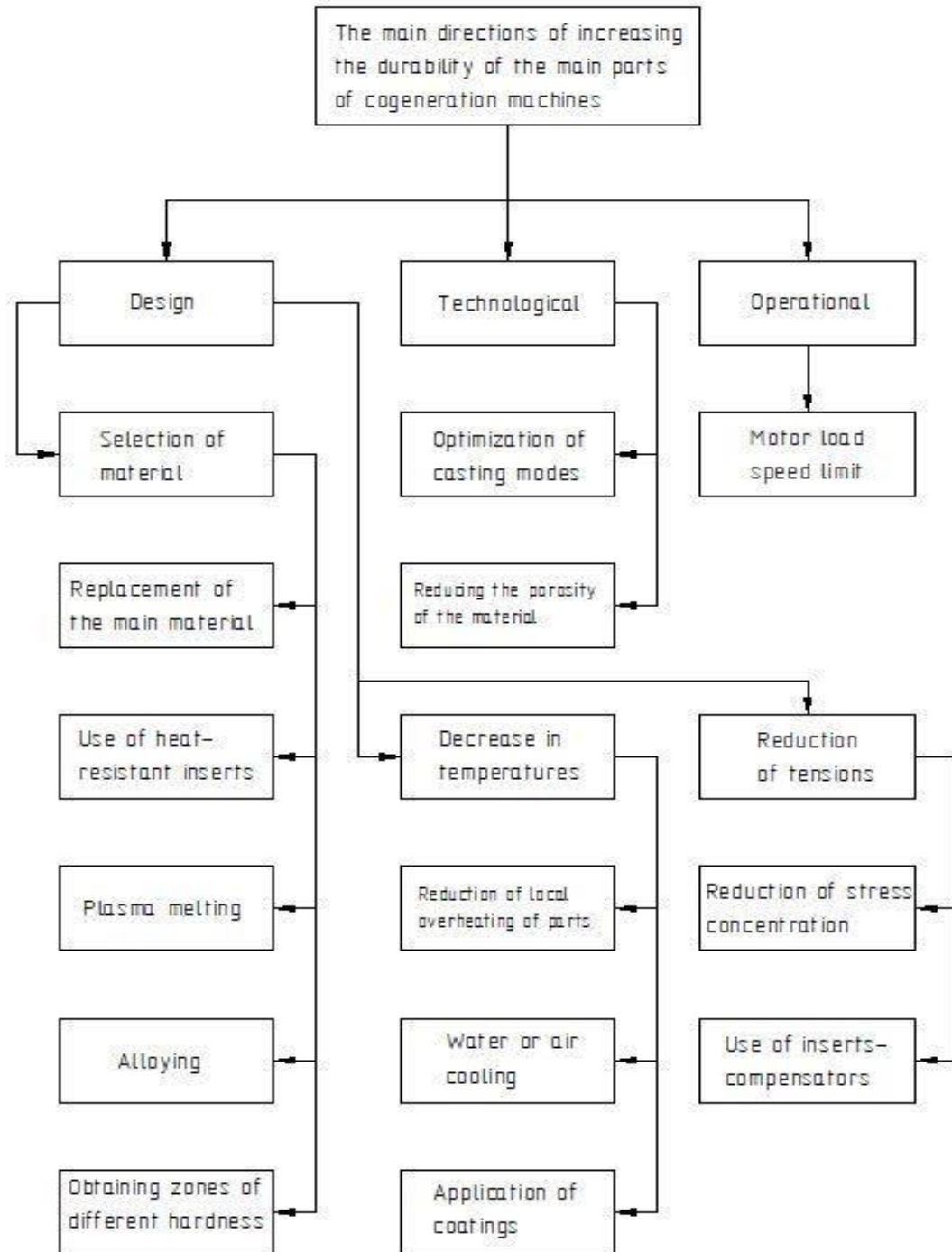


Fig. 1. The main directions of increasing the durability of the main parts of cogeneration machines

Based on works [1-10], existing directions for increasing the durability of the main parts of cogeneration machines are determined, as shown in Fig. 1.

As can be seen from Fig. 1 lacks one of the progressive technological directions of increasing the durability of the main parts of cogeneration machines - optimization of surface strengthening and the method and mode of finishing the relevant surfaces.

Traditionally [16], body parts include basic parts that perform the function of ensuring the accuracy of the relative position of nodes and mechanisms that are installed in its cavity under static and dynamic loading.

Based on the works [5-9], it should be noted that the reliability of the responsible parts of the machines depends on a number of factors, including the manufacturing process. Taking into account the modern trends in the development of tool materials [10] and the emergence of new metalworking centers, there is an urgent production task of improving the existing traditional technological processes, including the methods of surface strengthening and mechanical processing proposed in the work [10] by increasing the productivity of processing, stability of form-forming elements from simultaneous provision of quality indicators of treated surfaces. For this, it is necessary to consider the features of the main parts of machines for the cogeneration of thermal and electric energy (Fig. 1).

Based on the works [5-9], it should be noted that the reliability of the responsible parts of the machines depends on a number of factors, including the manufacturing process. Taking into account the modern trends in the development of tool materials [10] and the emergence of new metalworking centers, there is an urgent production task of improving the existing traditional technological processes, including the methods of surface strengthening and mechanical processing proposed in the work [10] by increasing the productivity of processing, stability of form-forming elements from simultaneous provision of quality indicators of treated surfaces. For this, it is necessary to consider the features of the main parts of machines for the cogeneration of thermal and electric energy (Fig. 2).

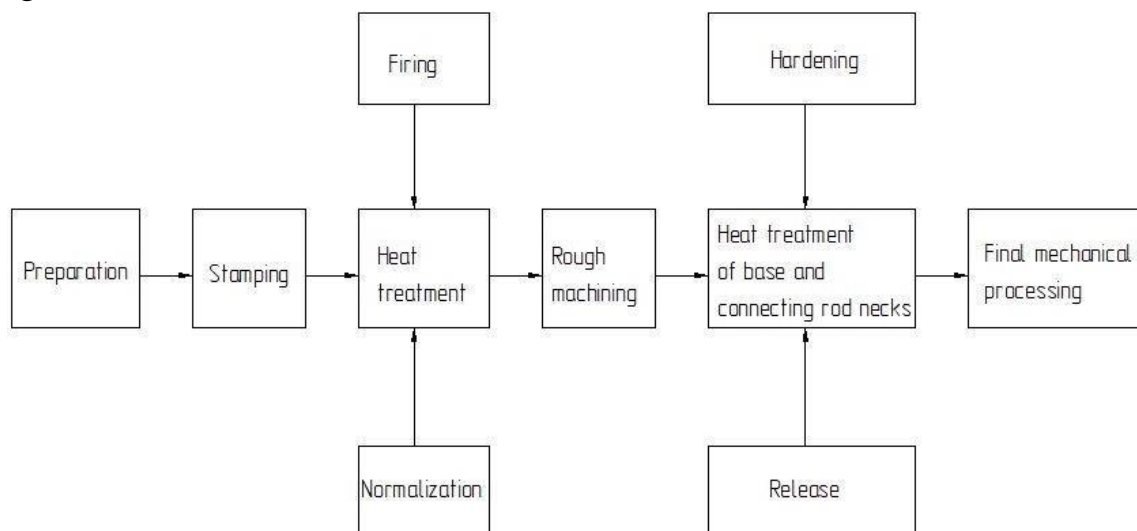


Fig. 2. The main stages of crankshaft manufacturing technology



The manufacturing technology of crankshafts is based on the primary stamping of the workpiece followed by heat treatment, during the implementation of which internal stresses in the metal are removed and its hardness is normalized (HB 177-255), which facilitates subsequent rough machining. After rough mechanical processing, the root and connecting rod necks are heat treated in order to form a hardened layer with a depth of 3–6.5 mm with a hardness of HRC 52–62 and further finishing. At the stage of finishing the crankshaft, the neck is polished followed by superfinishing. The methods of superfinishing the necks of crankshafts can include: polishing, processing with abrasive bars and rolling. It is known from works [10-14,16] that to increase the fatigue strength of heavily loaded crankshafts, their surface strengthening by rolling is used. However, this technology requires the design, manufacture and adjustment of additional equipment, which increases the cost of the manufactured part.

As evidenced by the results of scientific research [10-14,16], the reliability of the machine depends on the durability resource of the processed surfaces of the relevant parts and assemblies, which is formed during the finishing operations of mechanical processing. Therefore, considerable attention should be paid to optimizing methods of finishing mechanical processing of crankshafts in order to increase the durability of the machined surfaces of the relevant parts and the machine as a whole. According to literature sources [10-14,16], the connecting rod is the main element of the connecting rod - crank mechanisms of the internal combustion engine, which is designed to transmit force from the piston and convert its reverse - translational movement into a rotating engine crankshaft. During operation, the connecting rods are exposed to significant working loads and inertial forces, so the connecting rod must have sufficient strength and rigidity.

In the conditions of large-scale and mass production, connecting rod blanks are obtained by stamping on stamping hammers and crank presses. As the author notes in [10-14,16], for the mass production of connecting rods, it is more economical to pre-form the blank of connecting rods on forging rolls and final stamping on crank presses. Moreover, the holes of the crank head are obtained in blanks with an allowance for processing. Traditionally [10-14,16], the connecting rod holes of the internal combustion engine are processed according to the route: drilling, countersinking, one- or two-time reaming. The author in his work [17] notes that the strength of connecting rods is guaranteed by the correct choice of material and compliance with the requirements for their macro- and microstructure.

Thus, by choosing the optimal technological process of finishing the main parts of cogeneration machines, according to the criterion of the maximum quality of the treated surfaces with minimal costs, it is possible to increase the strength of the crank mechanism and the machine for the simultaneous generation of thermal and electrical energy as a whole.

To do this, we will consider the existing main approaches to technological assurance of the quality of processing cylindrical, flat surfaces and holes.

On the basis of the conducted research, we intend to ensure the durability of the main parts of the cogeneration machine by reorganizing the technological process of manufacturing and repair, by making changes to the finishing machining operations, namely, to replace low-productivity grinding with advanced cutting technology with preliminary plastic deformation. To achieve the goal, the authors developed methods for finishing cylindrical, flat surfaces, as well as holes by cutting with preliminary plastic deformation.

A Complex method of strengthening machine parts has been developed to strengthen high-wear parts of cogeneration machines, especially those that work in difficult friction conditions [20, 21]. This method has the following main stages: preliminary mechanical treatment, preparation for chemical deposition, chemical deposition, preparation for chemical-thermal treatment, carrying out chemical-thermal treatment according to specified modes, final mechanical treatment if necessary.

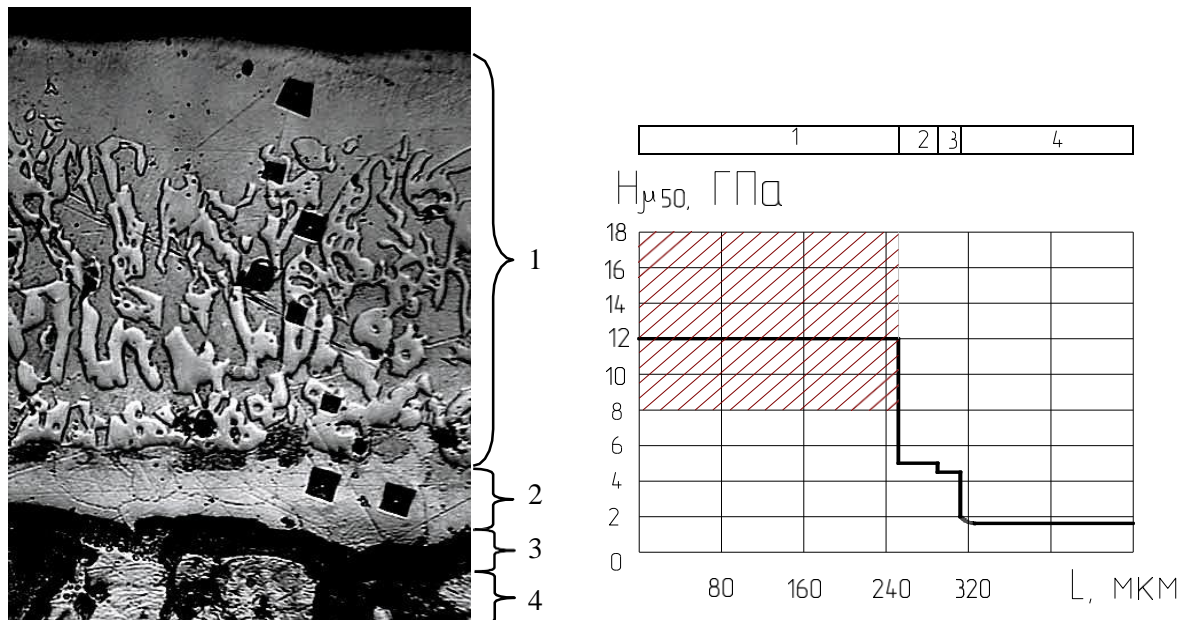


Fig. 3. Morphology and integral microhardness and thickness of the hardened layer formed by the Complex method of strengthening parts

After applying a Complex strengthening method, a strengthened layer is formed on the surfaces of the parts, which consists of several zones (Fig. 3): carbides in spherulite in  $\alpha$ -Fe (1); spherulite in  $\alpha$ -Fe (2); eutectoid layer (3); without carbon layer (4); inner part.

The thickness of the strengthened layer of the composite structure, depending on the modes of the Complex method, reaches several hundred micrometers, and the integral microhardness is 10,000-30,000 MPa (Fig. 3).

These parameters satisfy the strengthening conditions of most parts of according to the results of the approbation of the developed methods, several Ukrainian patents for inventions were obtained.

### Conclusions

As a result of the analysis of literary sources, it was established that the existing theoretical and experimental foundations of cutting technology with preliminary plastic deformation do not consider the influence of complex processing modes on the formation of operational properties of the processed surface. During the review of literary sources, which are devoted to the technology of cutting with preliminary plastic deformation, a restraining factor for the development of the above-mentioned technology was established, which consists in the use of de-forming elements made of steel, which during the processing of steel parts leads to the deterioration of the quality of the processed surface due to chemical affinity of tool and processed material. Therefore, the authors propose to use de-forming elements made of ceramics in the proposed cutting technologies with preliminary plastic deformation.

To strengthen wearing parts, a Complex method of strengthening the surfaces of such parts has been developed, which increases their service life several times.

### REFERENCES

1. *Analiz effektivnosti integrirovannykh sistem energosberezheniya na baze ustanovok kogeneratsii maloy moshchnosti i vozobnovlyayemykh istochnikov energii / G.A. Balasanyan, A.S. Mazurenko // Teplova yenergetika. 2008. №1. S. 7-10.*
2. *Koheneratsiyni tekhnolohiyi v maliy enerhetytsi: monohraftya / V.A. Malyarenko, O.L. Shubenko, S. YU. Andryeyev, M.YU. Babak, O.V. Senets'kyi / Kharkiv. nats. un-t mis'k. hosp-va im. O.M. Beketova, In-t problem mashynobud. im. A. M. Pidhornoho. – Kharkiv : KHNUMH im. O. M. Beketova, 2018. – 454 s.*
3. *Dvyhuny vnutrishn'oho z-horyannya: Seriya pidruchnykiv u 6 tomakh. T.6. Nadiynist' DVZ / Za red. Marchenka A.P., Shekhovtsova A.F. – Kharkiv: Vydavn. tsentr NTU “KHPI”, 2004.*
4. *Hodovans'kyi YU.Z., Stets'ko A.YE., Bilyavs'kyi L.A., Bilyavs'kyi M.L. Koheneratsiyna ustanovka z teplovym nasosom. Deklaratsiynny patent na korysnu model' № 52822, 10.09.2010, byul. №17.*
5. *Dolinskiy A.A., Basok B.I., Kolomeyko D.A. Analiz kogeneratsionnykh ustanovok. Chast' III. Sravnitel'nyy analiz skhemnykh resheniy kogeneratsionnykh ustanovok // Promyshlennya teplotekhnika. - 2006. - T.28. - №5. - S.73 - 78.*
6. *Energoberezheniye i kogeneratsiya energii v protsessakh neftepererabotki i neftekhimii / A.V. Stepanov, N.I. Sul'zhik, V.P. Salo, M.N. Timoshenko // Prom. teplotekhnika. — 2004. — 26, N 1. — S. 63-65.*
7. *Vidnovlyuvana enerhetyka ta enerhoefektyvnist' u XXI stolitti: materialy XXII mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi (Kyiv, 20-21 travnya 2021r.).— K.: Interservis, 2021.— 1104 s.*
8. *Cherednichenko O.K. Efektyvnist' enerhetychnykh ustanovok z termokhimichnymi systemamy dlya vysokotekhnolohichnykh suden i mors'kykh ob'yektiv naftohazovydobuvannya: dys. d-ra tekhn. nauk: 05.05.03 - Mykolayiv, 2020 - 382 s.*

9. Kolomeyko D.A. Enerhoekonomichnyy analiz koheneratsiynykh skhem na osnovi porshnevykh teplovykh dvyhuniv dys. kand. tekhn. nauk: 05.14.06. - Kyiv, 2009. - 151 s.
10. Novikov M.V., Shepelyev V.O., Klymenko S.A., Lavrinenko V.I. Tekhnolohiyi mekhanooobrobky instrumentamy z nadtverdykh materialiv i tverdykh splaviv u INM im. V.M. Bakulya NAN Ukrayiny // Protsesy mekhanichnoyi obrobky v mashynobuduvanni . – 2005 . – Vyp. 2 – s. 91 – 101.
11. Ambrosimov S.K. Fenomenologicheskaya model' issledovaniya energosilovykh zatrat na rezaniye pri operezhayushchem deformiruyushchem protyagivani s uprugoplasticheskim nagruzheniyem. // Zhurnal uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya, – 2008. №5.
12. Ripa V.R. Vyznachennya optimal'nykh rezhymiv rizannya pry vysokoshvydkisnomu frezeruvanni nerzhaviyuchykh staley: mahisters'ka robota / V.R. Ripa – Zaporizhzhya: NU «Zaporiz'ka politekhnika», 2020. – 85 s.
13. Hromovyy O.A. Rozrobka chystovykh kosokutnykh tortsevykh frez z kombinovanyimi skhemamy rizannya: Dys. kand. tekhn. nauk : 05.03.01 : Kyiv, 2002 - 172 c.
14. Kodrik A.I. Povysheniye obrabatyvayemosti vysokoplastichnykh staley pri rezhushchem protyagivani: Avtoreferat dis. kand. tekh. nauk – Kiyev, 1984. – 22 s.
15. Podurayev V.N., Yaroslavtsev V.M., Yaroslavtseva N.A. Vliyaniye obrabotki rezaniyem s operezhayushchim plasticheskim deformirovaniyem na predel vynoslivosti obrabotannykh detaley.— Izv. vuzov, ser. Mashinostroyeniye, 1971, 8, s. 121—124.
16. Tekhnolohiya mashynobuduvannya // P.P. Mel'nychuk, A.I. Borovyk, P.A. Linchevs'kyi, YU.V. Petrakov: Zhytomyrs'kyi derzhavnyy tekhnolohichnyy universytet – Zhytomyr: ZHDTU, 2005. – 882 s.
17. Vyhovs'kyi H.M., Hromovyy O.A. Doslidzhennya osoblyvostey znoshuvannya rizal'noho instrumentu pry vysokoshvydkisniy obrobsi//Protsesy mekhanichnoyi obrobky v mashynobuduvanni, 2009.-Vypusk 7 .-S.38.
18. Donchenko YE.I. Pidvyshchennya efektyvnosti frezeruvannya na osnovi rozrobky ta doslidzhennya avtomatyzovanoyi systemy diahnostryky frez: Dys. kand. tekhn. nauk : 05.03.01 : Kramators'k, 2021 - 222 s.
19. Akimov O.V. Naukovi osnovy konstruktors'ko-tekhnolohichnoho proektuvannya lytykh detaley dvyhuniv vnutrishn'oho z-horannya: Avtoref. dys. kand. tekhn. nauk: 05.13.23. – Kharkiv, 2009. – 34 s.
20. Stetsko A.E., Stetsko Y.T. (2020) Formation of Composite Reinforced Coating by Chemical Deposition and Chemical-Thermal Treatment of Boron and Carbon. In: Pogrebnjak A., Bondar O. (eds) Microstructure and Properties of Micro- and Nanoscale Materials, Films, and Coatings (NAP 2019). Springer Proceedings in Physics, vol 240. Springer, Singapore, P.261–270. – DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-15-1742-6\\_24](https://doi.org/10.1007/978-981-15-1742-6_24)
21. Stetsko A.E., Stetsko Y.T. (2021) The Influence of Carbon, Carbon, and Boron on the Formation of Diffusion Nanocomposite Hardened Layers on the Surfaces of Steel Parts. In: Fesenko O., Yatsenko L. (eds) Nanomaterials and Nanocomposites, Nanostructure Surfaces, and Their Applications. Springer Proceedings in Physics, vol 246. Springer, Cham. P. 699-708. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-51905-6\\_47](https://doi.org/10.1007/978-3-030-51905-6_47)

*Наукове видання*

# **МОЛОДА НАУКА - РОБОТИЗАЦІЯ І НАНО-ТЕХНОЛОГІЇ СУЧАСНОГО МАШИНОБУДУВАННЯ**

**Збірник наукових праць**

**Міжнародної молодіжної науково-технічної конференції  
10-12 квітня 2024 р.**

За загальною редакцією

д-ра техн. наук, проф. С. В. Ковалевського and

Hon.D.Sc., Prof. Predrag Dašić

Формат 60 × 84/16. Ум. друк. арк. 13,05.  
Обл.-вид. арк. 18,13. Тираж 100 пр. Зам. № 2

Видавець і виготівник  
Донбаська державна машинобудівна академія  
84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК №1633 від 24.12.2003