

Міністерство освіти і науки України
Ministry of Education and Science of Ukraine

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ
SCIENCE JOURNAL

**ТЕХНІЧНИЙ СЕРВІС АГРОПРОМИСЛОВОГО,
ЛІСОВОГО ТА ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСІВ**

2025, № 27

**TECHNICAL SERVICE OF AGRICULTURE,
FORESTRY AND TRANSPORT SYSTEMS**
2025, № 27

Харків – 2025 – Kharkiv

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ «ТЕХНІЧНИЙ СЕРВІС АГРОПРОМИСЛОВОГО, ЛІСОВОГО ТА ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСІВ»

SCIENCE JOURNAL «TECHNICAL SERVICE OF AGRICULTURE, FORESTRY AND TRANSPORT SYSTEMS»

Науковий журнал «Технічний сервіс агропромислового, лісового транспортного комплексів» та містить оглядові статті та результати досліджень у відповідності із рубриками:

- Технічний сервіс машин агропромислового комплексу
- Технічний сервіс машин лісового та транспортного комплексів
- Технології та засоби діагностування
- Проблеми використання паливомастильних матеріалів альтернативних видів палив
- Техніка і технології тваринництва
- Проблеми надійності
- Проблеми відновлення деталей машин
- Проблеми енергозабезпечення енергозбереження
- Питання сприяння розвитку науки і техніки
- Інноваційні методи та технології у підготовці фахівців

Науковий журнал призначений для виробничників, науково-педагогічних працівників, наукових співробітників, аспірантів, докторантів і студентів, які спеціалізуються у відповідних або суміжних галузях науки та напрямках виробництва.

Засновник: Державний біотехнологічний університет. Наказом Міністерства освіти і науки України №886 від 02.07.2020 року науковий журнал включено реєстру наукових фахових видань України, категорія «Б» з спеціальності 133 машинобудування».

Науковий журнал виходить 2 рази на рік. Мови видання: українська, англійська.

Затверджено до друку рішенням Вченої ради Державного біотехнологічного університету (протокол № 6 від 30.12.2025).

ISSN 2311-441X

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-27>

© Державний біотехнологічний університет, 2025.

Science Journal "Technical service of agriculture, forestry and transport systems" comprising review articles and research results, researches in accordance with sections:

- Technical service of machines of the agro industrial complex
- Technical service of machines of forest and transport complexes
- Technology and means of diagnostics
- Problems of using fuel-lubricating materials and alternative types of fuels
- Engineering and technology of livestock
- Problems of reliability
- Problems of restoration of parts of machinery
- The problems of energy supply and energy efficiency
- The issue of promoting science and machinery
- Innovative methods and technologies in training of specialists

The Science Journal is designed for manufacturers, scientific and pedagogical workers, research workers, graduate students, doctoral students and students who specialize in relevant or related fields of science and production areas.

Founder: State Biotechnological University. By order of the Ministry of Education and Science of Ukraine No. 886 dated July 2, 2020, the Science Journal is included in the register of scientific and specialized publications of Ukraine, category "B" from specialty 133 "Industrial Mechanical Engineering".

The Science Journal is published 2 times a year. Language: Ukrainian and English.

Approved for publication decision of the Academic council of State Biotechnological University (report № 6 from 30.12.2025).

ISSN 2311-441X

© State Biotechnological University, 2025.

Редакційна колегія:

Головний редактор:

Войтов В. А., д. т. н., проф. (Україна, Харків).

Заступник головного редактора:

Науменко О. А., к. т. н., проф. (Україна, Харків).

Технічний редактор:

Кісь-Коркіщенко Л. В., к. т. н., доц. (Україна, Харків).

Члени редакційної колегії:

Grigore Marian, д. т. н., проф. (Молдова, Кишинев).

Andrzej Marczuk, д. т. н., проф. (Польща, Люблін).

Jerzy Grudzinski, д. т. н., проф. (Польща, Люблін).

Michael Schüßler, д. т. н., проф. (Німеччина, Мюнхен).

Rainhard Neudorfer, д. т. н., проф. (Німеччина, Мюнхен).

Serhiy Kharchenko, д. т. н., проф. (Польща, Люблін).

Антощенков Р. В., д. т. н., проф. (Україна, Харків).

Калінін Є. І., д. т. н., проф. (Україна, Харків).

Козаченко О. В., д. т. н., проф. (Україна, Харків).

Кравцов А. Г., к. т. н., доц. (Україна, Харків).

Роговський І. Л., д. т. н., проф. (Україна, Київ).

Тришевський О. І., д. т. н., проф. (Україна, Харків).

Черновол М. І., д. т. н., проф. (Україна, Кропивницький).

Шевченко С. А., д. т. н., доц. (Україна, Харків).

Адреса редакційної колегії:

Державний біотехнологічний університет, вулиця Алчевських, 44, місто Харків, Україна, 61000.

Тел.: +38 057 700 3888.

Сайт: <https://biotechuniv.edu.ua>.

E-mail: gurnal_tc@ukr.net.

Editorial Board:

Chief Editor:

V. Vojtov, Dr.Sc., Prof., (Ukraine, Kharkiv).

Deputy of Chief Editor:

O. Naumenko, Ph.D., Prof., (Ukraine, Kharkiv).

Technical Editor:

L. Kis-Korkishchenko, Ph.D., Assoc. of Prof. (Ukraine, Kharkiv).

Members of the Editorial Board:

G. Marian, Dr.Sc., Prof. (Moldova, Chisinau).

A. Marczuk, Prof., Dr hab. (Poland, Lublin).

J. Grudzinski, Prof., Dr hab. (Poland, Lublin).

M. Schüßler, Dr.Sc., Prof. (Germany, Munich).

R. Neudorfer, Dr.Sc., Prof. (Germany, Munich).

S. Kharchenko, Dr.Sc., Prof. (Poland, Lublin).

R. Antoshchenkov, Dr.Sc., Prof. (Ukraine, Kharkiv).

Ye. Kalinin, Dr.Sc., Prof. (Ukraine, Kharkiv).

O. Kozachenko, Dr.Sc., Prof. (Ukraine, Kharkiv).

A. Kravtsov, Ph.D., Assoc. of Prof. (Ukraine, Kharkiv).

I. Rogovskii, Dr.Sc., Prof. (Ukraine, Kyiv).

O. Trishevsky, Dr.Sc., Prof. (Ukraine, Kharkiv).

M. Chernovol, Dr.Sc., Prof. (Ukraine, Kropyvnytskyi).

S. Shevchenko, Dr.Sc., Assoc. of Prof. (Ukraine, Kharkiv).

Address of the Editorial Board:

State Biotechnological University, 44 Alchevskih Street, Kharkiv, Ukraine, 61000.

Phone: +38 057 700 3888.

Website: <https://biotechuniv.edu.ua>.

E-mail: gurnal_tc@ukr.net.

ЗМІСТ

1. Градиський Ю.О., Сосєдко М.О., Лисенко К.О. Інформаційний підхід до опису поведінки шару подрібненої деревини під час сушіння	8-17
Дерябкіна Є.С., Клочко О.Ю. Дослідження впливу параметрів лазерного оплавлення на міцність зчеплення плазмового покриття і основи	18-29
3. Калюжний О.Б., Платков В.Я., Марченко М.М. Методи лазерного спікання та матеріалознавчі аспекти в адитивному виробництві металів: аналітичний огляд.....	30-46
4. Никифоров А.О., Антощенков Р.В., Галич І. В., Кісь В.М., Марченко М.В., Кісь-Коркіщенко Л.В. Показник якості енергоефективності системи логістики агропромислового комплексу для порівняльної оцінки альтернатив інноваційного розвитку	47-57
5. Рожко І.І., Гончаренко О.О., Лавренко В.В. Оцінка конструктивних особливостей та технічних характеристик мотоблоків для ефективної роботи на ділянках приватних домоволодінь	58-66
6. Ляшенко С.О., Фесенко А.М., Кісь В.М., Кісь М.В., Евстратов М.Д. Обґрунтування ефективності управління безпілотними літальними апаратами для потреб сільськогосподарського виробництва на основі застосування нейромережевого підходу.....	67-79
7. Цимбалюк Ю.І., Цимбалюк І.Ю. Моделювання процесу трелювання деревини під наметом лісового насадження	80-92
8. Автухов А.К., Карпенко В.С., Ковалевський Є.В., Корнев О.С. Визначення оптимальних матеріалів для відновлення інструментальних штампів, що піддаються абразивному зносу через аналіз зносостійкості металу, наплавленого стандартними електродними матеріалами українських виробників.....	93-99
9. Автухов А.К., Ковалевський Є.В., Борисенко О.С., Корнев О.С. Аналітичне прогнозування довговічності хромонікелевих формуючих інструментів із використанням статистичних та регресійних моделей	100-109
10. Автухов А.К., Ковалевський Є.В., Борисенко О.С., Корнев О.С. Оцінка циклічної тріщиностійкості високовуглецевих сталей з різним типом цементитної сітки	110-116
11. Свіргун О.А., Савченко В.Б., Іванова Т.С., Свіргун В.В. Ймовірнісна оцінка напружено деформованого стану вала барабана зерноочисного сепаратора за умов втомного руйнуванн	117-131
12. Гончаренко О.О., Ярошенко Б.М. Аналіз методів нанесення керамічних покриттів різними способами для підвищення експлуатаційної стійкості та зносостійкості деталей	132-139
13. Бэлих О.В. Механічна модель процесу відокремлення гранул перги у роторному екстракторі	140-175

14. **Сиромятников Ю.М., Харченко О.М.**
Фізико-механічні основи та оптимізація режимів центрифугування при
витоппленні бджолиного воску..... 176-193
15. **Шевченко С.А., Суска А.А., Скрипник О.С., Погорілий В.К.**
Методика навчання параметричному 3D-моделюванню меблів 194-203
16. **Шевченко Н.В., Бляшинець Ю.І.**
Визначення показників та шляхи підвищення стійкості колісних лісових
машин у різних умовах експлуатації 204-215
17. **Шевченко С.А.**
Дослідження впливу завитків волокон деревини на її сколювання при
фрезеруванні елементів зубчастого шипового з'єднання 216-221

CONTENTS

1. **Gradysky Y.O., Sosiedko M.O., Lysenko K.O.**
An information-based approach to describing the behavior of a layer of shredded wood during drying8-17
2. **Deryabkina, E.S., Klochko, O.Yu.**
Investigation of the Effect of Laser Remelting Parameters on the Adhesion Strength of Plasma Coatings to the Substrate18-29
3. **Kalyuzhnyi O.B., Platkov V.Ya. Marchenko. M.M.**
Laser Sintering Methods and Materials Science Aspects in Metal Additive Manufacturing: An Analytical Review30-46
4. **Nykyforov A.O., Antoshchenkov R.V., Halych I.V., Kis V.M. Marchenko M.V., Kis-Korkishchenko L.V.**
Quality indicator of energy efficiency of the logistics system of the agro-industrial complex for comparative assessment of innovative development alternatives47-57
5. **Rozhko I. I., Honcharenko O. O., Lavrenko V. V.**
Evaluation of Design Features and Technical Characteristics of Power Tillers for Efficient Operation on Private Household Plots.....58-66
6. **Liashenko S., Fesenko A., Kis V., Kis M., Yevstratov M.**
Substantiation of the effectiveness of unmanned aerial vehicle control for the needs of agricultural production based on the application of a neural network approach.....67-79
7. **Tsybalyuk Yu.I., Tsybalyuk I.Yu.**
Modeling the process of skidding wood under the canopy of a forest plantation.....80-92
8. **Avtukhov A.K., Karpenko V.S., Kovalevsky E.V., Borisenko O.S., Kornev O.S.**
Determination of optimal materials for the restoration of tool dies subject to abrasive wear through the analysis of the wear resistance of metal deposited with standard electrode materials of Ukrainian manufacturers93-99
9. **Avtukhov A.K., Kovalevsky E.V., Borisenko O.S., Kornev O.S.**
Analytical forecasting of the durability of chromium-nickel forming tools using statistical and regression models100-109
10. **Avtukhov A.K., Kovalevsky E.V., Borisenko O.S., Kornev O.S.**
Evaluation of cyclic crack resistance of high-carbon steels with different types of cementite mesh.....110-116
11. **Svirgun O.A., Savchenko V.B., Ivanova T. S. Svirgun V.V.**
Probabilistic assessment of the stress-strain state of the drum shaft of a grain cleaning separator under fatigue failure conditions117-131
12. **Goncharenko O.O., Yaroshenko B.M.**
Analysis of methods for applying ceramic coatings in various ways to increase the operational stability and wear resistance of parts132-139
13. **Belykh O.**
Mechanical Model of the Bee Bread Granules Separation Process in a Rotary Extractor140-175

14. **Syromiatnykov, Y.M., Kharchenko, O.M.**
Physico-Mechanical Foundations and Optimization of Centrifugation Regimes in Beeswax
Rendering 176-193
15. **Shevchenko S.A., Suska A.A., Skrypnyk O.S., Pohorilyi V.K.**
Technique for Teaching Parametric 3D Furniture Modelling..... 194-203
16. **Shevchenko N. V., Blyashynets Yu. I.**
Determination of indicators and ways to improve the stability of wheeled forest machines
in various operating conditions..... 204-215
17. **Shevchenko S.A.**
Research into the Influence of Swirling Wood Grain on Wood Splintering at Milling
Finger Joint Elements 216-221

Градиський Ю.О.
Сосєдко М.О.
Лисенко К.О.
Державний
біотехнологічний
університет,
Харків, Україна
E-mail:
gradiskiy@btu.kharkov.ua

ІНФОРМАЦІЙНИЙ ПІДХІД ДО ОПИСУ ПОВЕДІНКИ ШАРУ ПОДРІБНЕНОЇ ДЕРЕВИНИ ПІД ЧАС СУШІННЯ

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-27-8>

УДК 614.844.2:536.46

Градиський Ю.О. Сосєдко М.О. Лисенко К.О. Інформаційний підхід до опису поведінки шару подрібненої деревини під час сушіння

Анотація. Використання електротехнологій (озонування агенту сушіння, насичення повітря аеріонами, використання електроосмосу) є додатковим зовнішнім керованим впливом на подрібнену деревину. Це дає можливість більш гнучко управляти процесом сушіння. При досить невисоких енерговитратах, електротехнологія може значно впливати на величину умовної ентропії. Управляючи величиною електротехнологічного впливу, можна управляти реакцією на основний зовнішній вплив – агент сушіння. Встановлено, що для контролю процесу активного вентилявання бажано вимірювати температуру і вологість повітря на вході та виході з шару.

Для розрахунків сушіння активним вентиляванням був використаний, як найбільш доступний, відомий східчастий метод, в основі якого знаходиться спрощений механізм тепло- і масообміну. Відповідно до принципу максимуму інформації, на підставі результатів моделювання процесу сушіння активним вентиляванням запропоновано збільшувати продуктивність вентилятора в моменти, коли відносна вологість повітря менше 65%. При проведенні моделювання встановлено, що тривалість процесу сушіння при регулюванні продуктивності вентилятора в 4,7 рази менше, ніж при звичайному способі вентилявання. Нерівномірність процесу сушіння залишається на тому ж рівні або знижується до 1%.

Ключові слова: ентропія; фізичне і математичне моделювання; технічна система; внутрішня енергія; продуктивність вентилятора.

Gradysky Y.O., Sosiedko M.O., Lysenko K.O. An information-based approach to describing the behavior of a layer of shredded wood during drying

Abstract. The use of electrical technologies (ozonation of the drying agent, saturation of the air with air ions, use of electro-osmosis) is an additional external controlled effect on the chopped wood. This makes it possible to control the drying process more flexibly. With fairly low energy consumption, electrical technology can significantly affect the value of conditional entropy. By controlling the magnitude of the electrical technology influence, it is possible to control the reaction to the main external influence - the drying agent.

The analysis of the behavior of shredded wood, its reaction to external influences allows us to say that those periods of external influence when the reaction is in the phase of preventive inhibition are more effective for its drying. It is in this state that the shredded wood uses its internal energy to fulfill the goals of the drying process. The principle of maximum information leads to the main techniques, the use of which in drying will give the effect of resource saving. It has been established that to control the process of active ventilation, it is desirable to measure the temperature and humidity of the air at the inlet and outlet of the layer. It has been

established that to control the process of active ventilation, it is desirable to measure the temperature and humidity of the air at the inlet and outlet of the layer. For the calculation of drying by active ventilation, the well-known step method, which is based on a simplified mechanism of heat and mass transfer, was used as the most accessible. In accordance with the principle of maximum information, based on the results of modeling the drying process by active ventilation, it is proposed to increase the fan performance at times when the relative humidity is less than 65%. During the simulation, it was found that the drying time when adjusting the fan performance is 4.7 times shorter than with the conventional ventilation method. Drying unevenness remains at the same level or is reduced to 1%.

Keywords: physical and mathematical modeling; technical system; internal energy; fan performance.

Постановка проблеми

Подрібнену деревину в даний час у вітчизняній і світовій практиці зберігають в бункерних галереях з активним вентиляванням з одночасним сушінням [1]. Подрібнена деревина як технічна замкнена система перебуває в складному багатофакторному стані, тому, з позиції енергозбереження, необхідно всебічно досліджувати, моделювати всі процеси, що відбуваються в ній. Це дасть можливість найбільш раціонально підійти до схеми вентилявання, кількості та продуктивності вентиляторів. Автори підійшли до розв'язку цієї актуальної і практично корисної науково-технічної проблеми з позиції термодинаміки необоротних процесів [2] у комбінації з інформаційним підходом [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Зберігання подрібненої деревини не є новою проблемою, але, враховуючи нинішній інтерес до використання відновлювальних джерел енергії, привернуло до неї посилену увагу багатьох науковців як вітчизняних, так і з-за кордону.

Багато сучасних вчених прийшли до висновку, що найбільш ефективним способом зберігання є зберігання в крупних сховищах – бункерних галереях [4, 5], але таке зберігання має ряд недоліків. До таких недоліків можна віднести самонагрівання та самозаймання [6, 7, 8]. Основними факторами, що впливають на ці процеси і які необхідно регулювати в процесі зберігання є температура і вологість [9].

Найбільш ефективним способом усунення недоліків є підсушування подрібненої маси шляхом вентиляції [1]. Вентилювання може бути активним або вітровим. Проте, незважаючи на чисельні дослідження цієї проблеми є потребу в подальшому їх розвитку в напрямку оптимізації процесу підсушування подрібненої деревини для підвищення термінів зберігання з виключенням можливості самонагрівання та самозаймання.

Формулювання цілей статті

Метою даної роботи є наукове обґрунтування поведінки шару подрібненої деревини під час сушіння і зберігання подрібненої деревини в бункерній галереї з активним вентиляванням шляхом математичного моделювання стану подрібненої деревини за критеріями мінімуму енерговитрат і максимальної продуктивності установки з урахуванням технічних обмежень параметрів обладнання галереї.

Для досягнення поставленої мети визначено такі основні завдання дослідження:

- 1) розробити прийоми і методи для ресурсозбереження та інтенсифікації процесу активного вентилявання в бункерних галереях;
- 2) оптимізувати склад обладнання та параметри його роботи для зменшення енерговитрат під час сушіння подрібненої деревини активним вентиляванням.

Виклад основного матеріалу дослідження

Подрібнена деревина перебуває в стані спокою. Її внутрішня реакція визначається зовнішнім впливом x_1 , який не вимагає ніякої корекції її поведінки. Зовнішній вплив x_0 , у вигляді агента сушіння, відсутній. При цьому $p\left(\frac{x_1}{y_1}\right) = 1$, $p\left(\frac{x_0}{y_1}\right) = 0$, $H\left(\frac{x_0}{y_1}\right) = H\left(\frac{x_1}{y_1}\right) = 0$, $H\left(\frac{x}{y_1}\right) = 0$. Кулька, що характеризує стан об'єкта перебуває в крайньому правому, стійкому положенні (рис. 1). Кут нахилу основи ентропійного пагорба визначається мінімальною енергією, необхідною для підтримки стійкого стану кульки. Здійснюється низькоенергетичний зовнішній вплив x_0 , $U(x_0, y_1) < U(x_1, y_1)$.

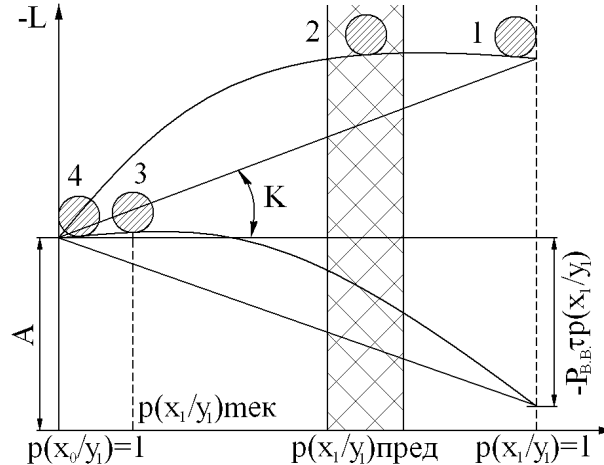


Рис. 1. Залежність корисності реакції об'єкта від умовної ентропії

Зовнішній вплив слабкий — температура, відносна вологість, швидкість сушильного агента така, що об'єкт за рахунок внутрішніх реакцій дає змогу "утримати" свій поточний стан.

У такій ситуації велике значення набуває фактор часу. Представимо енергію як потужність, що віддається протягом часу $U = P\tau$. Тоді

$$-L = \left\{ H\left(\frac{x}{y_1}\right) + [\lambda(P_3\tau(x_1, y_1) - P_{BB}\tau(x_0, y_1))]p\left(\frac{x_1}{y_1}\right) \right\} p(Y) + A. \quad (1)$$

Величина $P_3\tau = const$ і визначається багатьма факторами, що впливають на запас внутрішньої енергії об'єкта. Тривала дія зовнішнього впливу (P_{BB}) приводить не тільки до вичерпання запасеної енергії ($P_3\tau \downarrow$) і, як наслідок, до зменшення другої складової виразу $-L = \left\{ H\left(\frac{x}{y_1}\right) + Kp\left(\frac{x_1}{y_1}\right) \right\} p(y_1) + A$, але і до збільшення реакції на зовнішній $p\left(\frac{x_0}{y_1}\right) \uparrow$ вплив, $p\left(\frac{x_1}{y_1}\right) \downarrow$ а $H(X, Y) \uparrow$.

Зменшення енергетики приводить до опускання правого краю основи кривої $H\left(\frac{x}{y_1}\right)$. Це повинно приводити до підвищення стійкості стану в крайньому правому положенні. Однак відбувається і зменшення умовної ймовірності $p\left(\frac{x_1}{y_1}\right)$, тому корисність впливу падає (росте шкідливість), стан наближається до границі стійкості.

Перехід кульки в крайнє ліве положення визначається співвідношенням зміни швидкостей зміни $H\left(\frac{x}{y_1}\right)$ і $\Delta P_3\tau$. Якщо вплив зовнішнього впливу наростає швидше, ніж зменшення запасу енергії ($\frac{dH(X/y_1)}{d\tau} > \frac{d\Delta P_3\tau}{d\tau}$), то перехід (зрив регуляції) відбудеться

раніше. А якщо ні, то перехід кульки в крайнє ліве положення відбудеться не пізніше, ніж $p(x_0/y_1)$ стане більше $p(x_1/y_1)$.

Після зриву регуляції об'єкт перестає пручатися зовнішньому впливу. Шкідливість реакції може бути визначена з виразу

$$-L = \left\{ H\left(\frac{x}{y_1}\right) - \lambda \left(P_{BB} \tau p\left(\frac{x_1}{y_1}\right) \right) \right\} p(Y) + A, \quad (2)$$

або

$$-L = \left\{ H\left(\frac{x}{y_1}\right) + [\lambda(-P_3 \tau(x_1, y_1) - P_{BB} \tau(x_0, y_1))] p\left(\frac{x_1}{y_1}\right) \right\} p(Y) + A. \quad (3)$$

Графічно ситуацію можна подати положенням 3 кульки на рис. 1.

У випадку якщо реакцію (y_1) повністю буде визначати зовнішній вплив, то $p\left(\frac{x_1}{y_1}\right) = 0$, $H\left(\frac{x_0}{y_1}\right) = 1 = H(x_0)$, $H\left(\frac{x_1}{y_1}\right) = 0$, $H\left(\frac{x}{y_1}\right) = 0$. Кулька перебуває в крайньому лівому стійкому положенні (положення 4 на рис. 1). Після зміни зовнішнього впливу позитивний ефект реакції об'єкта максимальний.

Аналіз поведінки подрібненої деревини, її реакції на зовнішні впливи дають змогу сказати, що для її сушіння ефективніше ті періоди зовнішнього впливу, коли реакція перебуває у фазі превентивного гальмування. Саме в цьому стані подрібнена деревина використовує внутрішню енергію для розв'язку цілей процесу сушіння.

З позиції принципу максимуму взаємної інформації виходить, що процес сушіння приводить до збільшення взаємної інформації. Однак для зниження енергоємності процесу необхідно використовувати такі режими сушіння, щоб "змушувати" подрібнену деревину якнайчастіше і довше перебувати в стані "превентивного гальмування". Стан подрібненої деревини при такому способі сушіння може бути презентовано графічно положенням 2 кульки на рис. 1.

Для реалізації способу сушіння в стані фізіологічного збудження необхідно, щоб кулька, що фізично моделює стан подрібненої деревини, робила коливальні рухи навколо точки зриву регуляції ($p\left(\frac{x_1}{y_1}\right) = p\left(\frac{x_0}{y_1}\right)$).

Використання електротехнологій (озонування агента сушіння, насичення повітря аеріонами, використання електроосмосу) є додатковим зовнішнім керованим впливом на подрібнену деревину. Це дає можливість більш гнучко управляти процесом сушіння. При досить невисоких енерговитратах (чим більше енерговитрати, тим нижче опускається правий край ентропійного пагорба, підвищуючи стійкість системи (рис. 1)), електротехнологія може значно впливати на величину умовної ентропії. Управляючи величиною електротехнологічного впливу, можна управляти реакцією на основний зовнішній вплив – агент сушіння.

Ще більшого ефекту можна добитися при періодичній дії електротехнологічного впливу. З'являється можливість збільшити в процесі сушіння кількість періодів превентивного гальмування, значно скоротивши енергоємність процесу.

В такому випадку застосування електротехнології в сушінні набуває зовсім іншої ролі. З другорядного допоміжного фактора електротехнологія стає "наймогутнішим" керуючим впливом, що підсилює процес сушіння.

З формули $I(X, Y) = H(X) - H\left(\frac{X}{Y}\right) = H(Y) - H\left(\frac{Y}{X}\right) \rightarrow \max$ випливає, що добитися максимізації інформації процесу можна й іншим шляхом – збільшуючи $H(X)$ – безумовну ентропію процесу. Стосовно до процесу сушіння це означає наступне. Якщо

зовнішній вплив повністю визначає стан шару, то умовна ентропія $H\left(\frac{X}{Y}\right) \rightarrow 0$, а безумовна $H(X) \rightarrow \max$. В ідеальному випадку $I(X, Y) = H(X) = \max$.

Якщо використання під час сушіння електроактивованого повітря, озону, електроосмосу дає змогу управляти величиною умовної ентропії, то застосування полів НВЧ належить до іншого напрямку – збільшенню безумовної ентропії. В цьому плані застосування НВЧ-полів те саме що і застосування сушіння в псевдоскрапленому і киплячому шарі.

З принципу максимуму інформації впливають три основні прийоми, використання яких у сушінні дасть ефект ресурсозбереження:

- циклічність, періодичність зовнішнього впливу на шар, що сушиться;
- використання зовнішнього впливу, який задає стан всього шару;
- зміна виду зовнішнього впливу в процесі сушіння.

Найбільший ефект у цьому випадку можна отримати при використанні електротехнології.

Виходячи з принципу максимуму інформації та досвіду практичного впровадження нових технологій в процес сушіння можна сказати, що для інтенсифікації процесу активного вентиляювання можливе застосування наступних методів:

- зміна швидкості і напрямку агента сушіння;
- використання електричних і магнітних впливів, потоків іонізованих і заряджених часток.

Далі дано обґрунтування контрольованих параметрів процесу активного вентиляювання та виконана розробка засобів контролю процесу.

Розглянута інформативність кожного складового елемента комплексу "джерело інформації": атмосферне повітря (сушильний агент, система A), подрібнена деревина (деревна маса, система B) і всього комплексу в цілому (система (A, B)). Оцінка інформативності здійснювалася з урахуванням особливостей технології процесу сушіння активним вентиляюванням і умов безпечного зберігання подрібненої деревини.

Можливість активного вентиляювання атмосферним повітрям і швидкість сушіння залежить від його відносної вологості і температури. Тому дослідження проводилися по цих параметрах. Були визначені зміни оцінок математичного очікування відносної вологості і температури повітря протягом доби по місяцях. Як оцінку цих величин прийняли середнє значення вибірки.

Для оцінювання інформативності вимірювання параметрів атмосферного повітря використовували гістограми відносної вологості і температури. Увесь діапазон зміни відносної вологості повітря розділили на три ділянки: 0...70%; 70...80%; 80...100%. Імовірності того, що відносна вологість у будь-який час доби може належати кожній з ділянок, визначали по гістограмах. Так, для вибірки за липень імовірності по ділянках склали: $p_{F1} = 0,564$; $p_{F2} = 0,252$; $p_{F3} = 0,184$. Повну інформацію про вологість повітря знайшли, як

$$\begin{aligned} H(F) &= H(F_1) + H(F_2) + H(F_3) = \\ &= 0,564 \log_2 0,564 + 0,252 \log_2 0,252 + 0,184 \log_2 0,184 = 1,43 \text{ біт.} \end{aligned}$$

Увесь діапазон температури повітря був розбитий на три ділянки: 0...10°C; 10...20°C; 20...35°C; з імовірностями потрапляння температури на даний інтервал для вибірки за липень $p_{T1} = 0$; $p_{T2} = 0,443$; $p_{T3} = 0,557$. Інформація про температуру складала $H(T) = 0,443 \log_2 0,443 + 0,557 \log_2 0,557 = 0,99 \text{ біт}$.

Ентропія об'єднаної системи "температура-вологість" визначиться з рівняння: $H(A) = H(F_1 T) = H(F) + H(T / F) = 1,43 + 0,546 = 1,976$.

Відповідно до принципу максимуму інформації при досягненні рівноважної вологості ентропія приймає мінімальне значення. В такому стані подрібнена деревина (система B) містить мінімальну інформацію, оскільки її стан повністю визначається агентом сушіння. Отже, основна частина інформації припадає на елемент "сушильний агент" системи.

При постійних вхідних параметрах повітря і рівномірному його розподілі по шару подрібненої деревини можна в будь-який момент часу розрахувати температуру і вологість шару. В цьому випадку контроль зводиться тільки до вимірювання вхідних параметрів сушильного агента, до підтримки їх на заданому рівні, дотриманню експозиції сушіння. Ентропія системи $H(A, B) = H(A)$, тобто інформації про вхідні параметри сушильного агента цілком достатньо для контролю процесу сушіння.

При випадкових змінах параметрів сушильного агента (атмосферного повітря), нерівномірності розподілу повітря по шару ситуація міняється. Повна ентропія системи "сушильний агент – деревний шар" запишеться у вигляді $H(A, B) = H(B / A) + H(A)$, де $H(B / A)$ – умовна ентропія системи B при зміні системи A .

Загальна ентропія системи зростає, губиться визначеність її стану на будь-якій змінній тимчасовій ділянці. Невизначеність стану буде коливатися при зміні ймовірностей взаємних станів систем B і A . Системи контролю постійно будуть відчувати змінний дефіцит інформації, еквівалентний перевищенню ентропії $H(B / A)$.

Цілком очевидно, що контролю тільки за вхідними параметрами сушильного агента недостатньо, необхідно компенсувати дефіцит інформації про зміни в шарі подрібненої деревини. Ентропія $H(B / A)$ розподіляється в масі подрібненої деревини між елементарними шарами. В процесі сушіння кожний елементарний шар має ентропію, що визначається з виразу:

$$H(L) = \frac{1}{N-K} \left(H\left(\frac{B}{A}\right) - H\left(\frac{BK}{AN}\right) \right), \quad (4)$$

де $H(L)$ – ентропія елементарного шару, біт;

N – загальна кількість елементарних шарів, шт.;

K – кількість елементарних шарів, що перебувають у гіротермічній рівновазі з сушильним агентом, шт.

З отриманого виразу видно, що в процесі сушіння ентропія елементарного шару постійно змінюється, причому ці коливання характерні для конкретного шару і їх випадковість обумовлена випадковістю зміни вхідних параметрів сушильного агента. Тому якщо намагатися повністю ліквідувати дефіцит інформації $H(B / A)$ шляхом встановлення в шар датчиків (температури і вологості), то буде потрібно така їх кількість, скільки елементарних шарів. Причому багато з них, при знаходженні елементарного шару у гіротермічній рівновазі з сушильним агентом, ніякої корисної інформації передавати не будуть, тобто створюється надлишок інформації, становить $H(B / A) \times K / N$. Тому доцільно оцінити, яку інформацію про шар (система B) містить сушильний агент на її виході (система C).

Повна інформація про систему B , що входить в систему C , визначиться з виразу:

$$I_{C \rightarrow B} = H(B) - H\left(\frac{B}{C}\right),$$

де $I_{C \rightarrow B}$ – повна інформації про систему B , що знаходиться в системі C ;

$H(B / C)$ – умовна ентропія зміни системи B при зміні системи C .

Але

$$H(B) = H\left(\frac{B}{A}\right), \text{ тому } I_{C \rightarrow B} = H\left(\frac{B}{A}\right) - H\left(\frac{B}{C}\right). \quad (5)$$

Звідси видно, що при контролі параметрів на виході сушильного агента невизначеність інформації про стан шару знижується на величину $I_{C \rightarrow B}$, але дефіцит інформації залишається, і він становить $H(B / C)$. Отже, невизначеність про весь товстий шар, при контролі над ним по вихідних параметрах агента сушіння, буде залишатися постійно, аж до завершення сушіння. Для вихідного елементарного шару $H(B / C)$ близька або становить 0 і $I_{C \rightarrow B} = H\left(\frac{A}{B}\right)$. Очевидно, що, контролюючи вихідні параметри сушильного агента, маємо повну інформацію про граничний вихідний шар. Цього цілком достатньо, тому що сушіння ведеться до висихання зовнішніх шарів.

Отже, для контролю процесу активного вентилявання бажано вимірювати температуру і вологість повітря на вході та виході з шару.

На практиці, для визначення можливості використання атмосферного повітря без підігріву для активного вентилявання, визначають, яку вологість забезпечить дане повітря при його застосуванні як агента сушіння. Інакше кажучи, визначають, яку рівноважну вологість (W_p) прийме шар при його тривалому продуванні атмосферним повітрям із заданими параметрами. Є залежність, що відображає взаємозв'язок вологості і параметрів повітря. Однак ця залежність застосовується для стаціонарних станів, коли немає тепловологообміну. Можливість використання її для контролю параметрів шару при вентиляванні вимагає уточнення. З цією метою проводили фізичне моделювання процесу сушіння активним вентиляванням.

Для розрахунків сушіння активним вентиляванням був використаний, як найбільш доступний, відомий східчастий метод, в основі якого знаходиться спрощений механізм тепло- і масообміну. Для розрахунків була розроблена програма для ПЕОМ алгоритмічною мовою високого рівня (C++).

Результати моделювання показали, що вологість шару подрібненої деревини, що розраховується по параметрах агента сушіння на виході із шару, з достатньою точністю характеризує зміну вологості вихідних шарів, що підтверджує можливість використання засобів оцінювання рівноважної вологості для контролю над протіканням процесу активного вентилявання.

Як алгоритму функціонування засобу оцінювання рівноважної вологості прийнято рівняння Дея-Нелсона [10], що дає найменшу похибку визначення рівноважної вологості.

З усіма коефіцієнтами рівняння Дея-Нелсона записується у вигляді:

$$W_p = b_1 T^{b_2} \sqrt{-\frac{1}{a_1 T^{a_2}} \ln(1 - F)} \text{ або } W_p = a + b \Delta f + c \Delta T, \quad (6)$$

$$\text{де } a = \left(\frac{1}{k} \ln\left(\frac{1}{1-F_0}\right)\right)^{\frac{1}{n}}; b = \left(\frac{1}{k^{\frac{1}{1-n}}} \ln\left(\frac{1}{1-F_0}\right)\right)^{\frac{1}{n-1}} \frac{1}{n(1-F_0)};$$

$$c = \left(\frac{1}{k} \ln\left(\frac{1}{1-F_0}\right)\right)^{\frac{1}{n}} \left(a_2 b_2 \ln T_0 - b_2 \ln\left(\frac{1}{a_1} \ln\left[\frac{1}{1-F_0}\right]\right) - a_2\right) \frac{1}{b_1 T_0^{b_2}},$$

де $n = b_1 T^{b_2}$; $k = a_1 T^{a_2}$; F_0, T_0 – координати точки перегину кривої.

Для реалізації даної залежності розроблений і виготовлений засіб оцінювання рівноважної вологості. На його базі розроблений засіб оцінювання вологості подрібненої деревини.

Грунтуючись на особливостях повітрярозподілу в бункерах активного вентилявання, при пересуванні запірного клапана визначено, що для контролю процесу активного вентилявання можлива установка датчиків тільки в одній точці бункера, а

саме в нижній його частині на 1/3 висоти. Окрім цього, непрямий контроль дає змогу при необхідності пересувати датчик по висоті бункера і одержувати при цьому інформацію про розподіл вологості шару подрібненої деревини.

При визначенні необхідної частоти контролю входних параметрів повітря враховували їх добові коливання та вимоги по обмеженню вологості повітря при активному вентиляванні, пропоновані до системи регулювання. Необхідна частота контролю для цих регулюючих впливів визначалася з умови максимуму інформації для кожного виміру:

$$1 - (1 - p)^k = (1 - p)^K; \text{ звідки } K = \frac{1}{\log(1-p)}, \quad (7)$$

де p – імовірність виникнення необхідності регулюючого впливу при даному вимірі;
 K – необхідна кількість разів контролю.

Встановлено, що входні параметри агента сушіння необхідно контролювати 10 разів на добу з інтервалом часу в 2,4 години протягом всього процесу активного вентилявання.

Результати моделювання сушіння при активному вентиляванні показали, що на початку процесу контроль вологості не потрібний. Частота коливань вологості в бункері активного вентилявання під час сушіння визначалася з періоду коливань $T = 20$ год. Відповідно до теореми Котельникова [3] періодичність контролю параметрів повітря на виході із шару складала 3,2 години.

Відповідно до принципу максимуму інформації, на підставі результатів моделювання процесу сушіння активним вентиляванням запропоновано збільшувати продуктивність вентилятора в моменти, коли відносна вологість повітря менше 65%. При цьому буде виконуватися зміна рівня трьох видів впливу – зміна температури і вологості атмосферного повітря і збільшення швидкості фільтрації повітря.

Результати моделювання показали, що тривалість процесу сушіння подрібненої деревини при регулюванні продуктивності вентилятора в 4,7 рази менше, ніж при звичайному способі вентилявання. Нерівномірність процесу сушіння залишається на тому ж рівні або знижується до 1%.

Висновки

Використання джерел відновлювальної енергії носить сезонний характер, що вимагає потребу їх довгого зберігання [4]. Для покращення умов зберігання зі збереженням властивостей подрібненої деревини необхідно проводити регулювання температури та вологості [2]. Для вирішення цієї проблеми багатьма дослідниками використовувались різноманітні способи моделювання процесів, що протікають при зберіганні [1, 5]. Питання пов'язані з проблемою самонагрівання та самозаймання більш детально розглянуті в роботі [6].

Отже, за результатами виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – обґрунтовано використання інформаційного підходу для фізичного і математичного моделювання поведінки подрібненої деревини під час сушіння. Такий підхід дасть змогу раціонально підійти до схеми сушіння, більш оптимально визначати кількість і продуктивність вентиляторів без проведення додаткових експериментів.

Практична значущість результатів дослідження – отримані результати дають змогу оптимізувати склад обладнання та параметри його роботи, що дає змогу зменшити енерговитрати при використанні активного вентилявання під час сушіння подрібненої деревини.

Проведені дослідження з опису поведінки шару подрібненої деревини при сушінні та зберіганні з активним вентиляванням при використанні інформаційного підходу дають змогу зробити такі висновки: дано обґрунтування контрольованих параметрів процесу активного вентилявання та розроблено засоби контролю процесу; створена структурно-математична модель системи сушіння активним вентиляванням, розроблено критеріальне рівняння оптимальної величини енерговитрат на сушіння.

Список використаних джерел

1. Jylhä, Paula, Saleh Ahmadinia, Juha Hyvönen, Annamari (Ari) Laurén, Robert Prinz, Lauri Sikanen, & Johanna Routa. Self-Heating, Drying, and Dry Matter Losses of Stockpiled Stemwood Chips: The Effect of Ventilation. *Energies*, 2022, 15(19), 7094. <https://doi.org/10.3390/en15197094>
2. Градиський Ю.О., Суска А.А., В.І. Д'яконов, Соседко М.О. Інформаційний підхід до оптимізації процесу сушіння подрібненої деревини активним вентиляванням. *Журнал з менеджменту, економіки та технологій*. 2025. № 1. С. 249-258. URL: <https://journal-met.kh.ua/jme012520.html>
3. Erik Aneruda, & Anders Eriksson. Evaluation of an improved design for large-scale storage of wood chip and bark Biomass and Bioenergy, 2021. 154, 106255. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106255>
4. Ashman, J. M., Jones, J. M., & Williams, A. Some characteristics of the self-heating of the large scale storage of biomass. *Fuel Processing Technology*, 2018. Vol. 174, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.02.004>.
5. Michaela Skrizovska, Hana Veznikova, & Petra Roupцова. Inclination to self-ignition and analysis of gaseous products of wood chips heating. *Acta Chimica Slovaca*, 2020. Vol. 13, No. 1, 88–97. <https://doi.org/10.2478/acs-2020-0013>.
6. Wei, Jiayu, Can Yao, & Changdong Sheng. Modelling Self-Heating and Self-Ignition Processes during Biomass Storage. *Energies*, 2023. 16(10), 4048. <https://doi.org/10.3390/en16104048>.
7. Järvinen, Seppo, Lehtovaara, Jaakko, Pakkanen, Hannu, Salo, Marja, Alén, Raimo & Sirén, Pekka. Self-heating of wood pellets and possibilities for its control. 4th International Bioenergy 2009 Conference – Sustainable Bioenergy, pp. 112–124. <https://doi.org/10.13140/2.1.1201.0887>.
8. Guo, W. Self-heating and spontaneous combustion of wood pellets during storage (T). *Electronic Theses and Dissertations (ETDs) 2008+*. University of British Columbia, 2013. Vol. 74, pp. 56–78. URL: <https://open.library.ubc.ca/collections/ubctheses/24/items/1.0073583>.
9. Іващенко П.В. Основи теорії інформації: навч. посіб. Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2015. 53 с.
10. Ekechukwu O.V. *Drying Principles and Theory: an Overview*. Italy, Trieste: International Centre for Theoretical Physics, 1995. – 26 p.

References

1. Jylhä, Paula, Saleh Ahmadinia, Juha Hyvönen, Annamari (Ari) Laurén, Robert Prinz, Lauri Sikanen, & Johanna Routa. Self-Heating, Drying, and Dry Matter Losses of Stockpiled Stemwood Chips: The Effect of Ventilation. *Energies*, 2022, 15(19), 7094. <https://doi.org/10.3390/en15197094>
2. Gradisskiy YU.A., Suska A.A., V.I. D'yakonov, Sosedko M.A. Informatsionnyy podkhod k optimizatsii protsessa sushki izmel'chennoy drevesiny aktivnym ventilirovaniyem. *Zhurnal po menedzhmentu, ekonomike i tekhnologiyam*. 2025. № 1. С. 249-258. URL : <https://journal-met.kh.ua/jme012520.html>

3. Erik Aneruda, & Anders Eriksson. Evaluation of an improved design for large-scale storage of wood chip and bark Biomass and Bioenergy, 2021. 154, 106255. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106255>
4. Ashman, J. M., Jones, J. M., & Williams, A. Some characteristics of the self-heating of the large scale storage of biomass. Fuel Processing Technology, 2018. Vol. 174, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.02.004>.
5. Michaela Skrizovska, Hana Veznikova, & Petra Roupцова. Inclination to self-ignition and analysis of gaseous products of wood chips heating. Acta Chimica Slovaca, 2020. Vol. 13, No. 1, 88–97. <https://doi.org/10.2478/acs-2020-0013>.
6. Wei, Jiayu, Can Yao, & Changdong Sheng. Modelling Self-Heating and Self-Ignition Processes during Biomass Storage. Energies, 2023. 16(10), 4048. <https://doi.org/10.3390/en16104048>.
7. Järvinen, Seppo, Lehtovaara, Jaakko, Pakkanen, Hannu, Salo, Marja, Alén, Raimo & Sirén, Pekka. Self-heating of wood pellets and possibilities for its control. 4th International Bioenergy 2009 Conference – Sustainable Bioenergy, pp. 112–124. <https://doi.org/10.13140/2.1.1201.0887>.
8. Guo, W. Self-heating and spontaneous combustion of wood pellets during storage (T). Electronic Theses and Dissertations (ETDs) 2008+. University of British Columbia, 2013. Vol. 74, pp. 56–78. URL: <https://open.library.ubc.ca/collections/ubctheses/24/items/1.0073583>.
9. Ivashchenko P.V. Fundamentals of information theory: teaching. manual. Odesa: ONAZ named after O.S. Popova, 2015. - 53 p.
10. Ekechukwu O.V. Drying Principles and Theory: an Overview. Italy, Trieste: International Centre for Theoretical Physics, 1995. – 26 p.

Дерябкіна Є.С.,
Клочко О.Ю.

Державний
біотехнологічний
університет
м. Харків, Україна
E-mail:
216464g@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ЛАЗЕРНОГО ОПЛАВЛЕННЯ НА МІЦНІСТЬ ЗЧЕПЛЕННЯ ПЛАЗМОВОГО ПОКРИТТЯ І ОСНОВИ

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-27-18>

УДК 621.791.052

Дерябкіна Є.С., Клочко О.Ю. Дослідження впливу параметрів лазерного оплавлення на міцність зчеплення плазмового покриття і основи

Анотація. У роботі розглянуто особливості формування плазмових покриттів за умови подальшого оплавлення лазерним променем, які, порівняно з плазмовими покриттями без оплавлення, характеризуються підвищеною міцністю зчеплення з основою.

Проблему утворення міцного з'єднання між покриттям і основою вирішено шляхом дослідження адгезійної взаємодії, оскільки саме вона визначає експлуатаційні властивості поверхонь деталей. Визначення кількісних закономірностей та оцінювання фізико-хімічних процесів, що відбуваються в зоні контакту покриття з підкладкою і приводять до досягнення необхідної адгезійної міцності, з метою розроблення теоретично обґрунтованих рекомендацій щодо технології її формування можливе з використанням положень квантової механіки. Обґрунтовано, що мірою міжатомного зчеплення у твердому тілі є енергія зв'язку, яка адекватно описує адгезійну міцність. Розрахунок енергії адгезії виконано на основі енергетичного підходу до оцінювання металевих, ковалентних та іонних зв'язків між атомами основи і покриття. При розгляді окремих атомів і молекул домінуючу роль відіграє обмінна взаємодія, зумовлена енергією, що виникає між розплавленими атомами покриття та атомами металу основи і є визначальною складовою сумарної енергії зв'язку двох силових центрів.

Теоретичні дослідження та отримані експериментальні значення адгезійної міцності дали змогу визначити оптимальні режими лазерної обробки, за яких відбувається повне приварювання плазмового покриття до основи внаслідок повної дисоціації оксидних плівок на підкладці. Максимальне значення міцності зчеплення $\sigma_{зч} = 180$ МПа (для плазмових покриттів із лазерним оплавленням) досягнуто за мінімальної швидкості лазерного променя $0,8 \cdot 10^{-3}$ м/с, діаметра променя в зоні контакту з поверхнею $1 \cdot 10^{-3}$ м та коефіцієнта перекриття лазерних доріжок 0,9. За підвищення швидкості лазерного променя до $6 \cdot 10^{-3}$ м/с при сталих значеннях діаметра променя та коефіцієнта перекриття лазерних доріжок міцність зчеплення зменшується до $\sigma_{зч} = 100$ МПа, що пов'язано зі скороченням часу дії лазерного оплавлення.

Досліджено теоретичну модель взаємодії в системі «покриття – основа», аналіз якої дозволяє оцінити процес формування міцного металевого зв'язку, обґрунтувати доцільність застосування покриттів із самофлюсівних порошків сплавів на основі заліза, а також здійснювати прогнозування міцності зчеплення з урахуванням розрахунку енергії адгезії.

Ключові слова: плазмові покриття, лазерне оплавлення, адгезія, міцність зчеплення, швидкість променя, коефіцієнт перекриття доріжок.

Deryabkina, E.S., Klochko, O.Yu. Investigation of the Effect of Laser Remelting Parameters on the Adhesion Strength of Plasma Coatings to the Substrate

Abstract. The paper considers the features of plasma coating formation followed by laser beam remelting. Compared with plasma coatings without remelting, such coatings exhibit significantly increased adhesion strength to the substrate.

The problem of forming a strong bond between the coating and the substrate is addressed through the investigation of adhesion interaction, as it is the determining factor for the service performance of component surfaces. The determination of quantitative relationships and the evaluation of physicochemical processes occurring in the contact zone between the coating and the substrate, which lead to achieving the required adhesion strength, enable the development of theoretically substantiated technological recommendations using the principles of quantum mechanics. It is substantiated that the measure of interatomic bonding forces in a solid is the bonding energy, which adequately explains adhesion strength. The adhesion energy was calculated using an energy-based approach to evaluate metallic, covalent, and ionic bonds between the atoms of the substrate and the coating. When considering individual atoms and molecules, the dominant role belongs to exchange interaction, which is caused by the energy arising between molten coating atoms and substrate metal atoms and constitutes the determining component of the total bonding energy of two force centers.

Theoretical studies and experimentally obtained adhesion strength values made it possible to determine optimal laser processing modes under which complete welding of the plasma coating to the substrate occurs as a result of complete dissociation of oxide films on the substrate surface. The maximum adhesion strength value of $\sigma_a = 180$ MPa (for plasma coatings with laser remelting) was achieved at a minimum laser beam scanning speed of 0.8×10^{-3} m/s, a laser beam diameter at the interaction zone of 1×10^{-3} m, and a laser track overlap coefficient of 0.9. With an increase in the laser beam speed to 6×10^{-3} m/s at constant beam diameter and track overlap coefficient, the adhesion strength decreases to $\sigma_a = 100$ MPa, which is associated with a reduction in the laser remelting exposure time.

A theoretical model of interaction in the “coating–substrate” system was developed and analyzed. Its analysis makes it possible to evaluate the process of forming a strong metallic bond, substantiate the application of coatings based on self-fluxing iron-based alloy powders, and predict adhesion strength taking into account the calculated adhesion energy.

Keywords: plasma coatings, laser remelting, adhesion, adhesion strength, laser beam speed, track overlap coefficient.

Актуальність проблеми

Розроблення технологій надання поверхням відповідальних деталей високих фізико-механічних властивостей, при збереженні властивостей основного матеріалу, зберігає актуальність на сучасному етапі розвитку техніки. Найбільшого поширення набули газотермічні, зокрема плазмові технології нанесення функціональних покриттів.

Застосування плазмового напилювання обмежується недостатньою адгезією і зносостійкістю покриттів, а також значною пористістю. Доведено, що оплавлення висококонцентрованим джерелом тепла - лазерним випромінюванням дозволить підвищити якість напилених покриттів і є найефективнішим способом з огляду на технологічність, продуктивність, гнучкість і можливість оброблювання виробів будь яких розмірів і геометрії. Ще одним важливим моментом є використання плазмових і лазерних технологій без створення особливої атмосфери (на повітрі) і відмінна особливість лазерної обробки можливість транспортування лазерного променя на достатньо довгі дистанції.

Поряд із вирішенням загальних проблем створення якісних захисних покриттів стоїть завдання оптимального вибору матеріалу покриття, розробки та впровадження

нових дешевих зносостійких матеріалів з високими технологічними властивостями і створення наукових знань у галузі створення функціонально орієнтованих антифрикційних матеріалів і покриттів, які мають якісно новий комплекс службових властивостей, що є важливим і актуальним аспектом для практичного використання у сучасному машинобудуванні.

Суттєвий інтерес є інтегрування плазмових і лазерних технологій, які значно розширюють можливість створення покриттів з широким спектром властивостей, що дозволить заміну коштовних дефіцитних матеріалів звичайними вуглецевими та низьколегованими сталями.

Аналіз останніх досліджень

Зростання вимог сучасної техніки і промисловості до параметрів поверхневих шарів зумовлює необхідність створення композиційних покриттів, які дозволяють формувати на робочій поверхні функціональні шари із широким спектром експлуатаційних властивостей. Водночас матеріали покриття повинні поєднувати комплекс важкосумісних характеристик - високі значення міцності, пластичності, твердості. Це забезпечує можливість відновлення і зміцнення деталей з обмеженим запасом втомної міцності, а також розширює сферу застосування таких технологій для значної кількості деталей, що працюють під дією підвищених температур, ударних навантажень [1,2].

Плазмове напилювання є найбільш перспективним, високотехнологічним та ефективним процесом з газотермічних способів нанесення покриттів, що застосовується для підвищення стійкості вузлів машин або виробів, які працюють в умовах абразивної дії робочого середовища, шляхом використання композиційних порошків, що не поступаються карбиду. Цей метод полягає в розплавленні матеріалу, що наноситься за допомогою високо - температурного струменя, який утворюється плазмовим пальником, з подальшим розпорошенням розплаву потоком іонізованого газу. Як плазмоутворювальні матеріали найбільш поширені вода і гази: аргон, гелій, чистий азот, а також їх суміші. При плазмовому напилюванні щільність потужності теплового потоку струменя (до 1050 Вт/м²) і висока температура (4000–5000K) дозволяють наносити широку гаму порошкових матеріалів. Перевагами плазмового напилювання є можливість нанесення покриттів з різних матеріалів: металів, сплавів, оксидів, карбідів та інших сполук; висока продуктивність процесу при високому коефіцієнті використання порошку; можливість управління енергетичними параметрами плазми; нагрівання поверхні до порівняно невисоких температур (250-300⁰C), що сприяє збереженню особливості структури і властивостей матеріалу основи [1,2]. Але, незважаючи на визначені можливості, зазвичай не вдається повністю реалізувати його переваги через низьку адгезійну міцність і пористість покриттів, залишкові напруження [3].

Щоб поліпшити характеристики міцності покриттів вводиться їх оплавлення. Широко використовуються такі методи об'ємної обробки як оплавлення газовим пальником, в соляній ванні або в печі, а також ТВЧ [4,5]. Однак, при таких способах відбувається інтенсивне нагрівання деталі, що значно змінює структуру основи і викликає короблення. а також можливе стікання покриття [4].

Найбільш прогресивним і ефективним методом оплавлення газотермічних покриттів, позбавленим зазначених недоліків є оплавлення лазерним випромінюванням [6]. Використання лазерного випромінювання як локального висококонцентрованого джерела інфрачервоного випромінювання відкриває широкі можливості модифікації структури і властивостей поверхневих шарів металевих матеріалів. Крім локальності, перевагою лазерної обробки є можливість безперервного керування процесом: глибина нагріву зменшується зі збільшенням інтенсивності лазерного випромінювання, так як

при цьому відбувається більш швидке нагрівання поверхні при малій щільності потоку і тривалості часу опромінення [7]. Процес оплавлення самофлюсних газотермічних покриттів використовується і за кордоном. Так фірма «Метко» оплавляє покриття 10 кВт CO₂ – лазером. При цьому зменшується пористість, покращується хімічна чистота, за рахунок зменшення вмісту кисню, та структурна однорідність покриття. Причому продуктивність процесу в 10 разів вища, ніж за традиційних методів оплавлення [8]. Лазерне оплавлення газотермічних покриттів зі сплавів, що самофлюсуються, значно змінює їх структуру і властивості, підвищуючи як фізико-механічні, так і експлуатаційні характеристики, і дозволяє вести технологію зміцнення – відновлення низки деталей, які іншими традиційними методами не можуть бути рівнозначно оброблені. Застосування лазерів перспективне на всіх стадіях створення покриттів: для очищення і попередньої підготовки поверхні, на яку наноситься покриття; у самому процесі напилювання; при наступній термообробці; для контролю якості покриття та розмірів деталі.

У разі плазмового напилювання сплавів, що самофлюсуються, необхідна адгезійна міцність забезпечується тільки після подальшого оплавлення покриттів, тому дана технологічна операція є найбільш прийнятним об'єктом дослідження і оптимізації не тільки за її ступенем впливу на міцність зчеплення, але і по можливості технологічного управління нею, що особливо ефективно при оплавленні покриття. Таким чином, поєднання процесів плазмового напилювання порошків зносостійких самофлюсівних сплавів і їх наступне оплавлення лазерним випромінюванням є актуальним і перспективним науково-технічним завданням і служить для розробки нових технологічних процесів при зміцненні і відновленні цілого ряду деталей машин і механізмів.

Формулювання мети дослідження

Мета дослідження - визначення впливу параметрів лазерного випромінювання на якість (міцність зчеплення) плазмових покриттів з порошків самофлюсівних сплавів на основі заліза з урахуванням теоретичної оцінки процесів з'єднання покриття - основа.

Методичний підхід в проведенні досліджень

Проблематика формування міцного з'єднання між покриттям та основою є предметом численних досліджень, оскільки саме адгезійна взаємодія визначає експлуатаційні властивості поверхонь деталей. Отримання високих показників якості плазмового покриття забезпечується з урахуванням оцінки фізико-хімічних процесів, що протікають у зоні контакту покриття та підкладки, які призводять до досягнення необхідної адгезійної міцності, з метою прийняття теоретично обґрунтованих рекомендацій щодо технології їх створення. Доцільним інструментом для пояснення механізмів взаємодії між матеріалами покриття і основи та для обґрунтування вибору технологічних режимів їх формування є використання положень квантової механіки.

У [3] зазначено, що основний внесок у зчеплення забезпечують механічні фактори, доповнені дифузійними процесами, частковим сплавленням матеріалів, хімічними реакціями та дією слабких фізичних сил типу Ван-дер-Ваальса. Водночас механічне зчеплення та Ван-дер-ваальсові сили мають нестійкий характер і не здатні забезпечити високий рівень адгезії; вирішальну роль відіграють саме хімічні зв'язки між атомами двох матеріалів. Хімічна взаємодія на межі поділу покриття та основи ґрунтовно розглядається у багатьох публікаціях [9], де її описують із термодинамічних та енергетичних позицій. Це особливо актуально для металів, структура яких характеризується щільним атомним пакуванням і переважно сферичною симетрією міжатомних зв'язків. Формування міцного контакту між атомами покриття та підкладки відбувається послідовно у два кроки: спершу атоми зближуються до відстаней, на яких

починають проявлятися міжатомні сили. На другому етапі встановлюються стійкі хімічні зв'язки, причому ключовим чинником є адсорбційні процеси - фізична адсорбція та хемосорбція, що завершуються утворенням міцного хімічного зв'язку.

Встановлено, що вирішальним чинником адгезійної міцності є електронні процеси квантового рівня, які визначають перерозподіл електронної густини між атомами контактуючих матеріалів, дозволяють прогнозувати характер та інтенсивність взаємодії різних елементів або оцінити потенційну міцність їх зчеплення. У більшості робіт опис взаємодії частинок покриття та підкладки подано на якісному рівні, що ускладнює кількісний аналіз.

Для одержання кількісних закономірностей необхідним є застосування методів, здатних відобразити специфіку електронної будови атомів та динаміку зміни їхніх електронних оболонок у процесі контактування. Таким чином, для формування покриттів з високими якісними характеристиками і прогнозованими експлуатаційними властивостями важливо враховувати фізико-хімічні процеси, що відбуваються у зоні контакту та визначають кінцевий рівень адгезії.

Мірою сил міжатомного зчеплення твердого тіла може бути енергія зв'язку, яка добре пояснює адгезійну міцність. Існує два підходи до визначення енергії зв'язку [10,11]: на основі оцінки ван-дер-ваальсової взаємодії та оцінки адгезії на рівні електронної будови атому квантово-механічним методом.

Розрахунок енергії адгезії проводиться як енергетичний підхід до оцінки металевих, ковалентних, іонних зв'язків між атомами основи і покриття. Стосовно розгляду окремих атомів та молекул домінуючу роль належить обмінній взаємодії. Атоми покриття $M_{\text{п}}$ при плазмовому напилюванні у розплавленому стані потрапляють на поверхню основи $M_{\text{о}}$, як наслідок утворюється енергія, яка і забезпечує взаємодію між покриттям та атомами металів основи, що і обумовлює сили тяжіння. Обмінна енергія і є $E_{\text{зв}}$ - визначальною величиною загальної енергії зв'язку 2-х силових центрів (рис.1), характер взаємодії яких описується рівнянням Шредінгера [12]:

$$\hat{H} \cdot \psi = E_{\text{зв}} \psi \quad (1)$$

де $\hat{H}$ – оператор Гамільтона; $E_{\text{зв}}$ - загальна енергія зв'язку;
 ψ – хвильова функція.

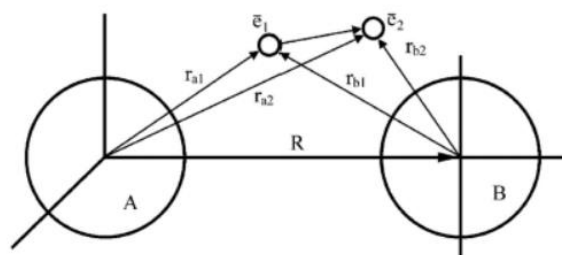


Рис.1. Схема взаємодії двох силових центрів

Обмінна взаємодія має квантово-механічний ефект і характеризує специфічну взаємодію тотожних частинок. При розрахунку $E_{\text{зв}}$ слід дотримуватися положення, що відповідає квазіхімічному трактуванню енергії кристалів [13], згідно з якою енергія зв'язку кристала дорівнює сумі енергій розриву всіх парних зв'язків. Кожен електрон взаємодіє з 2-ма протонами. Загальна симетрична хвильова функція:

$$\Psi = \Psi_{a,1} \Psi_{b,2} + \Psi_{a,2} \Psi_{b,1} \quad (2)$$

де $\Psi_{a,1}$ - хвильова функція електрона 1 у полі ядра А,
 $\Psi_{b,2}$ - хвильова функція електрона 2 у полі ядра В.

Наближене значення Ψ можна представити S – станом:

$$\Psi_a = \left(\frac{\alpha^3}{\pi}\right) \exp(-\alpha r_a) \quad (3)$$

$$\Psi_b = \left(\frac{\beta^3}{\pi}\right) \exp(-\beta r_b) \quad (4)$$

де r_a і r_b – радіуси атомів,

$$\beta = \sqrt{\frac{\theta_\beta}{\theta_n}} \alpha = \sqrt{\frac{\theta_\alpha}{\theta_n}} \quad (5)$$

де Θ_a та Θ_b – потенціали іонізації взаємодіючих атомів;
 Θ_n – потенціал іонізації водню.

Енергія взаємодії системи по формулі (1) має вигляд:

$$E_{зв} = \frac{\int \Psi H / \Psi d\tau}{\int \Psi \cdot \Psi d\tau} \quad (6)$$

де H' – частина загального гамільтоніана, яка збуджує, $(\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{H}')$
 H_0 - енергію вихідних взаємодіючих систем, не враховується.

Вирішуючи рівняння (6) варіаційним методом застосованим Гомбашем для квантово-механічних розрахунків [13], маємо остаточно для симетричної хвильової функції:

$$E_{зв} = \frac{H_1 + H_2}{1 + S} \quad (7)$$

де $\int$ - інтеграл перекриття, що характеризує ступінь перекриття атомних орбіт атомів, що взаємодіють;

$d\tau$ – елемент конфігураційного простору.

$$S = \int \int \Psi_{a,1} \Psi_{b,2} \Psi_{a,2} \Psi_{b,1} d\tau_1 d\tau_2 \quad (8)$$

На рис. 2 наведено розрахунки енергії зв'язку формула (7) залежно від співвідношення енергій електронів взаємодіючих силових центрів за різних відстаней між цими центрами за відомою методикою [12]. З графіків видно, що область переходу однакових рівнів енергії до різних рівнів відповідає залежно від між ядерної відстані R одиниці [13].

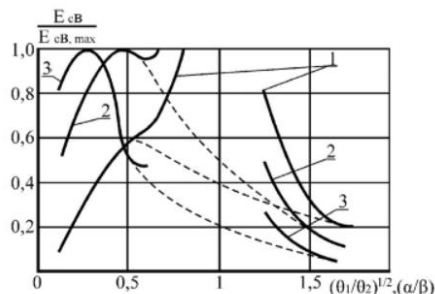


Рис. 2. Залежність енергії зв'язку двох силових центрів від співвідношення взаємодіючих рівнів енергії: 1 – R = 3 атомні одиниці; 2 – R = 4 атомні одиниці; 3 – R = 5 атомні одиниці

Однак енергія зв'язку (формула (7)) не враховує стан електронів, що беруть участь в обміні при взаємодії двох силових центрів.

При взаємодії різних металів, якщо їх хімічні потенціали не збігаються, на межі контакту утворюється подвійний електричний шар ΔE (рис.3, а).

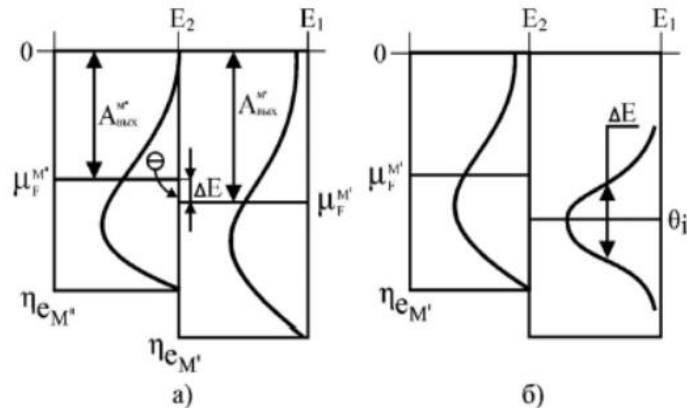


Рис. 3. Розподіл електронів за рівнями енергії при взаємодії: а – метал – метал; б – метал – атом

Система прагнуче до мінімуму енергії, тобто до вирівнювання рівнів. Варіюючи параметрами μ_F , знаходимо мінімальне значення $E_{зв}$, що реалізується в даному випадку. За нашим методом, що враховує різні енергетичні стани електронів на зовнішніх орбітах атомів, характер енергії зв'язку різко відрізняється, хоча тенденція зменшення $E_{зв}$ при $R \rightarrow \infty$ зберігається.

Розглядаючи взаємодію атом - метал із рівнем енергії атома Θ_i на величину розширення ΔE :

$$\Delta E = \frac{h\vartheta}{R} \cdot S \quad (9)$$

де ϑ – швидкість електрона;
 S – інтеграл перекриття;
 R – міжядерна відстань 2-х силових центрів.

Швидкість знаходиться за формулою:

$$\vartheta = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_e}} \quad (10)$$

При контакті атомів, слід враховувати ковалентний та іонний зв'язки що мають дипольний момент, які характеризують електростатичну взаємодію. Визначення енергії взаємодії потрібно визначати враховуючи координатне число K , яке дорівнює кількості зв'язків між сусідніми атомами. При взаємодії металів з різними параметрами або типами кристалічної решітки відносна енергія адгезії (кількість бінарних взаємодій на одиницю площі) зменшується. У цьому випадку утворюються крайові дислокації, які зменшують загальну енергію зв'язку за рахунок зменшення координаційного числа чи утворення «вільних» зв'язків. Тому доцільно як матеріал покриття і основи вибирати метали з близькими за значеннями параметрами та типами кристалічних решіток. При розрахунках енергії адгезії на залізі приймали $K = 4$, що відповідає ОЦК ґратами. Складено ряд енергоактивності взаємодії металів з залізною основою:

Ni, Fe, Co, W, Mo, Cu, Mn, V, Ti, Cr, Al, Mg

Самий міцний зв'язок(найвищу адгезію) покриття зі сталеву основою забезпечує нікель, як основа композиційного сплаву. Однак якщо основа має ОЦК - ґрати, то перевагу слід віддавати покриттю на основі заліза.

Результати досліджень

Для нанесення плазмових покриттів на деталь зі сталі 45 використаний порошок ПР-Х4Г2Р4С2Ф, що самофлюсується, зі сплаву системи Fe-Cr-B-Si, економно легований Al, V, Mn, що дозволить йому працювати у слабккорозійних середовищах.

Дослідження міцності зчеплення плазмового покриття після лазерного оплавлення проводили з урахуванням визначення оптимальних параметрів лазерного випромінювання (час дії лазерного випромінювання на зону контакту покриття з основою, швидкість переміщення лазерного променя). Результати наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Міцність зчеплення плазмових покриттів, оплавлених лазерним випромінюванням

№ досвіду	Час дії лазерного випромінювання, с	Швидкість переміщення лазерного променя, мм/с	Міцність зчеплення, МПа
1	1,2	1,4	160
2	1,0	1,57	145
3	0,8	1,98	123
4	0,6	3,23	118
5	0,4	4,07	100
6	0,2	5,97	61

На основі проведеного аналізу літературних джерел встановлено, що варіювання режимами лазерної обробки дозволяє керувати розмірами ванни проплаву. При режимах з невеликою енерговкладом відбувається проплавлення покриття на всю глибину, що призводить до сколювання або розтріскування покриття внаслідок дії значних залишкових напружень, поява яких обумовлена високими швидкостями охолодження розплаву. При великих енергетичних вкладах (час дії лазерного випромінювання вище 2,0 с, швидкості переміщення променя -0,57...0,65 мм/с) відбувається проплавлення як покриття, так і основи, при значному перемішуванні матеріалів, що обумовлює зниження рівня фізико-механічних та експлуатаційних властивостей нанесеного покриття.

У роботі [15] зазначається, що лазерну обробку бажано вести на режимах, при яких проплавлення відсутнє. Але оскільки нестабільність параметрів технологічного процесу (товщина напиленого покриття, хімічна неоднорідність покриття, коефіцієнт поглинання) не дозволяють гарантовано витримати глибину проплаву рівну товщині покриття, тому режими необхідно підбирати так, щоб глибина проплаву на 6-7 % перевищувала товщину напиленого покриття. Дослідження процесу лазерного оплавлення плазмових покриттів показали, що у досвіді 5 досягнуто повне проплавлення, але не відбувається якісного зчеплення. Що обумовлено короткочасним впливом рідкого розплаву з основою, коли не відбуваються у повній мірі процеси дисоціації оксидних плівок, що виникають на основі та утворення металевго зв'язку між елементами покриття та основи. Часткове розкислення поверхні розділу покриття з основою, спостерігається при дії лазерного променя порядку 0,4-0,6 с, міцність зчеплення вже досить висока. Міцність зчеплення залишається на рівні напилених покриттів при зменшенні часу впливу, так як ступінь розкислення поверхні основи знижується. Міцність зчеплення при впливі лазерного випромінювання в інтервалі 0,6-1,0 сек різко зростає від 50 МПа до 160 МПа. Отримані значення адгезійної міцності

дають можливість визначити оптимальні режими лазерної обробки, при яких відбувається повне приварювання плазмового покриття до основи.

Дослідження проводилися при потужності лазерного випромінювання $1,6 \times 10^8$ Вт/м². З отриманих даних видно, що залізне покриття має найбільшу виявлену в ході експерименту адгезійну міцність з основою при його оплавленні зі швидкістю переміщення променя не більше 1,57-1,98 мм/с. Дослідження проводилися при різних потужностях лазерного випромінювання, тому можна рекомендувати наступні режими лазерної обробки: 1) $q = 1,1 \times 10^8$ Вт/м², $v = 1,33-2,08$ мм/с; 2) $q = 1,6 \times 10^8$ Вт/м², $v = 1,67-2,08$ мм/с; 3) $q = 2,1 \times 10^8$ Вт/м², $v = 2,08-3,33$ мм/с.

Експериментально встановлено, що зменшення часу оплавлення (менше 0,75–0,6 с) призводить до зниження обмінної взаємодії між атомами покриття та основи, відповідно знижується адгезійна міцність.

Фактором, що лімітує міцність зчеплення покриття та основи плазмових покриттів зі сплавів, що самофлюсуються, на основі заліза, є розкислення окисних плівок між покриттям і основою та встановлення хімічних зв'язків. Час, необхідний для розкислення оксидів заліза при $T = 1300-1500$ К, становить 0,75-0,9 с [16].

У процесі дослідження міцності зчеплення покриття та основи спостерігався адгезійний та адгезійно - когезійний характер розривів зразків (коли покриття відривалася повністю або частина його залишалася на штифті), при чому перший випадок відбувається при великих швидкостях проміну лазера. Руйнування покриття починалося з краю покриття, де є дефекти, тобто не забезпечен повний контакт з основою і більш концентруються напруження. Збільшення навантаження приводить до виникнення мікротріщин, які поступово розповсюджуються по всій поверхні контакту і утворюють значну тріщину, що призводить до руйнування.

Максимальне значення $\sigma_{\text{сц}} = 180$ МПа (плазмових покриттів з лазерним оплавленням) спостерігалось при $V = 0,8 \times 10^{-3}$ м/с (таблиця 2 зразок 1) - при мінімальній швидкості променю лазера. З підвищенням швидкості променю лазера до $V = 5 \times 10^{-3}$ м/с міцність зчеплення знизилася до $\sigma_{\text{сц}} = 100$ МПа (зразок 3), що пов'язано зі скороченням часу дії лазерного оплавлення. Мінімальне значення $\sigma_{\text{сц}} = 51$ МПа – у плазмових покриттів без оплавлення лазером обумовлено через наявність пор та великої кількості окисних плівок.

Таблиця 2

Залежність міцності зчеплення покриття від швидкості лазерного проміну

№ зразка	Швидкість променю V , м/с	Діаметр променю лазера у місті дотику d , м	Коефіцієнт перекриття лазерних доріжок, К	Міцність зчеплення $\sigma_{\text{сц}}$, МПа
Плазмове покриття з оплавленням лазером				
1	$0,8 \times 10^{-3}$	1×10^{-3}	0,8	180
2	$1,65 \times 10^{-3}$	1×10^{-3}	0,8	127
3	5×10^{-3}	1×10^{-3}	0,8	100
4	Плазмове покриття без оплавлення			51

Практичні рекомендації

1. Теоретично параметри адгезії визначені з урахуванням координатного числа, яке дорівнює кількості зв'язків між сусідніми атомами. Тому доцільно як матеріал покриття і основи вибирати метали з близькими за значеннями параметрами та типами кристалічних решіток, що обумовлює перевагу застосування покриття на основі заліза для залізної основи.

2. Теоретичні дослідження і експериментальні значення адгезійної міцності дають можливість визначити оптимальні режими лазерної обробки, при яких відбувається повне приварювання плазмового покриття до основи, в наслідку повної дисоціації оксидних плівок на підкладці: 1) $q = 1,1 \times 10^8$ Вт/м², $V = 0,8 \cdot 10^{-3}$ м/с, $d = 1 \cdot 10^{-3}$ м та коефіцієнта перекриття лазерних доріжок 0,9.

Висновки

1. Надзвичайно важливою у виборі методу підвищення якості плазмових покриттів стала можливість управління фізико-механічними властивостями поверхневого шару з метою забезпечення необхідного підвищення експлуатаційних властивостей при оплавленні лазерним випромінюванням. Теоретично доведено, що адгезія покриття з основою визначається енергією зв'язку. У разі обміну окремих атомів і простих молекул - взаємодія, як показали розрахунки, грають домінуючу роль. В результаті обмінної взаємодії обох матеріалів виникає енергія, яка в основному і служить причиною виникнення сил притягнення покриття і основи.

2. Використання оплавлення лазерним променем дозволило отримати покриття з високим рівнем міцності зчеплення і як наслідок високими експлуатаційними властивостями. Встановлено, що для видалення оксидних плівок з поверхні контакту з метою підвищення міцності зчеплення покриття з основою час впливу оплавлення лазерним променем на плазмове покриття повинен бути не менше 0,75– 0,9 с (для залізної підкладки).

Список використаних джерел

1. Борисов Ю.С. Современные достижения в области нанесения защитных и упрочняющих покрытий, *Порошковая металлургия*, Киев, 2013, № 7, с. 5-14.
2. Клочко О.Ю., Дерябкина Е.С. Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів. Частина друга: Технологія конструкційних матеріалів: курс лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної (заочної) форми навчання інженерних спеціальностей. - Х.: ДБТУ, 2025.-85 с.
3. A Perspective on Plasma Spray Technology / A. Vardelle // *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. May 2015, Vol. 35, Issue 3, pp. 491–509.
4. Василенко Н. А. Перспективы применения локального упрочнения при изготовлении и восстановлении рабочих органов, *Техника АПК*, 2008, вып. 1, с. 29–31.
5. Дерябкина Е.С., Жежер М.Н. Влияние термической обработки на склонность к МКК сварных соединений низконикелевой коррозионностойкой стали с азотом, *Машинобудування*, Харків, УПА, 2012, вып.9, с.78-86.
6. Feldshtein E., Kardapolava M., Dyachenko O. On the effectiveness of multi-component laser modifying of Fe-based self-fluxing coating with hard particulates, *Int. J. Surface and Coatings Technology*, 2016, v.307, pp. 254–261.
7. Devojno O.G. On the formation features, microstructure and microhardness of single laser tracks, formed by laser cladding of a NiCrBSi self-fluxing alloy, *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, No 106, pp. 32–38.
8. Gnanamuthu D., Shankar V., Jacobs, R. Laser Heat Treatment of Iron-Base Alloys, *Proc. Applications of High Power Lasers*, Los Angeles, CA, SPIE, 1985, v. 5, № 12. pp. 56–72.
9. Петров С.В. Повышение качества плазменных покрытий, *Сварочное производство*, 2005, №5, с.48-50.
10. Бохан С.Г., Василенко А.Г., Гречихин Л.И. Расчет некоторых параметров физико-химических процессов образования и разрушения окисных пленок на подложке при газотермическом напылении, *Материалы конф. Теория и практика газотермического нанесения покрытий*, Дмитров, 2005, с. 66-71.

11. Назаренко П.В. Износостойкие газотермические покрытия из эвтектических сплавов, *Защитные покрытия в машиностроении*, К: ІЭС ім. Е.О. Патона, 1986, с. 39-41.
12. Рувінський М.А. Рівняння Шредінгера і фундаментальний квант дії $h/2$, *Фізика і хімія твердого тіла*, т. 9, № 3, 2008, с. 448-453.
13. Вакарчук І. О. Квантова механіка: підручник, 4-те вид. доп. Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2012, 872 с.
14. Feldshtein E.E. Tribological Properties of Electrosparc-Deposited and Further Laser-Hardened Coatings, *Journal of Friction and Wear*, Allerton Press, Inc., 2013, vol. 34, № 2, pp. 137–141.
15. Zhang, Gang, et al. Laser remelting of plasma-sprayed conventional and nanostructured coatings. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211, Issues C, 2011, pp. 105–110. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.10.028
16. Chen, Liang-Yu, et al. A New Method for Evaluating the Bond Strength of Plasma-Sprayed NiCrBSi Coatings Manufactured via Hybrid Plasma Spray and In Situ Laser Remelting Process. *Metals*, Vol. 12, No. 2, 2022, Article 168. doi:10.3390/met12020168

References

1. Borysov Yu.S. Suchasni dosiahnennia v oblasti nanesennia zakhysnykh ta uprochniuiuchykh pokryttiv (Modern achievements in the field of protective and strengthening coatings). *Powder Metallurgy*, Kyiv, 2013, No. 7, pp. 5–14. [in Ukrainian]
2. Klochko, O.Yu., Deriabkina, E.S. Materialoznavstvo ta tekhnolohiia konstruktsiinykh materialiv. Chastyna druha: Tekhnolohiia konstruktsiinykh materialiv: kurs lektsii (Materials science and technology of structural materials. Part II: Technology of structural materials: lecture course). Kharkiv: SBTU, 2025, 85 p. [in Ukrainian]
3. Vardelle A. A Perspective on Plasma Spray Technology. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, May 2015, Vol. 35, Issue 3, pp. 491–509.
4. Vasylenko, N.A. Perspektyvy zastosuvannia lokalnoho uprochnennia pry vyhotovlenni ta vidnovlenni robochykh orhaniv (Prospects for the application of local strengthening in manufacturing and restoration of working elements). *Tekhnika APK*, 2008, Issue 1, pp. 29–31. [in Ukrainian]
5. Deriabkina, E.S., Zhezher, M.N. Vplyv termichnoi obrobky na skhylnist do MKK zvarnykh ziednan nyzkonikelevoyi koroziinostiikoi stali z azotom (Effect of heat treatment on susceptibility to intergranular corrosion of welded joints of low-nickel nitrogen-alloyed corrosion-resistant steel). *Mashynobuduvannia*, Kharkiv, UIPA, 2012, Issue 9, pp. 78–86. [in Ukrainian]
6. Feldshtein, E., Kardapolava, M., Dyachenko, O. On the effectiveness of multi-component laser modifying of Fe-based self-fluxing coating with hard particulates. *Surface and Coatings Technology*, 2016, Vol. 307, pp. 254–261.
7. Devojno O.G. On the formation features, microstructure and microhardness of single laser tracks formed by laser cladding of a NiCrBSi self-fluxing alloy. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, No. 106, pp. 32–38.
8. Gnanamuthu D.S., Shankar V.S., Jacobs R.R. Laser Heat Treatment of Iron-Base Alloys. *Proceedings of Applications of High Power Lasers*, Los Angeles, CA, SPIE, 1985, Vol. 5, No. 12, pp. 56–72.
9. Petrov, S.V. Pidvyshchennia yakosti plazmovykh pokryttiv (Improving the quality of plasma coatings), *Svarochnoe proizvodstvo*, 2005, No. 5, pp. 48–50. [in Ukrainian]
10. Bokhan S.G., Vasylenko A.G., Hrechyhin L.I. Rozrakhunok deiakykh parametriv fizyko-khimichnykh protsesiv utvorennia ta ruinuvannia okysnykh plivok na pidlozhtsi pry hazotermichnomu napyleni (Calculation of certain parameters of physicochemical processes of formation and destruction of oxide films on the substrate during thermal spraying).

Proceedings of the conference Theory and Practice of Thermal Spraying of Coatings, Dmitrov, 2005, pp. 66–71. [in Ukrainian]

11. Nazarenko, P.V. Znosiostiiki hazotermichni pokryttia z evtektichnykh splaviv (Wear-resistant thermal spray coatings from eutectic alloys). Protective Coatings in Mechanical Engineering, Kyiv: E.O. Paton Electric Welding Institute, 1986, pp. 39–41. [in Ukrainian]

12. Ruvynskiy M.A. Rivniannia Shredinhera i fundamentalnyi kvant dii $\hbar/2$ (Schrödinger equation and the fundamental quantum of action $\hbar/2$). Physics and Chemistry of Solid State, Vol. 9, No. 3, 2008, pp. 448–453. [in Ukrainian]

13. Vakarchuk, I.O. Kvantova mekhanika: pidruchnyk (Quantum mechanics: textbook). 4th ed., Lviv: Ivan Franko National University of Lviv, 2012, 872 p. [in Ukrainian]

14. Feldshtein E.E. Tribological Properties of Electrosparc-Deposited and Further Laser-Hardened Coatings, Journal of Friction and Wear, Allerton Press, Inc., 2013, vol. 34, № 2, pp. 137–141.

15. Zhang, Gang, et al. Laser remelting of plasma-sprayed conventional and nanostructured coatings. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 211, Issues C, 2011, pp. 105–110. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.10.028

16. Chen, Liang-Yu, et al. A New Method for Evaluating the Bond Strength of Plasma-Sprayed NiCrBSi Coatings Manufactured via Hybrid Plasma Spray and In Situ Laser Remelting Process. Metals, Vol. 12, No. 2, 2022, Article 168. doi:10.3390/met12020168

Калюжний О.Б.¹,
Платков В.Я.²
Марченко М.М.¹

¹ Державний
біотехнологічний
університет,
м. Харків, Україна,
E-mail: albokal@ukr.net
kmmarchenko1208@gmail.com

² Східноукраїнський
національний університет
імені Володимира Даля,
м. Київ, Україна,
E-mail: vplatkov@gmail.com

МЕТОДИ ЛАЗЕРНОГО СПІКАННЯ ТА МАТЕРІАЛОЗНАВЧІ АСПЕКТИ В АДИТИВНОМУ ВИРОБНИЦТВІ МЕТАЛІВ: АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-27-30>

УДК 004.896

Калюжний О.Б., Платков В.Я., Марченко М.М. Методи лазерного спікання та матеріалознавчі аспекти в адитивному виробництві металів: аналітичний огляд

Анотація. У статті представлено огляд сучасних лазерних 3D-технологій обробки металевих матеріалів, що є одним з провідних напрямів адитивного виробництва. Розглянуто фізичні принципи взаємодії лазера з металевим порошком, механізми плавлення та затвердіння, а також важливість моніторингу процесів in-situ для забезпечення якості. Узагальнено основні методи лазерного 3D-друку металів (SLS, SLM, DMLS, DED/LENS), наведено їхні переваги, обмеження та сфери застосування. Особливу увагу приділено вимогам до металевих порошків, міжнародним стандартам ISO/ASTM та впливу параметрів лазера на мікроструктуру й механічні властивості деталей. Систематизовано характеристики найпоширеніших матеріалів — титанових, алюмінієвих, нікелевих сплавів, нержавіючих сталей, кобальт-хромових і мідних систем.

Ключові слова: лазерні 3D-технології, адитивне виробництво, металеві порошки, селективне лазерне плавлення, селективне лазерне спікання, пряме енергетичне осадження, металеві сплави.

Kalyuzhnyi O.B., Platkov V.Ya. Marchenko. M.M. Laser Sintering Methods and Materials Science Aspects in Metal Additive Manufacturing: An Analytical Review

Abstract. The article presents a review of modern laser 3D technologies for processing metallic materials, which represent a leading direction in additive manufacturing. The fundamental principles of laser-metal interaction, melting and solidification mechanisms, and the importance of in-situ monitoring for quality assurance are discussed. The main laser-based 3D printing methods (SLS, SLM, DMLS, DED/LENS) are summarized, outlining their advantages, limitations, and areas of application. Special attention is paid to the requirements for metallic powders, ISO/ASTM standards, and the influence of laser parameters on microstructure and mechanical properties. The characteristics of widely used materials — titanium, aluminum, nickel alloys, stainless steels, cobalt-chromium, and copper systems — are systematized.

Keywords: laser 3D technologies, additive manufacturing, metal powders, selective laser melting, selective laser sintering, directed energy deposition, metallic alloys.

1. Вступ

Лазерні 3D-технології металевих матеріалів – це група адитивних технологій (АТ), в яких джерелом енергії для плавлення чи спікання металевого порошку або дроту виступає лазерний промінь. Суть їх полягає у поетапному (шар за шаром) створенні тривимірних деталей без використання традиційних методів лиття чи механічної обробки. У сучасній промисловості лазерні 3D-технології металевих матеріалів відіграють ключову роль у формуванні виробничих процесів, пропонуючи виняткові можливості для створення складних, високопродуктивних компонентів. Адитивне виробництво (АВ), відоме як 3D-друк, стало однією з швидкозростаючих технологій у сучасному промисловому та науковому середовищі. Особливо значущим є розвиток металевого адитивного виробництва (МAM), яке перетворилося на повноцінний промисловий процес для виготовлення складних та індивідуалізованих металевих компонентів.

Інтерес до АВ не є випадковим, оскільки ця технологія пропонує рішення основних проблем, з якими стикається традиційне виробництво. Вона дозволяє долати обмеження, пов'язані з дизайном, мінімізувати матеріальні відходи та скорочувати терміни виконання замовлень [1]. Традиційні методи виробництва часто змушують йти на компроміси у дизайні, оскільки складна геометрія або інтеграція кількох функцій в одній деталі, як правило, неможливі або економічно недоцільні. Металеве АВ усуває ці обмеження, забезпечуючи високу гнучкість дизайну, що дозволяє створювати оптимізовані, легкі та складні структури, які раніше були недосяжні [2]. АВ не просто зміна способу виробництва, а фундаментальна зміна принципів проектування, що дозволяє зосередитися виключно на оптимізації функціональності без обмежень, накладених традиційними виробничими процесами.

Лазерні технології є центральним елементом цієї трансформації. Вони забезпечують високу швидкість, гнучкість та точність обробки металів, що є критично важливим для адитивного виробництва [3]. Лазерний промінь здатний миттєво передавати значну кількість енергії у центральну мікромасштабну область, що дозволяє досягати високої точності та працездатності при формуванні деталей [4].

Сучасний розвиток лазерних 3D-технологій металевих матеріалів характеризується кількома ключовими тенденціями, що спрямовані на підвищення ефективності, точності та розширення сфер застосування.

Однією з провідних тенденцій є розробка та впровадження високопотужних лазерів. Наприклад, волоконні лазери потужністю до 10 кВт суттєво розширили можливості лазерних технологій, дозволяючи не лише точне різання та зварювання, а й загартування металів та ефективний 3D-друк. Збільшення потужності забезпечує вищу швидкість обробки та дозволяє працювати зі сплавами з високими властивостями, такими як нікелеві, хромові, титанові [4, 5]. Це підвищує продуктивність і дозволяє обробляти більші об'єми матеріалів за менший час.

Значне якісне покращення відбувається завдяки інтеграції штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання (МН) у системи керування лазером. Це призвело до появи лазерів, які автоматично адаптуються до різних робочих умов. Вони на основі даних, отриманих від зовнішніх сенсорів, саморегулюють потужність променя, фокусування, швидкість обробки та інші параметри [6]. Ця інтеграція технологій дозволяє долати раніше непереборні обмеження, такі як термічні деформації або нерівномірний контроль мікроструктури, значно покращуючи ефективність процесу та якість кінцевого продукту. Перехід до динамічних, самооптимізуючих систем, керованих ШІ/МН, є критично важливим для подолання притаманних процесу нестабільностей та досягнення надійності та відтворюваності на промисловому рівні. Це дозволяє автоматично

коригувати параметри в реальному часі, мінімізуючи дефекти та оптимізуючи процес, що є критично важливим для складних металевих сплавів [7].

Іншим важливим напрямком є розвиток гібридних лазерних систем. Такі системи поєднують кілька типів лазерів в одному пристрої (наприклад, волоконні та CO₂ лазери) або АВ з традиційними методами обробки, такими як механічна обробка (фрезерування з ЧПК). Вони можуть виконувати два технологічні процеси одночасно в одному циклі, наприклад, зварювання та різання металів, що скорочує загальний час виробництва та знижує енергоспоживання [8]. Це вказує на перехід до інтегрованих рішень, які дозволяють поєднувати переваги різних методів, підвищуючи точність та якість поверхні.

Ще одним перспективним напрямком є розвиток ультрашвидких імпульсних лазерів. Їхня ключова перевага полягає у мінімальному термічному впливі на матеріал, що дозволяє ефективно працювати з чутливими матеріалами без пошкодження їхньої структури. Хоча це має особливе значення для біологічних тканин та полімерів, потенціал для металів полягає у зменшенні теплових деформацій та досягненні ще вищої точності [9].

Крім того, сучасні технології металообробки все більше спрямовані на сталий розвиток та зниження впливу на навколишнє середовище. Адитивне виробництво, за своєю природою, є більш ефективним у використанні ресурсів, оскільки додає матеріал лише там, де це необхідно. Зниження споживання енергії та можливість використання відновлюваних джерел енергії додатково підкреслюють екологічні переваги. Це не лише відповідає зростаючим екологічним вимогам, але й забезпечує економічну вигоду за рахунок зменшення витрат на матеріали та утилізацію [10].

2. Принципи лазерного 3D-друку металів

В основі лазерного 3D-друку металів лежить складна взаємодія високоенергетичного лазерного променя з металевим порошком, що призводить до його плавлення або спікання та подальшого затвердіння. Лазери є найефективнішим джерелом енергії в адитивному виробництві, оскільки їхні промені можуть миттєво передавати велику кількість енергії у мікромасштабну фокусну область [11]. Це відбувається завдяки просторовій когерентності лазерного світла, що дозволяє променям поширюватися без критичного розходження або втрати потужності на великі відстані та фокусуватися у надзвичайно малі плями [12].

Під час лазерного 3D друку промінь лазера ефективно поглинається матеріалом, що призводить до термічного спікання або повного плавлення металевого порошку [11]. Взаємодія лазера з металом у процесах, таких як селективне лазерне плавлення (SLM), є надзвичайно динамічною. Вона включає одночасну присутність металу у вигляді пари, рідини, порошку та твердого тіла [12].

Існує критичний баланс між достатньою енергією для повного плавлення/спікання та надмірною енергією. Якщо потужність лазера занадто висока, розплавлений метал може інтенсивно випаровуватися, утворюючи комбінацію тиску віддачі пари та плазми. Це може призвести до формування локальної депресії з підвищеним поглинанням лазера, відомої як "keyhole" (ключова діра), що є нестабільним і може спричинити утворення пористості в кінцевій деталі [13]. Перехід до режиму "keyhole", спричинений підвищенням щільності лазерної енергії, є вирішальним фактором якості деталі, безпосередньо впливаючи на пористість та цілісність матеріалу [13]. Цей перехід являє собою поріг, за яким контроль процесу стає значно складнішим. Точне калібрування параметрів лазера (потужність, швидкість сканування, діаметр плями) є надзвичайно важливим для кожного конкретного матеріалу та геометрії, щоб уникнути дефектів.

Під час друку розплавлений матеріал затвердіває набагато швидше за наявності високого температурного градієнта. Це швидке затвердіння та охолодження в адитивному виробництві забезпечують отримання унікальної ультрадрібнозернистої мікроструктури з пересиченими атомами твердого розчину [14]. На відміну від традиційно литих або кованих деталей, швидкі термічні цикли під час 3D-друку можуть індукувати in-situ осадження, що є формою внутрішньої термічної обробки. Ця особливість процесу дозволяє не просто виготовляти деталі, але і впливати на їхні фундаментальні властивості. Наприклад, дослідження показали, що контролюючи склад сплавів, таких як марганець та залізо, можна змінювати мікроструктуру, руйнуючи стовпчасті структури та зменшуючи розмір зерен, що покращує межу текучості кінцевого металу. Це відкриває шлях до створення матеріалів з властивостями, спеціально оптимізованими для конкретних застосувань [15].

Динамічний характер взаємодії лазера з металом робить моніторинг процесу in-situ критично важливим для підвищення надійності та якості адитивного виробництва. Наприклад, висока температура в області розплаву (>2000 K) призводить до термоелектронної емісії, яку можна використовувати для моніторингу процесу. Здатність моніторити термоелектронну емісію як індикатор температури та морфології поверхні в реальному часі дозволяє виявляти та коригувати дефекти [17]. Це має важливе значення для переходу від дослідницьких установок до надійного промислового виробництва, оскільки дозволяє операторам або автоматизованим системам виявляти аномалії в реальному часі та вносити корективи в параметри лазера, мінімізуючи кількість браку та покращуючи відтворюваність процесу. Перехід від кінцевого контролю, після виготовлення деталі, до моніторингу in-situ та корекції дефектів у реальному часі є фундаментальною зміною у забезпеченні якості для АВ, що наближає до виробництва "з першого разу" без дефектів.

3. Методи лазерного 3D-друку металів

Лазерний 3D-друк металів охоплює кілька ключових технологій, кожна з яких має свої унікальні принципи роботи, переваги та сфери застосування.¹ Найбільш поширеними є методи, засновані на технології порошкового шару (Powder Bed Fusion – PBF), такі як SLS, SLM та DMLS, а також технології прямого енергетичного осадження (Directed Energy Deposition – DED), зокрема лазерна інженерія кінцевої форми (LENS).

3.1. Селективне лазерне спікання

Селективне лазерне спікання (SLS) є методом адитивного виробництва, що використовує високопотужний лазер для спікання тонких шарів порошкових матеріалів у тверді, функціональні деталі. Цей процес зазвичай застосовується для створення міцних пластикових деталей, використовуючи поліаміди (нейлони), алюмід (суміш алюмінієвого порошку та поліаміду) та гумоподібні порошки. Товщина шарів порошку, що спікається, зазвичай становить від 20 до 100 мкм.

Однією з ключових переваг SLS є відсутність потреби в опорних структурах. Неспечений порошок, що оточує деталь, природно підтримує модель під час її побудови, що значно спрощує дизайн та постобробку. Ця особливість є не лише технічною перевагою, а й значною економічною та часовою вигодою, оскільки вона зменшує час постобробки, витрати матеріалу та дозволяє "вкладати" кілька деталей в одну збірку для максимального використання об'єму камери, що підвищує продуктивність. SLS-принтери часто оснащуються великими камерами побудови (до 750 мм), що дозволяє виготовляти як великі вироби, так і цілі партії невеликих об'єктів за один цикл. Технологія відносно недорога для прототипування та підходить для візуальних моделей. Крім того, неспечений порошок може бути використаний повторно для наступних виробничих циклів, що робить SLS технологією з нульовими відходами.¹ Це має важливі

наслідки для сталого розвитку, оскільки значно знижує матеріальні відходи порівняно з традиційними методами або іншими АВ-технологіями, де нерозплавлений порошок може бути забруднений. SLS ідеально підходить для швидкого прототипування, малосерійного виробництва та виготовлення кінцевих компонентів з промисловою точністю. Він забезпечує високу міцність, деталізацію та свободу дизайну, конкуруючи з литтям під тиском без високих витрат на оснастку. Незважаючи на ці переваги, SLS має певні обмеження, такі як відносно повільна швидкість для металів та залежність якості поверхні від розміру зерна порошку [18].

Хоча SLS частіше асоціюється з полімерами, існують модифікації, які можуть працювати з металевими порошками та сплавами.

3.2. Селективне лазерне плавлення

Селективне лазерне плавлення (SLM) має той самий технічний принцип, що й SLS, але відрізняється тим, що використовується виключно для металевих матеріалів і передбачає повне розплавлення порошку, а не лише спікання. Цей процес відбувається в робочій камері, яка заповнюється інертними газами, такими як аргон, для запобігання окисненню металу під час плавлення [19].

Процес SLM починається зі створення точної 3D-моделі за допомогою програмного забезпечення CAD, яка потім розбивається на тисячі тонких шарів. На кожному етапі тонкий шар металевого порошку рівномірно розподіляється по платформі побудови. Потужний лазерний промінь, керований системою сканування (дзеркалами та лінзами), методично плавить металевий порошок у точках, визначених цифровою моделлю, відповідно до контуру поточного шару. Після завершення кожного шару платформа опускається на одну висоту шару, і новий шар порошку розподіляється за допомогою скребоків або роликів. Платформа побудови постійно нагрівається протягом усього процесу для підтримки оптимальної температури та зменшення термічних напружень [20].

Повне плавлення порошку в SLM забезпечує високу щільність кінцевих деталей (до 99.9%), що призводить до відмінних механічних властивостей, порівнянних з традиційно виготовленими кованими матеріалами. Це робить SLM ідеальним для критично важливих застосувань, де міцність та структурна цілісність є першочерговими. Однак, висока щільність та повне плавлення мають свої недоліки. SLM вимагає використання опорних структур для нависаючих елементів та складних геометрій. Це необхідно для запобігання деформації через високі залишкові напруження, що виникають під час швидкого охолодження металу, та для підтримки геометрії деталі. Мінімальна товщина стінки, яку можна досягти за допомогою SLM, зазвичай становить 0.5-1.0 мм. Після друку деталі проходять обов'язкову постобробку, що включає видалення опорних структур, термічну обробку для зняття залишкових напружень та покращення мікроструктури, а також полірування для досягнення необхідної якості поверхні.

Переваги SLM включають можливість створення деталей зі складною геометрією та внутрішніми елементами, скорочення часу виконання замовлень (оскільки не потрібна оснастка), а також можливість одночасного виробництва кількох деталей. Незважаючи на високу вартість обладнання та спеціальних металевих порошоків, SLM є основною технологією для виробництва високопродуктивних компонентів у таких галузях, як аерокосмічна, медична та автомобільна.

3.3. Пряме лазерне спікання металів

Пряме лазерне спікання металів (DMLS) є ще однією поширеною технологією адитивного виробництва, що використовує лазер для створення металевих деталей. Хоча терміни DMLS та SLM часто використовуються взаємозамінно, існують важливі відмінності в їхніх фундаментальних процесах. DMLS є різновидом SLS, адаптованим для металевих порошоків.¹ На відміну від SLM, який передбачає повне плавлення

порошку, DMLS нагріває металевий порошок майже до температури плавлення, викликаючи спікання та синтез частинок через хімічну реакцію. Це часткове спікання означає, що деталі, виготовлені за технологією DMLS, можуть мати менші залишкові напруги порівняно з технологією SLM, оскільки матеріал не проходить повну фазу плавлення та кристалізації. Проте, це також може призвести до підвищення пористості (5-8%) та варіацій механічних властивостей через неповне злиття частинок. Після друку деталі зазвичай піддаються термічній обробці для зняття будь-яких залишкових напруг та покращення механічних властивостей [21].

У процесі DMLS використовують оптоволоконні лазери, зазвичай потужністю близько 200 Вт. Для підвищення продуктивності може бути використано кілька лазерів. Технологія дозволяє друкувати точні деталі з високою роздільною здатністю та складною геометрією. Отримані деталі характеризуються відмінною якістю поверхні та механічними властивостями, близькими до кованих металів. DMLS пропонує широку доступність матеріалів, включаючи нержавіючу сталь, алюмінієві, нікелеві сплави, титан, мідь та вольфрам. Він також підтримує композитні матеріали та гібридний друк метал-кераміка. Це робить DMLS гнучким до виготовлення унікальних форм та дизайнів зі стабільними механічними властивостями. Технологія дозволяє зменшити витрати на інструментальне оснащення, забезпечує гнучкість дизайну та дозволяє цифрово архівувати деталі для друку "на вимогу".

Незважаючи на переваги, DMLS має свої недоліки. Обладнання є дорогим у придбанні та експлуатації, вимагає кваліфікованих операторів та подальшої постобробки. Крім того, швидкість друку може бути відносно повільною, а об'єми побудови зазвичай малі. Вибір між DMLS та SLM залежить від пріоритетів: якщо критична висока щільність та механічні властивості, то SLM є кращим; якщо важлива гнучкість матеріалів та менші напруги, то DMLS може бути оптимальним. Ця відмінність між DMLS та SLM (спікання проти повного плавлення) має значні наслідки для властивостей матеріалу, зокрема щільності та залишкових напруг, що, своєю чергою, визначає їх придатність для критичних застосувань [22].

3.4. Пряме енергетичне осадження (DED), зокрема LENS

Пряме енергетичне осадження (DED) є ще однією важливою технологією адитивного виробництва металів, що суттєво відрізняється від методів порошкового шару (PBF). У DED металевий порошок або дріт подається безпосередньо в розплавлену ванну, яка створюється сфокусованим джерелом теплової енергії, таким як лазер, плазмова дуга або електронний промінь. Це дозволяє створювати деталі шляхом наплавлення зварних валиків [23, 24].

LENS (Laser Engineered Net Shaping) є однією з найвідоміших технологій DED, яка використовує високопотужний лазер (від 400 Вт до 3 кВт) для плавлення порошкових металів у повністю щільні тривимірні структури. Процес LENS, як і інші методи АВ, керується геометричною інформацією з CAD-моделі, що дозволяє будувати компонент шар за шаром. Для забезпечення геометричної та механічної цілісності готової деталі використовуються додаткове програмне забезпечення та системи контролю із замкненим циклом. Важливою особливістю процесу LENS є його проведення в герметично закритій камері, яка продувається аргоном. Це дозволяє підтримувати рівень кисню та вологи нижче 10 ppm, що є критично важливим для запобігання окислення металу та збереження якості деталі. Система подачі порошку точно регулює масовий потік матеріалу до зони плавлення. Після завершення друку компоненти можуть бути піддані різним видам постобробки, включаючи термічну обробку, гаряче ізостатичне пресування (HIP), механічну обробку або інші фінішні операції. LENS підтримує обробку багатьох високопродуктивних металів, таких як титан, нержавіюча сталь та Inconel, забезпечуючи якість, необхідну для критично важливих застосувань [25].

На відміну від PBF, DED (LENS) не обмежується об'ємом порошкового шару, що робить його ідеальним для ремонту існуючих компонентів та виготовлення великогабаритних деталей (наприклад, відновлення зношених залізничних коліс), DED також дозволяє створювати нові матеріали з декількох металів або додавати функціональні елементи до вже існуючих деталей. Для певних деталей DED може бути до 10 разів швидшим та у 5 разів дешевшим, ніж PBF [23].

Однією з ключових тенденцій є можливість інтеграції LENS як модульного друкованого елемента в існуючі або нові верстати з ЧПК. Це є важливим кроком до гібридного виробництва, що поєднує переваги адитивного та субтрактивного методів. Деталі, які виготовлені за допомогою DED, часто мають шорстку поверхню, яка потребує подальшої механічної обробки. Інтеграція DED-систем безпосередньо у верстати з ЧПК дозволяє виконувати адитивне наплавлення та субтрактивну обробку в одному циклі без необхідності переміщення деталі. Це значно скорочує час виробництва, підвищує точність та дозволяє створювати деталі зі складною внутрішньою геометрією та високоякісною зовнішньою поверхнею [26, 27].

4. Обладнання та типи лазерів для 3D-друку металів

Для реалізації лазерного 3D-друку металів використовується спеціалізоване обладнання, що поєднує високоточні механічні системи, потужні лазерні джерела та складне програмне забезпечення. Сучасні 3D-принтери по металу, такі як FastForm FF-M180D, спроектовані для постійного друку точних деталей, наприклад, у стоматології. Ці машини оснащені потужними лазерами, які забезпечують високу ефективність та швидкість друку, зберігаючи при цьому високу якість виробів [28].

Важливим компонентом є гальванометричні сканери (наприклад, Scanlab), що характеризуються високою точністю, точним контролем положення та мінімальним дрейфом лазерного променя. Системи SLM, такі як Renishaw AM400, використовують ітербійові волоконні лазери. Деякі конфігурації можуть мати два лазери для збільшення потужності (з 200 Вт до 400 Вт) при збереженні розміру плями 70 мкм. Оптика включає 2D скануючу систему та гальванометричний сканер з вбудованим позиціонуванням по осі Z. Сканер складається з двох сервомоторів/гальванометрів з рухомим ротором та індуктивним датчиком положення ротора [29].

Параметри лазера, такі як потужність, швидкість сканування та діаметр сфокусованої плями, безпосередньо впливають на якість друку. Ці параметри є ключовими для контролю мікроструктури, щільності та точності кінцевого виробу. Потужність лазера визначає глибину плавлення та швидкість процесу: занадто низька потужність може призвести до неповного спікання/плавлення, а занадто висока – до випаровування та дефектів. Діаметр плями впливає на роздільну здатність та деталізацію. Швидкість сканування контролює час взаємодії лазера з матеріалом, що впливає на термічні напружки та мікроструктуру. [30, 31].

Оптимальне налаштування цих параметрів є складним завданням, що вимагає глибокого розуміння взаємодії лазера з матеріалом. Взаємодія між параметрами лазера та відгуком матеріалу є нелінійною та надзвичайно складною, що виключає універсальні "оптимальні" налаштування. Це вимагає розробки матеріало- та геометрійно-специфічних карт процесів та адаптивного контролю. Складність виникає через те, що зміна одного параметра впливає на численні фізичні явища (розмір розплавленої ванни, температурні градієнти, швидкість випаровування, швидкість затвердіння), які, своєю чергою, впливають на кінцеву мікроструктуру та механічні властивості. Таким чином, єдиного набору "найкращих" параметрів не існує для всіх матеріалів або геометрій деталей. Замість цього потрібна "карта процесу", яка визначає оптимальні діапазони параметрів для конкретних сплавів та бажаних властивостей [32].

Характеристики лазерних систем, що використовуються, зазвичай лежать в таких межах: потужність лазера 50-500 Вт, швидкість сканування до 2 м/с, швидкість позиціонування до 7 м/с, діаметр сфокусованої плями 35-400 мкм.

Серед типів лазерів, що використовуються в промисловості, найпоширенішими є волоконні та газові CO₂ лазери. Волоконні лазери є меншими за розміром, мають майже подвоєну потужність та більшу продуктивність при аналогічному споживанні струму порівняно з CO₂ лазерами. Вони також здатні ефективно обробляти кольорові метали, такі як мідь і латунь, і є значно дешевшими в обслуговуванні. Тому перехід до волоконних лазерів є важливою тенденцією, що зумовлена їхньою компактністю, вищою ефективністю та нижчими експлуатаційними витратами. Для систем DED/LENS використовуються більш потужні лазери, діапазон потужностей яких становить від 400 Вт до 3 кВт [33].

Крім апаратного забезпечення, сучасні 3D-принтери по металу нерозривно пов'язані з програмним забезпеченням. Прогресивне програмне забезпечення (наприклад, Fastlayer) адаптоване для високоточного промислового друку, дозволяючи ідеально розміщувати деталі на платформі, проводити коригування різної складності та інтегрувати бази даних параметрів друку для різних металевих матеріалів. Це свідчить, що якість 3D-друку металів є результатом комплексної взаємодії апаратного, програмного забезпечення та інтелектуальних систем. Навіть найпотужніший лазер та найточніша оптика не будуть ефективними без інтелектуального керування. Системи зворотного зв'язку та ШІ дозволяють автоматично коригувати процес у реальному часі, що є критично важливим для мінімізації браку та підвищення відтворюваності [34, 35].

5. Загальні властивості та вимоги до металевих порошків 3D-друка

Металеві порошки є основною сировиною для лазерного 3D-друку металів, особливо для технологій порошкового шару (PBF). Якість кінцевого продукту безпосередньо залежить від характеристик цих порошків. Для забезпечення високої якості та стабільності процесу друку, металеві порошки повинні відповідати низці суворих вимог до своїх властивостей [36].

Оптимізація характеристик порошку (сферичність, розподіл частинок за розміром, текучість) є складною проблемою, де покращення однієї властивості може негативно вплинути на іншу, що вимагає комплексного підходу до його вибору [37].

Чистота порошку є суттєво важливою. Керамічні вклучення, які мають високу температуру плавлення і важко спікаються, значно знижують якість кінцевої деталі. Тому їхня відсутність у порошку є обов'язковою. Крім того, суворо контролюється вміст кисню та азоту [38]. Технологія приготування порошку для металевого 3D-друку, в основному, базується на методі атомізації, що призводить до того, що порошок має велику питому поверхню і легко окислюється. Висока питома поверхня та реакційна здатність атомізованих металевих порошків, хоча й необхідні для процесів АВ, створюють суттєву вразливість до забруднення (особливо киснем), що безпосередньо впливає на механічні властивості та утворення дефектів у кінцевій деталі. Низька чистота може призвести до зростання кількості дефектів у мікроструктурі та погіршенню механічних властивостей. Це означає, що поводження з порошком та його зберігання є настільки ж важливими, як і сам процес друку.

Плинність порошку безпосередньо впливає на рівномірність його розтікання під час друку та стабільність процесу подачі порошку. Вона залежить від морфології порошку, розподілу частинок за розміром та насипної щільності. Чим менша частка дрібного порошку, тим краща його плинність. Якщо щільність частинок залишається незмінною, відносна густина збільшується, а плинність порошку зростає. Адсорбція води, газу тощо на поверхні частинок зменшує плинність порошку. Низька плинність

може спричинити нерівномірне розподілення шарів, що призведе до порожнин або нерівномірного плавлення [39].

Різне обладнання для 3D-друку та процеси формування обумовлюють різні вимоги до розподілу частинок за розміром. Зазвичай застосовувані діапазони розмірів частинок для металевих 3D-друку становлять 15-53 мкм (дрібний порошок) та 53-105 мкм (грубий порошок). Дрібні порошки підходять для принтерів, що використовують лазер як джерело енергії (наприклад, SLM/DMLS), через їх тонку фокусну пляму та легке плавлення цього порошку. Спосіб подачі порошку – пошарове порошкове покриття. Для принтерів з коаксіальним способом подачі порошку (наприклад, DED), які мають дещо більшу пляму фокусування, можна використовувати грубий порошок. Неправильний розподіл частинок за розміром впливає на стабільність розплавленої ванни та щільність кінцевої деталі [40].

Морфологія (сферичність) порошку тісно пов'язана зі способом його приготування. Чим вища сферичність частинок порошку, тим краща його плинність. Металевий порошок для 3D-друку вимагає сферичності понад 98%, щоб розсипання та подача порошку були легшими під час друку. Якість порошку сильно впливає на якість деталі, зокрема на її щільність та пористість. Дослідження показують, що занадто грубий або занадто дрібний порошок, або низька округлість частинок перешкоджають досягненню високої щільності [41].

Таким чином, контроль якості порошку є важливим етапом забезпечення якості 3D-друкованих металевих деталей. Висока ефективність використання матеріалів та можливість повторного використання неспеченого порошку роблять металевий 3D-друк економічно та екологічно доцільним, знижуючи витрати на сировину та мінімізуючи відходи.

В лазерному металевому АВ важливу роль грає стандартизація порошків. Існує ряд стандартів, які є критично важливими для забезпечення відтворюваності, надійності та якості металевих порошків, що, у свою чергу, сприяє ширшому промислому впровадженню адитивного виробництва [42]. ISO/ASTM 52907:2019 містить технічні специфікації для металевих порошків, включаючи документування, відбір проб, гранулометричний склад, хімічний склад, густину, морфологію, сипучість, забруднення, пакування та зберігання. ISO/ASTM 52909:2022 охоплює оцінку механічних властивостей готової частини, включаючи статичні/квазістатичні та динамічні випробування. Постійний розвиток міжнародних стандартів як для металевих порошків, так і для готових деталей, виготовлених за допомогою АВ, є важливим фактором для широкого промислового впровадження АВ. Це перетворює технологію зі спеціалізованого, часто кустарного процесу на надійний, відтворюваний та сертифікований метод виробництва.

6. Металеві матеріали, що застосовуються у лазерному 3D-друці

Лазерний 3D-друк дозволяє працювати з широким спектром металевих сплавів, кожен з яких має свої унікальні властивості та оптимальні сфери застосування.

6.1. Титанові сплави

Титанові сплави є одними з найбільш широко використовуваних матеріалів у 3D-друці завдяки їхнім винятковим властивостям. Вони міцні, як сталь, але вдвічі легші, що робить їх ідеальними для застосувань, де критично важливе співвідношення міцності до ваги. Крім того, титанові сплави демонструють високу термічну міцність, відмінну стійкість до корозії та низьких температур, а також є біосумісними. Найпоширенішим сплавом є Ti6Al4V, що складається з 88-90% титану, 5.5-6.75% алюмінію та 3.5-4.5% ванадію [43].

Завдяки цим властивостям, титанові сплави знаходять широке застосування в:

– Авіації та космосі: Для виготовлення легких та високоміцних компонентів, таких як конструктивні елементи планера, лопатки компресора, ротори, кільця для реактивних двигунів та космічних капсул. 3D-друковані титанові сплави мають чудові комплексні механічні властивості, що відповідають вимогам авіаційних двигунів, а їхні механічні властивості (міцність на розрив, межа текучості та подовження) вищі ніж у поковок.

– Медицині та стоматології: Титан є гіпоалергенним та біосумісним металом, що робить його ідеальним для хірургічних інструментів, медичних імплантатів (хребта, стегон, колін), індивідуальних протезів та стоматологічних конструкцій. Можливість 3D-друку дозволяє створювати індивідуальні та складні імплантати з пористими структурами, які сприяють вrostанню кістки, покращуючи інтеграцію імплантату та результати лікування.

– Автопорті: Для гальмівних супортів, кронштейнів, колісних дисків.

– Ювелірній промисловості: Для виготовлення гіпоалергенних прикрас.

Лазерний 3D-друк дозволяє створювати з титану непрямокутні об'єкти органічної форми та сітчасті структури, які неможливо виготовити жодним іншим процесом. Типові специфікації для друку титаном включають мінімальну товщину стінки 1 мм, мінімальні деталі 0.25 мм та точність $\pm 0.2\%$.

6.2. Алюмінієві сплави

Алюмінієві сплави є легкими та високоміцними матеріалами, що демонструють величезний потенціал у 3D-друці. Вони мають гарну хімічну стійкість, одну з кращих питому міцність, стійкість до високих температур, а також відмінну тепло- та електропровідність.

Поширені алюмінієві сплави для 3D-друку включають: AlSi10Mg, AlSi7Mg0.6, AlSi12,

Сплав AlSi10Mg є одним із найбільш поширених матеріалів для SLM. Його склад ідеально підходить для цього процесу завдяки вмісту кремнію, який забезпечує хорошу плинність розплаву, та магнію, який дозволяє досягти значного зміцнення матеріалу після термічної обробки. Це надає сплаву високу міцність і твердість при відносно малій вазі, що робить його незамінним у виробництві легких, але міцних компонентів для аерокосмічної та автомобільної галузей [44].

Сплав AlSi7Mg0.6 поєднує менший вміст кремнію з більшою кількістю магнію, що надає йому оптимальний баланс міцності та пластичності. Це робить його придатним для деталей, які повинні витримувати значні динамічні навантаження або потребують високої пластичності, наприклад, у деталях авіаційних конструкцій або компонентах шасі автомобілів. Після термічної обробки сплав AlSi7Mg0.6 демонструє високі механічні властивості.

Сплав AlSi12, завдяки вмісту кремнію, близькому до ефективного складу (12.6%), має найнижчу температуру плавлення та виняткову плинність. Ця характеристика є важливою, оскільки дозволяє виробляти деталі з дуже тонкою стінкою та складною геометрією. На відміну від AlSi10Mg і AlSi7Mg0.6, AlSi12 не може бути значно зміцнений термічною обробкою.

Застосування алюмінієвих сплавів у 3D-друці охоплює такі галузі:

– Авіацію та космос: Для створення легких та високоміцних компонентів, таких як деталі авіаційних двигунів, фюзеляж та секції крил, що дозволяє зменшити загальну вагу літака та підвищити ефективність використання палива.

– Автомобільну промисловість: Компоненти з алюмінієвих сплавів сприяють зменшенню ваги транспортних засобів, що призводить до покращення паливної ефективності та загальної продуктивності. Приклади включають конструкції кузова, компоненти двигуна та системи підвіски.

– Медичні пристрої: Для 3D-друку індивідуальних протезів та ортопедичних імплантатів.

Лазерний 3D-друк дозволяє створювати з алюмінію деталі з внутрішніми каналами та функціями, які неможливо виготовити іншим способом. Це є ключовим для розвитку легкої промисловості, де зниження ваги без втрати міцності є критично важливим. Крім того, 3D-друк алюмінієм часто вимагає нижчих виробничих витрат та менше енергії порівняно з литтям або механічною обробкою, що є значною економічною перевагою.

6.3. Сплав Scalmalloy

Scalmalloy – один із найперспективніших сплавів, створених спеціально для SLM технологій. Основу матеріалу становить алюміній з легуванням магнієм (4,2–5,1 %), скандієм (0,6–0,9 %) та цирконієм (0,2–0,5 %), що забезпечує унікальне поєднання високої міцності, пластичності й термостабільності. Скандій утворює дрібнодисперсні зміцнювальні фази Al_3Sc , які значно підвищують межу текучості й запобігають рекристалізації, а цирконій стабілізує ці фази, зберігаючи дрібнозернисту структуру навіть при підвищених температурах. Сплав має тимчасовий опір розриву понад 500 МПа, межу текучості близько 480–500 МПа, відносне подовження 10–15 % та густину приблизно 2,67 г/см³, що робить його одним із найлегших та найміцніших алюмінієвих матеріалів. На відміну від традиційних алюмінієвих сплавів, Scalmalloy по питомій міцності наближається до титанових сплавів, але при цьому значно легший. Для адитивного виробництва цей сплав особливо зручний завдяки високій стійкості порошку до повторного використання, відсутності гарячих тріщин, здатності формувати тонкостінні та решітчасті конструкції складної геометрії, а також сумісності зі стандартними процесами зварювання. Його застосування охоплює авіаційну та космічну техніку, автоспорт, робототехніку та інші галузі, де критично важливим є поєднання міцності та мінімальної маси виробів [45].

6.4. Нікелеві сплави

Нікель та його сплави, зокрема Inconel, є незамінними матеріалами для виготовлення деталей, які повинні витримувати екстремальні умови – високі температури та агресивні хімічні середовища. Сплав Inconel 718, наприклад, демонструє відмінну тривалу міцність при температурах до 700 °C і є важливим матеріалом для більшості компонентів авіаційних двигунів з робочою температурою нижче 650 °C. Здатність 3D-друку виробляти деталі з точністю до мікронів є важливою для забезпечення їх довговічності та ефективності в умовах високого тиску. Ці матеріали особливо популярні в хімічній промисловості, енергетиці та авіації.

Застосування нікелевих сплавів у 3D-друці є критично важливим для галузей, що працюють в екстремальних умовах, таких як турбінні лопатки або компоненти ядерних реакторів. Адитивне виробництво дозволяє створювати складні геометрії, оптимізовані для цих умов, що неможливо традиційними методами. Крім того, дослідження механічних властивостей та структури сплаву Inconel 718, отриманого методом 3D-друку, показують можливість скорочення кількості необхідних операцій для виготовлення деталей. Це вказує на потенціал значного підвищення ефективності виробництва та зниження витрат у високотехнологічних галузях [46, 47].

6.5. Нержавіючі сталі

Нержавіючі сталі (AISI 304L, AISI 316L, AISI 321) є відносно дешевими та економічними металевими матеріалами для 3D-друку, що володіють значними корозійними властивостями та високою міцністю [48]. Вони дозволяють швидко та ефективно виготовляти невеликі партії складних промислових деталей. AISI 316L є одним з найбільш використовуваних видів аустенітної нержавіючої сталі з низьким вмістом вуглецю, що запобігає утворенню карбідів та надає вищу стійкість до корозії.

Ця сталь широко використовується для морського застосування, в сольових середовищах та в харчовій промисловості [49].

Ключові властивості нержавіючої сталі 316L для 3D-друку включають високу міцність, стійкість до корозії, високу твердість та зносостійкість.¹ Типові технічні характеристики порошку 316L: розмір частинок 10–45 мкм, сферична форма, щільність >99.5%, міцність 510 ± 50 МПа, міцність на розрив 620 ± 60 МПа, подовження $40 \pm 15\%$, модуль Юнга 220 ± 50 ГПа, твердість 18 ± 3 HRC, середня шорсткість Ra 18 ± 5 мкм.

Застосування нержавіючої сталі 316L охоплює:

- Деталі двигунів, машин та механізмів.
- Деталі літаків та космічних апаратів.
- Компоненти для автомобілів та мотоспорту.
- Приладобудування та пристрої контролю.
- Прес-форми для лиття пластмас.
- Дизайнерські елементи.

Нержавіючі сталі пропонують відмінний баланс між вартістю, механічними властивостями та корозійною стійкістю, робить їх універсальним вибором для широкого спектра промислових застосувань, де не потрібні екстремальні характеристики титану чи Inconel. Здатність швидко та ефективно виготовляти невеликі партії складних промислових деталей з нержавіючої сталі робить її ідеальною для масової кастомізації та виробництва "на вимогу", що є ключовою тенденцією в сучасному виробництві [50].

6.6. Інші матеріали

Крім основних, у лазерному 3D-друці металів також застосовуються інші важливі матеріали, що розширюють функціональні можливості технології:

– Кобальт-хромові сплави: Ці сплави широко використовуються в стоматології (для зубів, каркасів) та медичних імплантатах (індивідуальні протези). Вони характеризуються високою твердістю, міцністю, відмінною біосумісністю та корозійною стійкістю [51].

– Мідні сплави: Відзначаються відмінною тепло- та електропровідністю, а також високою жорсткістю. Їх застосування включає мікротеплообмінники, електротехніку та інструментальні вставки, де висока провідність є критично важливою [52, 53].

– Інструментальні сталі (наприклад, мартенситна сталь, H13): Ці сплави мають високу міцність, твердість та пластичність (яку можна додатково підвищити термічною обробкою). Вони стійкі до деформації та здатні зберігати ріжучу кромку при високих температурах. Застосовуються для виготовлення інструментів (стрижнів та вставок для лиття під тиском), функціональних прототипів та прес-форм [54, 55].

– Алюміди (інтерметалічні сполуки, які утворюються між алюмінієм та іншим металом або напівметалом): Відзначаються високою міцністю і жорсткістю при температурах до 1000 °C, низькою густиною, високою стійкістю до окислення та корозії, високою температурою плавлення, що дозволяє використовувати їх в екстремальних умовах [56].

Також для специфічних застосувань використовуються такі матеріали, як вольфрам, тантал та титан-танталовий сплав. Розширення палітри металевих сплавів, придатних для друку, зумовлене потребою до високоспецифічних, екстремальних вимог.

Наявність широкого спектра металевих матеріалів для 3D-друку дозволяє не тільки замінювати традиційно виготовлені деталі, але й створювати нові продукти з унікальними функціональними властивостями. Гнучність в виборі матеріалів є важлива перевага лазерного 3D-друку металів, що розширює сферу застосування та створення продуктів з оптимізованими характеристиками для конкретних потреб.

7. Висновки

Лазерні 3D-технології є основою трансформації сучасного виробництва. Ці технології забезпечують високу швидкість, точність та гнучкість створення складних, високопродуктивних компонентів. На відміну від традиційних методів, вони усувають обмеження, пов'язані з дизайном, мінімізують матеріальні відходи та скорочують терміни виконання замовлень.

Сучасний розвиток галузі лазерних 3D-технологій характеризується такими основними тенденціями:

- Впровадження високопотужних лазерів (до 10 кВт), які підвищують швидкість обробки та розширюють спектр матеріалів, що обробляються, включаючи нікелеві, хромові та титанові сплави.

- Інтеграція штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання (МН) для створення самооптимізуючих систем, що автоматично коригують параметри процесів 3D-друку в реальному часі, мінімізуючи дефекти та підвищуючи якість обробки кінцевих компонентів.

- Розвиток гібридних систем, що поєднують АВ з традиційною механічною обробкою, дозволяючи виконувати кілька процесів одночасно.

Існує декілька основних технологій лазерного 3D-друку металів, кожна з яких має унікальні характеристики:

- Селективне лазерне плавлення (SLM) забезпечує високу щільність деталей (до 99,9%) та відмінні механічні властивості, що робить його ідеальним для особливо важливих застосувань.

- Пряме лазерне спікання металів (DMLS), хоч і надає виробам меншу щільність та вищу пористість порівняно з SLM, більш гнучке щодо матеріалів та дозволяє отримати деталі з меншими залишковими напруженнями.

- Пряме енергетичне осадження (DED), зокрема лазерна інженерія кінцевої форми (LENS), оптимальне для ремонту та виготовлення великогабаритних деталей, оскільки не обмежене об'ємом порошкового шару. Ця технологія також може бути в 10 разів швидшою та в 5 разів дешевшою за PBF для певних завдань.

Якість кінцевого продукту суттєво залежить від характеристик металевих порошків (чистота, сферичність, текучість) та ретельного калібрування параметрів лазера (потужність, швидкість сканування, діаметр плями). Взаємодія цих параметрів є складною і нелінійною, що вимагає використання ШІ, МН та розробки спеціальних "карт процесів" для досягнення оптимальних результатів.

Лазерні 3D-технології не лише інноваційні, а й екологічно вигідні, оскільки вони сприяють більш ефективному використанню ресурсів та зниженню матеріальних відходів, що відповідає концепції сталого розвитку. Подальша інтеграція технологій ШІ та гібридних систем обіцяє значно підвищити надійність, точність та економічну ефективність цього виробництва.

Лазерні 3D-технології металевих матеріалів не просто інструмент, а стратегічний напрямок, що визначає майбутнє виробництва. Їхній потенціал у створенні високопродуктивних, індивідуалізованих та екологічно чистих продуктів робить їх ключовим елементом четвертої промислової революції.

Список використаних джерел

1. Zhou, L., Miller, J., Vezza, J., Mayster, M., Raffay, M., Justice, Q., Al Tamimi, Z., Hansotte, G., Sunkara, L. D., Bernat, J. Additive Manufacturing: A Comprehensive Review // Sensors. 2024. Vol. 24, Issue 9. Article Number 2668. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24092668>.

2. Peyre, P. The Physics of Metal Additive Manufacturing Processes // Additive Manufacturing of Metal Alloys 1. 2022. P. 151–199. DOI: 10.1002/9781394163380.ch3
3. Yap, C. Y., Chua, C. K., Dong, Z. L., Liu, Z. H., Zhang, D. Q., Gu, Y. F. Review of selective laser melting: Materials and applications // Applied Physics Reviews. 2015. Vol. 2, Issue 4. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4935926>.
4. Gao, B., Zhao, H., Peng, L., Sun, Z. A Review of Research Progress in Selective Laser Melting (SLM) // Micromachines. 2023. Vol. 14. Article Number 57. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi14010057>.
5. Mangano, F., Chambrone, L., van Noort, R., Miller, C., Hatton, P., Mangano, C. Direct Metal Laser Sintering Titanium Dental Implants: A Review of the Current Literature // International Journal of Biomaterials. 2014. Vol. 2014. Article ID 461534. DOI: 10.1155/2014/461534.
6. Ladani, L. J. Applications of artificial intelligence and machine learning in metal additive manufacturing // Journal of Physics: Materials. 2021. Vol. 4, Issue 4. Article Number 042009. DOI: [10.1088/2515-7639/ac2791](https://doi.org/10.1088/2515-7639/ac2791)
7. Ukwaththa, J.; Herath, S.; Meddage, D.P.P. A review of machine learning (ML) and explainable artificial intelligence (XAI) methods in additive manufacturing (3D printing). Mater. Today Commun. 2024, 41, 110294. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.110294>
8. Sahu, A.K.; Malhotra, J.; Jha, S. Laser-Based Hybrid Micromachining Processes: A Review. Opt. Laser Technol. 2022, 146, 107554. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107554>
9. Lizunov S. A., Bulgakov A. V., Zhidkov I. S., Kirichenko N. A., Lyalin A. G., Rethfeld B. Melting of gold by ultrashort laser pulses: advanced two-temperature modeling and comparison with surface damage experiments // Applied Physics A. – 2022. – Vol. 128. – Article number: 602. – DOI: 10.1007/s00339-022-05733-4.
10. Khalid M., Peng Q. Sustainability and Environmental Impact of Additive Manufacturing: A Literature Review // Computer-Aided Design and Applications, 2021, Vol. 18(6), pp. 1210–1232. – DOI: 10.14733/cadaps.2021.1210-1232
11. Humnabad, P. S., Tarun, R., Das, I. An Overview Of Direct Metal Laser Sintering (DMLS) Technology For Metal 3D Printing // Journal of Mines Metals and Fuels. 2022. Vol. 70, Issue 3A. P. 127. DOI: 10.18311/jmmf/2022/30681.
12. Imran, M. M., Idris, A. C., De Silva, L. C., Kim, Y.-B., Abas, P. E. Advancements in 3D Printing: Directed Energy Deposition Techniques, Defect Analysis, and Quality Monitoring // Technologies. 2024. Vol. 12, Issue 6. Article Number 86. DOI: <https://doi.org/10.3390/technologies12060086>.
13. Feenstra, D., Banerjee, R., Fraser, H. L., Huang, A. Critical review of the state of the art in multi-material fabrication via directed energy deposition // Current Opinion in Solid State and Materials Science. 2021. Vol. 25, Issue 4. P. 100924. DOI: 10.1016/j.cossms.2021.100924.
14. Gu Yijia, Yuan Jiandong, Chen Lianyi. Switching of controlling mechanisms during the rapid solidification of a melt pool in additive manufacturing // Phys. Rev. Materials. – 2023. – Vol. 7, No. 10. – DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.7.103401>
15. Dela Cruz M. S. B., Fukuda T., Inamura T., Hosoda H. Microstructure evolution in laser powder bed fusion-built Fe–Mn–Si shape memory alloy // Microstructures. – 2023. – Vol. 3. – Article № 2023012. – DOI: <https://doi.org/10.20517/microstructures.2022.33>
16. Webster S., Jeong J., Zha R., Liao S., Castro A., Jacquemetton L., Beckett D., Ehmann K. & Cao J. In situ, parallel monitoring of relative temperature, material emission, and laser reflection in powder-blown directed energy deposition // JOM. – 2024. – Vol. 76, pp. 6615–6638. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-024-06837-3>

-
17. Lashkary R., Bagheri Z. A comprehensive review of In-Situ monitoring and control techniques in directed energy deposition process // *J. Manuf. Process.* 2023. Vol. 98. P. 134–157. DOI: [10.1016/j.jmapro.2023.05.021](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.05.021).
18. Xiao B, Ye Z. Selective laser sintering: Processing, materials, challenges, applications, and emerging trends. *J Adv Therm Sci Res.* 2024; 11: 65-99. DOI: <https://doi.org/10.15377/2409-5826.2024.11.4>
19. Prashanth G.,K. Selective Laser Melting: Materials and Applications. *J. Manuf. Mater. Process.* 2020, 4(1), 13; <https://doi.org/10.3390/jmmp4010013>
20. Zhang J, Song B, Wei Q, Bourell D, Shi Y (2019) A review of selective laser melting of aluminium alloys: processing, microstructure, property and developing trends. *J Mater Sci Technol* 35:270–284 <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.09.004>
22. Humnabad, P.S.; Tarun, R.; Das, I. An Overview Of Direct Metal Laser Sintering for Metal 3D Printing // *J. Mines Met. Fuels.* 2022. Vol. 70, No. 3A. P. 127–133. DOI: [10.18311/jmmf/2022/30681](https://doi.org/10.18311/jmmf/2022/30681).
22. Kushwaha A.K., Rahman M.H., Slater E., Patel R., Evangelista C., Austin E., Tompkins E., McCarroll A., Rajak D.K., Menezes P.L. Powder bed fusion–based additive manufacturing: SLS, SLM, SHS, and DMLS // *Tribology of Additively Manufactured Materials* / ed. by P. Kumar, M. Misra, P.L. Menezes. – Amsterdam : Elsevier, 2022. – P. 1–37. – (Elsevier Series on Tribology and Surface Engineering). DOI: [10.1016/B978-0-12-821328-5.00001-9](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821328-5.00001-9)
23. Imran, M. M., Idris, A. C., De Silva, L. C., Kim, Y., & Abas, P. E. Advancements in 3D Printing: Directed Energy Deposition Techniques, Defect Analysis, and Quality Monitoring. *Technologies.* 2024. Vol. 12, iss. 6, art. no. 86. DOI: [10.3390/technologies12060086](https://doi.org/10.3390/technologies12060086).
24. Ghasempour-Mouziraji, M., Afonso, D., Nemati, B., & de Sousa, R. A. Directed Energy Deposition: A Scientometric Study and Its Practical Implications. *Metrics.* 2025. Vol. 2, iss. 3, art. no. 14. DOI: [10.3390/metrics2030014](https://doi.org/10.3390/metrics2030014).
25. Izadi M., Farzaneh A., Mohammed M., Gibson I., Rolfe B. A review of laser engineered net shaping (LENS) build and process parameters of metallic parts // *R. Prototyp. J.* 2020. Vol. 26, № 6. P. 1059–1078. DOI: [10.1108/RPJ-04-2018-0088](https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2018-0088).
26. Webster, S. In-situ, Parallel Monitoring of Relative Temperature, Material Emission, and Laser Reflection in Powder-Blown Directed Energy Deposition / S. Webster, C. Stott, J. Johnson // *JOM.* – 2024. DOI: [10.1007/s11837-024-06837-3](https://doi.org/10.1007/s11837-024-06837-3).
27. Kushwaha, A.K. Powder bed fusion–based additive manufacturing: SLS, SLM, SHS, and DMLS / A.K. Kushwaha, M. El-Desouky, A. Verma // *Tribology of Additively Manufactured Materials.* – 2022. – P. 1–37. DOI: [10.1016/B978-0-12-821328-5.00001-9](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821328-5.00001-9)
28. Hajnys J., Pagáč M., Kotera O., Petru J., Scholz S. Influence of basic process parameters on mechanical and internal properties of 316L steel in SLM process for Renishaw AM400. *MM Sci. J.* 2019. doi:10.17973/MMSJ.2019_03_2018127.
29. Adjamskyi, S. V., Kononenko, H. A., & Podolskyi, R. V. (2021). Improving the efficiency of the SLM-process by adjusting the focal spot diameter of the laser beam. *Paton Weld. J.*, (5), 18–23. <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.05.03>
30. Vaudreuil, S., Bencaid, S.-E., Vanaei, H. R., & El Magri, A. (2022). Effects of Power and Laser Speed on the Mechanical Properties of AlSi7Mg0.6 Manufactured by Laser Powder Bed Fusion. *Materials*, 15(23), 8640. <https://doi.org/10.3390/ma15238640>
31. Maamoun, A. H., Tarlochan, F., Olabi, A. G., & Al-Marzooqi, A. H. (2018). The Effect of Selective Laser Melting Process Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of Al6061 and AlSi10Mg Alloys. *Materials*, 12(1), 12. <https://doi.org/10.3390/ma12010012>

32. Khaimovich, A., Balyakin, A., Oleynik, M., Meshkov, A., Smelov, V. Optimization of process parameters for powder bed fusion additive manufacturing using a linear programming method: a conceptual framework. *Metals*, 2022, T. 12, N 11, с. 1976. DOI: 10.3390/met12111976.
33. Lee, H., Lim, C. H. J., Low, M. J., Tham, N., Murukeshan, V. M., Kim, Y. J. Lasers in additive manufacturing: A review. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.-Green Technol.*, 2017, 4(3): 307-322. DOI: 10.1007/s40684-017-0037-7.
34. Chadha, U. [et al.]. Directed Energy Deposition via Artificial Intelligence-Enabled Approaches. *Complexity*. 2022. Vol. 2022. P. 1-32. DOI: 10.1155/2022/2767371.
35. Gribova, V. [et al.]. A Multi-Model Ontological System for Intelligent Assistance in Laser Additive Processes. *Appl. Sci.* 2025. Vol. 15, № 8. P. 4396. DOI: 10.3390/app15084396.
36. Ramli, S. M. Q. M., Fadzil, N. A., Ghazali, H., Viklund, P., Ali, W. F. F. W. Essential characterization of metal powder for additive manufacturing // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1173, Issue 1. Article Number 012062. DOI: 10.1088/1757-899X/1173/1/012062.
37. Jiang H., Ren Y., Tian Y., Caballero A. O. Recent Advances in Metal Powder-Based Additive Manufacturing. *Mater.* 2023;16(11):3975. <https://doi.org/10.3390/ma16113975>
38. Yarovytsyn, O.V., Mykytchyk, A.V., Oliynyk, Y.V. New Process Requirements for Additive Powders for Microplasma Powder Deposition. *Powder Metall Met Ceram* 62, 276–292 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11106-023-00392-3>
39. Vock, S., Klöden, B., Kirchner, A. et al. Powders for powder bed fusion: a review. *Prog Addit Manuf* 4, 383–397 (2019). <https://doi.org/10.1007/s40964-019-00078-6>
40. Weaver JS, Whiting J, Tondare V, Beauchamp C, Peltz M, Tarr J, Phan TQ, Donmez MA. The effects of particle size distribution on the rheological properties of the powder and the mechanical properties of additively manufactured 17-4 PH stainless steel. *Addit Manuf.* 2021;39:10.1016/j.addma.2021.101851. doi: 10.1016/j.addma.2021.101851.
41. Garboczi E.J., Hrabe N. Particle shape and size analysis for metal powders used for additive manufacturing: technique description and application to two gas-atomized and plasma-atomized Ti-64 powders» – *Additive Manufacturing*, 31 (2020) 100965. DOI: 10.1016/j.addma.2019.100965.
42. Slotwinski, J. A., Garboczi, E. J., Stutzman, P. E., Ferraris, C. F., Watson, S. S., Peltz, M. A. Metal Powders for Additive Manufacturing: Characterization and Standards // *J Res Natl Inst Stand Technol.* 2014. Vol. 119. P. 460–493. DOI: 10.6028/jres.119.018.
43. Tamayo, J. A., Riascos, M., Vargas, C. A., Baena, L. M. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy via electron beam melting for the development of implants for the biomedical industry // *Heliyon*. 2021. Vol. 7, Issue 5. Article Number e06892. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e06892.
44. Gadlegaonkar, N., Bansod, P. J., Lakshmikanthan, A., Bhole, K. A Review on Additively Manufactured AlSi10Mg Alloy: Mechanical, Tribological, and Microstructure Properties // *Journal of Mines Metals and Fuels*. 2025. Vol. 73, Issue 1. P. 87–101. DOI: 10.18311/jmmf/2025/46621.
45. Mehta B., Svanberg A., Nyborg L. Laser Powder Bed Fusion of an Al-Mg-Sc-Zr Alloy: Manufacturing, Peak Hardening Response and Thermal Stability at Peak Hardness // *Metals*. – 2022. – Vol. 12, № 1. – P. 57. – DOI: [10.3390/met12010057](https://doi.org/10.3390/met12010057)
46. Daňa, M., Zetková, I., Mach, J. Mechanical Properties of Inconel Alloy 718 Produced by 3D Printing using DMLS // *MANUFACTURING TECHNOLOGY*. 2018. Vol. 18, Issue 4. P. 559–562. DOI: 10.21062/ujep/137.2018/a/1213-2489/MT/18/4/559.

47. Johnson, J., Kujawski, D. Additively Manufactured Inconel 718 Low-Cycle Fatigue Performance // *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, Issue 3. Article Number 1653. DOI: 10.3390/app15031653.
48. D'Andrea, D. Additive Manufacturing of AISI 316L Stainless Steel: A Review // *Metals*. 2023. Vol. 13, Issue 8. Article Number 1370. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13081370>.
49. Carminati, M., Quarto, M., D'Urso, G., Giardini, C., Maccarini, G. Mechanical Characterization of AISI 316L Samples Printed Using Material Extrusion // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, Issue 3. Article Number 1433. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12031433>.
50. Sumanariu, C. A., Amza, C. G., Baciuc, F., Vasile, M. I., Nicoara, A. I. Comparative Analysis of Mechanical Properties: Conventional vs. Additive Manufacturing for Stainless Steel 316L // *Materials*. 2024. Vol. 17, Issue 19. Article Number 4808. DOI: 10.3390/ma17194808.
51. Edelmann, A., Riedel, L., Hellmann, R. Realization of a Dental Framework by 3D Printing in Material Cobalt-Chromium with Superior Precision and Fitting Accuracy // *Materials (Basel)*. 2020. Vol. 13, Issue 23. P. 5390. DOI: 10.3390/ma13235390.
52. Von Lintel, H., Evsiutkina, E., Haase, C., Krupp, U., Jahns, K. Copper alloys for additive manufacturing: Laser powder bed fusion of CuCr1Zr by using a green qcw-laser // *European Journal of Materials*. 2023. Vol. 3, Issue 1. Article Number 2115945. DOI: 10.1080/26889277.2022.2115945.
53. Morshed-Behbahani, K., Aliyu, A., Bishop, D. P., Nasiri, A. M. Additive Manufacturing of Copper-based Alloys for High-temperature Aerospace Applications: A Review // *Materials Today Communications*. 2024. Vol. 38. P. 108395. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.108395.
54. Naimi, S., Hosseini, M. Tool Steels in Die-Casting Utilization and Increased Mold Life // *Advances in Mechanical Engineering*. 2015. Vol. 7, Issue 1. DOI: 10.1155/2014/286071.
55. Yuan, M., Karamchedu, S., Fan, Y., Liu, L., Nyborg, L., Cao, Y. A Case Study for a Worn Tool Steel in the Hot Stamping Process // *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. Vol. 22. P. 1065–1075. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.12.006.
56. Illarionov A. G., Stepanov S. I., Naschetnikova I. A., Popov A. A., Soundappan P., Thulasi Raman K. H., Suwas S. A Review—Additive Manufacturing of Intermetallic Alloys Based on Orthorhombic Titanium Aluminide Ti₂AlNb // *Materials*. – 2023. – Vol. 16, № 3. – P. 991. – DOI: [10.3390/ma16030991](https://doi.org/10.3390/ma16030991)

Никифоров А. О.,
Антощенко Р. В.,
Галич І. В.,
Кісь В. М.,
Марченко М. В.,
Кісь-Коркіщенко Л. В.
Державний
біотехнологічний
університет,
м. Харків, Україна
E-mail:
toninikiforov89@gmail.com

ПОКАЗНИК ЯКОСТІ
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ
ЛОГІСТИКИ АГРОПРОМИСЛОВОГО
КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ПОРІВНЯЛЬНОЇ
ОЦІНКИ АЛЬТЕРНАТИВ
ІННОВАЦІЙНОГО РОЗВИТКУ

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-27-47>

УДК 620.9:658.7:631:005.6

Никифоров А.О., Антощенко Р.В., Галич І. В., Кісь В.М., Марченко М.В., Кісь-Коркіщенко Л.В. **Показник якості енергоефективності системи логістики агропромислового комплексу для порівняльної оцінки альтернатив інноваційного розвитку**

Анотація. Розробка методичного апарату щодо оцінки якості та кількісного порівняння альтернативних інновацій у розвиток агропромислового комплексу (АПК) України, особливо системи логістики, є актуальним науковим завданням. Побудова системи ключових показників ефективності в даній області, їх впровадження у систему стандартів АПК дасть чіткі орієнтири для підприємств та дозволить здійснювати керування розвитку сільськогосподарської галузі з боку держави. В статті, на базі сутності L^8T^4 таблиці Бартіні, запропонований показник транспортної послуги для системи навантаження (розвантаження) суден-контейнеровозів у порту, а також – виведений коефіцієнт енергетичної ефективності даної логістичної операції. Наведений приклад чисельного розрахунку для конкретного морського порту.

Ключові слова: таблиця Бартіні, просторово-часові величини, розмірність, транспортна послуга, перенесення енергії, енергоефективність.

Nykyforov A.O., Antoshchenkov R.V., Halych I.V., Kis V.M. Marchenko M.V., Kis-Korkishchenko L.V. **Quality indicator of energy efficiency of the logistics system of the agro-industrial complex for comparative assessment of innovative development alternatives**

Abstract. The development of a methodological apparatus for the assessment and quantitative comparison of alternative innovations in the development of the agro-industrial complex (AIC) of Ukraine, especially the logistics system, is an urgent scientific task. The construction of a system of key performance indicators in this area, their implementation in the system of AIC standards will provide clear guidelines for enterprises and will allow the state to manage the development of the agricultural sector. In the article, based on the essence of the L^8T^4 Bartini table, a transport service indicator is proposed for the system of loading (unloading) of container ships in the port, and the energy efficiency coefficient of this logistics operation is derived. An example of a numerical calculation for a specific seaport is given.

Key words: Bartini table, space-time quantities, dimension, transport service, energy transfer, energy efficiency.

Актуальність проблеми

Агропромисловий комплекс (АПК) України є однією з ключових галузей національної економіки, яка має значний потенціал для забезпечення як внутрішнього попиту, так і експорту на світові ринки. Одним із найбільш ефективних інструментів для забезпечення стійкого розвитку АПК є впровадження інноваційних стратегій, які здатні підвищити ефективність виробничих процесів, оптимізувати використання ресурсів та підвищити якість продукції [1], [2]. Проте, незважаючи на наявність широких можливостей для впровадження інновацій, питання щодо оцінки їхньої ефективності залишається малодослідженим і недостатньо впровадженим на практиці. Багато підприємств АПК стикаються з труднощами у визначенні реальної віддачі від інноваційних впроваджень, що обмежує їхнє бажання інвестувати в новітні технології та процеси. Невизначеність щодо результативності інноваційних заходів ускладнює планування розвитку та прийняття стратегічних рішень. Окрім цього, глобальні ринки вимагають від аграрних підприємств України адаптації до нових умов, зокрема до посилення екологічних стандартів, цифровізації та автоматизації виробничих процесів. В таких умовах постає необхідність не лише у впровадженні інновацій, але й у розробці чітких моделей та стандартів аналізу їхньої ефективності.

В багатьом створення таких стандартів полягає у розробці інформаційного переліку ключових параметрів ефективності (KPI: Key Performance Indicators) [3]. Система KPI має характеризувати стан справ підприємства та сприяти прийняттю ефективних рішень щодо її розвитку шляхом порівняння відповідних ключових показників: із середньостатистичними показниками в галузі; з абсолютними стандартами; з власними результатами динамічного розвитку (дані за звітний період).

В [4] розкривається сутність і особливості метрик KPI щодо державної підтримки малого підприємництва в аграрному секторі економіки в сучасних умовах. Обґрунтовано, що комплекс показників досягнення цілей державної підтримки відображається в матриці показників.

В [5] - [9] вказується на те, що найбільш вагомим чинником при інноваціях у розвиток АПК, є напрямки розвитку та трансформування логістики, зокрема логістики виробництва та транспортування зернових та олійних культур.

В [10] пропонується підхід з автоматизації процесів управління транспортування пшениці на підставі розв'язання оптимізаційних дворівневих транспортних задач, де використовуються розроблені логістичні метрики KPI. Але запропонована система метрик не є достатньо інформаційною для логістичної системи АПК України. Запропоновані показники охоплюють лише процеси доставки до морських портів та проміжної перевалки пшениці.

Найбільш інформаційним чинником, що охоплює більшість аспектів будь якого процесу, є його характеристика з боку витрат енергії, потужності, створеної роботи [11]. Оцінка енергоефективності процесів перевезення і транспортно-логістичного обслуговування – це актуальна наукова задача. Її актуальність зростає із зростанням швидкостей переміщення, масштабів перевезень, зростаючим охопленням зон обслуговування, освоєнням нових типів транспортних засобів, енергоустановок та видів палива.

На цей час, у світлі розвитку тривимірної складської та розподільчої логістики (висотні склади-термінали, океанські контейнеровози, обслуговування хмарочосів тощо) необхідний розвиток оптимізаційного моделювання тривимірних мереж та полів.

Перелічені аспекти вимагають розвитку методів оцінки енергоефективності технічних систем з погляду вимог майбутнього технологічного укладу. Нові методи оцінки енергоефективності можуть бути побудовані на підставі сутностей таблиці Бартіні або – системи просторово-часових величин, [11]: $L^m T^r$, де L – міра відстані (лінійного розміру); T – міра часу, m , r – значення показників ступеня. Являючись

таблицею розмірності інваріант законів природи (соціальних та економічних у тому числі), LT-таблиця надає можливість отримати універсальні та інформаційні показники, що забезпечуватиме багатоаспектну порівняльну оцінку інновацій у розвиток логістики.

Формулювання мети дослідження

Мета роботи – аналіз сутностей LT-таблиці, що характеризують закон збереження потужності, розробка показника енергетичної ефективності системи логістики АПК з метою порівняльної оцінки інновацій.

Результати досліджень

1 Система просторово-часових величин Бартіні та її використання при розробленні нових концептуальних засад чисельної оцінки процесів

LT-таблиця являє собою безліч вертикальних стовпців, що подається як ряд цілісних ступенів довжини, і безліч горизонтальних рядків – цілісних ступенів часу (табл. 1). Перетинання кожного стовбця і кожного рядку автоматично дає розмірність той чи іншої величини. Базою або опорною точкою таблиці можна вважати поле, де перетинається стовбець L^0 і рядок T^0 . Це сукупність всіх безрозмірних фізичних констант (наприклад – кут, який виражений у радіанах).

Ідея методу переведення вимірювань фізичних величин у просторово-часової метриці належить Дж. Максвеллу. В 1873 році, в своєму трактаті «Електрика і магнетизм», він встановив, що розмірність маси – є $\text{м}^3/\text{с}^2$, а також, що для створення системи вимірювань достатньо двох основних одиниць вимірювання: L – довжини, та T – часу (метр, секунда).

LT-розмірність для маси може бути виведеною з виразу для вимірювання маси Сонця на підставі третього закону Кеплера [12]:

$$\frac{4\pi^2 R^3}{\gamma T^2} = M_H, \quad (1)$$

де $R, [\text{м}]$ - відстань між центром планети та центром Сонця;
 $T, [\text{с}]$ - період обертання планети навколо Сонця;
 $\gamma = 6,67430(15) \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{с}^2 \cdot \text{кг}}$ - гравітаційна постійна Кевендіша [13];
 $M_H, [\text{кг}]$ - маса Сонця.

Виходячи з (1)

$$M_H \propto \frac{R_1^3}{T_1^2} = \frac{R_2^3}{T_2^2} = \dots = \frac{R_i^3}{T_i^2} = \text{const}, \quad (2)$$

де R_i, T_i - радіус орбіти і період обертання для i -ої планети.

З цього, можна стверджувати, що величина вимірювання маси, що виражена в кілограмах, є пропорційною її величині, що виражена у $\text{м}^3/\text{с}^2$.

Якщо, повертаючись до табл. 1, рухатися від її базового поля по горизонталі вправо, ми отримаємо всі чисто геометричні величини: довжину; площу; об'єм; переміщення об'єму вздовж прямої; переміщення об'єму на анізотропній площині; переміщення об'єму у анізотропному просторі. Переміщення ліворуч дає розподіл відповідних безрозмірних величин на одиницю довжини, площі та об'єму. Найпростіший приклад $L^{-1}T^0$: змінення куту повороту на одиницю довжини – кривизна.

Більш складне з'ясувати зміст величин у полях таблиці, якщо рухатися вертикально, вздовж будь-якого стовбця. Для стовбця L^0 , рухаючись вгору від базового поля, спочатку отримаємо частоту – змінення безрозмірної величини за одиницю часу.

Наприклад, це може бути кутова швидкість: змінення за часом кута повороту, який виражений у радіанах. Наступне поле – зміна змінення безрозмірної величини за одиницю часу. Для руху обертання це є кутове прискорення. Ще далі – змінення кутового прискорення. Переміщення вниз від опорного поля дає «часову довжину» - час, протягом якого відбувається то чи інше змінення безрозмірної величини. Для коливального або обертального руху це є період.

Таблиця 1

Система просторово-часових величин Бартіні

T ^r	L ^m									
	L ⁻³	L ⁻²	L ⁻¹	L ⁰	L ¹	L ²	L ³	L ⁴	L ⁵	L ⁶
T ⁻⁶							L ³ ·T ⁻⁶	L ⁴ ·T ⁻⁶	Змінення потужності	Швидк. передачі потужн.
T ⁻⁵						Змінення тиску	Поверхностна потужн.	Швидк. змінення сили	Потужність	Швидк. передачі енергії
T ⁻⁴					Змінення щільн. току	Тиск	Кутове прискор. маси	Сила	Момент сили. Енергія	Швидк. передачі дії
T ⁻³				Змінення кутового приск.	Щільн. току	Напруж. ел.-маг. поля. Градієнт	Струм. Масовий розхід	Швидк. переміщ. заряду. Імпульс	Момент кільк. руху. Дія	Момент дії
T ⁻²			Змінення об'ємн. щільн.	Масова щільн. Кут. приск.	Прискорення	Різн. потенц.	Маса. Кільк. електрич-ва	Магнітн. момент	Момент інерції	
T ⁻¹		L ⁻² ·T ⁻¹	L ⁻¹ ·T ⁻¹	Частота	Швидкість	Обільність 2-мірна	Розхід об'ємний	Швидк. переміщ. об'єму		
T ⁰	L ⁻³ ·T ⁰	L ⁻² ·T ⁰	Змінення провідності	Безрозм. константи	Довжина Ємність Самоіндукц.	Поверхня	Об'єм просторовий			
T ¹	L ⁻³ ·T ¹	Змінення магн. проникненості	Провідність	Період	Тривалість відстані	L ² ·T ¹				
T ²	L ⁻³ ·T ²	Магн. проникненість	L ⁻¹ ·T ²	Поверхня часу	L ¹ ·T ²					
T ³	L ⁻³ ·T ³	L ⁻² ·T ³	L ⁻¹ ·T ³	Об'єм часу						

Таким чином, суть змін, що відбуваються при переміщенні у LT-таблиці наступне: якщо рухатися по вертикалі вгору – це еквівалентно зміненню величини на одиницю часу; якщо рухатися по горизонталі вправо – переносу величини на одиницю довжини. Переміщення по діагоналі вправо і вгору еквівалентно множенню вихідної величини на лінійну швидкість.

Поля LT-таблиці характеризують відповідні відомі та ще невідомі об'єктивні закони руху матерії, де просторово-часова розмірність, яка є у даному полі таблиці, є розмірністю інваріанти відповідного закону. Отже поле L²T⁻⁴ характеризує закон Гука або сталість (інваріант) модуля пружності. Поле L¹T⁻² – закон коливального руху маятника або сталість прискорення вільного падіння. L³T⁻² – перший закон Кеплера або сталість маси в планетарному русі.

Найбільш цікавими є поля LT-таблиці, що складають діагональ, яка проходить через базове поле L⁰T⁰ та розповсюджується зліва направо вгору. Ці поля характеризують закони збереження. Так, поле L⁵T⁻⁵ представляє закон збереження

енергії або сталості потужності при існуванні сталого поля. Поле L^6T^{-6} – закон збереження мобільності або сталості швидкості перенесення потужності [11].

Поле L^6T^{-6} , на відміну від полів з меншими ступенями ЛТ-параметрів, характеризує вже не тільки фізичні закони, але й процеси в економічних системах. Це можна проілюструвати на прикладі процесу застосування екскаватору. Його функціонування під час роботи характеризується деякою потужністю. Однак, ця потужність може бути застосованою лише у випадку доставки екскаватора до місця виконання робіт. Для його доставки потрібна інша потужність – на транспортування залізничною або автомобільною платформою. Мобільність наявного парку екскаваторів є постійна величина. З цього, при плануванні робіт терміни мають визначитися таким чином, щоб потрібна мобільність не перебільшувала наявну мобільність.

Використовуючи ЛТ-таблицю, можна будувати комплексні показники ефективності для різноманітних систем. Такі показники, будучи створеними на підставі розмірності, що враховує об'єктивні закони функціонування, надаватиме більш інформаційну та повну порівняльну оцінку альтернатив.

Наприклад, при оцінці ефективності транспортних систем широко використовується показник, що обчислюється як добуток маси вантажів на відстань їх перевезення. Цей показник вимірюється у тонно-кілометрах. Якщо подавати цей показник у ЛТ-метриці, то його розмірність буде:

$$M \cdot R: (L^3T^{-2}) \cdot L = L^4T^{-2}, \quad (3)$$

де M - маса вантажів, що перевозяться;
 R - відстань, на яку перевозяться вантажі.

З показника (3) виводиться продуктивність транспорту за встановлений період часу:

$$\frac{M \cdot R}{\Delta t} = M \cdot V: \frac{(L^3T^{-2}) \cdot L}{T} = L^4T^{-3}, \quad (4)$$

де Δt - період часу, за якої оцінюється продуктивність транспорту;
 V - швидкість транспортування.

Як видно з (4), тут неявно вважається, що якщо збільшити масу вантажу у 2 рази, то швидкість транспортного засобу має зменшитися також у 2 рази при той самій потужності. В дійсності цього не відбувається – швидкість при постійній потужності зменшується всього у $2^{1/3}$ або у 1,26 разів. Причина виникнення такої помилки – некоректність вибору показника для оцінки транспортних послуг.

Змінемо концепцію транспортної послуги від транспортування на визначену відстань маси вантажу (тонно-кілометри), на концепцію перенесення енергії, оскільки будь який вантаж у економічній системі більш інформаційно вимірюється не його фізичною масою, а кількістю енергії, що витрачається на його переміщення. Тоді, замість (3), слід записати:

$$E \cdot R \propto M \cdot V^2 \cdot R: \frac{(L^3T^{-2}) \cdot L^2}{T^2} \cdot L = L^6T^{-4}, [\text{т} \cdot \text{км} \cdot (\text{км/г})^2], \quad (5)$$

де E - енергія (кількість роботи), яку необхідно витратити на транспортування вантажу на одиницю відстані.

Показник (5), який отримав назву – «тран», дозволяє оцінювати транспортні послуги не тільки за обсягом вантажів та відстанню їх транспортування, але ще за швидкістю доставки. Тобто оплата праці, наприклад, в залізничному транспорті, спираючись на тонно-кілометри не враховує швидкості (своєчасності) доставки. Але

застосовуючи трани, ми приходимо до системи стимулювання, яка вимагає точного виконання графіку руху поїздів.

Наведені міркування стосуються лише процесів, що описують рух матеріальних точок, що мають масу. Якщо ввести у розгляд об'єкти, що враховують уявлення про гравітаційне поле, динаміку твердих, рідких та газоподібних тіл, електромагнітні, світлові і теплові процеси, можна побудувати більш інформативні і складні показники оцінки якості функціонування АПК, взагалі, та його транспортної системи, зокрема.

2 Використання сутності L^8T^4 таблиці Бартіні для оцінки енергоефективності транспортно-складського обслуговування 3D просторових об'єктів

Показник з оцінки транспортних послуг (5) базується на сутності L^6T^4 , яка передбачає лінійну (одномірну або мережну) модель транспортування. Однак, у світі розвитку тримірної складської інфраструктури та розподільної логістики (висотні склади-термінали, океанські контейнеровози, функціонування логістичних систем у хмарочосах тощо), необхідно розвивати оптимізаційне моделювання 3D просторових об'єктів в системах логістики.

Це потребує розвитку методів оцінки енергоефективності технічних систем з точки зору майбутнього технічного укладу. Сутність L^6T^4 , $[\text{кг}\cdot\text{м}\cdot(\text{м}/\text{с})^2]$ дозволяє здійснювати порівняльну оцінку інновацій в систему логістики при використанні її лінійної або мережевої моделі (транспортування по ребрам мережі).

При спробі оцінки інноваційних альтернатив, де розглядається ареальний (2D) або об'ємний (3D) характер розповсюдження продукції (наслідків виробництва) та (або) матеріальних і людських ресурсів, необхідно застосовувати показники з розмірністю: $[\text{кг}\cdot\text{м}^2\cdot(\text{м}/\text{с})^2]$ (L^7T^4) або $[\text{кг}\cdot\text{м}^3\cdot(\text{м}/\text{с})^2]$ (L^8T^4), відповідно.

Прикладами з 2D-об'єктами (процесами) можуть служити: процес розповсюдження відпрацьованих газів по території населеного пункту; обслуговування приміським транспортом маятникової міграції населення в агломерації; внесення посівів та добрив на сільськогосподарські поля. 3D-об'єкти присутні при: розповсюдженні відпрацьованих газів у об'ємі повітря над містом; відсипці вугілля у відкритих терміналах; розподілення робітників у робочих приміщеннях хмарочосів; завантаження простору вантажного відсіку вантажного судна; завантаження простору судна-контейнеровозу.

Розглянемо приклад оціночного розрахунку енергоефективності транспортної послуги по заповненню об'єму океанського контейнеровоза портовими кранами.

Сучасне судно-контейнеровоз завантажується у порту після швартування його до причалу і підключення до портової системи електроживлення. Повний процес завантаження містить: доставлення контейнерів з автомобільного (залізничного) фронту, з внутрішніх і тилових контейнерних складів (майданчиків); підвезення контейнерів під крани-контейнери; безпосереднє завантаження кранами відсіків трюму і палуби; завантаження паливом, водою та іншими засобами. Відповідні енергозатрати забезпечуються портом і вони фіксуються. Наприклад, порт Лос-Анджелеса з річною продуктивністю 10^6 TEU (Twenty-foot Equivalent Unit: умовна контейнерна одиниця у вигляді двадцяти-футового морського контейнеру) витрачає 20 000 МВт·г електричної енергії [14]. З цього об'єму енерговитрат на роботу причальних кранів-контейнерів витрачається 26% енергії.

Розрахунковий приклад буде охоплювати лише процес безпосереднього завантаження судна-контейнеровоза контейнерами групою кранів-контейнерів. За результатами розрахунку буде оцінено енергоефективність групи кранів як єдиного пристрою, що здійснює роботу щодо заповнення об'єму вантажного простору судна-

контейнеровоза. Для прикладу в якості судна-контейнеровозу розглянемо контейнеровоз класу Triple-E – OOCL Hong Kong. Контейнерна ємність судна складає 21 413 TEU. Звідси кубатура вантажомісткості даного контейнеровоза буде:

$$W = N_{\text{TEU}} \cdot U1_{\text{TEU}} = 21\,413 \text{ TEU} \cdot 39 \frac{\text{м}^3}{\text{TEU}} = 835\,000 \text{ м}^3, \quad (6)$$

де N_{TEU} - контейнерна ємність судна, виміряна у двадцяти-футових морських контейнерах;

$U1_{\text{TEU}}$ - об'єм одного двадцяти-футового контейнеру.

З цього, транспортна робота групи кранів щодо заповнення кубатури (6) дорівнює

$$M \cdot W = 63\,279\,000 \text{ кг} \cdot 835\,000 \text{ м}^3 = 52\,838 \cdot 10^9 \text{ кг} \cdot \text{м}^3, \quad (7)$$

де $M = 63\,279\,000 \text{ кг}$ - вантажопідйомність контейнеровозу (максимальна маса вантажу).

Далі обчислимо значення транспортної послуги $M \cdot W \cdot V^2$, $[\text{кг} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{м}^2/\text{с}^2]$, де V , $[\text{м}/\text{с}]$ - середня швидкість вантажопотоку. Відомо, що для портових кранів швидкість переміщення вантажу складає 150 – 175 м/хв. (під'їм, спускання), переміщення крану по рельсах – до 152 м/хв. Якщо перейти до системи СІ та взяти середнє округлене значення швидкості, отримаємо швидкість вантажопотоку, що забезпечується одним краном-контейнером $V1 \approx 2$, $[\text{м}/\text{с}]$.

Оскільки розглядається не один кран, а їх група, де крани працюють паралельно, то швидкість вантажопотоку має збільшуватися пропорційно кількості кранів. Для розрахунку приймемо, що у групі одночасно працює 6 кранів. Тоді:

$$V = V1 \cdot n = 2 \cdot 6 = 12 \text{ м}/\text{с}, \quad (8)$$

де $n = 6$ - кількість кранів-контейнерів в групі.

Для такої швидкості вантажопотоку транспортна послуга буде:

$$\begin{aligned} M \cdot W \cdot V^2 &= 52\,838 \cdot 10^9 \text{ кг} \cdot \text{м}^3 \cdot (12 \text{ м}/\text{с})^2 = \\ &= 7,609 \cdot 10^{15} \text{ кг} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{м}^2/\text{с}^2 = 7,609 \cdot 10^{15} \text{ м}^8 \cdot \text{с}^{-4}. \end{aligned} \quad (9)$$

Розмірність транспортної послуги (9) можна подати, як:

$$\text{м}^8 \cdot \text{с}^{-4} = \frac{\text{м}^3}{\text{с}^2} \cdot \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2} \cdot \text{м}^3 = \text{Дж} \cdot \text{м}^3. \quad (10)$$

Тобто транспортна послуга (9) це є перенесення енергії у визначений об'єм (вантажний об'єм контейнеровозу).

Далі, маючи на увазі, що транспортна послуга (9) вимірюється як $\text{Дж} \cdot \text{м}^3$, а також, що це характеризує корисний вихід з витрат енергії, оцінимо енергоефективність розрахованої транспортної послуги при завантаженні трюму та палуби контейнеровозу шістьма кранами-контейнерами у порту Лос-Анджелеса. Для обчислення безрозмірного коефіцієнту енергоефективності поділимо корисні енерговитрати з заповнення вантажного об'єму (транспортну послугу (9)) на енерговитрати на функціонування кранів-контейнерів, які приведені до визначеного вантажного об'єму судна-контейнеровозу:

$$k_{\text{D3}}^{\text{ен.еф.}} = \frac{M \cdot W \cdot V^2}{E \cdot W}, \quad (11)$$

де $M \cdot W \cdot V^2$, $[\text{Дж} \cdot \text{м}^3]$ - транспортна послуга (9);

E , $[\text{Дж}]$ - енерговитрати на роботу групи кранів-контейнерів;

$W, [м^3]$ - вантажний об'єм контейнеровозу.

Статистична оцінка річної норми на відпрацювання 10^6 умовних одиниць TEU в порту складає 20 000 МВт·г електричної енергії [14]. З цього, енерговитрати на заповнення трюму та палуби визначеного контейнеровозу складатиме:

$$E^{\text{порт}} = 20000 \text{ МВт} \cdot \varepsilon \cdot \frac{N_{\text{TEU}}}{N_{\Sigma \text{TEU}}} = 20000 \text{ МВт} \cdot \varepsilon \cdot \frac{21413 \text{ TEU}}{10^6 \text{ TEU}} = 428 \text{ МВт} \cdot \varepsilon = 1,542 \cdot 10^{12} \text{ Дж}, \quad (12)$$

де E - портові енерговитрати на завантаженні трюму і палуби визначеного контейнеровозу;

$N_{\text{TEU}} = 21413 \text{ TEU}$ - ємність вантажності відсіків та палуби контейнеровозу класу Triple-E – OOCL Honk Kong;

$N_{\Sigma \text{TEU}} = 10^6 \text{ TEU}$ - річний оборот порту Лос-Анджелес у TEU.

Якщо частка енерговитрат в порту на роботу причальних кранів складає 26 % [14], тоді енерговитрати на роботу кранів при завантаженні контейнеровозу є:

$$E = E^{\text{порт}} \cdot 0,26 = 1,542 \cdot 10^{12} \cdot 0,26 = 0,4 \cdot 10^{12} \text{ Дж}. \quad (13)$$

З цього, оцінка транспортної послуги щодо завантаження контейнеровозу з точки зору використаної енергії буде:

$$E \cdot W = 0,4 \cdot 10^{12} \text{ Дж} \cdot 835000 \text{ м}^3 = 333 \cdot 10^{15} \text{ Дж} \cdot \text{м}^3. \quad (14)$$

Тоді, коефіцієнт енергоефективності транспортної послуги щодо завантаження трюму та палуби контейнеровозу класу Triple-E – OOCL Honk Kong при застосуванні групи з шести кранів-контейнерів, складає:

$$k_{\text{ДЗ}}^{\text{ен.еф.}} = \frac{M \cdot W \cdot V^2}{E \cdot W} \cdot 100\% = \frac{7 \cdot 609 \cdot 10^{15} \text{ Дж} \cdot \text{м}^3}{333 \cdot 10^{15} \text{ Дж} \cdot \text{м}^3} \cdot 100\% = 0,0228 \cdot 100\% \approx 2,3\%, \quad (15)$$

Отже, система вантажо-розвантажувальних засобів у порту має дуже низький коефіцієнт енергоефективності.

З практичного досвіду відомо, що навантажувальні (розвантажувальні) роботи завжди виявляються вузьким місцем у будь-якій системі логістики. Тому, інноваційний розвиток логістики АПК України, перш за все, має бути спрямований на розвиток таких систем та засобів. Впровадження нових концептуальних засад з транспортування сільськогосподарських товарів дозволить підвищити енергоефективність (собівартість) процесів збору, обробки та доставки до користувача агропромислової продукції.

3 Обговорення отриманих результатів

Можна помітити, що у (15) вантажний об'єм контейнеровозу, W , входить як у чисельник, так й у знаменник. На перший погляд операція множення на цю величину при обчисленні транспортної послуги (9) та величини (14) є зайвою. Це буде мати сенс, якщо прийняти, що розподіл енергії по об'єму у (14) і розподіл маси вантажу у трюмі та на палубі у (7) є ідентичними – рівномірними по елементах об'єму.

Однак при більш деталізованому підході ці обидва розподіли – відрізняються. Наприклад, розподіл енергії по об'єму є рівномірним, а розподіл маси вантажу здійснюється з урахуванням щільності вантажної маси. Знизу розміщуються більш важкі контейнеру, зверху – більш легкі або пусті. При такому підході, при розрахунку (7), потрібно буде ввести вагові коефіцієнти по рівнях трюмного простору.

В наведеному прикладі здійснено спрощення з метою зменшення інформації, що не впливає безпосередньо на демонстрування можливостей метода застосування LT-метрик.

Також, позбавлена гнучкості розрахункова заміна групи кранів-контейнерів єдиним гіпотетичним краном. Зміни у механіці і в електродинаміці такого крану відносно групи кранів не будуть пропорційними зміненню швидкості переміщення вантажу. Однак, для першого наближення таке припущення є можливим.

Аналізуючи аналітичний вираз для обчислення транспортної послуги (9), можна встановити головне протиріччя та, з цього, актуальний напрямок удосконалення сучасних навантажувальних (розвантажувальних) систем та засобів. Отже, у виразі (9) присутній квадрат швидкості вантажопотоку, маса вантажу та вантажний об'єм транспортного засобу. Найбільш перспективним напрямком збільшення оцінки транспортної послуги є напрямок збільшення швидкості вантажопотоку, оскільки у (9) входить квадрат даної величини. Для її збільшення можна запроваджувати, наприклад, інновації щодо: автоматизації процесів навантаження (розвантаження); пакетизації вантажів; розробки принципово нових навантажувально-розвантажувальних засобів та концепцій навантаження (розвантаження).

Висновки

1. Для порівняльного аналізу інновацій в системі логістики АПК найбільш придатні для використання такі сутності таблиці Бартіні, як: L^6T^{-4} , L^7T^{-4} і L^8T^{-4} , які характеризують, відповідно: лінійний, ареальний та об'ємний методи перенесення енергії. Такі показники дають найбільш інформативну та повну оцінку інноваційних альтернатив з точки зору врахування всіх системних процесів та взаємодій.

2. В статті використана сутність L^8T^{-4} , на основі якої побудована оцінка транспортної послуги для системи завантаження трюму і палуби судна-контейнеровозу групою кранів-контейнерів, а також виведений безрозмірний коефіцієнт енергетичної ефективності даної логістичної підсистеми.

3. Коефіцієнт енергетичної ефективності, який обчислений для операції завантаження трюму і палуби судна-контейнеровозу класу Triple-E – OOCL Honk Kong групою з шості кранів-контейнерів в порту Лос-Анджелеса, складає величину 2,3 %. Це свідчить про дуже низький рівень енергоефективності сучасних систем та засобів навантаження (розвантаження).

4. Виходячи з виразу для транспортної послуги (9), можна більш системно розглядати напрямки подальшого удосконалення сучасних систем та засобів навантаження (розвантаження). Найбільш перспективним напрямком є напрямок щодо підвищення швидкості вантажопотоку. Оскільки у (9) присутній квадрат швидкості, з цього такі інновації у розвиток логістики АПК будуть мати найбільшу віддачу у порівнянні з підвищенням вантажопідйомності та місткістю технічних засобів транспортування (маса та обсяг вантажного відсіку присутні в першому ступені).

Список використаних джерел

1. Людвік І. І. Підвищення конкурентоспроможності АПК України через інноваційні стратегії: розробка та застосування моделей аналізу ефективності в умовах глобалізації. *Журнал Економіка та суспільство*. № 68. 2024. С. 1 – 10. DOI: 10.32782/2524-0072/2024-68-79

2. Сегеда С. А., Хахула Б. В., Любар Р. П., Хатула Л. П., Ситник О. О. Інноваційна агропродовольча політика, як фактор забезпечення глобальної продовольчої безпеки. *Журнал Агросвіт*. № 22. 2024. С. 51 – 57. DOI: 10.32702/2306-6792.2024.22.51

3. Цюцюра С.В., Криворучко, О.В., Цюцюра М.І. Ключові показники ефективності. Принципи розробки ключових показників для бюджетної сфери. *Журнал Управління розвитком складних систем*, Вип. 10. 2012. С. 87 – 91. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Urss_2012_10_17

4. Русанюк В.В. Метрики показників ефективності державної підтримки малого підприємництва в аграрному секторі. *Журнал Економіка АПК*, № 6. 2021. С. 117 – 127. DOI: 10.32317/2221-1055.202106117
5. Загірняк Д., Стефківська Ю. Аналіз напрямів оптимізації експорту й імпорту зернових та олійних культур в аспекті інституціоналізації АПК України. *Журнал Вісник КрНУ ім. М. Остроградського*. № 150 (1). 2025. С. 57 – 64. DOI: 10.32782/1995-0519.2025.1.7
6. Yanovska V., Król M., Pittman R. The logistics of grain exports from wartime Ukraine: What are the highest priority areas to Address? *Journal of Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. Vol. 30. March 2025. P. 1 – 13. DOI: 10.1016/j.trip.2025.101363
7. Sitnicki M.W., Kurinskyi D., Pimenowa O., Wasilewski M. and Wasilewska N. Strategic Formation of Agricultural Market Clusters in Ukraine: Emerging as a Global Player. *Journal of Sustainability*. No. 16 (21). July 2024. P. 1 – 21. DOI: 10.3390/su16219430
8. Zakharchuk O., Nechytailo V., Navrotskyi Ya., Kovalenko A. Development of grain logistics in Ukraine. *Journal of Ekonomika APK*. No. 32 (3). June 2025. P. 21 – 30. DOI: 10.32317/ekon.apk/3.2025.21
9. Рустамов Р.Ш. Оценка перспектив развития зерновой логистики в Украине. *Журнал Збірник наукових праць ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна*. № 8. 2014. С. 127 – 133. http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpdnu_tstp_2014_8_19
10. Москвіченко І.М., Стаднік В.Г., Павленко В.В. Щодо ефективності логістичних схем експорту українського зерна до країн-споживачів Азійського регіону. *Журнал Науковий вісник УНУ*, № 36. 2021. С. 101 – 107. DOI: 10.32782/2413-9971/2021-36-18
11. Aleinikov A. G., Smarsh D. A. Viva Di Bartini: Eleven New Laws of Conservation Expanding Physics for Global Strategic Management and Strategic Development. *Journal of Business Management and Strategy*. Vol. 11, No. 1. Febr. 2020. P. 1 – 16. DOI: 10.5296/bms.v11i1.16505
12. Cooper L. N. An Introduction to the Meaning and Structure of Physics. Harper & Row. 1968. 746 p.
13. Cavendish H. Experiments to determine the density of the Earth. *Philosophical Transaction of the Royal Society of London for the year 1798, Part II.*, pp. 469 – 526. <https://books.google.cat/books?id=O58mAAAAMAAJ&pg=PA59&hl>
14. Matalka R., DeShazo J. R., Callahan C. Moving Towards Resiliency: An Assessment of the Costs and Benefits of Energy Security Investment for the San Pedro Bay Ports. 2013. 58 p. URL: <http://innovation.luskin.ucla.edu/sites/default/files/Port%20Report.pdf>

References

1. Liudvik I. Improving the competitiveness of Ukraine's agro-industrial complex through innovative strategies: development and application of efficiency analysis models in the context of globalization. *Journal of Ekonomika ta Suspilstvo*. No. 68. 2024. P. 1 – 10. DOI: 10.32782/2524-0072/2024-68-79
2. Szeged S., Khakhula B., Lubar R., Khakhula L., Sytnyk O. Innovative agricultural policy as a factor for ensuring global food security. *Journal of Agrosvit*. No. 22. 2024. P. 51 – 57. DOI: 10.32702/2306-6792.2024.22.51
3. Cucura S.V., Krivoruchko O.V., Cucura M.I. Key performance indicators. Principles for developing key performance indicators for the budget sector. *Journal of Upravlinya rozvutkom skladnuh system*. No 10. 2012. P. 87 – 91. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Urss_2012_10_17

4. Rusaniuk V. V. Metrics of efficiency indicators of state support for small entrepreneurship in the agricultural sector. *Journal of Ekonomika APK*. No 6. 2021. P. 117 – 127. DOI: 10.32317/2221-1055.202106117
5. Zagirniak D., Stefkivska Y. Analysis of cereals and oil crops export and import optimization ways in aspect of Ukrainian agro-industrial complex institutionalization. *Journal of Vistnyk KrNU im. M. Ostrogradskogo*. No. 150 (1). 2025. P. 57 – 64. DOI: 10.32782/1995-0519.2025.1.7
6. Yanovska V., Król M., Pittman R. The logistics of grain exports from wartime Ukraine: What are the highest priority areas to Address? *Journal of Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. Vol. 30. March 2025. P. 1 – 13. DOI: 10.1016/j.trip.2025.101363
7. Sitnicki M.W., Kurinskyi D., Pimenowa O., Wasilewski M. and Wasilewska N. Strategic Formation of Agricultural Market Clusters in Ukraine: Emerging as a Global Player. *Journal of Sustainability*. No. 16 (21). July 2024. P. 1 – 21. DOI: 10.3390/su16219430
8. Zakharchuk O., Nechytailo V., Navrotskyi Ya., Kovalenko A. Development of grain logistics in Ukraine. *Journal of Ekonomika APK*. No. 32 (3). June 2025. P. 21 – 30. DOI: 10.32317/ekon.apk/3.2025.21
9. Rustumov R.Sh. Assessing the prospects for the development of grain logistics in Ukraine. *Journal of Zbirnyk naukovykh prac DNUZT im. ak. V.Lazaryana*. No. 8. 2014. P. 127 – 133. http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpdnu_tstp_2014_8_19
10. Moskvichenko I., Stadnik V., Pavlenko V. Regarding the efficiency of logistics schemes for exporting Ukrainian grain to consumer countries in the Asian region. *Journal of Naukovyi visnik UNU*. No. 36. 2021. P. 101 – 107. DOI: 10.32782/2413-9971/2021-36-18
11. Aleinikov A. G., Smarsh D. A. Viva Di Bartini: Eleven New Laws of Conservation Expanding Physics for Global Strategic Management and Strategic Development. *Journal of Business Management and Strategy*. Vol. 11, No. 1. Febr. 2020. P. 1 – 16. DOI: 10.5296/bms.v11i1.16505
12. Cooper L. N. An Introduction to the Meaning and Structure of Physics. Harper & Row. 1968. 746 p.
13. Cavendish H. Experiments to determine the density of the Earth. *Philosophical Transaction of the Royal Society of London for the year 1798, Part II.*, pp. 469 – 526. <https://books.google.cat/books?id=O58mAAAAMAAJ&pg=PA59&hl>
14. Matalka R., DeShazo J. R., Callahan C. Moving Towards Resiliency: An Assessment of the Costs and Benefits of Energy Security Investment for the San Pedro Bay Ports. 2013. 58 p. URL: <http://innovation.luskin.ucla.edu/sites/default/files/Port%20Report.pdf>

Рожко І. І. Гончаренко О. О. Лавренко В. В. Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна	ОЦІНКА КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТА ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОТОБЛОКІВ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОЇ РОБОТИ НА ДІЛЯНКАХ ПРИВАТНИХ ДОМОВОЛОДІНЬ
---	--

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-27-58>

УДК 631.372:631.3.02

Рожко І.І., Гончаренко О.О., Лавренко В. В. Оцінка конструктивних особливостей та технічних характеристик мотоблоків для ефективної роботи на ділянках приватних домоволодінь

Анотація. У статті наведено результати агроінженерної оцінки мотоблоків, що представлені на сучасному українському ринку малогабаритної сільськогосподарської техніки, з урахуванням їх конструктивно-технологічних особливостей, експлуатаційних параметрів та функціональних можливостей. Обґрунтовано актуальність використання мотоблоків як ефективного засобу механізації технологічних процесів у присадибних і малих фермерських господарствах в умовах трансформації агропродовольчого сектору України.

Проведено порівняльний аналіз технічних характеристик моделей мотоблоків різних класів — від легких до важких, що розрізняються за масою, потужністю двигуна, типом редуктора та можливістю агрегування з навісним обладнанням. Розглянуто особливості конструкцій з ремінним приводом, прямим приводом і редукторним з'єднанням, а також вплив типу двигуна (бензинового або дизельного) на продуктивність, паливну економічність і зручність експлуатації.

У роботі визначено основні критерії вибору мотоблока для ефективної роботи на земельних ділянках обмеженої площі: енергетичні показники, надійність трансмісії, ширина захвату робочих органів, ергономічність керування та можливість застосування широкого спектра навісного обладнання.

Здійснено класифікацію мотоблоків за масою та потужністю двигуна на чотири групи, що дозволяє користувачам обґрунтовано підібрати оптимальний варіант відповідно до ґрунтово-кліматичних умов і типу технологічних операцій.

На основі результатів аналізу запропоновано рекомендації щодо вибору, експлуатації та технічного обслуговування мотоблоків з урахуванням енергетичних, економічних і ергономічних критеріїв.

Отримані результати мають практичне значення для власників присадибних і малих фермерських господарств, а також можуть бути використані у навчальному процесі при підготовці фахівців агроінженерного профілю для формування компетентностей у сфері експлуатації малогабаритних механізованих засобів.

Ключові слова: мотоблок, малогабаритна техніка, агроінженерна оцінка, ґрунтообробка, продуктивність.

Rozhko I. I., Honcharenko O. O., Lavrenko V. V. Evaluation of Design Features and Technical Characteristics of Power Tillers for Efficient Operation on Private Household Plots

Abstract. The article presents the results of an agro-engineering assessment of walk-behind tractors (motoblocks) available on the modern Ukrainian market of small-scale agricultural machinery, taking into account their structural and technological features,

operational parameters, and functional capabilities. The relevance of using walk-behind tractors as an effective means of mechanizing technological processes in household and small-scale farming under the conditions of transformation of Ukraine's agri-food sector has been substantiated.

A comparative analysis of the technical characteristics of motoblock models of various classes — from light to heavy — differing in weight, engine power, type of gearbox, and compatibility with mounted equipment has been conducted. The study examines the design features of belt-driven, direct-drive, and gearbox-type motoblocks, as well as the influence of engine type (gasoline or diesel) on performance, fuel efficiency, and operational convenience. The research identifies the main criteria for selecting a motoblock for effective operation on small land plots: energy performance, transmission reliability, working width of soil tillage implements, ergonomic control features, and the possibility of using a wide range of attachments.

Motoblocks have been classified according to weight and engine power into four groups, which allows users to reasonably select the optimal model based on soil and climatic conditions and the type of technological operations.

Based on the analysis results, recommendations are proposed regarding the selection, operation, and maintenance of motoblocks, taking into account energy, economic, and ergonomic criteria.

The obtained results have practical significance for owners of household and small-scale farms and can also be used in the educational process for training agro-engineering specialists to develop competencies in the field of operation of small mechanized agricultural machinery.

Keywords: *walk-behind tractor, small-scale machinery, agro-engineering assessment, soil tillage, productivity.*

Актуальність проблеми

В умовах системної трансформації агропродовольчого комплексу України значно зросла роль присадибних та малих фермерських господарств у забезпеченні продовольчої безпеки на локальному та регіональному рівнях [1 – 4]. Використання великогабаритної техніки на малих площах є економічно недоцільним, тому особливої актуальності набуває застосування малогабаритних механізованих засобів – мотоблоків. Їх раціональний вибір і ефективна експлуатація сприяють підвищенню продуктивності праці та зменшенню фізичних навантажень на оператора.

Аналіз останніх досліджень

Мотокультиватори та мотоблоки належать до малогабаритних механізмів, призначених для виконання комплексу механізованих робіт на присадибних ділянках. Основна відмінність між ними полягає у функціональному призначенні. Мотокультиватор використовується переважно для культивації, розпушування та міжрядної обробки ґрунту, тоді як мотоблок є різновидом мінітрактора, універсальним багатофункціональним агрегатом, що дозволяє виконувати широкий спектр технологічних операцій — від оранки, догляду за рослинами, збирання до транспортування вантажів і прибирання територій [5 – 8].

Мотоблоки є одновісним механічним пристроєм, на відміну від мотокультиваторів, обладнуються колесами та посиленням редуктором, що забезпечує підвищену універсальність і можливість агрегування з різними типами навісного обладнання. Конструктивне посилення редуктора та використання валу відбору потужності у мотоблока сприяють збільшенню тягових характеристик і стабільності роботи при різних агротехнічних операціях [9 – 10].

Вирощування рослинницької продукції на невеликих ділянках стикається з низкою технологічних та економічних обмежень: висока вартість великогабаритної техніки, проблеми з маневруванням та доступом до ділянки. У зв'язку з цим виникає об'єктивна потреба у впровадженні багатофункціональної та економічно обґрунтованої малогабаритної техніки, що дозволить значно підвищити продуктивність та знизити фізичне навантаження оператора [11 – 13]

Вибір типу мотоблока визначається площею ділянки, структурою ґрунту та інтенсивністю використання. Для піщаних і супіщаних ґрунтів доцільно застосовувати легкі або середні моделі, тоді як для обробітку чорноземів або важких суглинків — середні чи важкі варіанти, що забезпечують достатню глибину культивування та стабільність руху [14 – 16].

Формулювання мети дослідження

Мета дослідження здійснення порівняльного аналізу та агроінженерної оцінки мотоблоків, представлених на українському ринку, а також наукове обґрунтування доцільності їх використання для забезпечення ефективного функціонування технологічних процесів і підвищення продуктивності робіт на присадибних ділянках.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання дослідження:

- провести аналіз технічних параметрів, конструктивних особливостей і функціональних характеристик сучасних мотоблоків;
- здійснити оцінку можливостей застосування начіпного обладнання відповідно до технологічних операцій та умов його експлуатації;
- узагальнити інформацію з наукових джерел, технічної документації та інструкцій з експлуатації для формування системи критеріїв оцінювання ефективності використання мотоблоків;
- визначити оптимальні критерії вибору мотоблока для механізації робіт на присадибних ділянках обмеженої площі.

Об'єкт дослідження: процес механізації ґрунтообробних робіт на присадибних ділянках.

Предмет дослідження: конструктивно-технологічні та експлуатаційні характеристики мотоблоків різних типів і їх агрегування з навісним обладнанням.

Методичний підхід в проведенні досліджень

У дослідженні застосовано аналітичний, порівняльний та структурно-функціональний методи аналізу, що забезпечили комплексне вивчення техніко-експлуатаційних характеристик двох моделей мотоблоків, представлених на українському ринку малогабаритної сільськогосподарської техніки.

Основними джерелами інформації слугували технічні каталоги, інструкції з експлуатації, а також офіційні сайти виробників і дистриб'юторів мотоблоків.

Аналіз проводився для моделей з бензиновим та дизельним типом двигуна. Порівняльну оцінку здійснювали за такими параметрами: потужність двигуна, к.с.; тип двигуна (бензиновий / дизельний, дво- чи чотиритактний); маса агрегату, кг; ширина захвату робочих органів, см; тип системи запуску (ручний / електричний стартер); можливість приєднання навісного обладнання (ґрунтофреза, плуг, косарка, картоплесаджалка тощо); ергономічні та експлуатаційні показники (зручність керування, рівень вібрацій, легкість технічного обслуговування).

Отримані дані були систематизовані та піддані аналітичній і структурно-функціональній оцінці. На основі результатів проведено агроінженерну оцінку ефективності кожної моделі за показниками енергетичної доцільності, продуктивності та ергономічності при виконанні робіт на присадибних ділянках обмеженої площі.

Результати досліджень

Залежно від маси та потужності двигуна мотоблоки поділяють на чотири групи:

- нульові – мотоблоки вагою менше за 100 кг та двигуном потужністю менше, ніж 6 кінських сил. Вони слабкі і малопотужні, тому якість поверхневого обробітку ґрунту, з малим заглибленням буде не значною;

- легкі – перший клас. Ремінні мотоблоки, вага до 100 кг, потужність - від 6-ти кінських сил. Це мотоблоки із двигуном, колінчастий вал якого розташований перпендикулярно до осі руху. Обертання від двигуна на редуктор передається за допомогою ремня. Серед найвідоміших представників - мотоблоки Кентавр ДТЗ 570БН та Вейма 900. Але зараз кожен бренд серед представлених на ринку України, - Форте, Кентавр або ДТЗ - пропонують свій варіант такого мотоблока. Перевагою такої модифікації є проста конструкція та вільний доступ до шківів двигуна і редуктора. Це дозволяє використовувати з мотоблоком косарку і в деяких випадках - навіть вібраційну картоплекопалку. Даний клас якщо і працює з додатковим комплектуванням, то переважно на межі своїх технічних можливостей, а також вимагають певних конструктивних доробок. Їх ускладнюють, оснащують більшими і важчими колесами;

- середні – другий клас. Мотоблоки з прямим приводом та вагою від 100 до 130 кг. Можливо, є й більш легкі або більш важкі моделі. Мотоблоки мають вал відбору потужності діаметром 18 мм під шпонку. Модифікація від Вейма випускається зі шліцьовим валом. В середині цієї групи є великий різновид техніки з різними характеристиками, і не існує чіткого стандарту, щодо тягових характеристик даного агрегату. Також присутні певні труднощі при виборі функціональних переваг. Якщо узагальнити, маємо два недоліки - немає стандарту і частина моделей дуже швидкі, навіть ті, які мають понижену передачу. При підборі начіпного обладнання, основні проблеми виникають з підбором косарки та картоплекопалки. Удосконалення таких агрегатів потребує встановлення додаткових (проміжних) передавальних механізмів, таких як: кутовий редуктор, пасовий перехідник, ходозменшувач. Це, переважно досить негативно впливає на тягово-зчіпні характеристики агрегату, оскільки з додатковим устаткуванням збільшується і загальна вага і його вартість, а потужність залишається;

- важкі – третій клас: редукторні, прямий привід, повздовжній вал відбору потужності, вага - в межах від 215 до 230 кг. Прикладом є мотоблоки бренду Мотор Січ і схожі за конструкцією.

Компонування цих двоколісних мотоблоків хоч і схоже на попередню групу, але має набагато кращі функціональні можливості. Коробка забезпечує більш широкий діапазон швидкостей. У комплексі з вагою близько 200 кг, це дозволяє комфортно виконувати як транспортні, так і ґрунтообробні роботи. Це справді «трактор» на двох колесах. Але тут є кілька проблем. Завод “Мотор Січ” останнім часом, припинив випуск такого класу, на офіційному сайті позначка - "немає в наявності". За всієї функціональності вибір механізованого начіпного обладнання був обмежений. Інша проблема в тому, що, мотоблоки виробництва і України і азіатських країн мали несумісні вали відбору потужності. Схожу конструкцію мають італійські мотоблоки, і вони також несумісні.

важкі мотоблоки — їх можуть називати водяними – це визначення за типом охолодження двигуна. На основі їх редукторів виробляють гібриди з двигуном повітряного охолодження. Також під них виготовляються кіт-набори для переробки мотоблока в трактор. Вага мотоблока - понад двісті кілограмів. На двигуні та редукторі є шків, які зручно використовувати для приводу в дію начіпного обладнання. На більшості моделей праворуч на редукторі є додатковий вал відбору потужності. Це єдиний тип мотоблоків, у якого стандартизований причіпний вузол. Стандартизований причіпний вузол та конструкція, широкий діапазон передач, відносно велика вага

дозволяють цьому мотоблоку виконувати всі необхідні роботи на порівняно невеликих земельних ділянках та в полі. Для таких мотоблоків існує майже все необхідне начинне обладнання. Повна локалізація виробництва в Китаї та довга історія випуску цієї моделі несприятливо позначається на загальній якості агрегату, є питання щодо двигуна. В якості суттєвої переваги даної групи мотоблоків можна знайти все необхідне обладнання для виконання різноманітних технологічних операцій.

З енергетичної точки зору мотоблоки поділяють за типом двигуна. Бензинові моделі відзначаються меншою масою, компактністю та простотою запуску, однак вони мають підвищене паливоспоживання й потребують перерв через перегрів. Дизельні мотоблоки, навпаки, характеризуються більшою потужністю, економічністю та довговічністю, хоча й мають певні недоліки, які вимагають від власника підвищених фінансових витрат, відзначаються високі вимоги до рівня якості палива та найсуворіші нормативи, пов'язані з обслуговуванням паливної системи, підвищеним рівнем шуму та більшою вартістю. Фактично, дизельні пристрої є більш вибагливими, якщо порівнювати їх із бензиновими.

Особливу увагу слід приділяти вибору типу двигуна та універсальності застосування ґрунтообробних робочих органів і додаткових начинних знарядь, які безпосередньо впливають на якість, продуктивність і доцільність експлуатації. Бензинові двигуни забезпечують легкість та компактність агрегату, тоді як дизельні — більшу тягу та економічність. Важливим параметром є крутний момент та робочий об'єм циліндрів, що визначає здатність мотоблока виконувати складніші роботи та перетягувати навантажені причепа [17 – 19].

Комплектація мотоблоків передбачає можливість агрегування з різними видами навісного обладнання – плугами, фрезами, картоплесаджалками, косарками, відвалами для снігу, причепами тощо. Наявність валу відбору потужності значно розширює функціональні можливості агрегату та дозволяє ефективно виконувати технологічно різноманітні операції [20, 21].

Технологічна, економічна доцільність комплектації машино-транспортного агрегату для виконання тих чи інших робіт визначається типом роботи, площею оброблюваних ділянок, необхідністю виконання транспортування та частотою використання агрегату. Для невеликих садів та городів достатньо легких моделей із базовим комплектом знарядь, для середніх ділянок рекомендується обладнання із більшою шириною захвату, що підвищує продуктивність і економічність палива, а для ділянок близько 2-4 га, доцільно застосовувати важкі мотоблоки з можливістю підключення активного начинного обладнання для садіння та збирання врожаю.

Перш ніж придбати мотоблок, рекомендується провести тестування агрегату, оцінюючи легкість запуску двигуна, висоту розташування органів керування під конкретного оператора, зручність керування, рівень вібрації та шуму, ефективність гальмівної системи та загальну ергономіку. Недотримання цих критеріїв може призвести до швидкої втоми оператора або підвищеного ризику травматизму.

Практичні рекомендації

Для забезпечення ефективної та безпечної експлуатації мотоблоків у присадибних господарствах доцільно проводити попередню оцінку умов роботи, враховуючи тип ґрунту, площу ділянки та інтенсивність використання, що дає змогу обґрунтовано обрати клас мотоблока – легкий, середній або важкий – відповідно до технологічних потреб. Вибір типу двигуна має базуватися на енергетичних і економічних критеріях: бензинові агрегати доцільно застосовувати для короткочасних робіт на легких ґрунтах, а дизельні – для тривалої експлуатації на важких ґрунтах та при підвищених навантаженнях. Важливо забезпечити оптимальне агрегування мотоблока з навісним обладнанням –

фрезами, плугами, картоплесаджалками, косарками тощо, враховуючи сумісність валу відбору потужності, робочу ширину захвату та тягові можливості агрегату.

Перед початком роботи необхідно проводити технічний огляд із перевіркою рівня мастила, стану паливної системи, кріплень і робочих органів, адже недотримання вимог технічного обслуговування призводить до зниження ефективності та безпеки експлуатації.

Під час роботи слід дотримуватися ергономічних вимог – налаштовувати висоту й положення розташування органів керування, відповідно до параметрів оператора, контролювати рівень вібрації та шуму, працювати у рекомендованому режимі навантаження.

Регулярне очищення та висоту розташування органів керування після завершення сезону забезпечують стабільність технічних показників і подовжують термін служби агрегату. Не менш важливим є підвищення професійної компетентності операторів через вивчення технічної документації, проходження інструктажів і набуття практичних навичок безпечного керування. Виконання зазначених рекомендацій сприяє підвищенню ефективності механізованих робіт на присадибних ділянках, зниженню експлуатаційних витрат, забезпеченню безпеки праці та раціональному використанню малогабаритної техніки в системі сталого сільськогосподарського виробництва.

Висновки

Таким чином, в Україні налічується велика кількість моделей мотокультиваторів та мотоблоків, які згруповані в чотири групи: малопотужна техніка для поверхневої обробки, ремінні мотоблоки типу ДТЗ 570БН з досить широкими можливостями, мотоблоки з прямим приводом та заднім валом відбору потужності, мотоблоки типу “Мотор Січ” та важкі мотоблоки. Результати проведеного аналізу підтверджують, що вибір типу мотоблока повинен базуватися на поєднанні енергетичних, конструктивних та ергономічних критеріїв, що забезпечують ефективність, безпечність і довговічність експлуатації у присадибному господарстві.

Список використаних джерел

1. Колокольчикова І. В. Роль малих форм господарювання в забезпеченні продовольчої безпеки держави. *Бізнес-навігатор*. 2013. Вип.3, С. 93 – 98.
2. Польова Н. М., Бойко А. О., Гуляйко А. П. Значення малих форм підприємництва в стратегії розвитку аграрного бізнесу. *Держава та регіони. Серія: Економіка та підприємництво*. 2024. Вип. С. 132.
3. Ланченко Є. О., Івченко В. М. Перспективи розвитку малого підприємництва в сільському господарстві. *Економіка і управління бізнесом*. 2024,15(1). С.71 – 91.
4. Кувачов В. П., Дружич В. М., Шевченко С. О., Зеленов К. О. Дослідження впливу параметрів копача на вертикальне навантаження коліс малогабаритного механізованого агрегату. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2025, 25(1). С. 15 – 20.
5. Батюк Ю. Аналіз конструкції енергетичних засобів малої механізації. *Техніка і технології АПК*. 2013,12. С. 19-22.
6. Kutelia G., Karchava O. K., Miruashvili V. Technical means of small mechanization +1. *The Journal of Nature Studies - Annals of Agrarian Science*. 2023, 20(3). PP. 155 – 157. Retrieved from <https://mail.journals.org/ge/index.php/aans/article/view/195>
7. Calcante, A. (2024). La piccola meccanizzazione delle colture specializzate. *MONDO MACCHINA*, 2024(12). PP.100-104.
8. Mihajlow R., Demirev Vl.. Dynamic computer modeling of arable walking tractor with plow. *Mechanization in agriculture & Conserving of the resources*, 2017. Vol. 63., Issue

6, pg(s) 232-235

9. Masharibov A., Xusainov B., Ismoilov R., Eshankulov U., Do'shonov S. (2025). Basing motoblock the main parametres of the potato digger. In *BIO Web of Conferences* (Vol. 173, p. 01008). EDP Sciences.

10. Руденко Т. В., Амосов В. В., Кулешков Ю. В., Руденко, І. Т. Електросапа – культиватор «Мрія». *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2024. Вип. 9(40), ч.І. С.110 – 117.

11. Ковальов О.В. Енергетичний баланс та закон оптимального керування мотоблоком з тяговим електродвигуном постійного струму. *Праці ТДАТУ*. 2008. Вип. 8, т. 5. С. 138-148.

12. Tukhtakuziyev, A., Mahmud, T., Norchayev, D. R., Sh, G. B., Khayitov, A. N., Aziz, M. T., ... & Syed, W. (2025). WITHDRAWN: Theoretical justification of vegetable cultivator parameters developed for MOTOBLOCK. *Heliyon*.

13. Katsitadze, J., Phutkaradze, Z., Kutelia, G., & Beridze, G. (2022). Theoretical and experimental study of the operational reliability of small-sized agricultural machinery operating in the mountainous conditions of Adjara. *Mechanization in agriculture & Conserving of the resources*, 66(2), 57-60.

14. Кіт М. Г. Морфологія ґрунтів: навч. посіб. Львів: Вид-во ЛНУ ім. Івана Франка, 2008. 227 с.

15. Ґрунтообробний мотоблок: пат. на кор. мод. 35352, Україна, МПК (2006, 51) B60K1/008. № u 200805379. Опубл. 10.09.2008 р., Бюл. №17.

16. Ковальов О.В., Гулевський В.Б. Електротехнологічна система обробітку ґрунту на базі малогабаритного ґрунтообробного мотоблоку. Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта): матер. Міжнар. наук.-техн. конф./ НУБіП. Київ, 2016. С. 21-23.

17. Ковальов О.В. Режим роботи електродвигуна приводу ґрунтообробного мотоблоку. Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта: Мат. VII Міжнар. наук.-техн. конф. /НУБіП України. Київ, 2018. С. 96-98.

18. Ковальов О.В. Тягові характеристики та керування мотоблоком з електроприводом по максимуму ККД. Науковий вісник НТУ «Харківський політехнічний інститут». 2008. №30. С. 509-510.

19. Ковальов О.В., Куценко Ю.М., Назар'ян Г.Н. Розрахунок потужності та вибір тягового електродвигуна приводу мотоблока. *Праці ТДАТУ*. 2010. Вип. 10, т.8. С. 228-238.

20. Магац М., Махоркіна Т. (2016). Конструкційно-експлуатаційні дослідження модернізованого агрегату (мотоблок ЗУБР НТ-105+ плуг ПЛ-1-17). *Вісник Львівського національного аграрного університету. Агроінженерні дослідження*, (20), 168-174.

21. Осін Р. А., Магопець С. О., Красота М. В., Бев, О. В. Методичні вказівки до виконання практичних занять з дисципліни «Трактори та автомобілі» за модулем «Загальна будова, класифікація тракторів, автомобілів та їх двигунів. Кривошипно-шатунний та газорозподільчий механізми» для здобувачів вищої освіти за спеціальностями 201 «Агрономія», 20 «Агроінженерія». Центральноукраїнський національний технічний університет. С.95.

References

1. Kolokolchikova, I. V. (2013). The role of small forms of farming in ensuring the state's food security. *Business Navigator*, (3), 93–98.

2. Polova, N. M., Boiko, A. O., & Huliako, A. P. (2024). *The importance of small forms of entrepreneurship in the strategy of agribusiness development*. State and Regions. Series:

Economics and Entrepreneurship, (Issue not specified), 132.

3. Lanchenko, Ye. O., & Ivchenko, V. M. (2024). *Prospects for the development of small entrepreneurship in agriculture*. Economics and Business Management, 15(1), 71–91.

4. Kuvachov, V. P., Druzhych, V. M., Shevchenko, S. O., & Zelenov, K. O. (2025). *Study of the influence of digger parameters on the vertical load of wheels of a small-sized mechanized unit*. Proceedings of the Tavria State Agrotechnological University, 25(1), 15–20.

5. Batiuk, Yu. (2013). *Analysis of the design of small-scale mechanization power units*. Machinery and Technologies of the Agro-Industrial Complex, (12), 19–22.

6. Kutelia, G., Karchava, O. K., & Miruashvili, V. (2023). *Technical means of small mechanization*. The Journal of Nature Studies – Annals of Agrarian Science, 20(3), 155–157. Retrieved from <https://mail.journals.org.ge/index.php/aans/article/view/195>

7. Calcante, A. (2024). *La piccola meccanizzazione delle colture specializzate*. Mondo Macchina, (12), 100–104.

8. Mihajlow, R., & Demirev, V. (2017). *Dynamic computer modeling of arable walking tractor with plow*. Mechanization in Agriculture & Conserving of the Resources, 63(6), 232–235.

9. Masharibov, A., Xusainov, B., Ismoilov, R., Eshankulov, U., & Do'shonov, S. (2025). *Basing motoblock: The main parameters of the potato digger*. BIO Web of Conferences, 173, 01008. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202517301008>

10. Rudenko, T. V., Amosov, V. V., Kuleshkov, Yu. V., & Rudenko, I. T. (2024). *Elektrosapa–kultyvator “Mriia”*. Tsentralnoukrainskyi Naukovyi Visnyk. Tekhnichni Nauky, 9(40), Part I, 110–117.

11. Kovalov, O. V. (2008). *Enerhetychnyi balans ta zakon optymalnoho keruvannia motoblokom z tiahovym elektrodyhunum postiinoho strumu*. Pratsi TDATU, 8(5), 138–148.

12. Tukhtakuziyev, A., Mahmud, T., Norchayev, D. R., Sh, G. B., Khayitov, A. N., Aziz, M. T., ... & Syed, W. (2025). WITHDRAWN: Theoretical justification of vegetable cultivator parameters developed for MOTOBLOCK. Heliyon.

13. Katsitadze, J., Phutkaradze, Z., Kutelia, G., & Beridze, G. (2022). Theoretical and experimental study of the operational reliability of small-sized agricultural machinery operating in the mountainous conditions of Adjara. Mechanization in agriculture & Conserving of the resources, 66(2), 57–60.

14. Kit, M. H. (2008). *Morfologhiia gruntiv: Navchalnyi posibnyk*. Lviv: Vydavnytstvo LNU imeni Ivana Franka.

15. *Gruntoobrobnyi motoblok*: Patent na korysnu model № 35352, Ukraina, MPK (2006, 51) B60K1/008. № u200805379. (2008, September 10). Biuletyn №17.

16. Kovalov, O. V., & Hulevskiy, V. B. (2016). *Elektrotekhnologichna systema obrobittu gruntu na bazi malohabarytnoho gruntoobrobnoho motobloku*. In *Problemy suchasnoi enerhetyky i avtomatyky v systemi pryrodokorystuvannia (teoriia, praktyka, istoriia, osvita): Materialy Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii*. NUBiP Ukrainy, Kyiv, 21–23.

17. Kovalov, O. V. (2018). *Rezhymy roboty elektrodyhuna pryvodu gruntoobrobnoho motobloku*. In *Problemy suchasnoi enerhetyky i avtomatyky v systemi pryrodokorystuvannia (teoriia, praktyka, istoriia, osvita): Materialy VII Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii*. NUBiP Ukrainy, Kyiv, 96–98.

18. Kovalov, O. V. (2008). *Tiahovi kharakterystyky ta keruvannia motoblokom z elektropryvodom po maksimumu KPD*. Naukovyi Visnyk NTU “Kharkivskiy Politekhichniy Instytut”, (30), 509–510.

19. Kovalov, O. V., Kutsenko, Yu. M., & Nazarian, H. N. (2010). *Rozrakhunok potuzhnosti ta vybir tiahovoho elektrodyhuna pryvodu motobloka*. Pratsi TDATU, 10(8), 228–238.

20. Mahats, M., & Makhorkina, T. (2016). *Konstruktsiino-ekspluatatsiini doslidzhennia modernizovanoho ahrehatu (motoblok ZUBR NT-105 + pluh PL-1-17)*. Visnyk Lvivskoho Natsionalnoho Ahrarnoho Universytetu. Ahroinzhenerni Doslidzhennia, (20), 168–174.

21. Osin, R. A., Mahopeț, S. O., Krasota, M. V., & Bev, O. V. (n.d.). *Metodychni vkazivky do vykonannia praktychnykh zaniat z dystsypliny "Traktory ta avtomobili" za modulem "Zahalna budova, klasyfikatsiia traktoriv, avtomobiliv ta yikh dvyhuniv. Kryvoshypno-shatunnyi ta hazorozpodilchyi mekhanizmy" dlia zdobuvachiv vyshchoi osvity za spetsialnostiamy 201 "Ahronomiia", 208 "Ahroinzheneriia"*. Tsentralnoukrainskyi Natsionalnyi Tekhnichnyi Universytet, 95 p.

Ляшенко С. О.¹,
Фесенко А. М.¹,
Кісь В. М.¹,
Кісь М. В.¹,
Євстратов М. Д.²

¹Державний біотехнологічний
університет,

E-mail:

lyashenkosa05@ukr.net

alla.ecology3006@gmail.com

vkisprof@ukr.net

²Харківський національний
університет радіоелектроніки
м. Харків, Україна

E-mail:

mykola.yevstratov@nure.ua

**ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
УПРАВЛІННЯ БЕЗПІЛОТНИМИ
ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ ДЛЯ
ПОТРЕБ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО
ВИРОБНИЦТВА НА ОСНОВІ
ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО
ПІДХОДУ**

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-27-67>

УДК 631:004.81; 004.9:63

*Ляшенко С.О., Фесенко А.М., Кісь В.М., Кісь М.В., Евстратов М.Д.
Обґрунтування ефективності управління безпілотними літальними апаратами для
потреб сільськогосподарського виробництва на основі застосування
нейромережевого підходу*

Анотація. Важливим вектором розвитку сільськогосподарського виробництва є використання штучного інтелекту та автоматизованих систем керування в різних галузях агробізнесу. Головними складовими застосування автоматизованих систем управління є ефективність, спрощення та безпечність людської праці у сільськогосподарському виробництві на різних роботах. Застосування нейромережевого підходу у системі керування різними автоматизованими системами та механізмами дає можливість підвищити ефективність робочого процесу. Метою роботи є підвищення точності траєкторії польоту дрона шляхом розроблення моделі прогнозування траєкторії на основі нейромережевого підходу. За використання набору відеоматеріалів для навчання нейронної мережі було розроблено модель для прогнозування траєкторії польоту БПЛА. За допомогою інструменту 3D-моделювання Blender було створено набір даних, що відображає різні умови навколишнього середовища. Архітектура нейронної мережі включає блоки довготривалої короткочасної пам'яті (LSTM), які здатні обробляти послідовні дані. Це робить їх ідеальними для прогнозування динамічної траєкторії руху БПЛА.

Отримані результати свідчать, що нейронна мережа показує кращу продуктивність у реальних сценаріях порівняно з традиційними методами прогнозування траєкторії. Інтеграція LSTM дозволила ефективно навчатися та узагальнювати часові дані, фіксуючи складні рухи і взаємодію з навколишнім середовищем. Це дослідження не тільки демонструє можливість використання нейромережевого навчання для прогнозування траєкторії БПЛА, але й управління діями худоби, автоматизованого збирання і сортування врожаю, управління рослинами і ґрунтом тощо. Крім того, прогнозування траєкторії в реальному часі може значно підвищити ефективність і швидкість прийняття рішень. Наукова новизна отриманих результатів полягає в розробці та навчанні моделей на базі нейромережевого підходу спеціально призначених для прогнозування траєкторії польоту дронів. Це дослідження

демонструє ефективність запропонованого підходу і його здатність підвищувати точність прогнозування траєкторії БПЛА.

Ключові слова: сільськогосподарське виробництво; автоматизовані системи керування; нейронна мережа; траєкторія БПЛА; дрони; прогнозування траєкторії; архітектура нейронної мережі; синтетичний набір даних; 3D-моделювання.

Liashenko S., Fesenko A., Kis V., Kis M., Yevstratov M. **Substantiation of the effectiveness of unmanned aerial vehicle control for the needs of agricultural production based on the application of a neural network approach**

Abstract. An important vector for the development of agricultural production is the use of artificial intelligence and automated control systems in various branches of agribusiness. One of the main components of the application of automated control systems is the efficiency, simplification and safety of human labor in agricultural production in various jobs. The use of a neural network approach in the control system of various automated systems and mechanisms in various jobs makes it possible to increase their efficiency. The aim of the work is to increase the accuracy of predicting the flight trajectory of a drone by developing a trajectory prediction model based on a neural network approach. Based on a set of video materials for training a neural network, a model for predicting the flight trajectory of a UAV was developed. Using the Blender 3D modeling tool, a set of data was created based on the display of various scenarios of environmental conditions. The neural network architecture includes long-short-term memory (LSTM) blocks that are able to process sequential data, making them ideal for predicting the dynamic trajectory of a UAV.

The results show that the neural network showed better performance in real-world scenarios compared to traditional trajectory prediction methods. The integration of LSTM allowed for effective learning and generalization of temporal data, capturing complex movements and interactions with the environment. This study not only demonstrates the possibility of using neural network learning for UAV trajectory prediction, but also livestock management, automated crop harvesting and sorting, plant and soil management, etc. In addition, real-time trajectory prediction can significantly improve the efficiency and speed of decision-making. The scientific novelty of the results lies in the development and training of learning models based on the neural network approach, specifically designed for drone flight trajectory prediction. This study demonstrates the effectiveness of the proposed approach and its ability to increase the accuracy of UAV trajectory prediction.

Keywords: agricultural production; automated control systems; neural network; UAV trajectory; drones; trajectory prediction; neural network architecture; synthetic dataset; 3D modeling.

Вступ.

Агробізнес - це важлива складова української економіки. Наразі агропромисловий комплекс перебуває у процесі трансформації. Інтенсивно запроваджуються сучасні сільськогосподарські технології. Вектор розвитку сільськогосподарського виробництва спрямований від традиційного землеробства до точного та експериментального, побудованого на використанні штучного інтелекту та автоматизованих систем управління. Одна з важливих складових застосування автоматизованих систем управління - ефективність, спрощення та безпечність людської праці у сільськогосподарському виробництві. Створення високоінтелектуального виробництва оптимізує тимчасові та трудові ресурси. Розробка високоінтелектуального виробництва дозволить суб'єкту господарювання отримати конкурентні переваги та значний економічний ефект. Застосування технологій штучного інтелекту (ШІ) сприяє розширенню можливостей людини на робочому місці, а в деяких випадках ШІ стає її заміною при виконанні різних робіт у сільськогосподарському виробництві [1, 2].

Аналіз стану справ

Технології ІІІ мають значний потенціал для сільськогосподарського виробництва за допомогою аналізу умов проведення робіт у конкретних регіонах та визначення того, що необхідно робити для підвищення ефективності виробництва.

Переваги застосування інтелектуальних технологій керування в сільськогосподарському виробництві, дають можливості покращати роботи з: управління худобою; автоматизованого збирання і сортування врожаю; управління рослинами і ґрунтом; точного фермерства; картографування врожайності; автоматизації зрошення.

Підвищення ефективності управлінських рішень, а також підвищення рівня знань та доступу до інформації пов'язане з можливістю ІІІ надавати більш точні прогнози щодо врожайності, цінності та ринкові ризики та ін. Цифрові технології і нове обладнання вже допомагають фермерам і агробізнесам працювати ефективніше, економити кошти і застосовувати більш точні і екологічні методи. Завдяки автоматизації багато завдань тепер виконуються без ручної праці [1-3].

Аналіз значної кількості сучасних досліджень дозволив систематизувати знання про наявні технології ІІІ, які проявили себе як успішні методи вирішення проблем у сфері агропромислового виробництва [2-4].

Крім того, використання ІІІ та роботизованих механізмів у сільському господарстві може вирішувати і такі важливі завдання, як усунення проблем із кадрами, зменшення шкідливого впливу хімічних засобів на людей та навколишнє середовище, підвищення врожайності оброблюваних культур, збільшення продуктивності підприємств, зниження собівартості агровиробництва. Подальшими етапами дослідження може стати докладне вивчення різних технологій та методів ІІІ для пошуку їх найкращого використання у різних сферах людської життєдіяльності (у тому числі у сільському господарстві), визначення їхнього ефективного поєднання між собою та обґрунтування оптимальної внутрішньої структури [3, 4].

Завдяки застосуванню штучного інтелекту автоматизація сільського господарства дає можливість зменшувати ризики для самих фермерів і пришвидшувати їх роботу. Для успішного застосування ІІІ використовується велика кількість даних, що дає можливість побудувати моделі для штучного інтелекту та машинного навчання. Це допоможе, наприклад, обрати правильний час для сівби насіння, визначити набір культур, вибір гібридного насіння для отримання більшого врожаю тощо. Розглянуті системи штучного інтелекту можуть допомогати покращити загальну якість отриманого врожаю. Крім того, розробка автоматизованих механічних систем, які використовують комп'ютерний зір і штучний інтелект, дасть можливість здійснювати контроль бур'янів шляхом розпилювання різного типу гербіцидів [4-6]. При цьому інтелектуальні механізми зі штучним інтелектом можуть різко скоротити кількість хімічних речовин, що використовуються на полях, і таким чином покращити якість сільськогосподарської продукції та підвищити економічність [6].

Мотивація. Підвищення ефективності виконання різного виду сільськогосподарських робіт, покращення логістики вантажів, збереження навколишнього середовища підкреслюють нагальну потребу в розробці та впровадженні інноваційних технологічних рішень для розвитку технологічних можливостей [4, 5].

Більшість методів прогнозування поведінки динамічних систем базуються на використанні інформації про параметри математичних моделей та властивості середовища. Однак відсутність такої апіорної інформації призводить до неефективності використання традиційних параметричних методів, а часто й до їх непрацездатності. Крім того, наявність нестационарності, нелінійності та різних видів невизначеностей у моделей реальних систем призводить до неефективності використання традиційних

непараметричних методів. За цих умов найефективнішим підходом є використання сучасних методів обчислювального інтелекту, зокрема нейронних мережових методів.

Нейромережовий підхід до використання дронів залишається актуальним. Він надає можливість запобігти неідеальному людському фактору та впроваджувати сучасні технології. Інтелектуальне розпізнавання нейронною мережею об'єктів, що використовуються у сільськогосподарському виробництві, за допомогою таких пристроїв як дрони, може здійснюватися в автономному режимі без присутності людини, а це підвищує ефективність [6].

Існують такі типи інформаційних технологій, що використовуються в сільському господарстві: технології точного сільського господарства; технології прогнозування врожайності сільськогосподарських культур та проведення моніторингу стану полів у режимі реального часу; обробка полів проти шкідників та бур'янів БПЛА; інформаційні технології прийняття управлінських рішень у сільському господарстві [5].

У сучасному світі, де інформаційні технології розвиваються надзвичайними темпами, важливи питанням сучасності є розробка рішень по застосуванні ефективних методів виявлення та прогнозування траєкторій БПЛА, які можна використовувати для різних цілей у сільськогосподарському виробництві [6].

Постановка проблеми. В наш час існують різні методи прогнозування траєкторії руху залежно від типу траєкторії руху об'єктів. При цьому виникають декілька проблем, таких як точність прогнозування, де прості моделі погано працюють, якщо навколо багато різнотипних об'єктів. Другою проблемою є відсутність пояснення, де нейронні мережі прогнозують зміну траєкторії, але невідомо, чому вона змінилася. Найбільш сучасні методи прогнозування траєкторії руху у натовпі базуються на моделі, що поєднує фізику процесу та нейронні мережі. Відповідно цього завжди розглядаються три сили: рух до пункту призначення, намагання уникнення зіткнення з іншими перешкодами, а також намагання не зіткнутися з рухаючимися людьми та іншими перешкодами, такими як транспортні засоби тощо [6-8].

Модель навчається на даних, коли люди прискорюються, сповільнюються або опиняються в неприємних ситуаціях, рухаються в неправильному напрямку та змушені змінити пункт призначення. Це робить рухи більш реалістичними та природними, наближаючись до поведінки людей. Було протестувано запропонований метод на реальних траєкторіях та порівняно його продуктивність з існуючими моделями навчання. Модель краще прогнозувала рухи та краще працювала в складних сценах та мала менше зіткнень. Поєднання фізики та нейронних мереж дає кращі результати для людей та потенційно для безпілотних літальних апаратів. Метод Social-NCE дозволяє навчити модель розпізнавати безпечні траєкторії від потенційно небезпечних траєкторій, які можуть спричинити зіткнення, генеруючи негативні вибірки на основі близькості інших об'єктів. Останнім часом безмодельні методи, засновані на глибокому навчанні, демонструють високу точність прогнозування [7-9].

Траєкторія руху неживих об'єктів підпорядковується законам фізики і часто може бути виведена за допомогою формул і рівнянь. Таким чином, виявлення іноді легше передбачити навіть вручну. Наприклад, у дослідженні [7] автори запропонували модель, яка поєднує вдосконалену LSTM, що прогнозує наступну точку траєкторії на основі історії руху та фіксує залежності між кроками в часі. Використовуючи фільтр Калмана визначили, алгоритм LSTM-KF дає хороший ефект. Однак цей підхід не враховує динамічні та екологічні фактори, наприклад, погодні умови, що знижує точність і обмежує застосування в режимі реального часу [7, 8].

Ці методи ефективні у середовищі, в якому були розроблені. Однак вони не реалізуються в повітряних середовищах, і немає достатньо даних для аналізу та висновків за допомогою конкретного методу. У завданнях БПЛА дрони працюють у

тривимірному просторі (3D), де важливі висота, швидкість та кути огляду, і простого слідування траєкторії недостатньо [7, 8].

Ще один підхід до прогнозування траєкторії руху транспортних засобів зосереджений на моделюванні потенційних майбутніх взаємодій між об'єктами. Соціальна LSTM застосовує мережі довгої короткочасної пам'яті (LSTM) для моделювання соціальних взаємодій та навчання на часових даних. LSTM також широко використовується для прогнозування траєкторій руху неживих об'єктів. Інші досліджували рух транспортних засобів і спостерігали, що невизначеність прогнозування виникає через взаємодію з навколишніми об'єктами, коли транспортні засоби змінюють свій маршрут. На основі цього було розглянуто модель з модулем майбутніх відносин (FRM), який оцінює ймовірність того, що транспортні засоби займають сусідні смуги руху та взаємодіють. Модуль обчислює розподіли ймовірностей на рівні смуг руху та потенційні зони взаємодії, використовуючи розподіли графових згорткових мереж (GCN) та гаусової суміші (GM) для моделювання взаємодій, таких як керування поточними дорожніми умовами та демонстрація різних моделей поведінки. Траєкторії можуть змінюватися через взаємодію з навколишніми об'єктами [7, 8].

Предметом дослідження є сучасний підхід з використанням нейронної мережі навчання, спеціально розробленої для прогнозування траєкторії польоту безпілотної літального апарату (БПЛА) [5-8].

Метою роботи є підвищення точності та ефективності прогнозування траєкторії польоту БПЛА в сільськогосподарському виробництві шляхом розробки моделі прогнозування траєкторії польоту на основі нейромережових технологій.

Для отримання очікуваних результатів було використано штучно створений набір даних, що включає анімації, зокрема моделі дронів, а також різні типи фонів та житлових комплексів для урізноманітнення набору даних. Ці анімації були створені за допомогою програми 3D-моделювання Blender, що дозволяє навчати модель в умовах, максимально наближених до реальності, без необхідності використання відеоматеріалів, а також дає можливість застосовувати реальні відео, на яких була протестована навчена нейронна мережа [6-8].

Архітектура нейронної мережі включає блоки довготривалої короткочасної пам'яті (LSTM), які вміють обробляти послідовні дані, що робить їх ідеальними для прогнозування динамічних траєкторій руху БПЛА. Процес навчання включав кілька етапів, починаючи з попереднього навчання, а потім налаштування на специфічні для БПЛА рухи та траєкторії [7-9].

У цій роботі описано розробку та реалізацію моделі, побудовану з використанням нейромережового підходу до навчання для прогнозування траєкторії польоту з використанням RCNN навчання та прогнозних LSTM. Основну концепцію цих кроків можна описати наступним чином:

- Дослідження було розділено на роботу з нейронною мережею розпізнавання RCNN, створення набору даних для неї, пошук рідкісних знімків з БПЛА за різних умов та використання програмного забезпечення для створення штучного набору даних з метою розширення та диверсифікації обсягу даних, на яких навчається нейронна мережа.

- При проектуванні розрахункової траєкторії польоту БПЛА було використано нейронну мережу LSTM. Для цього було знайдено матеріали, зокрема відео польоту потрібного об'єкта на тестових базах. Для урізноманітнення даних у програмному забезпеченні було отримано правдоподібні відео, які навчали нейронну мережу краще прогнозувати траєкторію польоту БПЛА. Перелік категорій навчання: розробка набору фото-відео матеріалу для навчання та перевірки; доповнення наборів показників; розробка моделі нейронної мережі; розробка моделі LSTM для прогнозування траєкторій

польоту; використання набору відео–фотоматеріалів для навчання та перевірки з метою розпізнавання та створення траєкторій [7-9].

Навчання нейронної мережі – багатоетапний процес, у якому використовувалися як штучно згенеровані анімації, так і реальні кадри для забезпечення моделі різноманітним набором даних, створених за допомогою Blender, складного програмного забезпечення для 3D-моделювання та анімації. Цей інструмент надав нам можливість контролювати такі змінні навколишнього середовища як умови освітлення, фон і траєкторії польоту моделей дронів з високою точністю.

За допомогою Blender моделювались різні погодні умови: від яскравого сонячного світла до похмурого неба, від туманних ранків до дощових вечорів. Текстури та кольори фонового середовища можна змінювати, щоб відображати різні ландшафти, такі як нерівна місцевість та відкриті поля [7, 9].

Наприклад, основні показники можна представити так:

- масштабні перетворення відображаються за допомогою таких даних, де S – матриця масштабування, застосована до координат зображення (x, y) ; S_x та S_y – масштабні коефіцієнти в горизонтальному та вертикальному напрямках, відповідно; x', y' – нові координати після масштабування;

- перетворення обертання включає поворот зображення на кут, який описується матрицею обертання R ;

- системи частинок Blender можна використовувати для моделювання факторів навколишнього середовища, таких як дощ, сніг або пил, і які можуть впливати на видимість дрона. Рух цих частинок можна описати законами руху Ньютона, де складовими є F – сила, що застосовується до частинок; m – маса частинок; a – прискорення; V – швидкість; x – положення; Δt – зміна часу;

- що стосується освітлення (E), Blender дозволяє динамічно налаштувати освітлення, яке може суттєво вплинути на зовнішній вигляд дрона в анімації. Змінюючи інтенсивність, колір та положення джерел світла, можна відтворити різний час доби, погодні умови та ефекти тіней [7]. Ці умови освітлення можна описати такими параметрами як інтенсивність світла I , кут падіння θ та відстань від джерела світла d , які впливають на освітленість об'єкта відповідно до закону обернених квадратів;

- крім того, освітлення та ефекти навколишнього середовища, такі як тіні та відблиски на корпусі дрона, також були ретельно налаштовані для імітації різного часу доби та погодних умов. Складовими дослідження були: λ – довжина хвилі світла; t – час; $L_0(x, \omega, \lambda, t)$ – яскравість вихідного світла з довжиною хвилі λ у точці x та момент часу t , у напрямку ω ; $L_e(x, \omega, \lambda, t)$ – яскравість випромінюваного світла; $\int_{\Omega} \dots d\omega'$ інтеграл по півсфері вхідних напрямків; $f_r(x, \omega', \omega, \lambda, t)$ – двонаправлена функція розподілу відбиття (BRDF), що визначає частку світла з довжиною хвилі λ у момент часу t від напрямку ω' , яке відбивається в напрямку ω у точці x ; $L_i(x, \omega', \lambda, t)$ – яскравість вхідного світла з довжиною хвилі λ від напрямку ω' у момент часу t , $-\omega' * n$ – поглинання вхідного значення заданим кутом [8-10].

Blender також дозволяє моделювати зіткнення та взаємодії між дроном та іншими об'єктами, які можна прогнозувати за допомогою принципів динаміки твердого тіла. Ці взаємодії можуть змінювати траєкторію польоту дрона настільки, що нейронна мережа повинна навчитися розуміти весь спектр потенційної поведінки в реальному світі.

Ці перетворення значно посилюють здатність моделі розпізнавати об'єкти з різних ракурсів та за умов освітлення, які точно імітують мінливість у природних умовах. Завдяки включенню низки доповнених даних нейронна мережа може отримати доступ до ширшого спектру досвіду, тим самим покращуючи її здатність узагальнювати дані від навчальних до реальних застосувань.

Включення цих методів у навчання передбачає випадкове застосування серії перетворень до кожного зображення в наборі даних, перш ніж воно буде передано в нейронну мережу. Це гарантує, що мережа рідко бачить одне й те саме зображення двічі, це зменшує час перенавчання та сприяє розвитку більш загального розуміння ознак, пов'язаних з важливими об'єктами. Зрештою, доповнення даних сприяє створенню більш універсальної та адаптивної моделі, яка може забезпечити надійну продуктивність за різних умов навколишнього середовища та варіацій зовнішнього вигляду об'єктів. Цей процес навчання є фундаментальним для розробки сучасних нейронних мереж, які ефективно функціонуватимуть у динамічних та непередбачуваних реальних сценаріях [8, 9].

Blender створив багато синтетичних сценаріїв з точним контролем над кожним аспектом анімації, що дозволяє моделювати реальні складнощі у віртуальному середовищі. У прагненні до вдосконалення можливостей нейронної мережі для розпізнавання дронів та прогнозування траєкторії було створено детальну анімацію дрона. Високореалістичні та різноманітні схеми польоту слугували навчальним майданчиком для нейронної мережі. У Blender рух дрона анімується за допомогою інтерполяції ключових кадрів, яка визначає початкову та кінцеву точки послідовності рухів, а Blender обчислює проміжні кадри. Для складних маневрів криву анімації можна математично описати за допомогою серії контрольних точок, що утворюють сплайн, зазвичай, сплайн Без'є у 3D-просторі (1):

$$B(t) = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} (1-t)^{n-1} t^i P_i, t \in [0,1], \quad (1)$$

де $B(t)$ – положення дрона на кривій Без'є в момент часу t ;
 P_i – контрольні точки; $\binom{n}{i}$ – біноміальні коефіцієнти.

Ця формула забезпечує плавні переходи між ключовими кадрами та реалістичні траєкторії руху.

Архітектури нейронних мереж. Для цього дослідження було обрано архітектуру, яка могла б забезпечити виявлення об'єктів у відеоматеріалах. Це вимагає високоточних можливостей розпізнавання. Серед різних розглянутих варіантів особливу удагу було приділено архітектурі згорткової нейронної мережі, відомій як RCNN (Region-based Convolutional Neural Networks -згорткової нейронної мережі на базі регіонів). Її було обрано за здатність точно розмежовувати та класифікувати об'єкти на зображеннях та відео. RCNN ефективні у виявленні візуальних шаблонів та структур на зображеннях завдяки своїй здатності до локального сприйняття та ієрархічної обробки інформації. Вони найкраще підходять для обробки статичних зображень та відеоконтакту.

RCNN застосовуються до відео шляхом обробки кожного кадру як окремого зображення, бо вони не враховують часові залежності між послідовними кадрами. Оскільки дослідження не вимагало врахування швидкості об'єктів, відео можна було розділити на окремі кадри. Зрештою, для досягнення цілей була обрана гібридна модель, що поєднує згорткові шари інтелектуальних інформаційних технологій для ефективного сприйняття візуальних шаблонів у кадрах та шари на основі механізмів уваги для обробки часових залежностей у послідовності кадрів. Цей підхід враховує як просторові, так і часові аспекти відеопотоку, забезпечуючи високу точність виявлення об'єктів та прогнозування траєкторії [11].

Дизайн гібридної моделі стратегічно використовує сильні сторони RCNN, компенсуючи водночас їхні обмеження. Завдяки інтеграції механізмів уваги модель отримує здатність відстежувати об'єкти в різних кадрах, що є критично важливим для захоплення руху та прогнозування майбутнього розташування. Такий подвійний фокус

як на безпосередніх візуальних деталях, так і на ширшому часовому контексті створює надійну основу для розуміння та інтерпретації динамічних сцен. Універсальність гібридної моделі робить її потужним інструментом для широкого спектру застосувань, від автоматизованих систем спостереження до передових систем допомоги водієві (ADAS) у транспортних засобах, де точне відстеження об'єктів навколо транспортного засобу може бути життєво важливим для безпеки та навігації.

Як підсумок, цей складний підхід до аналізу відео використовує найновіші досягнення в технології нейронних мереж, тим самим встановлює новий стандарт для точного та ефективного виявлення об'єктів та прогнозування траєкторії. Потенціал цієї технології у новому погляді на те, як ми взаємодіємо з візуальними даними та аналізуємо їх [9-11].

Після того, як модель LSTM згенерувала прогнози для наступного часового кроку, ці прогнози порівнювалися з наземними просторовими координатами дрона. Розбіжності між прогнозованими та фактичними позиціями надають зворотний зв'язок моделі, який використовується для оновлення її параметрів під час процесу навчання. Шляхом ітеративного коригування параметрів на основі цього зворотного зв'язку, LSTM поступово покращувала свою прогностичну точність з часом. Процес навчання та вдосконалення має вирішальне значення для забезпечення того, щоб LSTM ефективно вивчала динаміку рухів дрона та могла робити точні прогнози навіть у складних та непередбачуваних сценаріях. Крім того, здатність LSTM обробляти послідовні дані робить її добре придатною для моделювання динамічних систем, таких як траєкторія дрона, де минулі спостереження суттєво впливають на майбутню поведінку [9-11].

Процес навчання. Процес навчання нейронної мережі можна описати наступною формулою, яка характеризує оновлення ваг мережі на кожному кроці навчання:

$$W_{t+1} = W_t - \alpha * \nabla L(W_t), \quad (2)$$

де W_t – вага моделі на t кроці;
 α – швидкість навчання;
 $\nabla L(W_t)$ – градієнт функції відносно ваги на t кроці.

Навчання проводилося з використанням методу зворотного поширення помилки, що сприяло ефективному налаштуванню вагових коефіцієнтів мережі для мінімізації помилок розпізнавання та прогнозування. Зворотне поширення помилки є основним алгоритмом навчання нейронної мережі, який особливо добре підходить для вирішення складних завдань, що передбачають високий рівень обчислювальної складності, таких як прогнозування траєкторій об'єктів у відеопотоках.

Під час зворотного поширення, після прямого проходу через мережу, де вхідні дані обробляються шар за шаром для отримання вихідного сигналу, обчислюється похибка. Ця похибка є різницею між прогнозованим і фактичним бажаним вихідним сигналом. Алгоритм зворотного поширення потім переходить до обчислення градієнта похибки відносно кожної ваги за правилом ланцюга, поширюючи похибку назад від вихідного шару до вхідного шару. Такий систематичний підхід дозволяє ідентифікувати та виправляти внесок кожної ваги в загальну похибку [8, 9].

Рівняння (2) є фундаментальним компонентом алгоритму зворотного поширення, де W_{t+1} – це оновлені ваги після виконання кроку, керованого градієнтом функції втрат, а α – скаляр, який контролює розмір кроку, відомий як швидкість навчання. Швидкість навчання є критичним гіперпараметром у навчанні нейронних мереж, оскільки вона визначає, наскільки ваги коригуються під час кожного оновлення. Якщо швидкість навчання занадто велика, мережа може перевищити мінімум функції втрат, що призводить до дивергентної поведінки. І навпаки, якщо швидкість навчання занадто

мала, процес навчання може стати надмірно повільним і застрягти в локальних мінімумах.

Гradient $\nabla L(W_t)$ визначає напрямок, у якому функція втрат зростає найшвидше. Тому, щоб мінімізувати втрати, ми рухаємося в протилежному напрямку, тобто віднімаємо gradient від поточних вагових коефіцієнтів. Цей процес повторюється ітеративно протягом багатьох епох або ітерацій, причому кожне оновлення спрямоване на зменшення функції втрат, доки алгоритм не збіжиться до мінімуму, в ідеалі до глобального мінімуму [10, 11].

Крім того, розширюючи цю концепцію, можна ввести інші варіації алгоритму gradientного спуску для покращення процесу навчання. Наприклад, методи на основі імпульсу, такі як SGD з імпульсом можуть допомогти прискорити gradientні вектори в правильному напрямку, тим самим призводячи до швидшої збіжності [10]:

$$V_{t+1} = \beta * V_t + \nabla L(W_t), \quad (3)$$

$$W_{t+1} = W_t - \alpha * V_{t+1}. \quad (4)$$

де V – це швидкість (тобто, накопичений gradient);
 β – коефіцієнт імпульсу, зазвичай приймають у діапазоні від 0,9 до 0,99.

Коефіцієнт імпульсу допомагає згладити оновлення, а також допомагає для більш ефективного управління. Крім імпульсу, такі алгоритми, як RMSprop та Adam вводять адаптивні швидкості навчання для кожного параметра:

$$S_{t+1} = \delta * S_t + (1 - \delta) * (\nabla L(W_t))^2, \quad (5)$$

$$W_{t+1} = W_t - \frac{\alpha}{\sqrt{S_{t+1} + \epsilon}} * \nabla L(W_t). \quad (6)$$

У правилі оновлення RMSprop S_t – це ковзне середнє квадратів gradientів, δ – коефіцієнт спаду, а ϵ – малий скаляр, доданий до знаменника, щоб уникнути ділення на нуль. Цей адаптивний механізм допомагає зменшити gradient ваг, які отримують великі оновлення, що призводить до більш стабільного та ефективного навчання [8-10].

Ретельно розроблені анімаційні дані були створені в Blender та використані для навчання моделі розпізнавати та прогнозувати поведінку дрона під час польоту. Згорткові шари вміло витягують ознаки із зображень та є важливими для інтерпретації візуальної інформації дрона на різних фонах та в умовах освітлення [7, 9]. Операцію згортки в цих шарах можна представити так:

$$(f * g)(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)g(t - \tau)d\tau, \quad (7)$$

де f – функція зображення, g – функція ядра, а $*$ позначає операцію згортки.

Нейронну мережу було навчено за допомогою зворотного поширення помилки, з коригуванням вагових коефіцієнтів для мінімізації похибки між прогнозованим та фактичним положеннями дронів. Як функція втрат могла бути використана середньоквадратична помилка (MSE), яка є стандартною для задач регресії (8):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (8)$$

де y_i – істинне значення (фактичне положення кадру дрона),
 $\hat{y}_i$ – значення, передбачене мережею,
 n – кількість вибірок.

Шляхом ітерації протягом численних епох мережа оптимізує свої ваги, щоб зменшити цю втрату, ефективно навчаючись прогнозувати траєкторію руху дрона на основі анімованих даних. Цей метод не лише забезпечив безпечний та контрольований спосіб генерування навчальних даних, але й дозволив включити сценарії, які можуть бути рідкісними або важкими для захоплення в реальних кадрах, тим самим покращуючи експозицію та досвід нейронної мережі.

Завдяки використанню цих передових методів оптимізації навчання нейронних мереж стає надійнішим та ефективнішим, що дозволяє розробляти складні моделі, вони можуть виконувати широкий спектр завдань від простої класифікації до складних прогнозів траєкторій у динамічних середовищах.

Крім того, цей підхід сприяє постійному вдосконаленню та адаптації, гарантуючи, що нейронна мережа залишається стійкою та адаптивною до змінюваних викликів та середовищ [9-11].

Результати. Модель RCNN була навчена розпізнаванню за допомогою багатоетапного процесу. Спочатку було зібрано значний набір даних, що містить зображення з позначеними екземплярами дронів, де відображено як фактичні відеозаписи свідків, так і зображення зроблені в Blender. Ці зображення потім були використані для попереднього навчання моделі на загальних візуальних ознаках за допомогою таких методів, як навчання з викладачем за допомогою згорткових нейронних мереж (CNN). Під час навчання модель навчилася розрізняти різні об'єкти, включаючи дрон, шляхом ітеративного налаштування своїх параметрів для мінімізації зазделегідь визначеної функції втрат. Продуктивність навченої моделі RCNN оцінювалася за допомогою окремих наборів даних ваалідації та вимірювання таких показників, як точність, повнота та середня точність (mAP) на різних зображеннях. Відповідно ітеративного процесу навчання модель RCNN досягла високої точності розпізнавання дронів на зображеннях, демонструючи свою ефективність у реальних застосуваннях [7-9].

З метою підвищення точності моделі для об'єктів різних масштабів та розмірів може знадобитися точне налаштування. Більш точні параметри результатів представлені в таблиці 1.

Для розрахунку середньої точності (mAP) та середньої повноти (mAR) усереднили значення AP та AR по всіх класах та областях зображення.

Спочатку усереднимо значення AP по всіх класах та областях зображення наступним чином:

$$mAP = \frac{(77 + 65 + 82 + 45 + 71 + 73)}{6} = 68,5$$

Тепер усереднимо значення AR по всіх класах та областях зображення:

$$mAR = \frac{(65 + 69 + 78 + 40 + 71 + 78)}{6} = 66,83$$

Таким чином, середня точність (mAP) становить приблизно 68,5, а середня повнота (mAR) – приблизно 66,83.

Прогнозування траєкторії руху. Траєкторія руху прогнозується на основі даних про траєкторію, наданих усіма дронами. Вважається, що кожна сцена проходить попередню обробку, що дає просторові координати для кожного i -го об'єкта в момент часу t [9].

Таблиця 1

Виміри для оцінки якості моделі

Виміри	IoU розписка	Максимальне виявлення	Площа	Значення, %
Середня точність (AP)	0,50:0,95	100	всі	77
Середня точність (AP)	0,50	100	всі	65
Середня точність (AP)	0,75	100	всі	82
Середня точність (AP)	0,5:0,95	100	мала	45
Середня точність (AP)	0,5:0,95	100	середня	71
Середня точність (AP)	0,5:0,95	100	велика	73
Середня відгук (AR)	0,5:0,95	1	всі	65
Середня відгук (AR)	0,5:0,95	10	всі	69
Середня відгук (AR)	0,5:0,95	100	всі	78
Середня відгук (AR)	0,5:0,95	100	мала	40
Середня відгук (AR)	0,5:0,95	100	середня	71
Середня відгук (AR)	0,5:0,95	100	велика	78

Попередньо оброблена інформація отримується із зображень, які представлені в обмежувальних рамках, що охоплюють відповідні об'єкти дослідження. Вхідні дані містять вектор координат $\{x_t, y_t\}$, який дає уявлення про мінімальну та максимальну просторову протяжність об'єктів дослідження в момент часу t .

Ми можемо обчислити похибку прогнозування, яка є відстанню між прогнозованим місцем розташування та фактичним місцем розташування у момент часу $t-s$ у майбутньому. Цей крок попередньої обробки є важливим, оскільки він дозволяє нам ізолювати та витягувати відповідні об'єкти зі сцени, тим самим забезпечуючи подальший аналіз та прогнозування траєкторій руху. Отримуючи просторові координати кожного розглянутого об'єкта в різні моменти часу, можна спостерігати за їх рухами з часом та робити висновки про потенційні закономірності поведінки [9-11].

Аналізуючи зміни траєкторії руху БПЛА можна відмітити, що модель старанно намагається передбачити майбутні траєкторії з достатньою точністю. Тим не менш, спостерігалися помилки в продуктивності, оскільки моделі бракувало точного налаштування. Можна відмітити, що прямі маршрути демонстрували вищу точність. І навпаки, відхилення або повороти траєкторій іноді можуть створювати проблеми, що призводить до збільшення помилок виявлення у моделі [9].

Для тривалості траєкторії від 1 до 5 с ми отримали різноманітні дані для різних типів траєкторій (табл. 2). Це дозволяє нам оцінити точність прогнозування руху в різні часові інтервали. Найнижча середня похибка спостерігалася для повільного руху як на коротких, так і на довгих траєкторіях. Ці результати свідчать про те, що складність прогнозування траєкторії безпосередньо пов'язана з типом та тривалістю руху [9, 10].

Таблиця 2

Середня похибка різних типів маршрутів

Тип маршрута	Средня похибка, %	Тривалість, с
Прямий шлях	12,5	1
Прямий шлях	9,7	5
Поворот	36,2	1
Поворот	28,9	5
Повільний рух	10,6	1
Повільний рух	6,4	5

Результати, представлені в цьому дослідженні, демонструють високу ефективність використання гібридної архітектури RCNN+LSTM для виявлення та прогнозування траєкторій безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Запропонований підхід базується на застосуванні згорткової нейронної мережі на основі областей (RCNN) для точного розпізнавання об'єктів у відеокдрах та мережі довгострокової короткострокової пам'яті (LSTM) для захоплення часових залежностей та створення прогнозів щодо майбутніх позицій дронів. Цей комбінований метод забезпечує надійну точність виявлення та досить точне короткострокове прогнозування траєкторії протягом кількох секунд. Складність полягає у нерегулярному та криволінійному русі досліджуваного об'єкта.

Запропонований метод включає інтеграцію детектора на основі CNN з предиктором часових рядів LSTM та використання синтетичного набору даних, створеного в Blender, для охоплення широкого спектру сценаріїв польоту, освітлення та погодних умов. Реальні відеодані, хоча й обмежені, забезпечили додаткову перевірку, підтвердивши, що частина RCNN підтримує високу продуктивність виявлення (таблиця 1) і що модуль LSTM правильно оцінює рух дрона, включаючи зміни напрямку (таблиця 2) [9].

Аналіз (таблиця 1) показує, що модель має збалансований коефіцієнт повноти та точності $mAP \approx 68,5\%$ та $mAR \approx 66,83\%$, незважаючи на те, що точність виявлення знижується, коли дрон займає дуже мало пікселів на зображенні (дрібномасштабні об'єкти). Таблиця 2 показує, що найменші середні помилки (близько 6,4–10,6%) були отримані на траєкторіях польоту в повільному русі, тоді як повороти призводять до вищих помилок прогнозування до 28,9–36,2%. Це свідчить про загальну проблему для рекурентних підходів: стаціонарний рух передбачається достатньо точним, тоді як раптовий поворот призводить до більшої розбіжності між прогнозованими та реальними траєкторіями. Отримані результати показують, що точність виявлення крихтих або віддалених об'єктів знижується, це вказує на необхідність покращення оптики або додаткового точного налаштування [9].

На практиці ці результати можуть бути застосовані для автоматизованого відстеження БПЛА, створення безпечних повітряних маршрутів та систем безпеки в режимі реального часу над об'єктами сільськогосподарського виробництва.

Висновки. У роботі наведено аналіз сфери застосування БПЛА в сільському господарстві. Наукова новизна отриманих результатів полягає в розробці та навчанні моделей, побудованих на застосуванні нейромережевого підходу, щодо прогнозування траєкторії польоту БПЛА і сприяє підвищенню точності прогнозування траєкторії БПЛА для підвищення ефективності сільськогосподарського виробництва.

Покращення функціональності запропонованої моделі здійснювалось шляхом розширення її можливостей від розпізнавання об'єктів на відео та зображеннях до аналізу даних Google Earth. У дослідженні використовувалася гібридна модель, що поєднує згорткові нейронні мережі на основі регіонів (RCNN) та мережі довгої короткочасної пам'яті (LSTM). RCNN використовувалися для точного виявлення об'єктів в окремих кадрах, тоді як мережі LSTM фіксували часові залежності та прогнозували траєкторії об'єктів між кадрами. Запропонований підхід дозволяє моделі точно відстежувати об'єкти та прогнозувати їхній рух у динамічних сценах. Шляхом ітеративного налаштування параметрів на основі зворотного зв'язку від прогнозованих та фактичних положень, модель з часом покращувала точність прогнозування.

Результати дослідження показують, що нейронна мережа досягла високої точності в прогнозуванні траєкторії, причому модель показала кращу продуктивність у реальних сценаріях порівняно з традиційними методами. Інтеграція LSTM дозволила ефективно навчатися мережі та узагальнювати часові показники, фіксуючи складні рухи

та ефективну взаємодію з навколишнім середовищем. Це дослідження демонструє можливість використання нейромережевого підходу і для прогнозування траєкторії БПЛА, але дає потенційну можливість застосування цих рішень у сфері агробізнесу чи логістики [9, 10].

Список використаних джерел

1. Гарафонов О., Маргасова В. Перспективи впровадження інноваційних технологій розвитку агропромислового комплексу України. *Socio-economic relations in the digital society*. 2022. № 3 (45). С. 19–28. DOI: <https://doi.org/10.55643/ser.3.45.2022.475>.
2. Information and Communication Technology (ICT) in Agriculture: A Report to the G20 Agricultural Deputies. Rome: FAO, 2017. 57 p.
3. Болтянська Н.І., Маніта І.Ю., Подашевська О. Проблеми і перспективи розвитку інформаційних технологій в сільському господарстві. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*. 2020. Т. 20. № 4. С. 175–185. DOI: 10.31388/2078-0877-2020-20-4-175-185.
4. Апунович І.П. Штучний інтелект як рушій змін у сучасному сільському господарстві. «Агробіологія», 2024. № 2. С. 6-13.
5. AgroDSS: A decision support system for agriculture and farming / M. Kukar et al. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. 161 p., P. 260-271.
6. Kumari, S., Venkatesh, V.G., Tan, F.T.C. (2023). Application of machine learning and artificial intelligence on agriculture supply chain: a comprehensive review and future research directions. *Ann Oper Res*. DOI: 10.1007/s10479-023-05556-3
7. Yue, J., Manocha, D., & Wang, H. Human trajectory prediction via neural social physics. *Computer Vision – ECCV 2022. ECCV 2022. Lecture Notes in Computer Science*, 2022, vol. 13694. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-19830-4_22.
8. Liu, Y., Yan, Q., & Alahi, A. Social NCE: Contrastive learning of socially-aware motion representations. *IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2021, pp. 15118-15129. DOI: 10.48550/arXiv.2012.11717.
9. Bezsonov, O., Liashenko, S., Rudenko, O., Rutska, S., & Vashchenko, K, (2025) Using a deep learning network to predict flight path. *Radioelectronic and Computer Systems*, 2025(1), 71-84. doi: <https://doi.org/10.32620/reks.2025.1.5>
10. Qin, W., Tang, J., Lu, C., & Lao, S. Trajectory prediction based on long short-term memory network and Kalman filter using hurricanes as an example. *Computational Geosciences*, 2021, vol. 25, pp. 1005-1023. DOI: 10.1007/s10596-021-10037-2.
11. An, Y., Liu, A., Liu, H., & Geng, L. Multidimensional trajectory prediction of UAV swarms based on dynamic graph neural network. *IEEE access*, 2024, vol. 12, pp. 57033-57042. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3391374.

Цимбалюк Ю.І.,
Цимбалюк І.Ю.,
Національний
лісотехнічний університет
України,
м. Львів, Україна
E-mail:
yu.tsymbalyuk@nltu.edu.ua
ihortsymbaliuk@nltu.edu.ua

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТРЕЛЮВАННЯ ДЕРЕВИНИ ПІД НАМЕТОМ ЛІСОВОГО НАСАДЖЕННЯ

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-27-80>

УДК 630*375:[514.85+629.3.012]

Цимбалюк Ю.І., Цимбалюк І.Ю. *Моделювання процесу трелювання деревини під наметом лісового насаджень*

Анотація. У дослідженні розглядається питання трелювання деревини із застосуванням малогабаритних механізованих трелювальних засобів на ділянках лісового насаджень, створеного штучним шляхом за відомою схемою розміщення дерев в ньому. За основу взято умови рівномірно поступових рубок або аналогічних до них, коли трелювання деревини необхідно виконувати між деревами, які залишаються на площі. Метою дослідження є створення моделі штучного лісового насаджень та математичної моделі кінематики трелювальної системи в ньому і розроблення на їх основі симуляційної комп'ютерної моделі переміщення трелювальної системи в насадженні.

Основою реалізації мети дослідження є математичне моделювання, що ґрунтується на основних законах теоретичної механіки та фізики. При цьому враховано та відображено технічні можливості малогабаритного трелювального засобу, фізичні властивості предмету праці та спосіб його закріплення на трелювальному засобі. Враховано основні ознаки середовища роботи трелювальної системи, що впливатимуть на її кінематику та габаритні розміри.

Результатом виконаного дослідження є модель штучного лісового насаджень, математична модель кінематики малогабаритної трелювальної системи з описом часткових випадків її чисельна реалізація та комп'ютерна модель симуляції переміщення трелювальної системи в насадженні.

Ключові слова: круглий лісоматеріал, кінематика, трелювальна система, штучно створене лісове насаджень, моделювання, малогабаритний механізований трелювальний засіб.

Tsymbalyuk Yu.I., Tsymbalyuk I.Yu. *Modeling the process of skidding wood under the canopy of a forest plantation*

Abstract. The study examines the issue of skidding wood using small-sized mechanized skidding tools in areas of a forest plantation created artificially according to a known scheme for placing trees in it. The basis is the conditions of evenly gradual felling or similar to them, when skidding wood must be performed between the trees that remain on the area. The purpose of the study is to create a model of an artificial forest plantation and a mathematical model of the kinematics of the skidding system in it and to develop a simulation computer model of the skidding system movement in the plantation on their basis.

The basis for implementing the study goal is mathematical modeling, which is based on the basic laws of theoretical mechanics and physics. At the same time, the technical capabilities

of a small-sized skidding tool, the physical properties of the object of work and the method of its fixation on the skidding tool are taken into account and reflected. The main features of the skidding system's operating environment that will affect its kinematics and overall dimensions are taken into account.

The result of the research is a model of an artificial forest stand, a mathematical model of the kinematics of a small-sized skidding system with a description of partial cases, its numerical implementation, and a computer model for simulating the movement of the skidding system in the stand.

Keywords: round timber, kinematics, skidding system, artificially created forest stand, modeling, small-sized mechanized skidding device.

Постановка проблеми

Під час трелювання деревини на площі із залишеними на ній деревами, кінематика трелювальної системи зводиться до об'їзду перешкод на шляху вибраного напрямку руху. При цьому слід уникати будь-якого контакту трелювальної системи із деревом для уникнення його механічного пошкодження. Встановлення взаємозв'язку між властивостями середовища та габаритними розмірами трелювальної системи є одним із шляхів зменшення кількості пошкоджених дерев.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

В структурі основних лісосічних робіт, операція трелювання вважається найбільш складною і ресурсовитратною. Одночасно і екологічність виконання лісогосподарських заходів у вигляді рубок, також в основному залежить від наслідків трелювання деревини, а вони є різносторонніми і мають зазвичай довготривалий негативний ефект.

Зокрема, застосування важкої техніки, проявляється суттєвим ущільненням ґрунту [1]. Авторами статті був виконаний матаналіз з метою кількісної оцінки впливу ущільнення ґрунту на ріст, приріст по діаметру та виживання саджанців. Встановлено, що негативні наслідки проявляються більше на важких ґрунтах в порівнянні із піщаними.

Одним із напрямків зменшення ущільнення ґрунту під час трелювання деревини є використання легкої техніки [2]. В своїй роботі, автори статті виконували дослідження роботи міні трелювальника на гумових шинах з метою оцінки його робочого часу, енерговитрат, продуктивності та продукування парникових газів. Авторами зазначається, що в контексті дрібномасштабного лісового господарства, така техніка є більш екологічною в плані витрат енергії та продукування парникових газів в порівнянні із сільськогосподарськими тракторами чи спеціалізованими трелювальними машинами і може успішно з ними конкурувати.

У науковій публікації [3], виконано порівняльне дослідження впливу двох типів рушіїв трелювальних машин на пористість ґрунту. В підсумку, авторами публікації підтверджується вища екологічність колісних рушіїв в порівнянні із гусеничними в плані ущільнення та зменшення пористості ґрунту, хоча наслідки, загалом, дуже подібні. При цьому звертається увага на те, що при цьому велике значення має вологість ґрунту, тому під час трелювання деревини, слід вибирати періоди коли вологість ґрунту буде мінімальною, щоб зменшити негативні наслідки.

Під час трелювання деревини на площі де є насадження певної повноти, завжди відбуваються механічні пошкодження дерев. У роботі [4] опубліковано результати дослідження залишкових пошкоджень дерев в насадженні після виконання рубки, а також ступінь порушення ґрунтової поверхні після трелювання деревини. Встановлено, що у випадку застосування гусеничної трелювальної техніки, пошкодження дерев на площі перевищує 20%, а порушення ґрунту становило 58+% при суцільній системі рубки і 42% під час прорідження насадження чи вибіркової рубки. При цьому, під час суцільної

системи рубки встановлено у п'ять разів більше пошкоджень ґрунту на глибину 5см і більше в порівнянні із рубками прорідження чи вибірковими. У підсумку встановлено, що під час проріджувальних чи вибіркових рубок, відбувається більше пошкоджень дерев, але менше руйнується ґрунт. Гусенична техніка, що працює в лісі, завдає більше руйнувань в порівнянні із колісною.

Наукове дослідження [5] присвячене рубкам прорідження в лісових насадженнях з метою оцінки впливу напівмеханізованих систем лісозаготівлі на дерева, фізичні характеристики ґрунту та природне відновлення лісу. Встановлено, що трелювальна техніка із лебідкою та канатно-блочним оснащенням дозволяє досягнути суттєвого зменшення пошкодження дерев та руйнування ґрунту, особливо якщо використовувати для трелювання вантажну каретку, що переміщується по натягнутому канату.

Сучасні цифрові технології дозволяють значно розширити дослідницькі можливості, зокрема шляхом створення та використання імітаційного моделювання. У науковій роботі [6], авторами використано імітаційне моделювання для дослідження взаємозв'язку між інтенсивністю рубки та пошкодженням дерев в процесі цього. Встановлено, що за низької інтенсивності, пошкодження дерев відбувається в основному, внаслідок будівництва трелювальних шляхів. Збільшення інтенсивності рубки призводить до збільшення відсотка вторинних пошкоджень дерев вздовж трелювальних шляхів. Автори стверджують, що зменшення площі вирубки і збільшення інтенсивності рубки призводить до зменшення негативних наслідків для лісу. Крім того, більша інтенсивність рубки дозволяє збільшити термін між прийомами рубки, що сприяє кращому відновленню лісу.

Все більше науковців схиляються до необхідності обмеження використання потужної, особливо гусеничної техніки в лісах. Цій тематиці присвячене дослідження [7], що стосується використання гусеничної техніки в гірських умовах. Автори пропонують замінювати гусеничні трелювальні машини на міні трелювальну техніку на колісному ході. Під час дослідження встановлено, що така заміна дала бажаний екологічний ефект, економічну перевагу та призвело до зростання безпеки праці. Вартість заготівлі 1м³ деревини вдалося знизити на 30...50%, а продуктивність трелювання при середній відстані 130м, зросла на 1,2м³.

Дослідження [9] стосується дрібномасштабного лісівництва, а його метою була оцінка впливу різних лісівничих методів на продуктивність та витрати під час виконання лісогосподарських рубок, а також створення моделі продуктивності типової системи машин на рубках прорідження. Для дослідження були використані три ділянки лісового насадження на яких виконувалися рубки впродовж тридцяти років з різною інтенсивністю прорідження. Розроблена модель визначення продуктивності системи машин, яка включає ручний механізований інструмент і колісний сільськогосподарський трактор, обладнаний лебідкою. Дослідження підтвердили економічну доцільність заготівлі деревної маси із дерев відносно невеликого діаметру, які забираються із насадження.

До теперішнього часу під час виконання рубок в лісових насадженнях, використовуються як механізовані трелювальні засоби, так і трелювання з використанням тварин, зокрема коней. В дослідженні [10], виконувалося порівняння екологічних показників внаслідок використання на трелюванні коней та колісних тракторів. Отримані результати свідчать про вищу екологічність процесу із застосуванням на трелюванні, особливо в плані сприяння природного відновлення лісу.

Огляд тематичних наукових публікацій, свідчить про не достатньо висвітлену проблему механічних пошкоджень дерев в насадженні під час роботи трелювальної системи. Зокрема, мало приділяється уваги кінематиці та взаємозв'язку габаритних

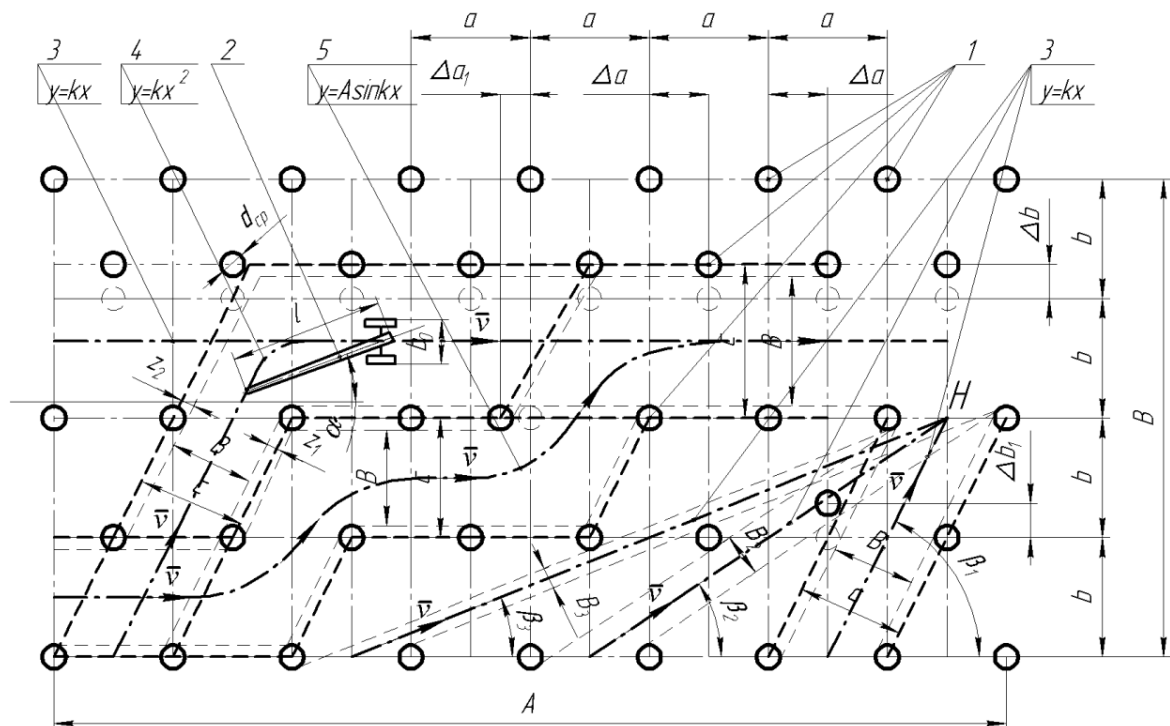
розмірів трелювальної системи із характерними параметрами лісового насадження, від яких значною мірою залежить частота контактів із деревами на смузі трелювання.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є обґрунтування умов безперешкодного переміщення малогабаритної трелювальної системи, що використовується в лісовому насадженні, яке характеризується відомою схемою розміщення дерев та розроблення комп'ютерної моделі симуляції процесу трелювання, що дозволить аналізувати та підбирати параметри трелювальної системи для конкретних лісоексплуатаційних умов.

Результати дослідження

Основою моделювання процесу трелювання деревини малогабаритними механізованими засобами є створення моделі середовища та узагальнений математичний опис кінематики трелювальної системи в ньому із врахуванням особливостей трелювального засобу, фізичних властивостей предмету праці та способу трелювання. Очевидно, що середовищем застосування трелювальних засобів є лісове насадження в якому реалізовується певний вид лісогосподарської рубки згідно прийнятої технології. Лісові насадження при цьому можуть бути як штучного так і природного походження, що мають суттєві відмінності, які важко відобразити в одній узагальненій моделі. Виходячи з цього та враховуючи тенденцію відтворення та формування лісів, яка ґрунтується на створенні лісових культур шляхом висаджування саджанців, за основу приймемо штучно створене лісове насадження (рис. 1).



1 – дерева в перерізі стовбура при основі; 2 – малогабаритна трелювальна система;
 3, 4, 5 – ймовірні траєкторії руху трелювальної системи

Рис. 1. Розрахункова модель ділянки штучно створеного лісового насадження

Найбільш важливою характеристикою насадження, є схема розподілу дерев по площі, яка під час штучного створення насадження є відомою і зберігається навіть після виконання вікових доглядових рубок. В рівних умовах, лісові насадження створюють в

основному шляхом висаджування саджанців головної породи рядами з певною віддалю між ними та встановленою відстанню в ряду. Створене таким способом насадження приймемо за базове для розроблення його моделі.

Таким чином, відстань між рядами дерев або ширину міжряддя, позначимо b (рис.1), а відстань між деревами в ряду – a . В силу різних чинників, зазвичай відстань між деревами в ряду відхиляються в ту чи іншу сторону від прийнятої в певному діапазоні. Це відхилення врахуємо в моделі насадження, позначивши як Δa_1 , а величину зміщення дерев у двох сусідніх рядах позначимо Δa . Аналогічним чином, окремі дерева можуть «випадати» з ряду, зміщуючись в сторону міжряддя на певну величину Δb_1 або може бути зміщення всього ряду, змінюючи ширину міжряддя на Δb . Вважатимемо, що на площі зростає чисте одновікове насадження, дерева якого при основі мають певний середній діаметр d_{cp} .

Ширину площі з якої виконується трелювання деревини, позначимо як B , а її довжину буквою A . З прив'язкою до прямокутної системи координат, координати розміщення будь-якого дерева можна виразити як:

$$\begin{cases} x_n = (n - 1) \cdot a \pm \Delta a \pm \Delta a_1; \\ y_n = (m - 1) \cdot b \pm \Delta b \pm \Delta b_1. \end{cases} \quad (1)$$

де n – загальна кількість дерев в ряду;
 m – загальна кількість рядів на площі.

Максимальну ширину смуги трелювання на якій може виконуватися маневрування трелювальної системи, позначимо B_1 , а ширину трелювальної системи b_0 . З врахуванням схеми розміщення дерев на площі, можна визначити максимально допустиму ширину трелювальної системи, що переміщується по прямій до вибраної точки не маневруючи між деревами:

$$b_0 \leq \frac{(a - \Delta a) \cdot b}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (2)$$

Даний вираз має зміст за умови: $0 \leq \Delta a \leq \frac{a}{2}$. У випадку маневрування, цей параметр виражатиметься залежністю: $b_0 = \frac{b \cdot (a + \Delta a) - \Delta a \cdot b}{\sqrt{b^2 + (a + \Delta a)^2}} = \frac{b \cdot a}{\sqrt{b^2 + (a + \Delta a)^2}} \quad (2')$

Очевидно, що під час трелювання деревини, трелювальна система переміщуватиметься зручними для руху траєкторіями, що складатимуться з прямолінійних та криволінійних ділянок, які можна описати відомими рівняннями прямої $y = kx$, параболи $y = kx^2$ чи синусоїди $y = A \sin kx$ (рис.1).

Для виведення основного рівняння кінематики трелювальної системи, введемо ряд припущень та уточнень. Вважатимемо, що трелювання деревини у вигляді одного сортименту, в напів завантаженому стані, виконується із застосуванням міні скідера «повідкового» типу. З цього можна припустити, що загальна довжина трелювальної системи визначатиметься довжиною сортименту через те, що тягова одиниця майже повністю знаходиться під ним. Спосіб закріплення сортименту дозволяє міні скідеру вільно маневрувати, змінюючи кут між його поздовжньою віссю в плані та поздовжньою віссю сортименту (рисунок 2).

Вважатимемо, що довжина трелювальної системи l , визначається точками $M_1 M_2$, які є її початком і кінцем відповідно і рух її початкової точки M_1 , що знаходиться на трелювальному засобі, відбувається в площині XOY , певною криволінійною траєкторією, яку можна виразити рівнянням:

$$y = f(x) \quad (3)$$

Подібну криволінійну траєкторію описуватиме під час руху і кінцева т. M_2 трелювальної системи, яка знаходиться на частині сортименту, що ковзає по опорній поверхні. Її рівняння відносно системи координат XOY , можна записати у вигляді:

$$\eta = \varphi(\xi) \quad (4)$$

В довільний момент часу, трелювальна система займатиме певне положення в системі координат XOY , яке можна виразити залежностями між координатами x, y її початкової точки M_1 та координатами ξ, η її кінцевої точки M_2 .

$$x = \xi + l \cdot \cos \alpha, \quad (5)$$

$$y = \eta + l \cdot \sin \alpha. \quad (6)$$

де α – кут між віссю OX та трелювальною системою в певний момент часу.

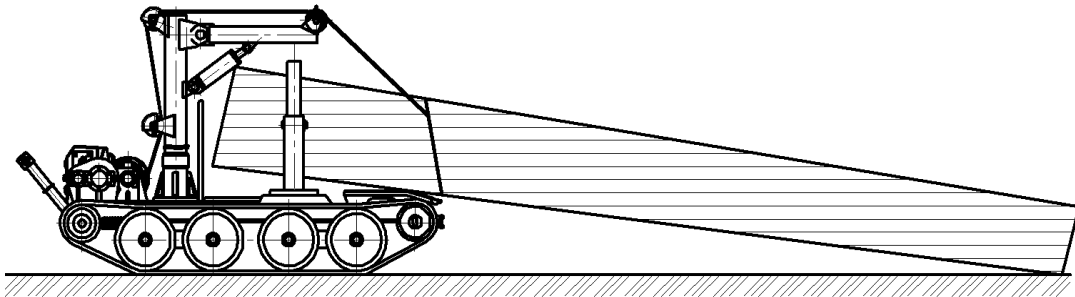
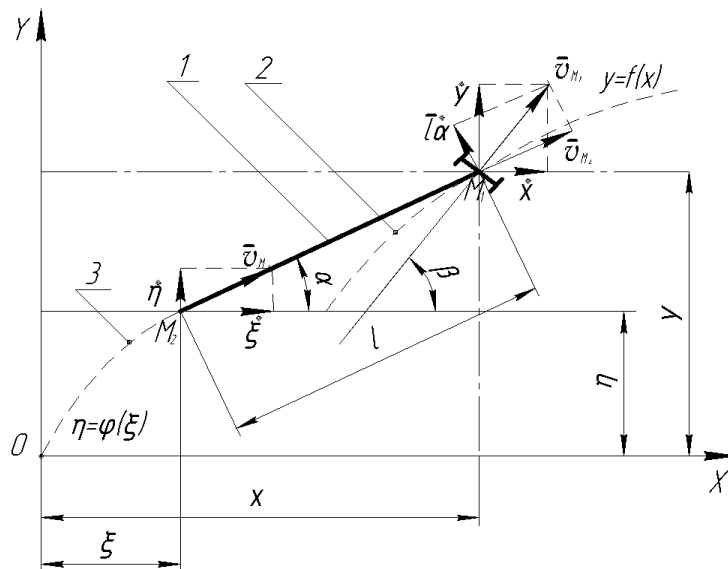


Рис.2. Компонувальна схема малогабаритної трелювальної системи

Використовуючи рівняння (5) і (6), можна записати таку залежність:

$$(y - \eta)^2 + (x - \xi)^2 = l^2. \quad (7)$$



1 – малогабаритна трелювальна система; 2 – траєкторія руху трелювального засобу; 3 – траєкторія, що описує частина сортименту, яка ковзає по опорній поверхні

Рис. 3. Узагальнена розрахункова схема кінематики малогабаритної трелювальної системи

На основі отриманої залежності (7) можна стверджувати, що кінцева точка M_2 трелювальної системи, рухатиметься дугою кола радіусом l , а центр цього кола переміщуватиметься криволінійною траєкторією, відповідно з рівнянням (3).

Очевидно, що рух кінцевої точки M_2 співпадатиме з напрямом M_2M_1 , а це означає, що трелювальна система в кожний момент часу знаходитиметься на дотичній до кривої $\eta = \phi(\xi)$, яка описується т. M_2 у системі координат XOY . Її положення характеризується змінним кутом α , який відповідно до основної формули графічного диференціювання зв'язаний з $\eta(\xi)$, залежністю:

$$\frac{d\eta}{d\xi} = tg\alpha \quad (8)$$

Зазначена умова означає, що лісоматеріал є нерозтяжним тілом і проекції векторів швидкостей точок M_1 і M_2 на напрям M_1M_2 рівні між собою, тобто матиме місце залежність:

$$\dot{\xi} \cdot \cos \alpha + \dot{\eta} \cdot \sin \alpha = \dot{x} \cdot \cos \alpha + \dot{y} \cdot \sin \alpha \quad (9)$$

Залежність (9) можна отримати виходячи із умови плоско паралельного руху тіла про те, що швидкості двох його точок зв'язані між собою:

$$\bar{v}_{M_1} = \bar{v}_{M_2} + \bar{v}_{M_2M_1}, \quad (10)$$

де $|\bar{v}_{M_2M_1}| = l \cdot \dot{\alpha}$,
 або

$$|v_{M_1M_2}| = \dot{y} \cdot \cos \alpha - \dot{x} \cdot \sin \alpha \quad (10')$$

Записавши векторну рівність (10) в проекціях на напрям перпендикулярний до напрямку M_1M_2 , отримаємо основне рівняння кінематики трелювальної системи:

$$\dot{y} \cdot \cos \alpha - \dot{x} \cdot \sin \alpha = l\dot{\alpha} \quad (11)$$

або

$$dy \cdot \cos \alpha - dx \cdot \sin \alpha = l \cdot d\alpha$$

Отримане рівняння має вигляд рівняння Ріккаті, яке не завжди може бути проінтегроване в квадратурах [13], крім випадків руху точки M_1 трелювальної системи прямолінійною траєкторією або траєкторією у вигляді дуги кола.

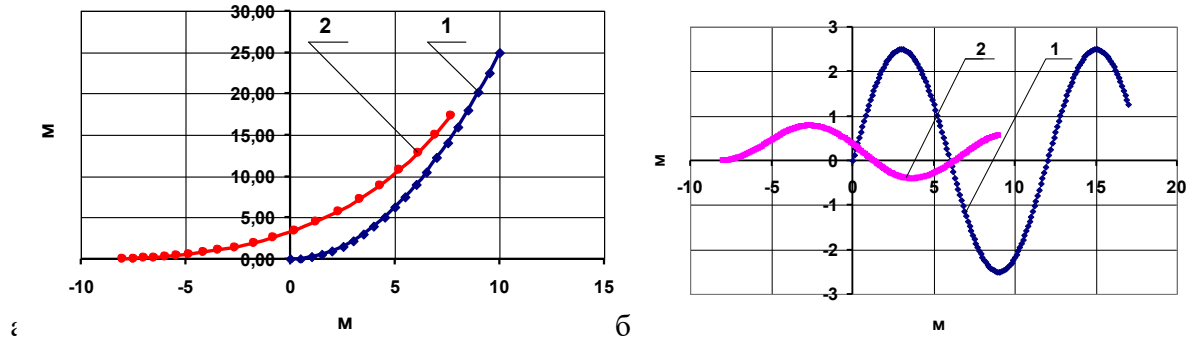
Якщо вважати, що під час руху трелювальної системи, координати x і y зростатимуть, а саме $dx \geq 0, dy \geq 0$, то в будь-який момент часу $d\alpha \geq 0$. Тобто, кут α в процесі руху зростатиме. Щоб встановити до якого значення відбуватиметься його зростання, скористаємося геометричним змістом похідної з врахуванням, що $y' = tg\beta$:

$$l d\alpha = \frac{\sin(\beta - \alpha)}{\cos \beta} \cdot dx, \quad (12)$$

Отже, в процесі руху точки M_1 трелювальної системи, її ордината зростатиме, тобто $tg\beta \geq 0$, а значення кута α , наблизатиметься до кута β , залишаючись при цьому меншим від нього. Це твердження стосується лише випадків, коли рух точки M_1 трелювальної системи, здійснюється траєкторією для якої $y' \geq 0$ при всіх $x \geq 0$. Якщо рух відбувається траєкторією похідна y' якої змінює знак, то змінюватиме знак і $d\alpha$. Тобто, в положенні у якому $d\alpha$ змінює знак, кут α матиме максимальне значення: α_{max}

– лінія осі сортименту співпадає з дотичною до траєкторії руху початкової точки M_1 трелювальної системи.

Точні аналітичні розв'язки рівняння (11), вдалося отримати за умови руху передньої точки M_1 трелювальної системи прямою або дугою кола [12]. Для випадків руху більш складними траєкторіями, такими як парабола чи синусоїда, розв'язки рівняння (11), отримано шляхом застосування чисельних методів, зокрема методу Ейлера, що дозволило будувати відповідні траєкторії (рис.4) руху кінцевих точок трелювальної системи. відповідно до вихідних даних.



1, 2 – траєкторії руху початкової і кінцевої точок трелювальної системи

Рис. 4. Траєкторії крайніх точок малогабаритної трелювальної системи під час її руху параболою та синусоїдою відповідно

Для комп'ютерного моделювання процесу трелювання деревини в лісовому насадженні, була розроблена блок-схема алгоритму роботи програми (рис.5).

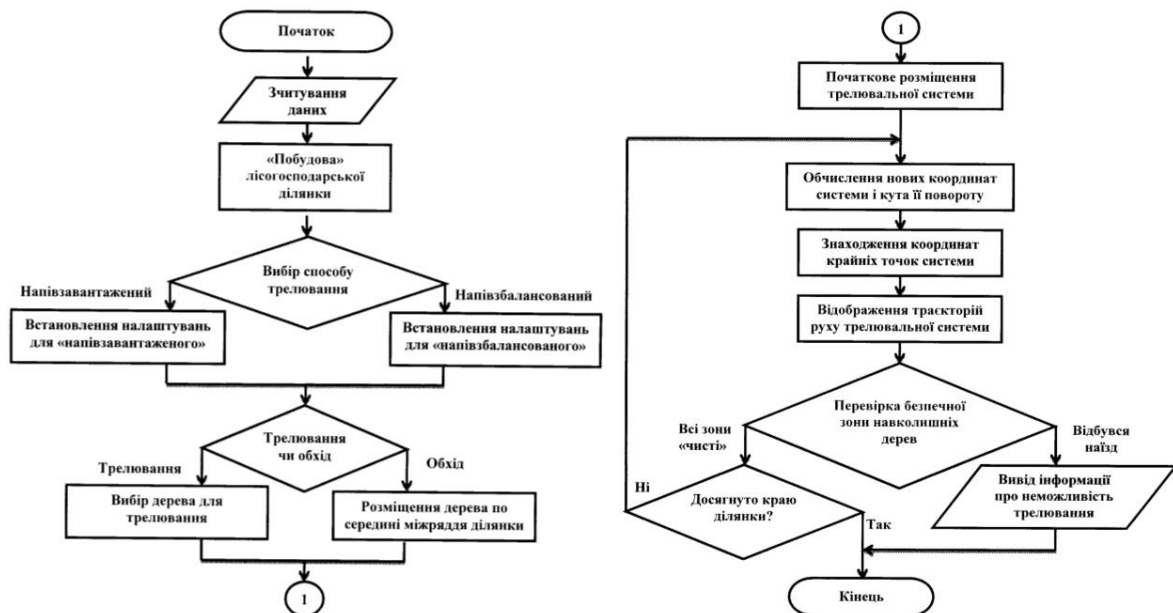


Рис. 5. Блок-схема алгоритму комп'ютерної моделі процесу трелювання

Реалізація алгоритму на основі розробленої моделі лісового насадження та математичної моделі кінематики малогабаритної трелювальної системи, дозволила візуалізувати процес трелювання деревини, що по суті є симуляцією даного процесу. До уваги було взято два основних способи трелювання: в напів завантаженому стані та в напів збалансованому стані або з використанням причепа, зважаючи на те, що кожний із цих способів є актуальним для поштучного трелювання лісоматеріалів.

Робота програми симуляції процесу трелювання складається із двох етапів: введення вхідних даних та візуального відображення процесу переміщення трелювальної системи. Вхідні дані вводяться на відповідній панелі (рис.6) і містять інформацію про насадження, спосіб трелювання, кут та напрямок зрізання дерев, габаритні розміри трелювальної системи і для зручності – вибір швидкості руху трелювальної системи.

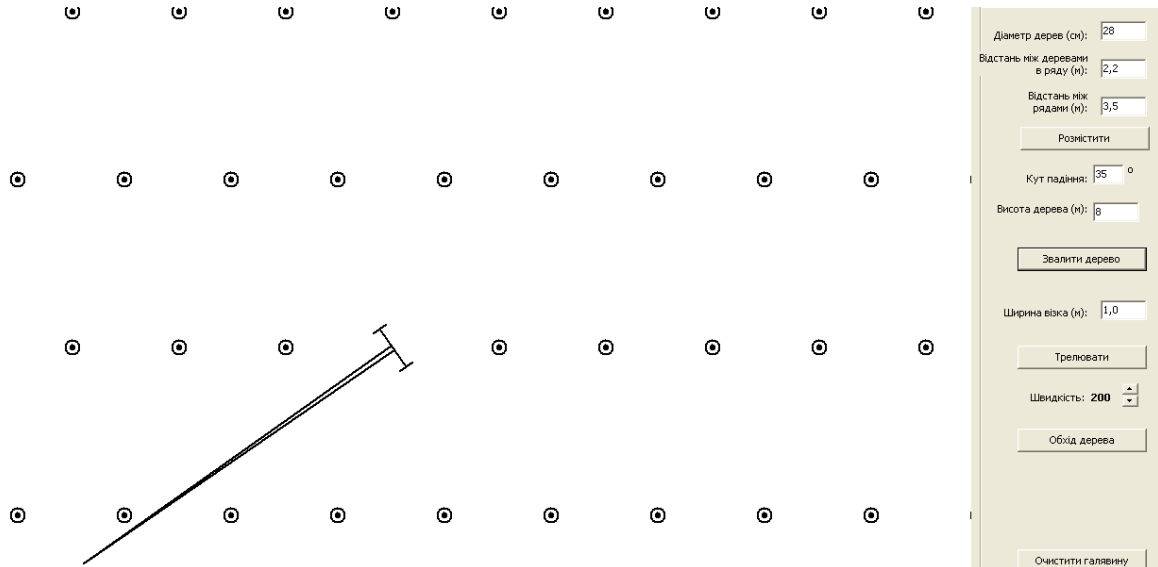


Рис. 6. Генерування моделі насадження та розміщення трелювальної системи

Після введення даних про лісове насадження, які включають відстань між рядами дерев, відстань між деревами в ряду та середній діаметр дерева при основі, слід також ввести діапазон відхилення розміщення дерев від зазначеної схеми їх розміщення. В цьому діапазоні, програма виконує зміщення дерев у випадковому порядку на випадкову відстань. Чим забезпечується елемент випадковості необхідний для використання програми в експериментальному дослідженні. По завершенню введення зазначених даних на екрані генерується модель лісового насадження з відповідними параметрами (рис.6), які найбільше впливають на кінематику трелювальної системи.

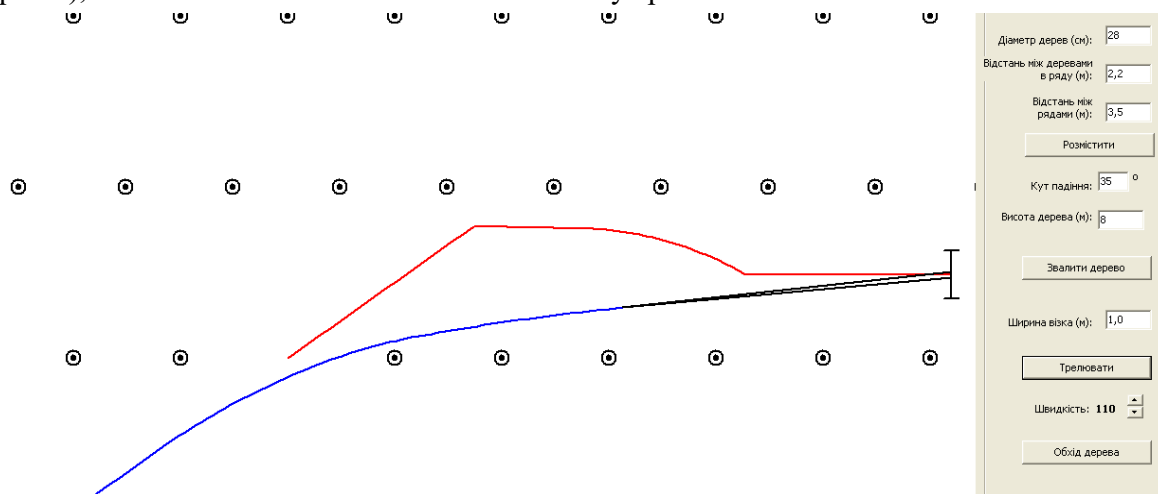


Рис.7. Візуалізація переміщення трелювальної системи в лісовому насадженні

Після цього, вводяться дані, які стосуються способу трелювання та параметрів трелювальної системи. В програмі закладено два способи трелювання лісоматеріалу: в

напів завантаженому стані та в напів збалансованому стані, які залежать від місця розміщення причіпного трелювального засобу. Трелювання в напів завантаженому стані може виконуватися і без причіпного трелювального засобу. Довжина трелювальної системи в програмі, відповідає довжині лісоматеріалу, а ширина вводиться відповідно до ширини тягача. Початкове положення лісоматеріалу, а відповідно і розміщення трелювальної системи, визначається кутом падіння зрізаних дерев, який також необхідно ввести, спираючись на технологічні особливості рубки. Ввівши зазначені дані та давши команду на запуск, на екрані з'являється трелювальна система у місці вибраного для зрізання дерева (рис.6).

Давши команду на початок руху трелювальної системи, на екрані візуалізується її переміщення із відображення в кольорі траєкторій руху початкової та кінцевої її точок (рис.7). Якщо задана у вихідних даних довжина трелювальної системи є надто великою та унеможливує її рух в згенерованому насадженні, це відображається на екрані (рис.8). Після цього, слід змінити схему розміщення дерев чи зменшити габаритні розміри трелювальної системи або змінити спосіб трелювання.

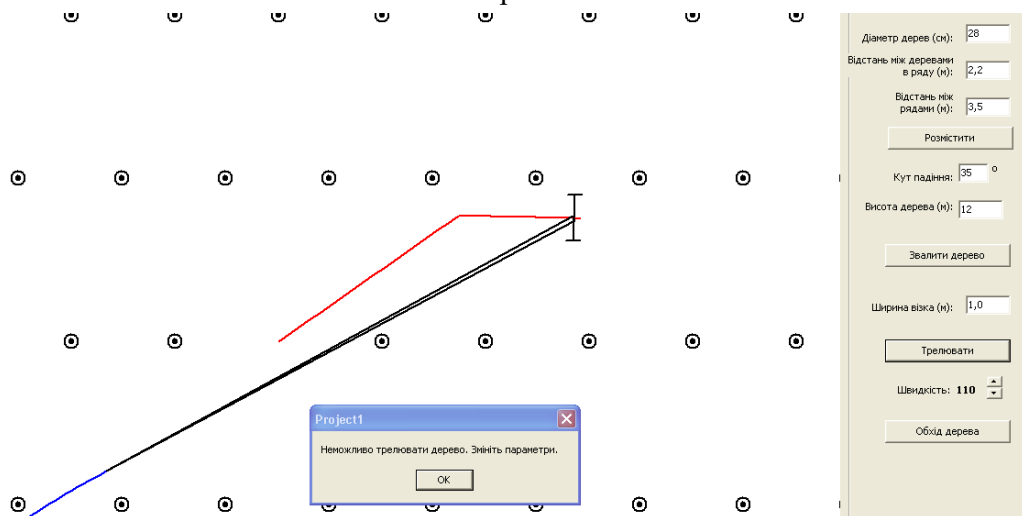


Рис. 8. Повідомлення про невідповідність розмірів трелювальної системи параметрам лісового насадження

Така програма симуляції процесу трелювання, може використовуватися, як в процесі експериментального дослідження, так і на практиці під час планування лісосічних робіт, особливо на етапі вибору системи лісосічних машин.

Обговорення

Моделювання є важливою складовою наукового підходу до розв'язку проблеми, що ґрунтується на глибоких знаннях про об'єкт та предмет дослідження і використанні математичного апарату. Сучасний етап розвитку цифрових технологій, дозволяє візуалізувати математичні моделі в динаміці, розробляючи програмний код для симуляції процесу чи явища з високою точністю та елементами випадковості і непередбачуваності. Використання комп'ютерної симуляції стає одним із найбільш доступних та дешевих засобів дослідження, що розкриває широкі можливості.

В структурі основних лісосічних робіт, трелювання деревини є однією із операцій де доцільно використовувати комп'ютерне моделювання для симуляції та в процесі дослідження, що в реальних умовах потребує використання значних коштів, часу та не завжди отримані результати задовольняють умови експерименту. Чим більшу кількість чинників, які впливають на процес враховуються в симуляційній моделі, тим повніше відображатимуться реальні умови і достовірнішими будуть результати.

Розроблені в роботі моделі симуляції процесу трелювання деревини, враховують основні, як змінні так і не змінні чинники, що впливають на кінематику та параметри малогабаритної трелювальної системи і можуть використовуватися для проведення дослідження згідно плану експерименту для рівнинних умов.

Висновки

1. Зважаючи, що більше половини лісів України є штучно створені [11], то за основу під час розроблення моделі лісового насадження, вибрано штучно створене насадження із розміщенням дерев рядами, що найбільш характерне для рівнинних лісів.
2. Аналіз тематичних наукових публікацій, свідчить про не достатньо висвітлені причини механічних пошкоджень дерев в насадженні під час трелювання деревини.
3. Вказано, що однією із основних причин механічних пошкоджень дерев зазвичай є лісоматеріал, що третяся об дерево під час повороту трелювальної системи, тому важливо прогнозувати траєкторію переміщення кінцевої точки трелювальної системи для уникнення зіткнення із деревами на площі.
3. Отримане основне рівняння кінематики, дійсне для випадку трелювання одиничного лісоматеріалу такого поперечного січення, що дозволяє його вважати абсолютно жорстким не розтяжним тілом циліндричної форми.
4. Комп'ютерна симуляція процесу трелювання, розширює можливості експериментальних досліджень та знайде практичне застосування на виробництві.

Список використаних джерел

1. Цимбалюк Ю.І. Чисельна реалізація математичної моделі транспортування круглого лісоматеріалу під наметом лісу [Текст] / Ю. І. Цимбалюк, О.І. Думанський // Науковий вісник НЛТУ України: зб. наук.-техн. праць. – Львів: ПВБ НЛТУ України, 2011. – Вип. 21.18 – С. 305–310. https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2011/21_18/index.htm
2. E. Ampoorter, P. De Frenne, M. Hermy, K. Verheyen. Effects of soil compaction on growth and survival of tree saplings: A meta-analysis. *Basic and Applied Ecology*. Volume 12, Issue 5, August 2011, Pages 394-402. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2011.06.003>
3. Dinko Vusić, Marijan Šušnjar, Enrico Marchi, Raffaello Spina, Željko Zečić, Rodolfo Picchio. Skidding operations in thinning and shelterwood cut of mixed stands – Work productivity, energy inputs and emissions. *Ecological Engineering*. Volume 61, Part A, December 2013, Pages 216-223. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.09.052>
4. D'Acqui, L. P., Certini, G., Cambi, M., & Marchi, E. (2020) Machinery's impact on forest soil porosity. *Journal of Terramechanics*. Volume 91, October 2020, Pages 65-71. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2020.05.002>
5. Spinelli, R., Magagnotti, N., & Nati, C. (2010). Benchmarking the impact of traditional small-scale logging systems used in Mediterranean forestry. *Forest Ecology and Management*. Volume 260, Issues 11, 15 November 2010, Pages 1997-2001. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.08.048>
6. Enrico Marchi, Rodolfo Picchio, Raffaele Spinelli, Stefano Verani, Rachele Venanzi, Giacomo Certini. Environmental impact assessment of different logging methods in pine forests thinning. *Ecological Engineering*. Volume 70, September 2014, Pages 429-436. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.06.019>
7. R.E. Gullison, J.J. Hardner. The effects of road design and harvest intensity on forest damage caused by selective logging: empirical results and a simulation model from the Bosque Chimanes, Bolivia. *Forest Ecology and Management*. Volume 59, Issues 1-2, June 1993, Pages 1-14. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(93\)90067-W](https://doi.org/10.1016/0378-1127(93)90067-W)

8. Raffaele Spinelli, Natascia Magagnotti, Rub. An alternative skidding technology to the current use of crawler tractors in Alpine logging operations. *Journal of Cleaner Production*. Volume 31, August 2012, Pages 73-79. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.02.033>
9. Proto, A. R., Bernardini, V., Cataldo, M. F., & Zimbalatti, G. (2020). Whole tree system evaluation of thinning a pine plantation in southern Italy. *Annals of Silvicultural Research*, 45(1), 44–52. <https://doi.org/10.12899/asr-1849>
10. Alessandro K. Cerutti, Angela Calvo, Sander Bruun. Comparison of the environmental performance of light mechanization and animal traction using a modular LCA approach. *Journal of Cleaner Production*. Volume 64, 1 February 2014, Pages 396-403. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.027>
11. Державний комітет лісового господарства України. Лісове господарство України. – К.: «Видавничий дім «ЕКО – інформ», 2010. – 64с.
12. Цимбалюк Ю.І. Кінематика малогабаритної трелювальної системи траєкторією у вигляді дуги кола. [Текст] /Ю. І. Цимбалюк// Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів: науковий журнал. – Харків, 2025, №26 – С. 36-44. <https://doi.org/10.64165/journal-ts.2025.26.36-44>
13. Самойленко А. М.; Кривошея С.А.; Перестюк М. О. (1994). Диференціальні рівняння у прикладах і задачах (PDF). Київ: Вища школа. с. 455.

References

1. Tsymbalyuk Yu.I. Numerical implementation of a mathematical model of roundwood transportation under a forest canopy [Text] / Yu. I. Tsymbalyuk, O.I. Dumansky // Scientific Bulletin of the NLTU of Ukraine: Collection of Scientific and Technical Works – Lviv: RVV NLTU of Ukraine, 2011. – Issue 21.18 – P. 305–310. https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2011/21_18/index.htm
2. E. Ampoorter, P. De Frenne, M. Hermy, K. Verheyen. Effects of soil compaction on growth and survival of tree saplings: A meta-analysis. *Basic and Applied Ecology*. Volume 12, Issue 5, August 2011, Pages 394-402. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2011.06.003>
3. Dinko Vusić, Marijan Šušnjar, Enrico Marchi, Raffaello Spina, Željko Zečić, Rodolfo Picchio. Skidding operations in thinning and shelterwood cut of mixed stands – Work productivity, energy inputs and emissions. *Ecological Engineering*. Volume 61, Part A, December 2013, Pages 216-223. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.09.052>
4. D'Acqui, L. P., Certini, G., Cambi, M., & Marchi, E. (2020) Machinery's impact on forest soil porosity. *Journal of Terramechanics*. Volume 91, October 2020, Pages 65-71. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2020.05.002>
5. Spinelli, R., Magagnotti, N., & Nati, C. (2010). Benchmarking the impact of traditional small-scale logging systems used in Mediterranean forestry. *Forest Ecology and Management*. Volume 260, Issues 11, 15 November 2010, Pages 1997-2001. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.08.048>
6. Enrico Marchi, Rodolfo Picchio, Raffaele Spinelli, Stefano Verani, Rachele Venanzi, Giacomo Certini. Environmental impact assessment of different logging methods in pine forests thinning. *Ecological Engineering*. Volume 70, September 2014, Pages 429-436. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.06.019>
7. R. E. Gullison, J.J. Hardner. The effects of road design and harvest intensity on forest damage caused by selective logging: empirical results and a simulation model from the Bosque Chimanes, Bolivia. *Forest Ecology and Management*. Volume 59, Issues 1-2, June 1993, Pages 1-14. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(93\)90067-W](https://doi.org/10.1016/0378-1127(93)90067-W)
8. Raffaele Spinelli, Natascia Magagnotti, Rub. An alternative skidding technology to the current use of crawler tractors in Alpine logging operations. *Journal of Cleaner Production*. Volume 31, August 2012, Pages 73-79. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.02.033>

9. Proto, A.R., Bernardini, V., Cataldo, M.F., & Zimbalatti, G. (2020). Whole tree system evaluation of thinning a pine plantation in southern Italy. *Annals of Silvicultural Research*, 45(1), 44–52. <https://doi.org/10.12899/asr-1849>
10. Alessandro K. Cerutti, Angela Calvo, Sander Bruun. Comparison of the environmental performance of light mechanization and animal traction using a modular LCA approach. *Journal of Cleaner Production*. Volume 64, 1 February 2014, Pages 396-403. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.027>
11. State Forestry Committee of Ukraine. *Forestry of Ukraine*. – Kyiv: “Publishing House “EKO – Inform”, 2010. – 64p.
12. Tsymbalyuk Y.I. Kinematics of a small-sized skidding system with a trajectory in the form of an arc of a circle. [Text] /Yu. I. Tsymbalyuk// *Technical service of agro-industrial, forestry and transport complexes: scientific journal*. – Kharkiv, 2025, No. 26 – P. 36-44. <https://doi.org/10.64165/journal-ts.2025.26.36-44>
13. Samoilenko A. M.; Kryvosheya S. A.; Perestyuk M. O. (1994). *Differential equations in examples and problems (PDF)*. Kyiv: Vyscha shkola. p. 455.

**Автухов А. К.,
Карпенко В. С.,
Ковалевський Є. В.,
Корнев О. С.**
Державний
біотехнологічний
університет,
м. Харків, Україна
E-mail:
a.k.avtukhov@gmail.com

**ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ
МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ
ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ ШТАМПІВ, ЩО
ПІДДАЮТЬСЯ АБРАЗИВНОМУ ЗНОСУ ЧЕРЕЗ
АНАЛІЗ ЗНОСОСТІЙКОСТІ МЕТАЛУ,
НАПЛАВЛЕНОГО СТАНДАРТНИМИ
ЕЛЕКТРОДНИМИ МАТЕРІАЛАМИ УКРАЇНСЬКИХ
ВИРОБНИКІВ**

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-27-93>

УДК 621.791.75:620.178.16:669.017:621.9.01

Автухов А. К., Карпенко В. С., Ковалевський Є. В., Корнев О. С. Визначення оптимальних матеріалів для відновлення інструментальних штамів, що піддаються абразивному зносу через аналіз зносостійкості металу, наплавленого стандартними електродними матеріалами українських виробників

Анотація. Проведено аналіз типової конструкції, схеми роботи, умов зношування штамів для виготовлення деталей з неметалевих матеріалів з абразивним покриттям. Показано, що крім досить високої зносостійкості кромок штамів, їхня робоча поверхня повинна чинити опір шаржуванню абразивною масою, а рівень пластичності і в'язкості металу кромок повинен виключати сколювання їх фрагментів у процесі експлуатації.

Структура металу, наплавленого попередньо обраними електродними матеріалами, змінювалася від феритної до заевтектичної з великою кількістю зміцнювальних фаз, мікротвердість яких досягає 20 ГПа. Випробування на опір абразивному зношуванню показали, що зносостійкість в межах дослідженого ряду матеріалів відрізняється до 5 разів.

Ключові слова: штамп, абразивне зношування, умови зношування, наплавлений метал, зносостійкість.

Вступ

Штампування є одним з найпоширеніших технологічних процесів на сучасному виробництві. Штампуванням оброблюються широкий спектр листових матеріалів – металів, пластиків та гумових техпластин. Найбільшою проблемою при використанні цього процесу є знос штампу чи його окремих частин – ріжучих кромок та притискних площин, що контактують з матеріалом, який оброблюється. Це поступово призводить до суттєвого зменшення точності деталей, що виготовляються.

При штампуванні металевих виробів, знос робочих кромок штамів залежно від матеріалів, способів їх зміцнення і структурного стану досягає гранично допустимого значення через 10 - 30 змін роботи штампу, а іноді і швидше. Це спричинює необхідність заточки пуансонів та матриць штампу, тобто проведення ремонту, що призводить до зниження техніко-економічних показників виробництва, обумовленого можливими простоями обладнання та додатковими витратами на виготовлення нових та заміну зношених деталей.

Тому проблема терміну служби штамів, способів їх відновлення, як і раніше, залишається актуальною. Деталі штамів для обробки металів, зазвичай, відновлюються

на спеціалізованих підприємствах, шляхом заточки чи заміни пуансонів чи матриць. Проте, на багатьох підприємствах, шляхом штамповки обробляються неметалеві матеріали, штампи використовуються одноразово, або, коли дозволені певні технологічні допуски, деталі штампів відновлюються дуговим наплавленням електродами, що забезпечують перенос металу з феритною або низьковуглецевою аустенітною структурою, що мають необхідний рівень зносостійкості. Не завжди враховуються характер і механізм зношування, особливості експлуатації деталей та вимоги до них. Крім того, наплавлення проводиться без застосування спеціального оснащення, яке забезпечує формування оптимальних геометричних параметрів наплавленого валика та однорідності його структури по всьому периметру зношеної деталі штамп. У процесі наплавлення відбувається надмірне нагрівання робочої поверхні штамп, що призводить до зниження опірності шаржуванню зони відновлення. Але ці недоліки можуть перекриватися низькою вартістю такого відновлення.

Метою роботи був аналіз способу експлуатації, умов зношування штампів, що використовуються для обробки неметалевих абразивних матеріалів, попередній вибір матеріалів для наплавлення кромки штампів і випробування наплавленого металу на зносостійкість на промисловому обладнанні, у простому штампі, що імітує умови зношування деталей пресої оснастки для штампування деталей.

Аналіз схеми роботи, умов зношування деталей штампів для виготовлення неметалевих деталей з абразивним покриттям і вимог до них

Розглядається робота штамп для виготовлення невідновлюваного зачисного інструменту на базі полімерного матеріалу товщиною 5мм з нанесеними з двох боків шарами наждачного паперу різної зернистості.

Відомо, що зносостійкість, на відміну багатьох інших параметрів, не є виключною властивістю матеріалів, а характеризує систему "матеріал – деталь - умови зношування". Найважливішою характеристикою такої системи є відношення твердості абразиву до твердості матеріалу H_a/H_m [1]. При цьому важлива не вихідна мікротвердість матеріалів H_m , а твердість поверхні тертя, набута в процесі зношування $H_{птм}$ [2]. Відомо [3], що один з найефективніших механізмів самозміцнення робочої поверхні деталей – утворення мартенситу деформації, та інші явища, що супроводжують цей процес (виділення дрібнодисперсних карбідів по площинах ковзань, релаксація напружень та інше). У той самий час одні й самі матеріали, під впливом неоднакових за складом і властивостями абразивних мас, що працюють за різних температур, тиску та інших факторів, виявляють різну здатність до самозміцнення поверхні тертя і опірності зношуванню. Крім того, на вибір матеріалів, структурного стану, способів управління структурою можуть впливати характер і допустима величина зношування, вимоги до рівня в'язкості і пластичності та інше. Залежно від умов роботи можливі зміни рівнів зносостійкості в межах певного ряду матеріалів, аж до повної інверсії (перестановки). У зв'язку з цим, очевидно, що визначення основних параметрів експлуатації деталей штампів, характеру зношування та вимог, що висуваються до них, є однією з основних умов обґрунтованого вибору матеріалів та їх структурного стану.

Типова конструкція штамп (рис. 1) включає деталі, що не зношуються абразивним впливом: верхня та нижня плита 11, 3, колонки 8 та напрямні втулки 9, матрице- та пуансонотримач 4 і 10, та деталі що піддаються впливу оброблювальних абразивів: пуансон 1 з зовнішньою робочою кромкою, матрицю 2 з внутрішньою робочою кромкою, напрямні пластини 5, знімач 7, упор 13.

У випадку дослідження проводиться штампування неметалевих деталей на полімерній основі з абразивними поверхнями. Виготовлення виробу здійснюється в наступний спосіб. Коли пуансон 2 штамп знаходиться у верхньому положенні, на

матрицю, до упору 13, покроково подається по направляючим 5 стрічка матеріалу що обробляється 6. Пуансон 1 пробиває матеріал і просуває готову деталь у отвір матриці 2. Щойно виштампувана деталь, з допомогою знімача 7 провалюється вниз, замінюючи попередньо виготовлену деталь, що видаляється із робочої зони штампу. Після цього пуансон повертаються у вихідне положення, а робочий матеріал просувається на наступний крок. Процес повторюється багаторазово до тих пір, поки зношування матриці, пуансона або деталей подачі матеріалу у зону штампування не досягне гранично допустимої величини, що викликає необхідність заміни зношеної деталі. Значний вплив на знос деталей штампу здійснює темп штампування. Чим вище темп – тим вище температура у робочій зоні штампу.

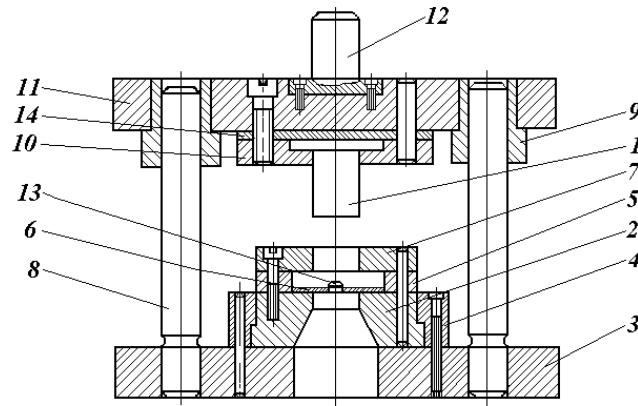


Рис. 1 – Штампу для виготовлення неметалевого одноразового абразивного інструменту

Умови експлуатації штампу в прес-формі висувають різні вимоги до різних його частин. Торцеві поверхні, що формують деталь, відчувають в основному нормальні тиски, що викликаються матеріалом, що призводить до вдавлювання абразивних частинок, шаржування і налипання, але, при цьому, практично виключається зношування цієї частини деталей. А ріжучі поверхні пуансона та матриці зазнають ударних навантажень, що можуть викликати мікротріщини та викришування кромки. Також відбувається їх абразивний знос, адгезивний знос і відбувається термічний вплив.

У найбільш жорстких умовах експлуатується робоча кромка пуансона, яка, зазнаючи тангенціальної напруги, викликаними абразивними зернами, що потрапляють у зазор між пуансоном і матрицею інтенсивно зношується. Для тестових деталей, допустиме зношування не повинно перевищувати 0,1 – 0,2 мм на ребрі кромки. В іншому випадку на кромці виробу виникають "задири", що є бракувальною ознакою.

Опірність зношування та шаржування залежить в основному від трьох параметрів експлуатації деталей: мікротвердості зерен абразиву, її тиску та температури поверхні штампу.

Виміри мікротвердості зерен абразиву показали, що вона змінюється в широких межах згідно із законом розподілу, близьким до нормального. Вибірка становила понад 100 штук зерен.

Середній тиск абразивного матеріалу на робочу поверхню штампів змінюється в межах 20 - 50 МПа залежно від виду виробів, що штампуються. Тиск, що виникає при дії абразиву на робочу кромку у зазорі між пуансоном та матрицею штампа, визначити складно. Однак, судячи з характеру зношування поверхні робочої кромки (ризки, подряпини), можна припустити, що тиск достатній для створення напружень у місці контакту одиничного зерна з поверхнею, що перевищують межу плинності і в деяких випадках межа міцності металу насичених вуглецем шарів цементованої сталі 20Х з якої виготовляються нові деталі штампів. Температура робочих кромки в процесі роботи

підвищується на 10-15 °С відносно температури навколишнього середовища.

Знос та руйнування пуансону штампу по торцю та боковій поверхні показано на рис.2 .

Виходячи з умов роботи штамів, можна сформулювати такі основні вимоги до пуансонів та матриць, які безпосередньо формують деталь у процесі:

- повинні мати високу опірність абразивному зношуванню робочих кромek і шаржування абразивною масою поверхні матеріалу;
- повинні забезпечувати достатній рівень в'язкості та пластичності кромek, що виключають їх розтріскування та сколювання в процесі експлуатації;
- процес відновлення деталей штампу способом наплавлення не повинен призводити до суттєвого зниження опірності шаржуванню робочої поверхні штамів.

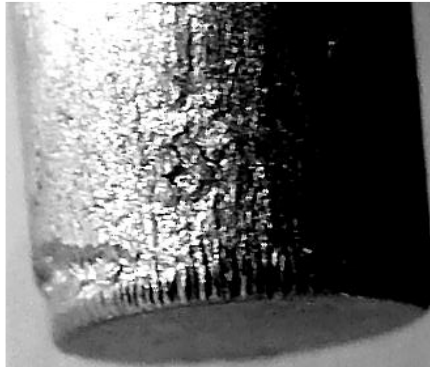


Рис. 2 – Знос пуансону штампа для виготовлення неметалевого одноразового абразивного інструменту по боковій поверхні.

Методика випробувань

Основною умовою вибору методики випробувань на зносостійкість було забезпечення ідентичності результатів виробничих та лабораторних досліджень.

Випробування проводили на штамі за методикою, що забезпечує повноту фазових перетворень [4], ступінь зміцнення поверхні тертя, та ряд відносної зносостійкості стандартних сталей типу 20Х (цементованої) та 40Х12 у різному структурному стані, вивчених раніше у виробничих умовах.

Зношування тестового пуансона діаметром 10мм та довжиною 50 мм на штамі здійснюється з використанням спіненого матеріалу на основі пінополіпропілену товщиною 5мм з наклеєним з одного боку наждачним папером Р100 та Р320 з іншого боку.

Інтенсивність зношування визначали за втратою маси зразків за один хід з точністю до 1×10^{-4} г. Кількість ходів за один цикл випробувань між зважуваннями вибирали таким чином, щоб втрата маси при цьому становила не менше 0,008 г. За показник зносостійкості приймали середнє значення результатів за 5 циклів випробувань кожного зразку. При цьому похибка щодо зносостійкості не перевищує 4,5 % при надійності 0,9.

Ступінь зміцнення внаслідок впливу абразиву оцінювали по мікротвердості робочої поверхні за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 при навантаженні 0,5 Н.

Вибір матеріалів для наплавлення штамів

Вибір матеріалів здійснювали шляхом випробувань пуансонів штампу, наплавлених обраними електродами різних типів у виробничих умовах.

Існують два основні шляхи підвищення опірності сталей і сплавів абразивному зношуванню. Перший – збільшення кількості зміцнюючої фази сплаву до необхідних меж, оптимізація її за типом, морфології, характеру розподілу в матриці. Другий – пошук найкращої, для конкретних умов зношування, металевої матриці.

На даний час існує велика кількість зносостійких матеріалів, в тому числі електроди і дріт, для наплавлення деталей. Основною вимогою до технологічного процесу відновлення деталей штампів є збільшення зносостійкості і надійності з допомогою найбільш доступних стандартних матеріалів. При необхідності, існує подальша можливість модифікації робочих поверхонь наплавлених кромок шляхом плазмової або хіміко-термічної обробки [4] або азотуванням поверхні. Але як правило, у реальних умовах, це не відбувається.

Вибір стандартних матеріалів не представляє складності, через достатню наявність технічної інформації про властивості наплавних матеріалів, яка електродів так і дріт. Разом з тим, якщо судити з хімічного складу напавленого металу, і ґрунтуватися на результатах досліджень, проведених раніше [4], можна зробити висновок, що за рівнем зносостійкості в умовах роботи деталей прес-форм, можливі істотної відмінності цих матеріалів. В рамках даної роботи були проведені випробування доступних в Україні матеріалів, наплавлених стандартними електродами, наплавлення дрітом – не досліджувалося.

В роботі використані наплавні матеріали виробництва ДП «Дослідний завод зварювальних матеріалів Інституту електрозварювання імені Є. О. Патона Національної академії наук України, та виробника ТОВ «Суми-Електрод». Слід звернути увагу, що окремі характеристики електродів одного типу різних виробників відрізняються, але не суттєво, чим можна знехтувати. У таблиці вибрані наплавні електроди, призначені переважно для відтворення деталей, що піддаються абразивним навантаженням. Інформація про наплавні матеріали зібрана у таблиці 1.

Таблиця 1

Марки електродних матеріалів, тип напавленого металу та його властивості

Марка наплавочного матеріалу	Тип напавленого металу	Твердість	Мікротвердість Н _{0,5} , ГПа	
			До зношування	Після зношування
АНО-4	Низьковуглецева сталь	150 HB	2,5	4,6
ЦЛ11	08X19H10Г2Б	200 HB	2,6	6,5
ОЗН-400М	17Г4С1	23-24 HRC	5,2	8,0
ОМГ-Н	65Х11Н3	27-29 HRC	6,0	10,1
ЭН-60М	70Х3СМТ	58-60 HRC	8,2	9,7
Т-590	330Х25Г2С2Р	55-58 HRC	8,7	10,9

Найменшу опірність зношуванню має відновлений пуансон, напавлений металом електроду АНО-4. Низький вміст вуглецю та легуючих елементів зумовлює феритну структуру напавлення з низькою вихідною мікротвердістю – 2,5 ГПа. У процесі зношування, в результаті механічного наклепу, твердість поверхні тертя збільшується до 4,6 ГПа. Однак відношення Н_а/Н_птм зберігається високим (близько 3), що обумовлює значну частку мікрорізання в процесі зношування і, в результаті, низьку зносостійкість.

Більш високою опірністю до зношування, завдяки високому рівню легування та підвищеному вмісту вуглецю, має метал, напавлений електродом ЦЛ-11. Завдяки твердорозчинному зміцненню, за рахунок легування та механічному наклепу, мікротвердість поверхні тертя досягає 6,5 ГПа. Це у 1,5 краще, ніж результат

використання електроду АНО-4, що забезпечує більш високу зносостійкість матеріалів цього типу в порівнянні з феритними.

Матеріал електроду ОЗН-400М зі структурою, що поєднує низьковуглецевий мартенсит і бейніт, перевищують за зносостійкістю метал наплавлений електродами ЦЛ-11 у півтора рази, і в два по відношенню до феритних нелегованих матеріалів.

Мікротвердість поверхні тертя металу, наплавленого електродом ЕН-60М з переважно мартенситною структурою, досягає близько 10 ГПа, що відповідає рівню мікротвердості металу 65Х11Н3, наплавленого електродами ОМГ-Н. Проте, попри однакову твердість, зносостійкість у першому випадку є нижчою.

Це пояснюється тим, що підвищення мікротвердості у мартенситних матеріалах відбувається переважно за рахунок механічного наклепу, тому механізми релаксації напружень та інші позитивні ефекти, які супроводжують формування мартенситу деформації, у цьому випадку не реалізуються.

Крім того, у зміцненому шарі відсутня пластична складова – аустеніт, через що робота руйнування мікрооб'ємів поверхні є меншою, ніж у металах, які містять залишковий аустеніт та певну кількість мартенситу деформації.

Помітне підвищення зносостійкості, до 2,5 разів, спостерігається при використанні електрода ОМГ-Н. Це зумовлено тим, що внаслідок наявності відносно нестабільного аустеніту на поверхні тертя в процесі експлуатаційного зношування формується до 20 % мартенситу. Хоча ця кількість є меншою за оптимальний рівень (40–50 %) [3], її достатньо для підвищення мікротвердості до 10,1 ГПа та збільшення зносостійкості приблизно удвічі порівняно з матеріалами, у яких присутній повністю стабільний аустеніт.

Крім того, у даному наплавленому металі аустеніт має переважно хромистий, а не марганцевий характер. Відомо, що хром чинить більш виражений позитивний вплив на зміцнення сталей із залишковим метастабільним аустенітом, ніж марганець. Це пояснюється тим, що міцність мартенситу деформації визначається не лише вмістом вуглецю, а й енергією зв'язку між дислокаціями та атомами вуглецю в аустеніті.

Чим більша енергія зв'язку між дислокаціями та атомами домішок упродовження (вуглецю, азоту тощо), тим вищий ступінь закріплення дислокацій у мартенситі (за сталого вмісту вуглецю), а отже, і ефективна міцність аналізованої фази. Марганець знижує енергію зв'язку дислокацій з атомами вуглецю в α -фазі, тоді як хром, навпаки, підвищує цей показник [5].

Таким чином, хромисті або хромомарганцеві метастабільні аустенітні сталі при однаковому вмісті вуглецю характеризуються вищою зносостійкістю, ніж сталі з марганцевим аустенітом.

Істотне підвищення зносостійкості спостерігається також при наплавленні матеріалами заевтектичного складу, що входять до складу електродів Т-590. У цьому випадку структура наплавленого металу характеризується наявністю значної кількості зміцнюючих фаз, частка яких може досягати 60 %. Мікротвердість окремих структурних складових, зокрема карбоборидів, сягає 20 ГПа, що істотно перевищує твердість матричного металу.

У таких сплавах визначальний внесок у загальну твердість належить саме зміцнюючим фазам, особливо у металі 80Х20Р3Т, де їх концентрація та розподіл забезпечують високий опір абразивному зношуванню. Основна функція металевої матриці полягає у надійному утриманні частинок твердих фаз, запобігаючи їх викришуванню під дією абразивних частинок.

Загалом, у межах ряду розглянутих матеріалів, зносостійкість відрізняється суттєво. Таким чином, на підставі результатів випробувань встановлено, що відновлення або зміцнення нових штампів з точки зору впливу на їхню зносостійкість, доцільно

проводити доєвтектичними або заєвтектичними матеріалами. Однак, встановити наскільки такий підхід може відповідати іншим вимогам, що висувуються до цих деталей, можна шляхом випробувань наплавлених штамів, для конкретних деталей, у виробничих умовах.

Висновки

1. Аналіз конструкції штамів, умов їх експлуатації та характеру зношування робочих кромки під дією абразивних частинок, тиску, температури й швидкості штампування показав, що під час роботи штами повинні забезпечувати не лише високу опірність абразивному зношуванню, але й стійкість до шаржування абразивною масою. При цьому робочі кромки повинні зберігати певний рівень пластичності в процесі експлуатації, що забезпечує їхню здатність протидіяти мікроруйнуванню і викришуванню під дією циклічних навантажень. Оптимальне поєднання твердості та пластичності визначає довговічність робочих поверхонь штамів при інтенсивних умовах тертя.

2. Металографічні дослідження наплавленого металу, отриманого з використанням попередньо обраних електродних матеріалів, виявили значну зміну структури – від переважно феритної до заєвтектичної, з формуванням великої кількості зміцнювальних фаз, частка яких може досягати 50 %. Утворення цих фаз зумовлює підвищення мікротвердості наплавленого шару до рівня 20 ГПа, що свідчить про ефективність вибраних електродів для зміцнення робочих поверхонь штамів.

3. Результати лабораторних випробувань наплавленого металу на опір абразивному зношуванню показали, що зносостійкість випробуваних матеріалів може відрізнятись до п'яти разів у межах однієї серії досліджень. Встановлено, що цей показник не корелює безпосередньо з вихідною твердістю металу, проте має виражену залежність від мікротвердості поверхні тертя, сформованої в процесі зношування. Найбільше зростання мікротвердості — до 4,1 ГПа — спостерігається у шарі, наплавленому електродами типу 65X11H3, де формується 15–20 % мартенситу деформації. Разом із тим, при близьких значеннях мікротвердості вищою зносостійкістю відзначаються матеріали, у структурі яких поряд із мартенситом деформації присутня пластична аустенітна складова, що сприяє зниженню крихкості й підвищенню опору руйнуванню в умовах тертя.

Список використаних джерел

1. Хрущов М.М. Абразивне зношування / М.М. Хрущов, М.А. Бабишев: Наука, 1970. 251 с.
2. Андрущенко М.І. Прогнозування механізму та інтенсивності зношування на основі оцінки співвідношення твердості абразиву та зношуваного матеріалу / М.І. Андрущенко, Р.А. Куликовський, М.Н. Бриков, Д.М. Андрущенко // Проблеми трибології (Problems of Tribology). – 2009. – №1. – С. 6-12.
3. Андрущенко М.І. Здатність до самозміцнення поверхні тертя в процесі абразивного зношування та зносостійкість сталей в залежності від вмісту вуглецю та хрому / М.І. Андрущенко, Р.А. Куликовський, М.Ю. Осипов, А.В. Холод, А.Е. Капустян // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2014. – №1. – С. 92-100.
4. Андрущенко М.І. Вплив вуглецю та хрому на здатність до зміцнення та зносостійкість безкарбідних сталей в умовах абразивного зношування / М.І. Андрущенко, О.Е. Рузов, Р.А. Куликовський, Н.Н. Бриков // Проблеми трибології (Problems of Tribology). – 2003. – №2. – С. 112-116.
5. Гаврилюк В.Г. Розподіл вуглецю у сталі / В.Г. Гаврилюк – Київ: Наукова думка. – 1987. – 208 с.

Автухов А.К.,
Ковалевський ЄВ.,
Борисенко О.С.,
Корнев О.С.
Державний
біотехнологічний
університет,
м. Харків, Україна
E-mail:
a.k.avtukhov@gmail.com

**АНАЛІТИЧНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ
ДОВГОВІЧНОСТІ ХРОМОНІКЕЛЕВИХ
ФОРМУЮЧИХ ІНСТРУМЕНТІВ ІЗ
ВИКОРИСТАННЯМ СТАТИСТИЧНИХ ТА
РЕГРЕСІЙНИХ МОДЕЛЕЙ**

DOI:

УДК 621.746

Автухов А.К., Ковалевський ЄВ., Борисенко О.С., Корнев О.С. Аналітичне прогнозування довговічності хромонікелевих формуючих інструментів із використанням статистичних та регресійних моделей

Анотація. У статті розглянуто проблему забезпечення надійності та прогнозування ресурсу двошарових хромонікелевих прокатних валків виконання ЛПХНд-63, які зазнають інтенсивного механічного, термічного та контактано-втомного зношування в умовах сучасних режимів прокатки. Непередбачувані відмови формуючих інструментів зумовлюють значні економічні втрати, що актуалізує необхідність розроблення методик достовірної оцінки їхнього фактичного стану та прогнозування наробітку.

У роботі проведено аналіз сучасних підходів до підвищення експлуатаційної стійкості валків, який свідчить про домінування напрямів, пов'язаних з удосконаленням матеріалів, хімічного складу та технологій термообробки. Разом із тим, питання прогнозування ресурсу з урахуванням умов та схем експлуатації залишається недостатньо опрацьованим.

На основі статистичних даних досліджено формуючі інструменти, що експлуатувалися у різних комбінаціях чистових та чернових клітей. Проведено оцінку однорідності добірок та взаємозв'язків між технологічними та експлуатаційними параметрами. Встановлено суттєву різницю у варіації показників залежно від схеми застосування формуючих інструментів..

З використанням методів множинної лінійної регресії побудовано модель прогнозування загального наробітку, яка відображає вплив твердості валка, кількості установок у чистовій та черновій клітях. Отримане рівняння дозволяє кількісно оцінювати зміну ресурсу за ключовими параметрами та може бути застосоване для оптимізації технологічних схем використання валків ЛПХНд-63.

Ключові слова: формуючі інструменти, ресурс, працездатність, методики прогнозування, технологічні характеристик, експлуатаційні характеристики, лінійні регресії

Avtukhov A.K., Kovalevsky E.V., Borisenko O.S., Kornev O.S. Analytical forecasting of the durability of chromium-nickel forming tools using statistical and regression models.

Abstract. The article considers the problem of ensuring the reliability and forecasting the resource of two-layer chromium-nickel rolling rolls of the LPHND-63 design, which are subject to intensive mechanical, thermal and contact-fatigue wear under modern rolling conditions. Unforeseen failures of forming tools cause significant economic losses, which makes it necessary to develop methods for reliable assessment of their actual condition and forecasting of operating time.

The paper analyzes modern approaches to increasing the operational stability of rolls, which indicates the dominance of directions related to the improvement of materials, chemical composition and heat treatment technologies. At the same time, the issue of forecasting the resource taking into account the conditions and operating schemes remains insufficiently studied.

Based on statistical data, forming tools operated in various combinations of finishing and roughing stands were investigated. The homogeneity of the selections and the relationships between technological and operational parameters were assessed. A significant difference in the variation of indicators depending on the scheme of application of forming tools was established.

Using multiple linear regression methods, a model for predicting the total operating time was constructed, which reflects the influence of roll hardness and the number of installations in finishing and roughing stands. The obtained equation allows quantitatively assessing the change in resource by key parameters and can be used to optimize technological schemes for using LPHND-63 rolls.

Keywords: forming tools, resource, performance, forecasting methods, technological characteristics, operational characteristics, linear regressions

Постановка проблеми.

Ефективність роботи сучасних прокатних станів значною мірою визначається надійністю та довговічністю формуючих інструментів, серед яких прокатні валки займають ключове місце. Хромонікелеві валки широко застосовуються в чорній металургії завдяки поєднанню високої твердості, стійкості до термічних навантажень та підвищеної зносостійкості. Проте інтенсивні режими прокатки, зростання швидкостей деформації, підвищені температури та контактні навантаження зумовлюють прискорення процесів механічного, термічного й контактено-втомного зношування таких валків. Це актуалізує необхідність достовірної оцінки їх фактичного ресурсу та можливості його прогнозування [1-4].

Непередбачувані відмови формуючих інструментів призводять до значних економічних втрат: збільшення простоїв обладнання, виникнення браку прокату, зростання витрат на ремонт і відновлення. Водночас, надмірно часта заміна інструмента без об'єктивного аналізу його реального стану призводить до необґрунтованого споживання матеріальних ресурсів. Тому актуальним є розроблення моделей прогнозування наробітку, що враховують параметри твердості валків, умови прокатки, кількість установок у чернових і чистових клітях та характеристики навантаження.

Сучасні тенденції цифровізації виробництва та розвиток методів аналітики даних відкривають можливості для комплексної діагностики стану валків та побудови математичних залежностей, які дозволяють переходити до проактивних стратегій технічного обслуговування. Визначення та прогнозування ресурсу хромонікелевих прокатних валків є важливим завданням для забезпечення стабільної якості прокатної продукції, підвищення економічної ефективності та зниження ризику аварійних ситуацій.

Отже, дослідження закономірностей втрати працездатності формуючих інструментів та розроблення методик прогнозування їх ресурсу є актуальним як з наукової, так і з виробничої точки зору та має суттєве практичне значення для підприємств металургійної галузі.

Формування мети дослідження.

Мета роботи: підвищення ресурсу двошарових хромонікелевих валків виконання ЛПХНД-63 за рахунок оптимізації технологічних схем їх використання.

Аналіз останніх досліджень.

Вітчизняні та зарубіжні розробки, що стосуються виробництва, застосування та підвищення терміну служби валків, показують, що реалізація проблеми підвищення їхньої стійкості проводиться в декількох напрямках. Головні з них включають розробку нових та оптимізацію застосовуваних хімічних складів валкових чавунів [5-7]; їх модифікування [8-12]; удосконалення технології виливки та термообробки [13-16].

Значна частина цих розробок базується на дослідженнях експлуатаційної стійкості прокатних валків [17-19].

Дослідження з експлуатаційної стійкості валків стану 2000 виконань ЛПХНд-63, ЛПХНд-71, ЛПХНд-74, які були виготовлені методом стаціонарного виливка показали, що залежно від клітей стану суттєво змінюються умови експлуатації валків (температура металу, що прокочується, швидкість прокатки, тиск, зусилля і момент прокатки, кількість циклів навантаження). Від зміни параметрів експлуатації валка по клітях суттєво залежить їх надійність, а також причини списання за відмовами [19].

Матеріали, наведені в цій роботі показують, що найбільш високі експлуатаційні параметри характерні для валків виконання ЛПХНд-74, а найнижчі – виконання ЛПХНд – 63. Але слід зазначити, що валки виконання ЛПХНд – 74 дещо дорожче виконання ЛПХНд – 71 і майже в 1, 8 рази – виконання ЛПХНд – 63. Це суттєво впливає на рентабельність роботи стану і, у випадку застосування більш дорогих валків, підвищує витрати на виробництво прокату [19].

Результати досліджень.

Дослідження експлуатаційної стійкості формуючих інструментів складний процес, складність якого обумовлена отриманням статистичних даних щодо експлуатаційних характеристик на діючому виробництві.

При проведенні досліджень було отримано інформацію щодо технологічних та експлуатаційних характеристик валків виконання ЛПХНд – 63 за різні періоди експлуатації і різними схемами їх використання. Усього було досліджено працездатність 96 формуючих інструментів. З них 52 використовувались під час експлуатації як в чорнових так і в чистових клітях, а 44 – тільки у чистових. При проведенні досліджень враховували такі показники: наробіток, т; загальне зняття металу, мм; наробіток на 1мм з'єму металу, т/мм; кількість установок; знімання металу за установку, мм; наробіток за установку, т. Отримані дані наведені у таблиці 1.

Розраховані для двох інформаційних масивів даних статистики технологічних та експлуатаційних характеристик наведені в таблиці 1 з якої видно, що більшість середніх значень і середня квадратичних відхилень параметрів характеристики в двох інформаційних масивах близькі між собою. Але слід зазначити, що на себе звертає увагу той факт що для всіх характеристик формуючих інструментів коефіцієнти варіації, що відображають роботу валків в чорнових клітях значно вище ніж для валків, що працюють в чистових клітях. Це пояснюється тим, що розглянуті добірки даних різняться між собою не тільки прикладами експлуатації, а також різнорідні за схемами використання. Одна група валків експлуатувалась в чистовій і чорнових клітях а друга тільки в чистових клітях. Об'єднання таких інформаційних масивів приводить к викривленню розрахункових значень статистик, а саме к зменшенню середніх значень і збільшенню дисперсії оскільки сумуються дані для валків, що працюють тільки в чистовій кліті. Інформація щодо експлуатації формуючих інструментів у чорновій кліті у другому інформаційному масиві таблиці не відображена оскільки має нульові значення.

Таблиця 1

Статистичні параметри технологічних та експлуатаційних характеристик формуючих інструментів виконання ЛПХНл-63

Статистичні параметри технологічних та експлуатаційних характеристик					
середній показник		середнє квадратичне відхилення		коефіцієнт варіації	
Твердість, HSD					
Д1* - 67,9	Д2* - 66,1	Д1* - 2,43	Д2* - 1,93	Д1* - 0,036	Д2* - 0,029
Д3* - 67,9	Д4* - 65,2	Д3* - 2,48	Д4* - 1,31	Д3* - 0,036	Д4* - 0,029
Σ Д1+Д2 - 67,9	Σ Д3+Д4 - 66,7	Σ Д1+Д2 - 2,42	Σ Д3+Д4 - 1,71	Σ Д1+Д2 - 0,036	Σ Д3+Д4 -0,026
Наробіток загальний, т					
Д1* - 150430	Д2* - 143572	Д1* - 48501	Д2* - 4869	Д1* - 0,322	Д2* - 0,382
Д3* - 74365	Д4* - 74458	Д3* - 2,48	Д4* - 1,31	Д3* - 0,037	Д4* - 0,020
Σ Д1+Д2-147842	Σ Д3+Д4 - 74395	Σ Д1+Д2 - 50586	Σ Д3+Д4 - 23618	Σ Д1+Д2 - 0,342	Σ Д3+Д4 - 0,318
Наробіток у чистовій кліті, т					
Д1* - 52939	Д2* - 45965	Д1* - 10590	Д2* - 28768	Д1* - 0,370	Д2* - 0,626
Д3* - 74365	Д4* - 74458	Д3* - 2,48	Д4* - 1,31	Д3* - 0,037	Д4* - 0,020
Σ Д1+Д2 - 62156	Σ Д3+Д4 - 74395	Σ Д1+Д2 - 23414	Σ Д3+Д4 -23618	Σ Д1+Д2 - 0,434	Σ Д3+Д4 - 0,318
Наробіток у чистовій кліті, т					
Д1* - 97491	Д2* - 97606	Д1* - 60690	Д2* - 55973	Д1* - 0,623	Д2* - 0,573
Зняття металу (загальне), мм					
Д1* - 43,4	Д2* - 39,6	Д1* - 8,02	Д2* - 9,18	Д1* - 0,185	Д2* - 0,232
Д3* - 37,2	Д4* - 38,6	Д3* - 9,58	Д4* - 13,40	Д3* - 0,258	Д4* - 0,348
Σ Д1+Д2 - 42,1	Σ Д3+Д4 - 37,4	Σ Д1+Д2 - 8,62	Σ Д3+Д4 - 10,30	Σ Д1+Д2 - 0,207	Σ Д3+Д4 - 0,281
Зняття металу (у чистовій кліті), мм					
Д1* - 27,0	Д2* - 22,2	Д1* - 9,57	Д2* - 12,6	Д1* - 0,354	Д2* - 0,547
Д3* - 37,2	Д4* - 38,6	Д3* - 9,58	Д4* - 13,40	Д3* - 0,258	Д4* - 0,348
Σ Д1+Д2 - 42,1	Σ Д3+Д4 - 37,4	Σ Д1+Д2 - 8,62	Σ Д3+Д4 - 10,30	Σ Д1+Д2 - 0,207	Σ Д3+Д4 - 0,281
Зняття металу (у черновій кліті), мм					
Д1* - 16,4	Д2* - 17,4	Д1* - 9,28	Д2* - 9,45	Д1* - 0,567	Д2* - 0,544
Наробіток на 1мм зняття металу (у чистовій кліті), т/мм.					
Д1* - 1956	Д2* - 1912	Д1* - 323	Д2* - 613	Д1* - 0,165	Д2* - 0,321
Д3* - 1984	Д4* - 1950	Д3* - 328	Д4* - 200	Д3* - 0,165	Д4* - 0,102
Σ Д1+Д2 - 1940	Σ Д3+Д4 - 1973	Σ Д1+Д2 - 447	Σ Д3+Д4 - 292	Σ Д1+Д2 - 0,237	Σ Д3+Д4 - 0,146
Наробіток на 1мм зняття металу (у черновій кліті), т/мм.					
Д1* - 6180	Д2* - 5987	Д1* - 1646	Д2* - 1773	Д1* - 0,266	0,296
Кількість установок (у чистовій кліті)					
Д1* - 15,9	Д2* - 12,6	Д1* - 6,41	Д2* - 8,60	Д1* - 0,403	Д2* - 0,685
Д3* - 19,1	Д4* - 19,6	Д3* - 4,01	Д4* - 6,99	Д3* - 0,210	Д4* - 0,356
Σ Д1+Д2 -14,7	Σ Д3+Д4 -19,7	Σ Д1+Д2- 7,32	Σ Д3+Д4- 5,01	Σ Д1+Д2-0,503	Σ Д3+Д4-0,261
Кількість установок (у черновій кліті)					
Д1* - 4,64	Д2* - 4,55	Д1* - 2,82	Д2* - 2,56	Д1* - 0,607	Д2* -
Нарбіток за установку (загальний),т					
Д1* - 24600	Д2* - 25324	Д1* - 5585	Д2* - 3739	Д1* - 0,439	Д2* - 0,348
Д3* - 3822	Д4* - 3798	Д3* - 736	Д4* - 226	Д3* - 0,192	Д4* - 0,059
Σ Д1+Д2 - 8447	Σ Д3+Д4 - 3811	Σ Д1+Д2 - 3760	Σ Д3+Д4 - 614	Σ Д1+Д2 - 0,444	Σ Д3+Д4 - 0,159
Нарбіток за установку (у чистовій кліті),т					
Д1*-3447	Д2*-3880	Д1*-726	Д2*-815	Д1*-0,211	Д2*-0,212
Д3*-3822	Д4*-3798	Д3*-736	Д4*-226	Д3*-0,192	Д4*-0,59
Σ Д1+Д2-1,89	Σ Д3+Д4-2,0	Σ Д1+Д2-0,33	Σ Д3+Д4-0,27	Σ Д1+Д2-0,177	Σ Д3+Д4-0,142
З'єму металу за установку (у чистовій кліті), мм					
Д1* - 1,80	Д2* - 2,05	Д1* - 0,31	Д2* - 0,33	Д1* - 0,171	Д2* - 0,162
Д3*-1,98	Д4*-1,96	Д3*-0,31	Д4*-0,20	Д3*-0,159	Д4*-0,100
Σ Д1+Д2-2,34	Σ Д3+Д4-2,0	Σ Д1+Д2-0,51	Σ Д3+Д4-0,27	Σ Д1+Д2-0,223	Σ Д3+Д4-0,142
З'єму металу за установку (у черновій кліті),, мм					
Д1* - 3,48	Д2* - 3,77	Д1* - 0,86	Д2* - 0,83	Д1* - 0,249	Д2* - 0,220

Примітка: Д1 – добірка даних №1; Д2* – добірка даних №2; Д3* – добірка даних №3; Д4* – добірка даних №4; $\sum$ Д1+Д2 – інформаційний масив сумарної добірки даних №1 та $\sum$ Д3+Д4 – інформаційний масив сумарної добірки даних №3 та №4

Щоб перейти до аналізу впливу твердості, і кількості установок на загальний наробіток формуючих інструментів були проаналізовані гіпотези по можливості об'єднання двох добірок даних різного періоду експлуатації та використані за різними схемами в один інформаційний масив.

Дослідження проводили за методикою [20], яка передбачає, що вся сукупність з двох інформаційних масивів поділяється на інтервали (для виконання розрахунків доцільно прийняти 7 інтервалів), потім у двох стовпцях по цих інтервалах визначається кожна добірка даних окремо і обчислюється критерій перевірки гіпотези χ^2 по залежності

$$\chi^2 = n_1 n_2 \sum_{k=1}^k \frac{1}{m_{11} + m_{12}} \left(\frac{m_{11}}{n_1} - \frac{m_{12}}{n_2} \right)$$

де n_1 та n_2 – обсяг першої та другої вибірок;
 m_{11} та m_{12} – частота в інтервалі для першої та другої добірок даних;
 k – кількість інтервалів розбиття сукупної добірки даних.

Гіпотеза про однорідність двох добірок даних приймається, якщо за заданим рівнем значущості α дотримується нерівність:

$$\chi^2 < \chi^2_{\alpha; k-1}$$

де $k-1$ – число ступенів свободи, а $\chi^2_{\alpha; k-1}$ – табличне значення критерію за відповідним рівнем значущості α .

Для перевірки гіпотези та рівності середніх значень випадкової величини у двох добірках даних проводили, насамперед, розрахунок статистик з кожної добірки даних. На наступному етапі перевіряли гіпотези про рівність дисперсій двох добірок даних за критерієм Фішера $F = S_1^2 / S_2^2$, який має F-розподіл с $k_1 = n_1 - 1$ та $k_2 = n_2 - 1$ ступенями свободи, де S_1^2 , n_1 та S_2^2 , n_2 відповідно дисперсії ($S_1^2 > S_2^2$) та обсяги двох добірок даних.

При прийнятому рівні значущості α гіпотеза щодо рівності дисперсій двох добірок даних підтверджувалась, якщо $F < F_{\alpha; k_1; k_2}$, де $F_{\alpha; k_1; k_2}$ – табличні значення критеріїв. Потім перевірялась гіпотеза щодо рівності середніх значень випадкової величини двох вибірок, при цьому якщо гіпотеза рівності дисперсій не була відкинута для перевірки гіпотези рівності середніх обчислюється критерій Стюдента

$$t = \frac{x_1 - x_2}{S} \sqrt{n_1 \cdot n_2 / (n_1 + n_2)}$$

де

$$S = \sqrt{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2 / (n_1 + n_2 - 2)}$$

Умовою прийняття гіпотези про рівність середніх є нерівність $|t| < t_{\alpha/2; k}$, де $t_{\alpha/2; k}$ – табличні значення критерію Стюдента або рівня значущості α с числом ступенів свободи $k = n_1 + n_2 - 2$.

При аналізі взаємних зв'язків характеристик формуючих інструментів використовували графі кореляційних зв'язків, до яких входять тільки зв'язки виявлені при рівні 005.

Для розрахунку критеріїв перевірки гіпотез використовували значення статистичних показників за певний період експлуатації, що наведені в таблиці 1. Розраховані та табличні значення критеріїв про рівні значимості 0,05 наведені у таблиці 2.

Таблиця 2

Результати розрахунків щодо перевірки гіпотези рівності середніх значень у дослідних добірках даних

Технологічні та експлуатаційні характеристики формуючих	Статистика добірок даних				Критерії та допоміжні параметри							Гіпотеза щодо рівності *	
	X_1	S_1	X_2	S_2	F	k_1/k_2	$F_{0,05}; k_1, k_2$	S	t	$K(k^1/c)$	$F_{0,05}; k$	середніх	дисперсій
Інформаційний масив, що складається з добірок даних Д1*та Д2*													
Кількість установок	20,5	5,42	17,1	8,08	2,22	19/32	1,92	6,54	1,83	50	2,00	(+)	(+)
Зняття металу, мм	43,4	8,02	39,6	9,18	1,31	19/32	1,92	8,77	1,53	51	2,00	(+)	(+)
Загальний наробіток, т	1504330	48501	143572	54869	1,28	19/32	1,92	52586	0,46	51	2,00	(+)	(+)
Твердість, HS D	67,9	2,43	66,1	1,93	1,59	32/19	2,05	2,57	2,81	50	2,01	(+)	(+)
Інформаційний масив, що складається з добірок даних Д3*та Д4*													
Кількість установок	19,1	4,01	19,6	6,99	3,04	13,29	2,08	5,12	0,24	41	2,02	(+)	(+)
Зняття металу, мм	37,2	9,58	38,6	13,4	1,96	13,29	2,08	12,3	0,35	42	2,02	(+)	(+)
Загальний наробіток, т	74365	23104	74458	25642	1,23	13,29	2,08	24884	0,01	42	2,02	(+)	(+)
Твердість, HSD	67,9	2,48	66,8	131	3,58	29/13	2,39	2,19	3,82	43	2,01	(+)	(+)

* Гіпотеза приймається – (+), не приймається – (-)

Для побудови рівняння регресії, що описує вплив твердості (HSD), кількості установок у чистовій кліті (N_1) та кількості установок у черновій кліті (N_2) на загальний наробіток (N_3), використовували модель множинної лінійної регресії.

Розрахунок коефіцієнтів виконували за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення в пакеті "Аналіз даних" MS Excel,

На основі розрахунків було отримуємо рівняння множинної лінійної регресії:

$$N_3 = -183570 + 5293.4 \text{ HSD} - 2053.4 N_1 + 9345.5 N_2$$

Аналіз коефіцієнтів, що показують вплив кожного фактора на загальний наробіток засвідчив:

- збільшення твердості на 1 одиницю (за умови, що показники N_1 та N_2 не змінюються) призводить до збільшення загального наробітку (N_3) в середньому на 5293.4 т. Це відповідає очікуванням, оскільки валки з підвищеним рівнем твердості мають більшу стійкість.

- збільшення кількості установок у чистовій кліті (N_1) на 1 одиницю (за умови, що HSD і N_2 не змінюються) призводить до зменшення загального наробітку (N_3) в середньому на 2053.4 т. Це може свідчити про те, що кількість установок в чистовій кліті при використанні формуючих інструментів треба ретельно розраховувати.

- збільшення кількості установок у черновій кліті (N_2) на 1 одиницю ((за умови, що HSD і N_1 не змінюються) призводить до збільшення загального наробітку (N_3) в середньому на 9345.5 т. Це свідчить про те, що валки, які частіше використовуються в черновій кліті, мають більший потенціал для відновлення та менший вплив на втрату їх працездатності.

Висновки

У результаті проведених досліджень підтверджено актуальність проблеми прогнозування ресурсу хромонікелевих двошарових валків виконання ЛПХНд-63, що зумовлено інтенсивністю експлуатаційних навантажень, високими термічними та контактними параметрами процесу прокатки, а також значними економічними втратами у разі непередбачуваних відмов формуючих інструментів.

Аналіз сучасного стану питання показав, що підвищення експлуатаційної стійкості валків реалізується переважно за рахунок удосконалення матеріалів, оптимізації хімічного складу валкових чавунів, покращення технологій виливки та термообробки. Проте методичні підходи до прогнозування ресурсу валків залежно від технологічних режимів їх застосування потребують подальшого вдосконалення.

На основі опрацювання статистичних даних встановлено, що валки, які експлуатуються за різними схемами (у чистових та/або чернових клітках), характеризуються істотною відмінністю за рівнем варіації експлуатаційних параметрів.

З метою прогнозування загального наробітку валків на основі множинного регресійного аналізу отримано математичну модель, яка має чіткий фізичний зміст і адекватно описує вплив ключових факторів: твердості, кількості установок у чистовій та черновій клітках на загальний ресурс формуючих інструментів.

Отримані результати дозволяють обґрунтовано оптимізувати технологічні схеми застосування валків ЛПХНд-63 для забезпечення підвищення їх ресурсу та покращення економічної ефективності роботи прокатних станів.

Список використаних джерел

1. Proizvodstvo i primenenie prokatnyh valkov: spravochnik / T. S. Skoblo i dr. Red. T. S. Skoblo. Harkov, 2013. CD № 1. 572 s.

2. Avtukhov A. Analysis of structure formation stability in the centrifugal cast plate rolls of nickel-chromium cast iron when entering inoculant feedings/ A.Avtukhov // Metallurgical and Mining Industry.-2015.-№9-P.1080-1084.
3. A. Avtukhov, A. Martynenko, V. Bantkovskiy, Y. Kovalevskiy. Influence of cast iron vacuuming on the level of mechanical characteristics of the material of the working layer of doublelayer chromium-nickel rolls. *Technology audit and production reserves* — № 4/1(66), 2022. P 11-14
4. Автухов А.К. Методичні засади оцінки економічної ефективності у технологіях виробництва прокатних валків / А.К. Автухов // Актуальні проблеми інноваційної економіки. – 2017. - №2. – С.25-31.
5. Чавун робочого шару двошарових прокатних валків: Пат. №101550 Україна, МПК (2015.01) C22C37/06, C22C37/08, C22C37/10 № у 2015 00918; заявл. 05.02.2015; опубл. 25.09.2015, Бюл. №18.
6. Avtuhov A.K. Obobshenie razrabotok po ispolzovaniyu i proizvodstvu hromonikelevogo chuguna dlya izgotovleniya prokatnyh valkov. Resursozberigayuchi tehnologii, materialy ta obladnannya u remontnomu virobnictvi: Visnik HNTUSG H.: HNTUSG, 2017. Vip.183. S. 64-76.
7. Автухов А.К., Скобло Т.С. Особливості розподілу хімічних елементів у фазах відцентроволитих валків з хромонікелевого модифікованого чавуну. *Збірник тез доповідей VII Всеукраїнській науково практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Підвищення надійності машин і обладнання»* : Крапивницький: ЦНТУ, 2018. С .137
8. Primenenie shlakoobrazuyushih smesey pri proizvodstve i renovacii izdelij: monografiya / T. S. Skoblo, A. K. Avtuhov i dr.; Pod red. d.t.n., prof. T. S. Skoblo. Harkov: «Polosataya tipografiya», 2016. 284s.
9. Skoblo T. S., Avtuhov A. K., Sokolov R. G. Vliyanie modifikatorov novogo pokoleniya Superseed® 75 i Reseed® na strukturu metalla centrobezhnolityh listoprokatnyh valkov. Litejnoe proizvodstvo. 2015. №2. S. 12-14.
10. Elkem ASA Research. Модификатор Superseed®Inoculant [Текст] / ИТБ "Литьё Украины", 2003. – № 11 (39)
11. Elkem ASA Research. Модификатор Foundrisil®Inoculant [Текст] / ИТБ "Литьё Украины", 2004. – № 2 (42)
12. Elkem ASA Research. Модификатор Reseed®Inoculant [Текст] / ИТБ "Литьё Украины", 2004. – № 7 (47)
13. Спосіб виробництва прокатних валків: Пат. №105761 Україна, МПК (2016.01) B21B27/00, B22D 23/00 № у 2015 07442; заявл. 24.07.2015; опубл.11.04.2016, Бюл. №7.
14. Skoblo T. S., Avtuhov A. K., Sokolov R. G. Vliyanie tehnologicheskikh parametrov otlivki dvuhslojnyh valkov na ih tverdost i koercitivnuyu silu. Problemi nadijnosti mashin ta zasobiv mehanizaciyi silskogospodarskogo virobniictva: Visnik HNTUSG H.: HNTUSG, 2014. Vip. 151. S. 108-113.
15. Ocenka vliyaniya parametrov otlivki dvuhslojnyh listoprokatnyh valkov na skorost kristallizacii i raspredelenie ostatochnyh napryazhenij. Skoblo T. S. Avtuhov A. K. i dr. Stal. 2016. №10. S. 34-38.
16. Автухов А.К. Оптимізація технологічних параметрів виготовлення прокатних валків з хромонікелевого чавуну. *Проблеми математичного моделювання*: матеріали Всеукр. наук.-метод. конф., м. Кам'янське 23-25 трав. 2018 р. Кам'янське: ДДТУ, 2018. С.178
17. Skoblo T. S. Avtuhov A. K., Klimanchuk V. V. Prichiny i harakteristika otkazov listoprokatnyh valkov stanov goryachej prokatki. Metallurgiya mashinostroeniya. 2014. №3. S. 14-17.

18. Skoblo T. S., Avtuhov A. K., Sokolov R. G. Analiz ekspluatacionnoj stojkosti dvuhslojnyh chugunnyh valkov. Stal. 2015. №2. S. 34-37.
19. Skoblo T. S., Avtuhov A. K., Sokolov R. G. Opyt ekspluatatsii rabochih valkov stana 2000. Nauchniyat potencial na sveta-13. Materiali za IH mezhdunarodna nauchna praktichna konferenci. Bolgariya. 2013. Tom 20. S. 13-27.
20. Автухов А.К., Ковалевський Є.В. Розробка методики дослідження технологічних та експлуатаційних характеристик формуючих інструментів станів гарячої прокатки. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів* — № 25, 2024. С 43-49

References

1. Skoblo T.S., Sidashenko A.I., Aleksandrova N.M., Belkin E.L., Vlasovets V.M., Klochko O.Yu., Martynenko A.D. (2013). Production and application of rolling rolls. Reference book. Ed. Prof. T.S. Skoblo. Kharkiv. Izd. CD No. 1. 572 p.
2. Avtukhov A. Analysis of structure formation stability in the centrifugal cast plate rolls of nickel-chromium cast iron when entering inoculant feedings/ A.Avtukhov // Metallurgical and Mining Industry.-2015.-№9-P.1080-1084.
3. A. Avtukhov, A. Martynenko, V. Bantkovskiy, Y. Kovalevskiy. Influence of cast iron vacuuming on the level of mechanical characteristics of the material of the working layer of doublelayer chromium-nickel rolls. *Technology audit and production reserves* — № 4/1(66), 2022. P 11-14
4. Avtukhov A.K. Methodological principles of assessing economic efficiency in technologies for the production of rolling rolls / A.K. Avtukhov // Actual problems of innovative economy. – 2017. - No. 2. – P.25-31.
5. Cast iron of the working layer of two-layer rolling rolls: Pat. No. 101550 Ukraine, MPK (2015.01) C22C37/06, C22C37/08, C22C37/10 No. u 2015 00918; appl. 05.02.2015; publ. 25.09.2015, Bull. No. 18.
6. Avtukhov A.K. Generalization of developments on the use and production of chromium-nickel cast iron for the manufacture of rolling rolls. Resource-saving technologies, materials and equipment from repair manufacturing: Newsletter of KhNTUSG Kh.: KhNTUSG, 2017. Issue 183. pp. 64-76.
7. Avtukhov A.K., Skoblo T.S. Features of the distribution of chemical elements in the phases of centrifugally cast rolls made of chromium-nickel modified cast iron. Collection of abstracts of reports to the VII All-Ukrainian scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists "Improving the reliability of machines and equipment": Krapivnytskyi: TsNTU, 2018. P. 137
8. Application of slag-forming mixtures in the production and renovation of products: monograph / T. S. Skoblo, A. K. Avtukhov et al.; Ed. by Doctor of Technical Sciences, Professor T. S. Skoblo. Kharkov: "Striped Printing House", 2016. 284 p.
9. Skoblo T.S., Avtukhov A.K., Sokolov R.G. Influence of new generation modifiers Superseed® 75 and Reseed® on the structure of metal of centrifugally cast sheet rolling rolls. Foundry production. 2015. No. 2. P. 12-14.
10. Elkem ASA Research. Superseed® Inoculant Modifier [Text] / ITB "Casting of Ukraine", 2003. - No. 11 (39)
11. Elkem ASA Research. Foundrisil® Inoculant Modifier [Text] / ITB "Casting of Ukraine", 2004. - No. 2 (42)
12. Elkem ASA Research. Reseed® Inoculant Modifier [Text] / ITB "Casting of Ukraine", 2004. - No. 7 (47)
13. Method of manufacturing rolling rolls: Pat. No. 105761 Ukraine, MPK (2016.01) B21B27/00, B22D 23/00 No. u 2015 07442; appl. 24.07.2015; publ. 11.04.2016, Bull. No. 7.

14. Skoblo T. S., Avtukhov A. K., Sokolov R. G. Influence of technological parameters of casting of double-layer rolls on their hardness and coercive force. Problems of reliability of machines and means of mechanization of agricultural production: Bulletin of KhNTUSG Kh.: KhNTUSG, 2014. Issue 151. Pp. 108-113.
15. Evaluation of the influence of casting parameters of two-layer sheet-rolled rolls on the rate of crystallization and distribution of final stresses. Skoblo T. S. Avtukhov A. K. and others Stal. 2016. No. 10. P. 34-38.
16. Avtukhov A.K. Optimization of technological parameters for the production of rolling rolls from chromium-nickel cast iron. Problems of mathematical modeling: materials of the All-Ukrainian Scientific-Methodological Conference, Kamianske, May 23-25, 2018. Kamianske: DSTU, 2018. P.178
17. Skoblo T. S. Avtukhov A. K., Klymanchuk V. V. Causes and characteristics of failures of sheet-rolled rolls of hot rolling mills. Machine-building metallurgy. 2014. No. 3. P. 14-17.
18. Skoblo T. S., Avtukhov A. K., Sokolov R. G. Analysis of operational durability of two-layer cast iron rolls. Steel. 2015. No. 2. P. 34-37.
19. Skoblo T. S., Avtukhov A. K., Sokolov R. G. Experience in the use of workers' rolls of the year 2000. Nauchniyat potentsial na sveta-13. Materials for the IX international scientific practical conference. Bulgaria. 2013. Volume 20. P. 13-27.
20. Avtukhov A.K., Kovalevsky E.V. Development of a methodology for studying the technological and operational characteristics of forming tools of hot rolling mills. Technical Service of Agro-Industrial, Forestry and Transport Complexes — No. 25, 2024. P. 43-49.

**Автухов А. К.,
Ковалевський Є. В.,
Борисенко О. С.,
Корнев О. С.**
Державний
біотехнологічний
університет,
м. Харків, Україна
E-mail:
a.k.avtukhov@gmail.com

ОЦІНКА ЦИКЛІЧНОЇ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ ВИСОКОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ З РІЗНИМ ТИПОМ ЦЕМЕНТИТНОЇ СІТКИ

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-27-110>

УДК 621.746

Автухов А.К., Ковалевський ЄВ., Борисенко О.С., Корнев О.С. Оцінка циклічної тріщиностійкості високовуглецевих сталей з різним типом цементитної сітки

Анотація. У статті досліджено вплив структурних складових заєвтектоїдних графітизованих сталей на експлуатаційні характеристики формуючих інструментів з гвинтовими калібрами. Показано, що складні умови контактної взаємодії, інтенсивне тепловиділення та нерівномірний розподіл напружень зумовлюють прискорене зношування і контактну втому робочих поверхонь валків, що висуває підвищені вимоги до матеріалу та режимів його термічної обробки.

Експериментально досліджено заєвтектоїдні сталі з різною морфологією карбідної фази та графітових включень за умов одно- та багатоступеневої нормалізації з різних температур і швидкостей охолодження. Встановлено закономірності впливу температури аустенітизації та режимів охолодження на подрібнення карбідів, сфероїдизацію перліту й формування структурно вільного цементиту. Показано, що багатоступенева нормалізація з прискореним охолодженням забезпечує підвищення термічної витривалості та циклічної тріщиностійкості сталей.

Отримано рівняння регресії, які пов'язують статичну тріщиностійкість і термічну витривалість зі розмірами та відстанню між карбідними включеннями. На цій основі розроблено бальну шкалу оцінювання впливу карбідної фази на працездатність валків кулькопрокатних станів. Встановлено, що найкращі експлуатаційні властивості мають сталі зі сфероїдизованим перлітом, компактними або кулястими включеннями графіту та дрібнодисперсними відокремленими карбідами.

Ключові слова: заєвтектоїдна сталь, графітизація, прокатні валки, термічна витривалість, тріщиностійкість, карбідна сітка, сфероїдизація.

Avtukhov A.K., Kovalevsky E.V., Borisenko O.S., Kornev O.S. Evaluation of cyclic crack resistance of high-carbon steels with different types of cementite mesh

Abstract. The article investigates the influence of structural constituents of hypereutectoid graphitized steels on the service performance of forming tools with helical calibers. It is shown that complex contact interaction conditions, intensive heat generation, and non-uniform stress distribution lead to accelerated wear and contact fatigue of the roll working surfaces, which imposes increased requirements on the material and its heat treatment regimes.

Hypereutectoid steels with different morphologies of the carbide phase and graphite inclusions were experimentally studied under single- and multi-stage normalizing at various temperatures and cooling rates. The regularities of the influence of austenitizing temperature and cooling conditions on carbide refinement, pearlite spheroidization, and the formation of

structurally free cementite were established. It was demonstrated that multi-stage normalizing with accelerated cooling ensures enhanced thermal endurance and cyclic crack resistance of the steels.

Regression equations were obtained that relate static fracture toughness and thermal endurance to the size of carbide inclusions and the distance between them. On this basis, a scoring scale was developed to assess the influence of the carbide phase on the performance of rolls for ball-rolling mills. It was established that steels with spheroidized pearlite, compact or globular graphite inclusions, and finely dispersed isolated carbides exhibit the best service properties.

Keywords: hypereutectoid steel, graphitization, rolling rolls, thermal endurance, fracture toughness, carbide network, spheroidization.

Постановка проблеми.

Формуючі інструменти з гвинтовими калібрами широко застосовуються при виробництві кульок для подрібнення матеріалів різного призначення. Особливістю роботи гвинтових калібрів є поєднання процесів деформування і транспортування металу, внаслідок чого контакт інструмента із заготовкою має складний ковзнокочувальний характер. При цьому контактні напруження розподіляються нерівномірно вздовж гвинтової лінії, а їх максимальні значення виникають у вхідній зоні калібру, де відбувається початкова пластична деформація матеріалу.

В процесі експлуатації формуючих інструментів з гвинтовими калібрами спостерігається інтенсивне тепловиділення, обумовлене тертям і пластичною деформацією металу. Нерівномірний розподіл температури по поверхні калібру призводить до виникнення термічних напружень, що, у поєднанні з механічними навантаженнями, сприяє розвитку контактної втоми та прискореному зношуванню робочих поверхонь.

Важливим фактором забезпечення довговічності формуючих інструментів з гвинтовими калібрами є правильний вибір матеріалу та режимів термічної обробки. [1].

Традиційно для виготовлення прокатних валків широко застосовуються чавуни та леговані сталі, однак їх експлуатаційні можливості в умовах кулькопрокатних станів є обмеженими через недостатню тріщиностійкість або знижену пластичність. У зв'язку з цим зростає інтерес до використання заєвтектоїдних графітізованих сталей, які поєднують підвищені міцнісні характеристики зі здатністю до релаксації напружень за рахунок наявності графітових включень.

Разом із тим, наявні наукові публікації не дають систематизованих відомостей щодо впливу хімічного складу та режимів термічної обробки на формування мікроструктури заєвтектоїдних графітізованих сталей, зокрема на морфологію, розміри та просторовий розподіл карбідної фази [2]. Недостатньо вивченими залишаються також питання взаємозв'язку між структурним станом сталей і рівнем їх статичної та циклічної тріщиностійкості, термічної витривалості та загальної експлуатаційної стійкості валків.

Особливо актуальним є встановлення кількісних критеріїв оцінювання впливу карбідних і графітових включень на працездатність формуючих інструментів, що дозволило б обґрунтовано керувати структуроутворенням на стадіях виплавки, модифікування та термічної обробки. Розроблення таких критеріїв є необхідною умовою для цілеспрямованого вибору матеріалу валків і підвищення їх ресурсу без суттєвого ускладнення технології виробництва.

Формування мети дослідження.

Мета роботи: визначити вплив структурних складових у заєвтектоїдних сталях на експлуатаційні характеристики формуючих інструментів.

Аналіз останніх досліджень.

В останні роки з'явилися дані, що свідчать про використання заевтектоїдних сталей для виготовлення формувальних інструментів, які застосовуються на листо- та сортопрокатних станах, а також для виготовлення шайб профілегибних агрегатів [3]. Такі валки є співставними з чавунними та мають вищі міцнісні й пластичні властивості. Запропоновані графітізовані сталі істотно відрізняються від відомих раніше тим, що включення графіту формуються в них не в процесі графітізувального відпалу, а під час кристалізації та охолодження виливки. Це дає змогу шляхом варіювання хімічного складу та застосування різних технологічних прийомів отримувати заготовки із заданим рівнем експлуатаційних характеристик.

Під час виробництва виливок із графітізованих сталей значну увагу приділяють питанням легування та модифікування. Однак у наявних публікаціях з цього питання [4,5] наведено надто широкі межі вмісту елементів, відсутні дані щодо концентрації основних графітізувальних добавок, зокрема кремнію, а також не визначено способи введення й ефективна кількість добавок-модифікаторів. Автори обмежуються лише переліком уведених лігатур, які, судячи зі структури сталей, містять кремній, кальцій, магній, церій та інші компоненти.

У багатьох розглянутих публікаціях, присвячених розробці високовуглецевих сталей, передбачено використання таких матеріалів для виготовлення валків передчистових і чистових клітей сортових станів. Однак цього недостатньо для застосування подібної інформації під час виробництва валків кулькопрокатних станів, оскільки в ній відсутні дані щодо рівня механічних та експлуатаційних властивостей. Водночас відсутні відомості про режими термічної обробки та концентрації низки основних елементів. Тому без додаткових систематизованих досліджень неможливо оцінити ефективність використання подібних високовуглецевих матеріалів для валків кулькопрокатних станів.

Результати досліджень.

В роботі досліджували два типи заевтектоїдних сталей: із грубою цементитною сіткою та мікроділянками ледебуриту, а також зі структурно вільним цементитом, рівномірно розподіленим у металевій матриці.

Хімічний склад досліджуваних матеріалів наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Хімічний склад заевтектоїдних сталей

Умовний номер плавки	Вміст елементів, %; інше - Fe						
	C	Si	Mn	S	Cr	Ni	Mo
1	1,68	2,57	0,77	0,04	0,80	1,05	0,31
2	1,23	1,99	0,42	0,03	0,74	0,86	0,33
3	1,40	2,01	0,45	0,03	0,76	0,86	0,39
4	1,72	2,07	0,60	0,03	0,17	0,14	0,09

Для визначення структури матеріалів та встановлення впливу швидкості охолодження на поведінку структурно вільного цементиту й ступінь сфероїзації перліту досліджували зміни, що відбуваються під час охолодження сталі з різних температур на повітрі та під вентилятором.

Проводили та аналізували як одноступеневі обробки за температур 850; 950; 1050 °С, так і багатоступеневі – за 950 °С, 850 °С; 1050, 950 °С і 1050, 950, 850 °С.

Встановлено, що при одноступеневих обробках зміна швидкості охолодження практично не впливає на сфероїдизацію перліту матриці. Більшою мірою проявляється роль температури аустенітизації. За нормалізації з 850 °С у структурі матриці з'являються дрібні сфероїдизовані карбіди. Підвищення температури нормалізації до 950 °С призводить до подрібнення більшої частини голок вторинного цементиту. Характерні структури термічно оброблених сталей наведено на рис. 1.

Найбільш істотний вплив швидкості охолодження проявляється за багатоступеневої обробки. Різниця у структурі помітна, починаючи навіть із порівняно низьких температур – 950, 850 °С. Прискорене охолодження (вентилятором) підвищує ступінь сфероїдизації перліту. Подвійна нормалізація з вищих температур – 1050, 950 °С – за прискореного охолодження забезпечує подрібнення карбідів у сталях із розірваною цементитною сіткою, а за наявності грубої сітки – її потоншення та збереження без змін ділянок ледебуритної евтектики. Прискорене охолодження після кожного ступеня нормалізації перешкоджає подальшій коагуляції карбідів. Структурні зміни в матриці за потрібної нормалізації 1050, 950 і 850 °С практично не відрізняються від подвійної.

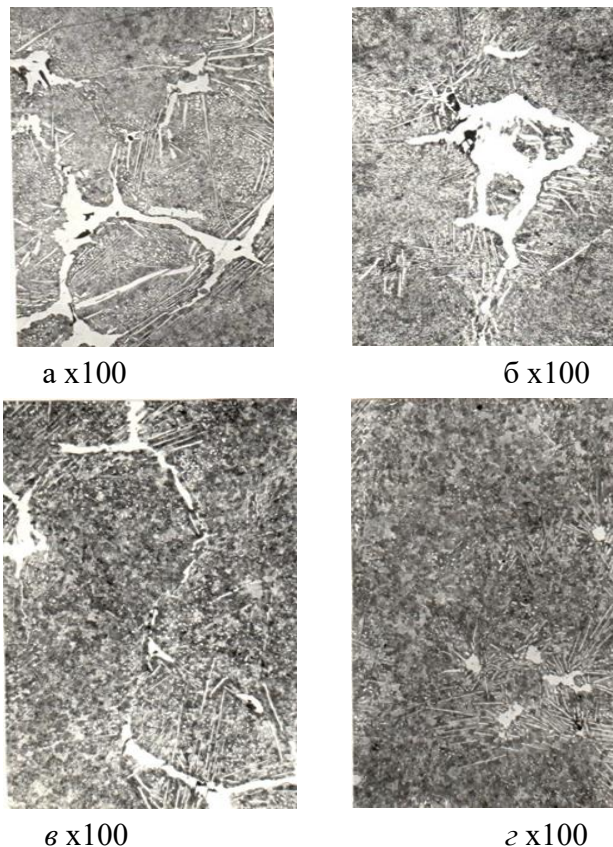


Рис. 1. Мікроструктури досліджених заевтектоїдних сталей, де: а – плавка 1, нормалізація за 950 °С; б – плавка 7, подвійна нормалізація за 1050 і 950 °С; в – плавка 8, подвійна нормалізація за 1050 і 950 °С; г – плавка 4, потрібна нормалізація за 1050, 950 і 850 °С.

Оцінку інтенсивності розчинення карбідної фази за різних температур обробки здійснювали шляхом зіставлення зразків, що пройшли нормалізацію та гартування.

Подрібнення карбідної фази (рис. 1б) та сфероїдизація графітових включень істотно знижують зародження тріщин.

Найбільшу термічну витривалість мають сталі, структура яких складається зі сфероїдизованого перліту з включеннями графіту компактної або кулястої форми та дрібних подрібнених включень цементиту (рис. 1в).

Лабораторні випробування з визначення статичної тріщиностійкості показали, що сталі з грубою цементитною сіткою (рис. 1г) характеризуються вищою статичною тріщиностійкістю порівняно зі сталями, які мають тонку карбідну сітку або структурно вільний цементит, рівномірно розподілений у матриці.

Тріщиностійкість сталей з рівномірними включеннями вторинних карбідів є неоднаковою. У сталях з великими відокремленими включеннями карбідів схильність до утворення тріщин (статична тріщиностійкість) є помітно вищою.

Водночас встановлено, що формування в структурі сталі сфероїдизованих графітових включень гальмує ріст втомних тріщин.

Отже, результати досліджень дали змогу встановити, що максимальною циклічною тріщиностійкістю характеризуються заевтектоїдні сталі, структура яких складається з просторового каркаса у вигляді вторинних карбідів і металевої матриці із зернистим перлітом та сфероїдизованими включеннями графіту.

Відповідно до цього виникла необхідність визначити розміри карбідних включень та їх розподіл у матриці графітізованої сталі з метою забезпечення максимальної експлуатаційної стійкості прокатних валків.

За стандартною програмою Excel було отримано такі рівняння регресії:

$$K_{IC} = 16,37 + 0,58X_1 + 0,94X_2 + 0,001X_1^2 - 0,006X_2^2;$$

$$N_{ц} = -1177,58 + 67,98X_1 + 33,62X_2 - 0,45X_1^2 - 0,22X_2^2;$$

де: K_{IC} – статична тріщиностійкість сталі, МПа $\sqrt{М}$;
 $N_{ц}$ – термічна витривалість сталі, кількість циклів;
 X_1 – поперечний розмір карбідних включень, мкм;
 X_2 – відстань між карбідними включеннями, мкм.

На підставі аналізу мікроструктур і рівнянь регресії було розроблено бальну шкалу оцінювання впливу карбідних включень (табл. 2) на стійкість валків кулькопрокатних станів.

Таблиця 2

Характеристика карбідних включень

Балл	Доля карбідної фази, %	Наявність карбідної сітки	Розмір сфероїдизованих включень, мкм	Відстань між сфероїдизованими включеннями, мкм
I	Більше 15,0	Суцільна карбідна сітка	2...10	До 5
II	12,0...15,0	Розірвана карбідна сітка	10...25	5...15
III	10,0...12,0	Розірвана та потовщена карбідна сітка	25...40	15...30
IV	7,0...10,0	Окремі островки карбідної сітки	40...50	30...40
V	Менше 7,0	Залишки карбідної сітки	50...70	Більше 40

Розроблена бальна шкала характеризує загальне різноманіття форм виділень карбідної фази. Встановлено, що найкращі експлуатаційні властивості мають сталі, карбідна фаза яких представлена відокремленими карбідними включеннями розміром до 50 мкм (V бал). Сталі, карбідна фаза яких складається із суцільної карбідної сітки (I бал), характеризуються зниженими експлуатаційними властивостями.

Аналіз структури сталей 150ХНМ, 180СХНМ і 150СГНМ з урахуванням розробленої бальної шкали дав змогу дійти висновку, що для виготовлення валків кулькопрокатних станів найбільш доцільно застосовувати сталь 150СГНМ.

Мікроструктура цієї сталі після остаточної термічної обробки має пластівчасті включення графіту (рис. 1а) та карбідну фазу у вигляді скоагульованих включень (IV і V бал).

Висновки.

Встановлено, що параметри термічної обробки є визначальними для формування експлуатаційних характеристик заєвтектоїдних сталей. Одноступенева обробка мало впливає на сфероїдизацію перліту, тоді як підвищення температури аустенітизації до 950 °С сприяє подрібненню голок вторинного цементиту. Найбільш ефективною є подвійна та потрійна нормалізація з прискореним охолодженням (вентилятором). Це дозволяє подрібнити карбіди, потоншити цементитну сітку та запобігти небажаній коагуляції карбідів.

Максимальну термічну стійкість мають сталі, структура яких складається зі сфероїдизованого перліту, дрібних включень цементиту та графіту компактної або кулястої форми. Графітові включення сфероїдизованої форми виконують роль релаксаторів напружень і ефективно гальмують ріст втомних тріщин.

За сукупністю механічних та експлуатаційних характеристик найбільш доцільним матеріалом для виготовлення валків шаропрокатних станів визначено сталь 150СГНМ. Після термічної обробки вона забезпечує оптимальне поєднання пластівчастого графіту та скоагульованих карбідів. Це дозволяє підвищити ресурс прокатного інструменту без значного ускладнення технологічного процесу виробництва.

Список використаних джерел

1. Proizvodstvo i primeneniye prokatnykh valkov: spravochnik / T. S. Skoblo i dr. Red. T. S. Skoblo. Harkov, 2013. CD № 1. 572 s.
2. А. К. Автухов, О. Б. Калюжний, О. С. Борисенко, О. С. Корнєв. Вплив хімічного складу та термічної обробки на експлуатаційні властивості заєвтектоїдних сталей, що працюють в умовах підвищених знакозмінних навантажень та температур. // Наукові нотатки : міжвуз. збірник. - Луцьк, 2025. - № 81. - С. 92-96
3. Жучков С. М., Беленький Б. Л., Кулик О. П. Досвід використання високовуглецевих сталей для виготовлення валків сортопрокатних станів. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2018. № 2. С. 45–52.
4. Кондратьєв С. Ю., Анастасіаді Г. П. Вплив легування та модифікування на структуроутворення графітізованих сталей для інструментального застосування. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2019. Т. 642, № 4. С. 12–19.
5. Бабанін А. Я., Степанов Г. В. Дослідження процесів графітизації та карбідоутворення у високовуглецевих сталях при литті та термічній обробці. *Проблеми спеціальної електрометалургії*. 2021. № 3. С. 28–35.

References

1. Production and application of rolling rolls: a guide / T. S. Skoblo and others. Ed. T. S. Skoblo. Harkov, 2013. CD No. 1. 572 p.
2. A. K. Avtukhov, O. B. Kalyuzhny, O. S. Borisenko, O. S. Kornev. The influence of chemical composition and heat treatment on the operational properties of hypereutectoid steels operating under conditions of increased alternating loads and temperatures. // Scientific notes: interuniversity collection. - Lutsk, 2025. - No. 81. - P. 92-96
3. Zhuchkov S. M., Belenky B. L., Kulyk O. P. Experience in using high-carbon steels for the manufacture of rolls of section rolling mills. Metallurgical and mining industry. 2018. No. 2. P. 45–52.
4. Kondratiev S. Yu., Anastasiadi G. P. The influence of alloying and modification on the structure formation of graphitized steels for tool applications. Metallurgy and heat treatment of metals. 2019. T. 642, No. 4. P. 12–19.
5. Babanin A. Ya., Stepanov G. V. Research on the processes of graphitization and carbide formation in high-carbon steels during casting and heat treatment. Problems of special electrometallurgy. 2021. No.3. P. 28-35.

Свіргун О.А.¹,
Савченко В.Б.¹,
Марченко М.В.¹
Іванова Т.С.¹,
Свіргун В.В.²

¹Державний
біотехнологічний
університет
м. Харків, Україна
² АТ «Укренергомашини»

Е-mail:
dmolgal1963@btu.kharkov.ua

**ЙМОВІРНІСНА ОЦІНКА
НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО
СТАНУ ВАЛА БАРАБАНА
ЗЕРНООЧИСНОГО СЕПАРАТОРА ЗА
УМОВ ВТОМНОГО РУЙНУВАННЯ**

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-27-117>

УДК 539.4:620.19

Свіргун О. А., Савченко В. Б., Іванова Т. С., Свіргун В. В. Ймовірнісна оцінка напружено-деформованого стану вала барабана зерноочисного сепаратора за умов втомного руйнування

Анотація. Стаття присвячена розрахунково-експериментальному аналізу валу решітчастого барабана комбінованого зерноочисного сепаратора з урахуванням статичних і циклічних навантажень та стохастичної природи втомного руйнування зварних з'єднань. Об'єктом дослідження є вал барабана, навантажений рівномірно розподіленими й зосередженими згинаючими зусиллями від власної ваги, маси барабана і зернового вороху, а також крутним моментом приводу. Оцінювання напружено-деформованого стану скінчено-елементної моделі, побудованої в Autodesk Inventor, підтвердило достатній запас статичної міцності для різних варіантів конструкції. Водночас виявлено локальні зони концентрації напружень у місцях зварних швів, де коефіцієнт запасу міцності може опускатися нижче одиниці, що є критичним при дії змінних навантажень. Розрахунки втомної довговічності виконано за допустимими напруженнями з використанням медіанних кривих втоми з ймовірнісною оцінкою, що враховує розподіл амплітуд напружень та рівень залишкових напружень, які виникли в процесі зварювання. Показано, що високі залишкові напруження суттєво знижують ресурс, тоді як оптимізація технології зварювання з метою гарантованого забезпечення повного провару та післязварювальної термообробки сприяє значному підвищенню довговічності. Запропоновано комплекс таких конструктивно-технологічних заходів, як уточнення геометрії валу, застосування підсилюючих елементів у зонах зародження тріщин, попередній підігрів та контроль якості зварювання для зниження залишкових напружень. Результати мають практичну цінність для проєктування, модернізації та забезпечення експлуатаційної надійності сепараторів у зернопереробних лініях.

Ключові слова: вал барабана; зерноочисний сепаратор; зварні з'єднання; втомна довговічність; концентрація напружень; залишкові напруження; криві втоми; ймовірнісні методи; скінчено-елементний аналіз.

Svirgun O. A., Savchenko V. B., Ivanova T. S. Svirgun V. V. Probabilistic assessment of the stress-strain state of the drum shaft of a grain-cleaning separator under fatigue failure conditions

Abstract. The paper presents a combined computational and experimental analysis of the shaft of a perforated drum in a grain-cleaning separator, accounting for static and cyclic loads and the stochastic nature of fatigue failure of welded joints. The object of study is the drum shaft subjected to uniformly distributed and concentrated bending loads from its own weight, the mass of the drum and grain bulk, as well as the driving torque. Evaluation of the stress-strain state of a finite-element model built in Autodesk Inventor confirmed an adequate margin of static strength for the considered design variants. At the same time, local zones of stress concentration were identified at welded seams, where the safety factor may drop below unity, which is critical under variable loading. Fatigue life calculations were performed using allowable stresses with median S–N curves and a probabilistic assessment that accounts for the distribution of stress amplitudes and the level of residual stresses generated during welding. It is shown that high residual stresses substantially reduce service life, whereas optimization of welding technology aimed at ensuring full penetration and subsequent post-weld heat treatment significantly increases durability. A set of constructive and technological measures is proposed, including refinement of shaft geometry, application of reinforcing elements in crack initiation zones, preheating, and welding quality control to reduce residual stresses. The results have practical value for the design, modernization, and enhancement of operational reliability of separators in grain processing lines.

Keywords: drum shaft; grain-cleaning separator; welded joints; fatigue life; stress concentration; residual stresses; S–N curves; probabilistic methods; finite-element analysis.

Постановка проблеми

Післязбиральна обробка зерна та його зберігання є ключовими етапами у загальній технологічній системі забезпечення збереження врожаю зернових культур та доведення його до товарних кондицій. Саме на цьому етапі формується якість кінцевого продукту, що безпосередньо впливає на економічну ефективність аграрного виробництва та конкурентоспроможність продукції на ринку.

У зв'язку з цим актуальним є питання модернізації існуючих зразків техніки та розробки нових зерноочисних машин, які б забезпечували високий рівень очищення зерна при мінімальних капітальних витратах.

Формулювання мети досліджень

В процесі експлуатації сепаратора трапляються випадки руйнування вала барабану. В зв'язку з цим виникає необхідність виконання розрахунку внутрішніх зусиль, які діють в поперечних перерізах валу і визначають його статичну і втомну міцність.

Завдання даного дослідження полягає у здійсненні розрахункового аналізу конструкції валу решіткового барабана комбінованого сепаратора, обґрунтуванні методів підвищення надійності його роботи.

Аналіз конструкції і умов її експлуатації

Об'єктом дослідження у даній роботі є вал решітного барабана сепаратора. Барабан виконує функцію основного робочого органу зерноочисного сепаратора, призначеного для розділення зернового вороху на фракції за розміром та аеродинамічними властивостями. Застосовується переважно на зернопереробних підприємствах у складі стаціонарних або мобільних технологічних ліній.

Конструкція барабана (рис. 1) являє собою металевий обід, до якого кріпляться решіта. Обід, у свою чергу, кріпиться до вала барабана стрижневою конструкцією за допомогою зварювання.

В процесі експлуатації сепаратора трапляються випадки руйнування вала барабану (рис. 2). В зв'язку з цим виникає необхідність виконання розрахунку внутрішніх зусиль, які діють в поперечних перерізах валу і визначають його статичну і втомну міцність.

Як зазначається в роботі [1], аналіз конструкції сепаратора показує, що вал барабана зазнає складного згинаючого навантаження, яке складається з рівномірно розподіленого по всій довжині навантаження від власної ваги валу, а також зосереджених зусиль від ваги барабану і оброблюваної зернової суміші, які передаються на вал через стійки кріплення в п'яти точках. Крім того, вал закручений крутним моментом, який створюється механізмом приводу (рис. 3).

Розглядалися декілька варіантів конструкції сепаратора [1-5] та були прийняті наступні вихідні умови:

Вихідні експлуатаційні характеристики сепаратора:

- розрахункова продуктивність – 175 - 200 т/год;
- режим навантаження – 11 місяців на рік 24 години на добу;
- прогнозований термін експлуатації – 8 років.
- максимальний кут нахилу барабану в процесі експлуатації – 5° ;
- види опор валу барабану – 2 підшипника кочення.
- насипна маса матеріалу (пшениця) – $0,75 \text{ т/м}^3$
- частота обертання валу – 17 об/хв та 30 об/хв.

Для аналізу напружено-деформованого стану іншої конструкції решітчастого барабану в Autodesk Inventor була створена розрахункова модель (рис. 3) та виконано аналіз напружено-деформованого стану (рис. 4-7).

Аналіз змодельованого напружено-деформованого стану решітчастого барабана сепаратора під дією статичного навантаження свідчить, що згідно з прийнятою розрахунковою схемою, вал має значний запас міцності. Для одного варіанта конструкції $n_T=6,97$ [3-5], для іншого [1] $n_T=2,43$

Однак, конструктивні особливості вала, зокрема наявність зварних з'єднань у місцях кріплення барабана, зумовлюють необхідність врахування концентрації напружень. В зонах зварних швів (рис. 6) є місця де коефіцієнт запасу по текучості менше одиниці. Це не допустимо з точки зору статичних розрахунків. Тим більше що вал працює при знакозмінних складних напруженнях, тому ці місця потребують більш докладного аналізу на довговічність.

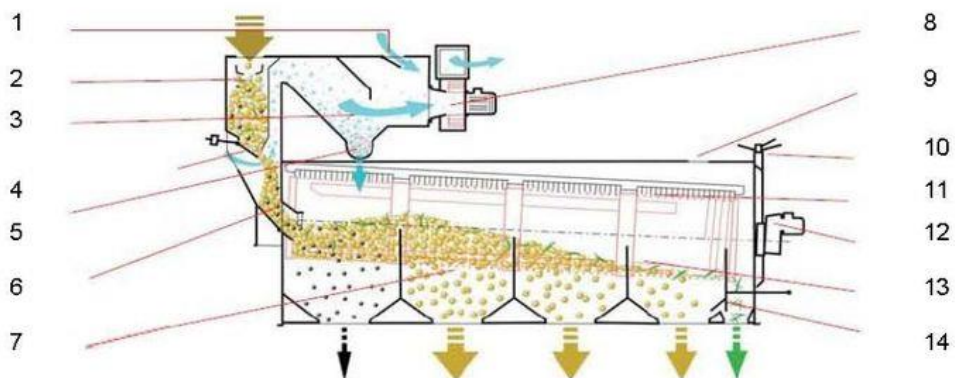


Рис. 1. Схема решітно-барабанного сепаратора. 1 - Регулятор сили аспірації, 2 - загрузочний бункер, 3 - осадова камера, 4 - регулювання подачі продукту, 5 - розвантажувальний шнек та шлюзовий затвор, 6 - аспіраційна камера, 7 - решітний барабан, 8 - вентилятор, 9 - додаткова аспірація барабана, 10 - регулювання кута нахилу барабана, 11 - ролики очищувача, 12 - Регулювання частоти обертання, 13 - секції решіт, 14 - рухома заслінка.



Рис. 2. Поломки барабана [1]

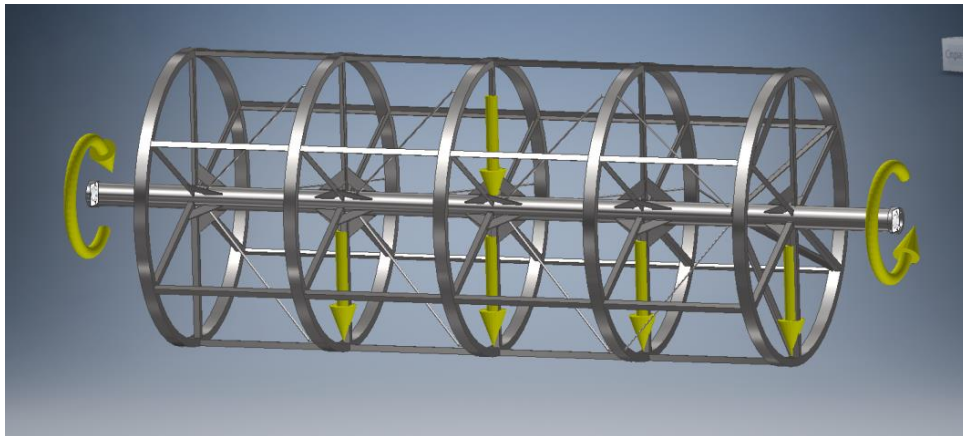


Рис. 3. Модель решітного барабану сепаратора в Autodesk Inventor.

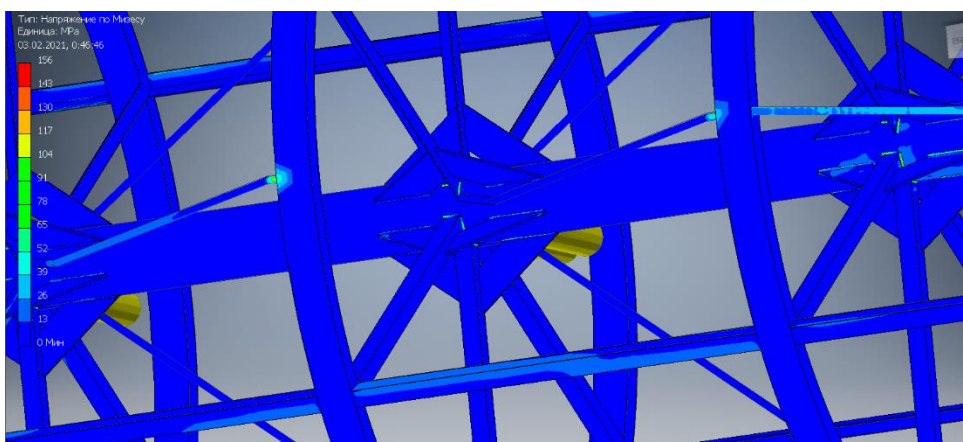


Рис. 4. Розподіл еквівалентних напружень в конструкції

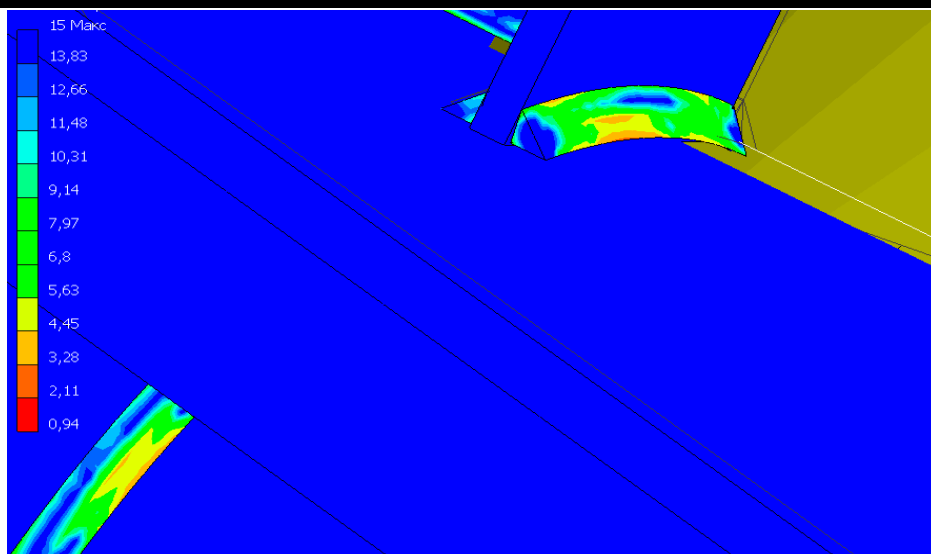


Рис. 5. Розподіл еквівалентних напружень в зоні зварних швів

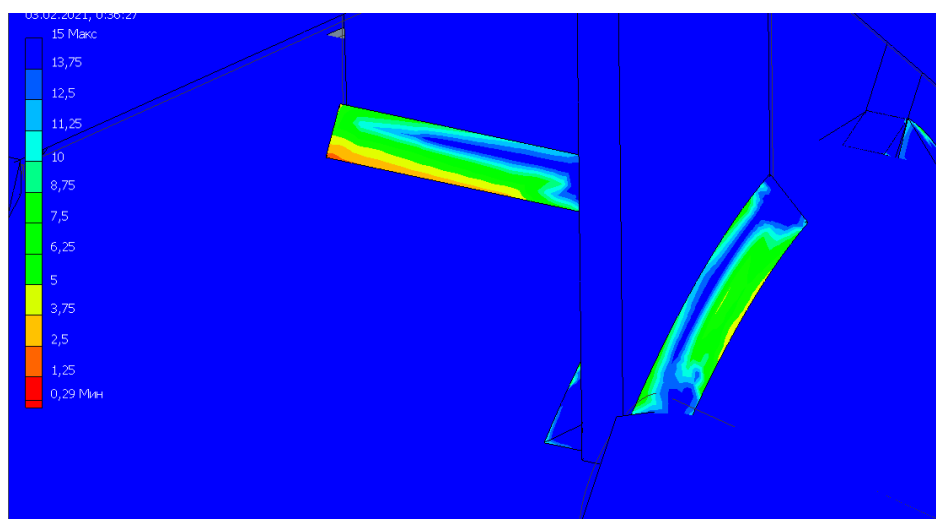


Рис. 6. Зони зварних швів. Коефіцієнт запасу міцності

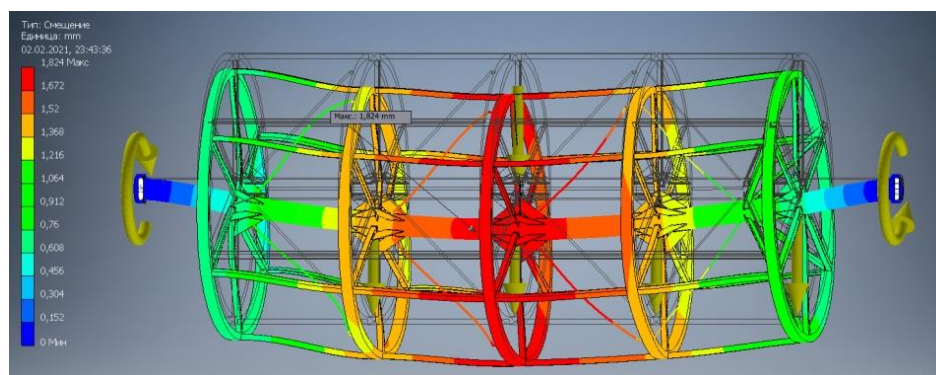


Рис. 7. Переміщення в конструкції

Аналіз останніх досліджень та публікацій

В нормативних документах і рекомендаціях як України [6], так і європейських [7, 8] доступні декілька підходів до оцінювання втомної міцності сталевих зварних з'єднань: метод номінальних напружень, метод гарячої точки, метод напружень у

надрізі. Усі перелічені методи базуються на припущенні лінійно-пружної поведінки матеріалу.

Метод номінальних напружень ґрунтується на класичних розрахунках напружень у рамках механіки суцільного тіла і не враховує локальні ефекти концентрації напружень. Оцінювання втомної міцності здійснюється шляхом порівняння розрахованого номінального напруження з відповідною проектною категорією з'єднання, що визначається його геометрією та умовами навантаження. До перевагою цього методу є відносна простота. Він широко використовується в стандартах [6, 7, 8].

Метод напруження в "гарячій точці" Hot-spot stress був розвинений науковцями Британського інституту зварювання, зокрема Maddox S. J. та Niemi E. [9, 10, 11], та німецьким вченим Hobbacher [8] для вирішення задач втомної міцності зварних вузлів. Метод гарячої точки (Hot-spot stress) передбачає екстраполяцію напружень до зони переходу шва (weld toe) за допомогою чисельних розрахунків або тензометричних вимірювань. Цей підхід враховує структурні концентрації напружень і, як наслідок, вимагає меншої кількості кривих $S-N$ у порівнянні з методом номінальних напружень. Але потребує екстраполяції напружень в зоні переходу швів.

Метод напружень у надрізі (NSIF) заснований на розробках Seeger et al. Olivier [12]. В теперішній час прийнятий в низці рекомендацій та технічних правил, зокрема в рекомендаціях Міжнародного інституту зварювання (IIW), у публікаціях DVS (Німеччина) та в FKM-керівництві (Німеччина) [12, 13]. Метод полягає в заміні реальних профілів переходу та кореня шва згладженими контурами з фіксованим радіусом вершини надрізу (зазвичай 1 мм). Така ідеалізація дозволяє уніфікувати локальну геометрію для розрахунків концентрації напружень. Але цей метод чутливий до вибору радіуса вершини надрізу, тобто потребує точного моделювання.

Локальні методи — це більш точні та сучасні інструменти, які враховують реальну геометрію та локальні ефекти.

До локальних методів можна віднести наступні.

Метод NSIF. Коефіцієнти інтенсивності напружень у надрізі (Notch Stress Intensity Factors). Параметри, що характеризують інтенсивність локальних полів напружень біля геометричних надрізів або гострих контурів; використовуються для кількісної оцінки впливу надрізу на ініціацію та ріст втомних тріщин [13, 14]. Метод добре підходить для гострих геометрій. Недоліком можна назвати чутливість до геометричних моделювань.

Метод середньої щільності енергії деформації (SED) [15, 16]. Усереднена щільність енергії деформації в зоні концентрації — застосовується як локальний критерій для прогнозування втомного руйнування та порівняння різних геометрій концентрацій напружень, придатний для оцінки як одноосового, так і багатовісного навантаження. Перевага: застосовний до різних режимів напруження. Обмеження використання - чутливий до вибору розміру контрольної області.

Теорія критичних відстаней (TCD) [17,18]. Підхід, що вводить характерну відстань від концентрації напружень, на якій усереднена або пікова величина напружень або деформацій корелює з ініціацією тріщини; використовується для уніфікації критеріїв міцності при наявності локальних дефектів або надрізів. Потребує калібрування для кожного матеріалу.

Метод пікових напружень (Peak Stress Method) [19, 20]. Наближений підхід, що використовує пікові (максимальні) лінійно-упругі напруження, отримані з скінчено-елементного аналізу двовимірних та тривимірних моделей з грубою сіткою, для оцінки локальної втомної міцності. наближений Заощаджує час, придатний для практичної практики. З недоліків - наближений, менш точний, ніж «чистий» NSIF.

Вал решітного барабана працює при складному напруженому стані. У частині оцінювання втомної міцності при багатоосьових умовах у чинних стандартах і рекомендаціях немає єдиного пріоритетного підходу.

Рекомендації пропонують використовувати або еквівалентний діапазон напружень за критерієм фон Мізеса [21], або головні напруження у поєднанні з одноосьовими кривими $S-N$. Зокрема, Eurocode 3 [7] пропонує формування еквівалентного діапазону напружень на основі лінійного правила сумування пошкоджень (Palmgren–Miner), тоді як рекомендації Міжнародного інституту зварювання визначають еквівалентний діапазон у рамках багатовісного підходу Gough–Pollard [23]. Більш докладно з порівнянням методів та підходів можна познайомитись в роботах [21, 22].

В деяких випадках, як зазначається в літературних джерелах, ефективними для визначення напруженого стану зони зварного шва є комбіновані методики, згідно з якими напруження в локальних зонах переходу від шва до основного металу визначаються за математичними формулами, отриманими аналітичними шляхом, а напруження на достатній відстані від гострих концентраторів за допомогою комп'ютерного моделювання МСЕ.

Зварні з'єднання характеризуються стохастичною природою втомного руйнування. Порівняно з більшістю несучих елементів, саме вони демонструють один із найбільших розкидів показників втомної довговічності, причому це спостерігається навіть за умов ретельно контрольованих лабораторних випробувань. Відтак постає необхідність системно враховувати варіабельність як самого процесу зародження та розвитку тріщин, так і оцінки граничного строку служби. Експлуатаційні напруження при цьому доцільно трактувати як випадкові процеси. За таких умов інтеграція ймовірнісних методів у процедури оцінювання довговічності та ризику стає критичною складовою науково обґрунтованого проєктування і управління технічним станом зварних конструкцій.

Одним з сильних чинників, що впливають на опір втомі з'єднань, є залишкове напружене поле в зоні шва. В наслідок різкого температурного перепаду, структурних змін і пружньопластичної деформації, в зонах зварних з'єднань виникає значне залишкове напруження, величина якого може досягати і навіть істотно перевищувати межу текучості вихідного матеріалу.

Залишкові зварювальні напруження (σ_{ocm}), при визначенні характеристики опору втомі з'єднань, враховують відповідно до розподілу їх на високі ($\sigma_{ocm} > 0,5\sigma_m$) і низькі ($\sigma_{ocm} \leq 0,5\sigma_m$).

У розрахунках на втому за методом допустимих напружень за допомогою рівняння кривої втоми виду

$$\sigma^m N = \bar{\sigma}_R^m N_0,$$

де параметр m рівняння медіанної (відповідної ймовірності відмови 50%) кривої втоми може бути визначено через параметри $\bar{\sigma}_R$, A_R , B_R [6, 7] медіанної кривої втоми за такими залежностями:

$$m = \frac{a_2^2 - a_0 b_2}{A(a_1 b_2 - a_2 b_1)};$$
$$a_0 = \int_{x_1}^{x_2} \ln x (x + B)^2 dx;$$
$$a_1 = \int_{x_1}^{x_2} \ln^2 x dx;$$

$$a_2 = \int_{x_1}^{x_2} \ln x (x + B) dx;$$

$$b_1 = B(x_2 - x_1)(x_2 + x_1 + B) + \frac{1}{3}(x_2^3 - x_1^3);$$

$$b_2 = (x_2 - x_1) \left(B + \frac{x_1 + x_2}{2} \right),$$

де x_1 і x_2 – інтервал довговічності.

У розрахунках на втому розподіл амплітуд напружень в елементах конструкцій рекомендується задавати логарифмічно нормальним законом. Де середнє значення $\ln \hat{\sigma}_a$ та середнє квадратичне відхилення $S_{\ln \hat{\sigma}_a}$, натуральних логарифмів амплітуд напруження розраховують за формулами:

$$\ln \hat{\sigma}_a = \ln(\hat{\sigma}_a) - \frac{1}{2} S_{\ln \hat{\sigma}_a};$$

$$S_{\ln \hat{\sigma}_a} = \sqrt{\ln \left[\left(\frac{S_{\hat{\sigma}_a}}{\hat{\sigma}_a} \right)^2 + 1 \right]}$$

За розрахунковими характеристиками опору втомі зварного з'єднання з кривої втоми визначається гранична кількість циклів $N_i(\sigma_{a_i}, P)$ як функція амплітуди напруження σ_{a_i} та ймовірності відмови P . При постійному коефіцієнті асиметрії циклу R_σ кількість циклів $N_i(\sigma_{a_i}, P)$ обчислюється за відповідною формулою,

$$N_i(\sigma_{a_i}, P) = \frac{A}{\ln \left[\frac{2\sigma_a}{(1 - R_\sigma)R_R(P)} \right]} - B,$$

а при постійному середньому напруженні — за альтернативним співвідношенням

$$N_i(\sigma_{a_i}, P) = \frac{A}{\ln \left(\frac{\sigma_{a_i} + \sigma_m}{R_R(P)} \right)} - B.$$

Ймовірність відмови P знаходиться за квантілю нормального розподілу z_p , яка визначається за формулою

$$z_p = \frac{1 - \tilde{n}}{\sqrt{\tilde{n}^2 \vartheta_{\sigma_R}^2 + \vartheta_B^2}},$$

Остаточню, характеристики опору втомі елементів конструкцій зі зварними з'єднаннями, визначають за ймовірністю відмови, враховуючи параметри $\bar{\sigma}_R$, S_{σ_R} розподілу межі витривалості і параметри $\bar{\sigma}_R$, A_R , B_R рівняння медіанної (відповідної ймовірності відмови 50%) кривої втоми, яка має вигляд:

$$\sigma = \bar{\sigma}_R \cdot e^{\frac{A_R}{N+B_R}}.$$

Тоді, рівняння, яке описує розрахункову криву втоми вузла зі зварним з'єднанням, що побудоване для ймовірності відмови $P\%$, має вигляд:

$$\sigma(P; N) = R_R \cdot e^{\frac{A_R}{N+B_R}}.$$

Нормативне значення границі витривалості $\bar{\sigma}_R$ визначають за діаграмами граничних напружень циклу як значення, яке відповідає гілці $N \rightarrow \infty$ або з таблиць.

Параметри A_R та B_R , що входять в рівняння кривої втоми, також визначаються за відповідними діаграмами або з таблиць [6, 7].

Розрахункову границю витривалості $R_R = \sigma_R(P)$ визначають залежно від допустимої ймовірності відмови P (ймовірності утворення втомної тріщини глибиною 2...3 мм) за формулою виду

$$R_R = \bar{\sigma}_R - z_P S_{\sigma_R}$$

де z_P – квантіль нормального розподілу для ймовірності P .

Квантіль нормального розподілу для ймовірності $P = 0,95$ неруйнування дорівнює $z_P = 1,645$. Квантіль нормального розподілу для ймовірності $P = 0,5$ неруйнування дорівнює $z_P = 0$.

Результати досліджень

Для розрахунку вала на витривалість було розроблено програму в математичній таблиці MS Excel.

Розрахунки виконувались для варіантів

- високі залишкові напруження (рис. 8);
- низькі залишкові напруження (рис. 9);
- низькі залишкові напруження та неповний провар (рис. 10).

Вихідні дані для розрахунку

Ar	Br	Ssi	SiR
6,65E+05	4,85E+05	10	48

Z	0	1,675
Rr	48	31,25

Результати розрахунку

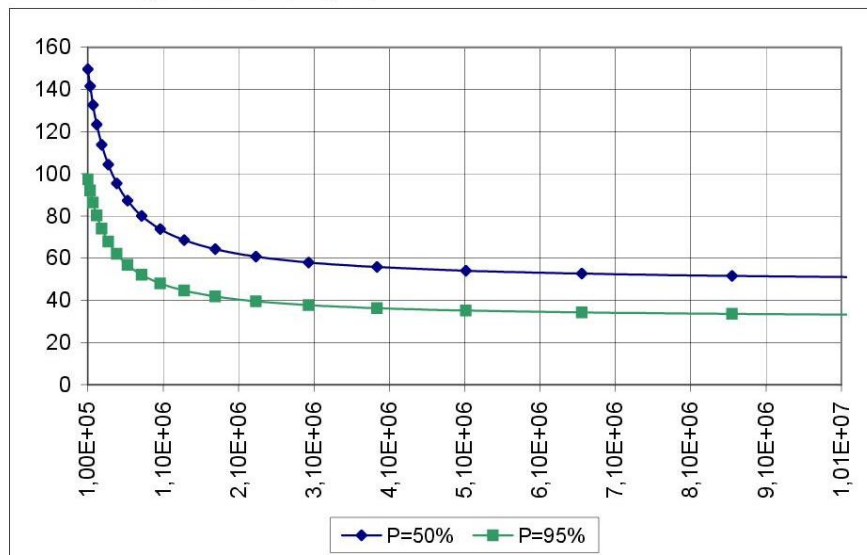


Рис. 8. Результати розрахунку довговічності вала при високих залишкових напруженнях ($\sigma_{ост} > 0,5\sigma_m$)

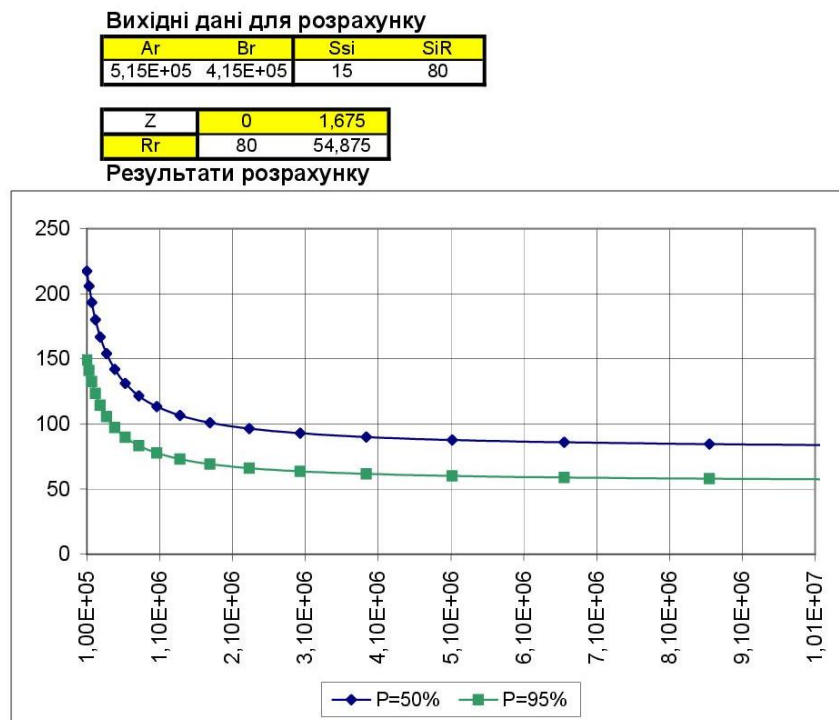


Рис. 9. Результати розрахунку довговічності валу при низьких залишкових напруженнях

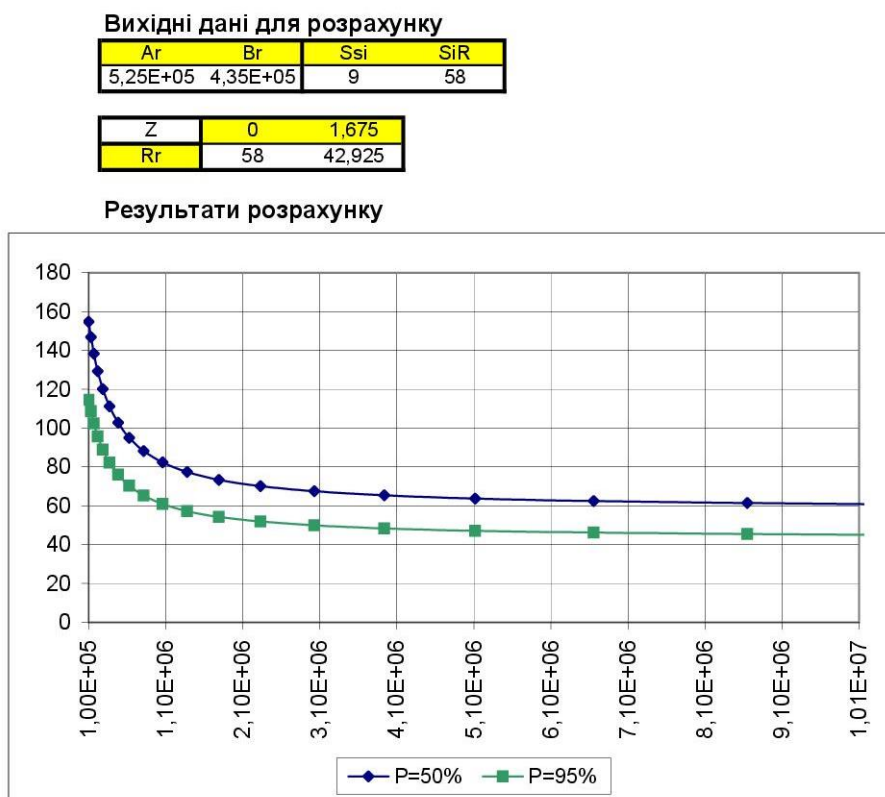


Рис. 10. Результати розрахунку довговічності валу при низьких залишкових напруженнях та неповному проварі ($\sigma_{ост} \leq 0,5\sigma_m$)

Аналізуючи результати розрахунків (рис. 8-10), можна зазначити, що при досягненні $N=10^7$, крива втомної асимптотично наближається до значення максимального напруження, починаючи з якого вал не повинен виявляти жодних ознак руйнування. З розрахунку вала сепаратора на статичну міцність маємо максимальні еквівалентні напруження $\sigma_e = \sigma_a = 79,3$ МПа.

Таблиця 1

Оцінка довговічності вала барабана

Сценарій	Умови залишкових напружень	Провар	Ймовірність безвідмовної роботи	Довговічність N , циклів
1	високі залишкові напруження	не вказано	50%	$8,16 \cdot 10^5 < 6,46 \cdot 10^7$
2	низькі залишкові напруження	неповний провар	50%	$2,86 \cdot 10^5 < 6,46 \cdot 10^7$
3	низькі залишкові напруження	не вказано	95%	$1,06 \cdot 10^6 < 6,46 \cdot 10^7$
4	низькі залишкові напруження	не вказано	50%	весь строк служби

Для іншої конструкції барабана, який виготовлявся з сталі 20 були виконана аналогічні розрахунки. Результати розрахунків наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Оцінка довговічності вала барабана зі сталі 20

Сценарій	Умови залишкових напружень	Наявність провару	Ймовірність безвідмовної роботи	Довговічність N , циклів
1	високі залишкові напруження	не вказано	50%	$3,71 \cdot 10^5$
2	низькі залишкові напруження	неповний провар	50%	$4,83 \cdot 10^6$
3	низькі залишкові напруження	не вказано	95%	$1,69 \cdot 10^5$
4	низькі залишкові напруження (з невеликою похибкою)	не вказано	50%	$1,06 \cdot 10^6$

З огляду на результати аналізу, одним із ефективних способів мінімізації негативного впливу зварних швів є оптимізація їх конструктивного виконання. Тому, можна говорити про необхідність проведення заходів щодо підвищення втомної міцності вала барабана сепаратора.

Висновки

1. Розрахункові значення еквівалентних напружень не перевищують допустимих меж, а коефіцієнт запасу міцності є достатнім для гарантованої роботи в умовах статичного навантаження.
2. Аналіз прогинів вала під дією робочого навантаження показав, що максимальні значення деформацій знаходяться в межах допустимих норм і не чинять негативного впливу на функціонування конструкції та технологічний процес.
3. Наявність зварного з'єднання, що працює в умовах циклічного навантаження, спричиняє зниження коефіцієнта запасу міцності до рівня 0,89, що є критичним і неприйнятним для динамічної експлуатації, з огляду на ризик передчасного руйнування.
4. Геометричні параметри існуючої конструкції вала не відповідають вимогам, необхідним для забезпечення його надійної та безаварійної експлуатації та потребують коригування. Його можна виконати орієнтуючись на данні графіків (рис. 8-10).
5. У випадку експлуатації вже існуючих конструкцій, що зазнали втомного пошкодження, доцільним є застосування підсилювальних елементів типу «косинок» у зонах зародження тріщин, з подальшим виконанням повздовжніх зварних швів для їх фіксації.
6. Для зниження негативного впливу від зварювання використовують наступні методики підвищення втомної міцності зварних конструкцій:
 - застосування попереднього підігріву та післязварювальної термообробки;
 - контроль якості зварних з'єднань (відсутність непроварів, тріщин, флокенів);
 - зниження залишкових напружень шляхом оптимізації технології зварювання;
 - використання матеріалів із підвищеною втомною міцністю або легування шва.

Список використаних джерел

1. Савченко В. Б., Полтавченко О. В., Попко К. Г. Аналіз умов роботи і розрахунок вала сепаратора КБС 1240 на статичну міцність // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. Вип. 205 «Проблеми надійності машин». – 2019. – С. 330–338.
2. Савченко В. Б., Свіргун О. А., Свіргун В. В., Марченко М. В. Розрахунок вала барабана сепаратора // Матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф. «Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем». – Кропивницький : ЦНТУ, 2022. – 192 с.
3. Свіргун О. А., Савченко В. В., Свіргун В. В., Мазко І. Р. Оцінка статичної міцності барабана сепаратора // Проблеми надійності та міцності машин і споруд: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. – Харків : ДБТУ, 2023. – С. 38–40.
4. Свіргун О. А., Савченко В. Б., Свіргун В. В., Іванова Т. С. Дослідження можливостей конструктивного удосконалення барабану зернового сепаратора // Молодь і технічний прогрес в АПВ: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. – Харків : ДБТУ, 2024. – С. 559–561.
5. Свіргун О. А., Савченко В. Б., Свіргун В. В., Іванова Т. С. Дослідження втомних пошкоджень в зварних з'єднаннях вал сепаратора – маточина барабана // Молодь і індустрія 4.0 в ХХІ столітті: матеріали ХХІ Міжнар. форуму молоді. – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 90–91.
6. ДБН В.2.6-198:2014. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу. – Київ : Мінрегіон України, 2014. – 205 с.
7. EUROCODE 3: Design of Steel Structures. Part 1–9: Fatigue. – BS EN 1993-1-9:2014. – 2014. – 36 p.

8. Hobbacher A. F., Baumgartner J. Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components. – Cham : Springer; IIW, 2024. – 199 p. – DOI: 10.1007/978-3-031-57667-6.
9. Maddox S. J., Razmjoo G. R. Interim fatigue design recommendations for fillet welded joints under complex loading // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 2001. – Vol. 24. – P. 329–337.
10. Niemi E., Fricke W., Maddox S. J. Fatigue Analysis of Welded Components. – Cambridge : Woodhead Publishing, 2006.
11. Fricke W. Guideline for the Fatigue Assessment by Notch Stress Analysis for Welded Structures. – Cambridge : IIW, 2008. – IIW Doc. XIII-2240r1-08/XV-1289r1-08.
12. Rother K., Fricke W. Effective notch stress approach for welds having low stress concentration // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. – 2016. – Vol. 147. – P. 12–20. – DOI: 10.1016/j.ijpvp.2016.09.008.
13. Lazzarin P., Lassen T., Livieri P. A notch stress intensity approach applied to fatigue life predictions of welded joints with different local toe geometry // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 2003. – Vol. 26. – P. 49–58.
14. Lazzarin P., Sonsino C. M., Zambardi R. A notch stress intensity approach to assess the multiaxial fatigue strength of welded tube-to-flange joints subjected to combined loadings // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 2004. – Vol. 27. – P. 127–140.
15. Livieri P., Lazzarin P. Fatigue strength of steel and aluminium welded joints based on generalised stress intensity factors and local strain energy values // *International Journal of Fracture*. – 2005. – Vol. 133. – P. 247–276.
16. Lazzarin P., Livieri P., Berto F., Zappalorto M. Local strain energy density and fatigue strength of welded joints under uniaxial and multiaxial loading // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2008. – Vol. 75. – P. 1875–1889.
17. Susmel L. Multiaxial notch fatigue. – Cambridge : Woodhead Publishing, 2009.
18. Susmel L., Askes H. Modified Wöhler Curve Method and multiaxial fatigue assessment of thin welded joints // *International Journal of Fatigue*. 2012. Vol. 43. P. 30–42.
19. Meneghetti G., Guzzella C. The peak stress method to estimate the mode I notch stress intensity factor in welded joints using three-dimensional finite element models // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2014. – Vol. 115. – P. 154–171.
20. Meneghetti G., De Marchi A., Campagnolo A. Assessment of root failures in tube-to-flange steel welded joints under torsional loading according to the Peak Stress Method // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. – 2016. – Vol. 83. – P. 19–30.
21. Fass M., Hecht M., Baumgartner J. et al. Evaluation of the approach based on the maximum principal stress from the IIW-Recommendation for welded joints under proportional, multiaxial stress states // *Welding in the World*. – 2023. – Vol. 67. – P. 2323–2332. – DOI: 10.1007/s40194-023-01571-x.
22. Pedersen M. M. Multiaxial fatigue assessment of welded joints using the notch stress approach // *International Journal of Fatigue*. – 2016. – Vol. 83. – P. 269–279.
23. Gough H. J., Pollard H. V. The strength of metals under combined alternating stresses // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 1935. Vol. 131(1). P. 3–103.

References

1. Savchenko, V. B., Poltavchenko, O. V., & Popko, K. G. (2019). Analysis of operating conditions and calculation of the separator shaft KBS 1240 for static strength. *Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture*, Issue 205 “Problems of machine reliability”, 330–338. [in Ukrainian].
2. Savchenko, V. B., Svirgun, O. A., Svirgun, V. V., & Marchenko, M. V. (2022). Calculation of the separator drum shaft. In *Proceedings of the IV International Scientific and*

Practical Conference “Improving reliability and efficiency of machines, processes and systems” (pp. 192). Kropyvnytskyi: CNTU. [in Ukrainian].

3. Svirgun, O. A., Savchenko, V. V., Svirgun, V. V., & Mazko, I. R. (2023). Assessment of static strength of the separator drum. In *Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference “Problems of reliability and strength of machines and structures”* (pp. 38–40). Kharkiv: DBTU. [in Ukrainian].

4. Svirgun, O. A., Savchenko, V. B., Svirgun, V. V., & Ivanova, T. S. (2024). Research on possibilities of constructive improvement of the grain separator drum. In *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Youth and technical progress in agriculture”* (pp. 559–561). Kharkiv: DBTU. [in Ukrainian].

5. Svirgun, O. A., Savchenko, V. B., Svirgun, V. V., & Ivanova, T. S. (2025). Investigation of fatigue damage in welded joints of separator shaft–drum hub. In *Proceedings of the XXI International Youth Forum “Youth and Industry 4.0 in the XXI Century”* (pp. 90–91). Kharkiv: DBTU. [in Ukrainian].

6. DBN V.2.6-198:2014. (2014). *Building structures. Steel structures. Design, fabrication and installation standards*. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine. [in Ukrainian].

7. EUROCODE 3: Design of Steel Structures. Part 1–9: Fatigue. (2014). BS EN 1993-1-9:2014. 36p.

8. Hobbacher, A. F., & Baumgartner, J. (2024). *Recommendations for fatigue design of welded joints and components*. Cham: Springer; IIW. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-57667-6>

9. Maddox, S. J., & Razmjoo, G. R. (2001). Interim fatigue design recommendations for fillet welded joints under complex loading. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 24, 329–337.

10. Niemi, E., Fricke, W., & Maddox, S. J. (2006). *Fatigue analysis of welded components*. Cambridge: Woodhead Publishing.

11. Fricke, W. (2008). Guideline for the fatigue assessment by notch stress analysis for welded structures. Cambridge: IIW. IIW Doc. XIII-2240r1-08/XV-1289r1-08.

12. Rother, K., & Fricke, W. (2016). Effective notch stress approach for welds having low stress concentration. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 147, 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2016.09.008>

13. Lazzarin, P., Lassen, T., & Livieri, P. (2003). A notch stress intensity approach applied to fatigue life predictions of welded joints with different local toe geometry. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 26, 49–58.

14. Lazzarin, P., Sonsino, C. M., & Zambardi, R. (2004). A notch stress intensity approach to assess the multiaxial fatigue strength of welded tube-to-flange joints subjected to combined loadings. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 27, 127–140.

15. Livieri, P., & Lazzarin, P. (2005). Fatigue strength of steel and aluminium welded joints based on generalised stress intensity factors and local strain energy values. *International Journal of Fracture*, 133, 247–276.

16. Lazzarin, P., Livieri, P., Berto, F., & Zappalorto, M. (2008). Local strain energy density and fatigue strength of welded joints under uniaxial and multiaxial loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 75, 1875–1889.

17. Susmel, L. (2009). *Multiaxial notch fatigue*. Cambridge: Woodhead Publishing.

18. Susmel, L., & Askes, H. (2012). Modified Wöhler curve method and multiaxial fatigue assessment of thin welded joints. *International Journal of Fatigue*, 43, 30–42.

19. Meneghetti, G., & Guzzella, C. (2014). The peak stress method to estimate the mode I notch stress intensity factor in welded joints using three-dimensional finite element models. *Engineering Fracture Mechanics*, 115, 154–171.

20. Meneghetti, G., De Marchi, A., & Campagnolo, A. (2016). Assessment of root failures in tube-to-flange steel welded joints under torsional loading according to the peak stress method. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 83, 19–30.
21. Fass, M., Hecht, M., Baumgartner, J., et al. (2023). Evaluation of the approach based on the maximum principal stress from the IIW-Recommendation for welded joints under proportional, multiaxial stress states. *Welding in the World*, 67, 2323–2332. <https://doi.org/10.1007/s40194-023-01571-x>
22. Pedersen, M. M. (2016). Multiaxial fatigue assessment of welded joints using the notch stress approach. *International Journal of Fatigue*, 83, 269–279.
23. Gough, H. J., & Pollard, H. V. (1935). The strength of metals under combined alternating stresses. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 131(1), 3–103.

Гончаренко О. О.,
Ярошенко Б. М.
Полтавський державний
аграрний університет

**АНАЛІЗ МЕТОДІВ НАНЕСЕННЯ
КЕРАМІЧНИХ ПОКРИТТІВ РІЗНИМИ
СПОСОБАМИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ
ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ТА
ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ**

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-27-132>

УДК621.791.927

Гончаренко О. О., Ярошенко Б.М. Аналіз методів нанесення керамічних покриттів різними способами для підвищення експлуатаційної стійкості та зносостійкості деталей

Анотація. В статті обговорюються експериментальні дослідження нанесення керамічних покриттів різними методами і способами на компонент робочих органів сільськогосподарської техніки, двигунів автомобільної та автотракторної техніки. Крім того, було ретельно розглянуто кілька матеріалів керамічних покриттів та процесів їх нанесення, досліджено використання методів оптимізації керамічного покриття, а також дисперсійного аналізу.

Ключові слова: керамічні покриття, методи покриття, продуктивність двигуна, дисперсійний аналіз, оптимізація, газополуменеве напилення, відновлення, сільськогосподарська техніка, автомобільний транспорт, зносостійкість.

Goncharenko O. O., Yaroshenko B. M. Analysis of methods for applying ceramic coatings in various ways to increase the operational stability and wear resistance of parts

The article discusses experimental studies of applying ceramic coatings by various methods and means to components of working bodies of agricultural machinery, engines of automobile and tractor machinery. In addition, several ceramic coating materials and their application processes were carefully considered, the use of ceramic coating optimization methods, as well as dispersion analysis were investigated.

Keywords: ceramic coatings, coating methods, engine performance, dispersion analysis, optimization, flame spraying, restoration, agricultural machinery, automotive, wear resistance.

Вступ

Відновлення деталей сільськогосподарської техніки та автомобілів методом нанесення керамічних покриттів має значні перспективи в умовах сучасної промисловості. Воно здатне забезпечити збільшення терміну служби деталей, високу стійкість до корозії, має економічні та екологічні переваги, а також адаптацію до нових технологій.

Газопорошкове напилення композиційних покриттів є сучасною технологією, яка активно використовуються в процесах відновлення деталей та механізмів. Вона має ряд переваг та специфічний вплив на різні типи деталей які обґрунтовують доцільність його застосування в різних галузях промисловості. Це перш за все:

- підвищена зносостійкість, кераміко-металеві покриття забезпечують високий рівень зносостійкості завдяки твердій керамічній матриці, що є корисним у тих випадках, де деталі піддаються абразивним або ударним навантаженням.

- стійкість до корозії, керамічні матеріали мають високу хімічну стійкість, що робить такі покриття ефективними в агресивних середовищах, де звичайні металеві покриття можуть швидко зношуватися.

- поліпшення термічних властивостей, кераміко-металеві покриття можуть витримувати високі температури, що дозволяє використовувати їх у високотемпературних застосуваннях, таких як газові турбіни або нафтогазове обладнання.

- знижене тертя, завдяки своїй структурі та властивостям, такі покриття можуть знижувати коефіцієнт тертя, що підвищує ефективність роботи механізмів і зменшує енергетичні витрати.

- гнучкість у проектуванні, процес газопорошкового наплавлення дозволяє створювати покриття з різними властивостями, що дає можливість адаптувати їх під специфічні вимоги для кожного конкретного випадку.

- екологічність, застосування газопорошкового методу часто є більш екологічним у порівнянні з традиційними методами наплавлення, оскільки може зменшувати викиди шкідливих сполук у атмосферу.

- висока адгезія, дані покриття, отримані за допомогою газопорошкового наплавлення, забезпечують відмінну адгезію до основи, що зменшує ризик відшарування або розтріскування покриттів під час експлуатації.

Мета дослідження.

У зв'язку з тим, що газопорошкове наплавлення за своєю суттю є симбіозом одного з видів наплавлення (газової) та одного з видів газотермічного напилення (газополуменового) доцільно розглянути існуючі способи формування композитних покриттів цими двома технологічними методами нанесення покриттів.

Матеріали і методи досліджень.

При класифікації способів отримання кераміко-металевих покриттів їх можна умовно поділити на ті, що проводяться методом наплавлення (електродне наплавлення, газове наплавлення, аргонодугове наплавлення (TIG), наплавлення в середовищі захисних газів (MIG), плазмове наплавлення, наплавлення з застосування лазера, електрошлакове наплавлення, індукційне), та ті при яких матеріал у вигляді порошку чи дроту напилюється в полум'ї горілки прискорюючись в соплі і з великою швидкістю наноситься на поверхню напилення: дугове (порошковими дротами, з подаванням порошку в зону горіння дуги), газополуменове (з використанням дроту, прутків, порошків з гнучкого трубопроводу), плазмове (плазмове напилення з використанням холодної плазми Cold Spray, плазмове напилення Plasma Spray, плазмове електролітичне напилення Plasma Electrolytic Coating, плазмове напилення методом втулки Plasma Arc Spray, та інші), детонаційне (детонаційне напилення Detonation Spray Coating, детонаційне осадження Detonation Gun Coating, детонаційне термічне осадження Detonation Thermal Spraying)).

Дугове наплавлення. Найбільш простішим шляхом формування КП за допомогою дугового наплавлення є використання заздалегідь сформованих композиційних матеріалів (КМ) у вигляді електродів, дроту або стрічки. Широкий асортимент наплавних металокерамічних електродів випускає фірма Metko (США). У Швейцарії електроди такого типу застосовують для зносостійкого наплавлення деталей типу "шнек", що працюють в умовах абразивного зносу. Їх виготовляють методом порошкової металургії: спікають шихту, що складається із порошку сталі (55%) та порошку карбіду титану (45%). Електроди мають переріз 4×5 мм та довжину 150 мм [1]. Для наплавлення деталей металургійного обладнання широке застосування отримали електроди системи

$\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$ [2]. Зазначені кермети мають такі співвідношення карбіду хрому і нікелю: ГК-10 - 90% Cr_3C_2 + 10%Ni; ГК-15 - 85% Cr_3C_2 +15%Ni. Структура їх має зерна карбіду хрому, що зцементовані твердим розчином з нікелевою зв'язкою. Композиційні електроди утворюються і при введенні керамічних дрібнодисперсних частинок в обмазку електродів [3].

Також існують наплавлювальні електроди марок ЭН-ИТС-01 (ТУ 48-19-362-82) та ЭН-ИТС-02 (ТУ 49-10-410-86). Вони складаються з сталевого стрижня діаметром 4 мм з легуючим покриттям, що містить тверді і тугоплавкі сполуки хрому. Твердість покриття при використанні даних електродів складає 57-62 HRC. Їх зносостійкість порівняно з наплавленням сормайт-1 або електродами Т-590, Т-620 у 1,3-2 рази вище [4].

Для виготовлення металокерамічних стрічок (методом прокатування з подальшим спіканням) можна використовувати композиційні порошки. Так заводи країни Грузії випускають цілу низку композиційних стрічок, що містять карбіди металів (ЭНЛ НАКХ-20, ЭНЛ НЖ КТ-40, ЭНЛ НЖКВ-20 та ін.). Товщина стрічок коливається від 0,9 до 4 мм, ширина 20-60 мм. Композиційні порошкові дроти виготовляють шляхом наповнення металевих оболонок із маловуглецевої сталі механічними сумішами або композиційними порошками. В якості структурних компонентів таких дротів можуть використовуватися також алюмінієві оболонки та зміцнюючі волокна [5].

Окремі компоненти композиційних матеріалів для нанесення КП можуть виконувати лише допоміжну роль зв'язки для решти функціональних компонентів покриття. Прикладом таких матеріалів є порошково-полімерні стрічки, а також матеріали типу "Конформа Клед" [7]. Загальною ознакою для цих матеріалів є те, що полімер у вигляді порошку (у першому випадку) або "сітки-тканини" (у другому випадку) є зв'язкою для металевих і керамічних частинок і при нанесенні покриття вигоряє.

Інститутом електрозварювання ім.С.О.Патона НАН України розроблено наплавний матеріал марки Нп-350Х1068Т2-ПП-0 на основі високохромистого чавуну, легованого карбідо- та карбоборидоутворюючими елементами. Він випускається у вигляді порошкового дроту. Наплавлення здійснюється закритою дугою. Тверді включення мають компактну форму розміром 6...60 мкм. Матриця сплаву, мікротвердістю 6500-8500 МПа містить велику кількість дрібнодисперсних (0,2...1,0 мкм) частинок карбоборидів хрому, ніобію та карбонітридів титану. Висока дисперсність та компактна форма частинок зносостійкої фази забезпечують підвищення зносостійкості у 1,8 – 2,5 рази.

Іншим напрямком використання дугового наплавлення для формування композиційних матеріалів покриттів (КМП) є впровадження порошкового керамічного наповнювача у металеву матрицю під час процесу наплавлення. Це може бути зроблено шляхом введення керамічних частинок у розплавлений метал покриття з використанням механічного тиску, газового потоку, сили тяжіння та інших методів.

У Болгарії було запропоновано метод наплавлення, який поєднує термомеханічну обробку шва та армування поверхні порошковими матеріалами. Цей процес полягає в тому, що на вальці металу, наплавленому механізованим способом (вібруючим або невібруючим), на певній відстані від дуги подається твердосплавна порошкова добавка. Далі наплавлений метал з частинками прокатується накатним роликком, що призводить до пластичної деформації й проникнення твердих часток на певну глибину. Після прокатування наплавлений шар металу підлягає загартуванню за допомогою охолоджувальної рідини. Цей метод дозволяє отримувати композиційні шари без розчинення твердих часток у металі, але не забезпечує рівномірності фізико-механічних

властивостей покриттів по товщині, оскільки основна маса твердих часток зосереджена на поверхні.

Для утворення композиційних покриттів можна подавати тугоплавку порошкову добавку до хвостової частини зварювальної ванни. Подача порошкової добавки у рідкий метал може здійснюватися під дією власної ваги, із застосуванням різних подаючих пристроїв або за допомогою транспортного газового потоку. Згідно з проведеними дослідженнями, найбільш перспективним є останній варіант. У композиційному наплавленому шарі метали основи й дроту утворюють сплав матриці, що містить керамічні частинки.

В ІЕЗ ім. Патона розроблена наплавлення по брикету, що є сумішшю необхідних порошків з будь-яким клеєм, висушену і прокатану до потрібної товщини. Таким чином наплавляють КП, що складаються з твердих тугоплавких частинок, впроваджених у металеву пластичну матрицю. Спосіб має низку переваг - можна наплавляти криволінійні поверхні, так як брикетований порошок не обсипається з деталі, більш точно витримується товщина шару, що покращує формування валика, що наплавляється. Однак введення додаткових технологічних операцій з приготування брикетів та необхідність плакування тугоплавких частинок для їх захисту від розчинення в рідкому матричному металі при високих температурах електричної дуги, ускладнює застосування цього способу.

Англійськими науковцями розроблено спосіб дугового наплавлення під шаром флюсу, який наноситься на передуючий шар механічної суміші гранульованого металу та карбідних частинок, і має назву "фьюжбонд". Матрицю покриття при цьому створює зварювальний електродний дріт спільно з металом основи та гранульованим додатковим металом. Наповнювачем в даному випадку є карбіди металів (найчастіше карбід хрому). При напавленні зварювальна головка коливається і за один прохід наноситься валик шириною приблизно 38 мм та товщиною 3,2 мм.

Для отримання КП *плазмовим напавленням* можуть використовуватися композиційні дроти з необхідним поєднанням та об'ємним вмістом армуючих волокон. Волокнисті композиційні матеріали рекомендуються для застосування на заводах з виробництва та відновлення алюмінієвих поршнів дизельних двигунів та на машинобудівних підприємствах [5,6]. Зміцнення робочої поверхні канави поршня під верхнє компресійне кільце досягається внаслідок пропавлення плазмовою дугою відповідної зони деталі що ремонтується та введення в неї необхідного кількості (до 10...15%) легуючих елементів. При такій обробці основне значення для покращення властивостей зміцнюючої зони має утворення дисперсних інтерметалідних фаз, наприклад, алюмінію нікелю, та рівномірний розподіл їх у структурі. Зношування зміцненої зони зменшується в 3-4 рази, а опір циклічному ударному навантаженню виростає в 2-3 рази в порівнянні з застосовуваними порошковими алюмінієвими сплавами. Тривалі стендові та експлуатаційні випробування показали, що використання зміцнених поршнів дозволяє підвищити термін служби сполучення "верхнє компресійне кільце - канавка поршня" в 1,5 - 1,7 рази.

Для утворення кераміко-металевих покриттів широко використовується плазмове напавлення по шару порошку [7,8].

При проведенні випробувань на абразивне зношування ("сухий пісок") плазмові покриття на основі заліза, кобальту або нікелю з добавками карбідів титану або вольфраму показали зносостійкість у 13 разів вище, ніж покриття без добавок.

Способом *індукційного напавлення* проводиться армування поверхневого шару металевої деталі з порошкоподібної шахти, що складається з сполучної речовини і тугоплавких частинок другої фази: карбіди, композиційні порошки, литі кулі з твердих сплавів та ін.

При нагріванні струмами високої частоти відбувається розплавлення зв'язуючого компонента шахти і поверхневого шару деталі, а керамічний наповнюючий матеріал, що має більш високу температуру плавлення, не розплавляється і осідає на розплавлений шар. Таким чином, КП є сталеву матрицю з вплавленими в неї зернами тугоплавкого компонента. Найбільшого поширення індукційне наплавлення КП отримала при відновленні леміхів плугів та інших деталей ґрунтообробних органів сільськогосподарської техніки.

Випробуваннями на газоабразивне зношування встановлено, що найбільшу стійкість мають КП (отримані індукційним наплавленням), що містять за обсягом не менше 40% наповнювача - реліту, сплавів типу ВК, ТК і т.д.

Індукційне нагрівання використовується для нанесення КП при відливці змінних елементів зношених деталей, наприклад, заготовок долота та леза лемеха плуга. Основу сплаву становить порошок типу сормайту (ПГ-С27 або ПГ-УС25), крім того, в твердосплавну композицію вводять 10% карбіду титану, що забезпечує підвищення зносостійкості на 30-35%.

Добре себе зарекомендувало, з погляду отримання КП, *електрошлакове наплавлення*. Електродні дроти, що подаються із заданою швидкістю в шлакову ванну, розплавлюючись, створюють сплав-зв'язку, що утворює матрицю (основу) металу, що наплавляється. У процесі наплавлення дозовано подають зернистий наповнюючий матеріал (наприклад, реліт), який у шлаковій ванні поверхнево очищається, утворюючи зносостійкі КП (рис.1). В деяких випадках для активування процесу отримання КП застосовують магнітне поле. Електрошлакове наплавлення доцільно застосовувати для відновлення деталей ходової частини гусеничних тракторів (опорних катків та ін.).

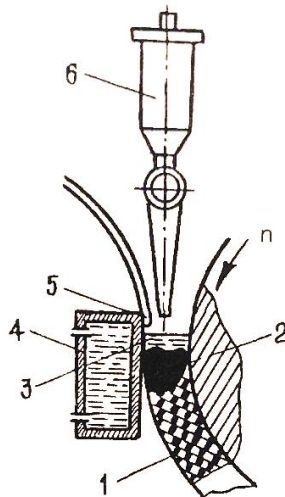


Рис. 1. Схема електрошлакового наплавлення композиційних покриттів: 1 – наплавлений метал, 2 – наплавлювальна ванна; 3- рідкий шлак; 4- кристалізатор; 5 - електродний дріт; 6- бункер з армуючим порошком

Газове наплавлення є одним із найпростіших та найефективніших методів отримання покриттів у ремонтному виробництві. Джерелом теплової енергії при цьому є - полум'я, що утворюється в результаті горіння суміші окислювач - горючий газ. В якості горючих газів в даному випадку застосовують: ацетилен (C_2H_2), метан (CH_4), пропан (C_3H_8), бутан (C_4H_{10}), водень (H_2) та ін.

Найбільш висока температура полум'я досягається при використанні ацетилено-кисневих сумішей. Однак теплотворна здатність вища у пропану та бутану. Тому для наплення найчастіше застосовують ацетилен технічний (ДСТУ 5457-75) або пропан-

бутанову суміш (ДСТУ 20448-90). Роль присадного матеріалу при газовому наплавленні виконують дроти, прутки та порошкоподібні матеріали.

Існує спосіб з попереднім нанесенням порошку на поверхню деталі з подальшим оплавленням газовим полум'ям - наплавлення по шару порошку або напилюватися з наступним або одночасним оплавленням. Останній варіант газового наплавлення отримав назву газопорошкового наплавлення.

Газове наплавлення з присадкою прутків або дроту виконують вручну, головним чином, ацетиленовими пальниками різних типів та конструкцій.

Деталі невеликих розмірів наплавляють без попереднього підігріву, великогабаритні деталі підігрівають до 500-700°C. При цьому способі застосовують трубчасті наплавлювальні матеріали, що являють собою сталеві і ніхромові трубки, заповнені порошком, наприклад, карбідом вольфраму. У процесі наплавлення газокисневим полум'ям трубка розплавляється, а зносостійкий наповнювач занурюється в розплавлений метал, утворюючи високозносостійкий композиційний сплав.

Способи *газотермічного напилення* (плазмове, детонаційне, дугове, газополум'яне) можуть використовуватися для утворення матричних КП, що містять метал, кераміку, полімер, скло і т.д., а також отримання багат шарових покриттів із зазначених матеріалів.

Виходячи з аналізу літературних даних що до якості одержуваних КП, більш якісніші покриття отримуються плазмовим та детонаційним напиленням.

Детонаційне напилення забезпечує найвищі фізико-механічні властивості покриттів у порівнянні з іншими методами напилення. Основна роль у щепленні порошкоподібної композиції з відновлюваною деталлю належить ефекту високошвидкісного зіткнення, що знижує вимоги до технологічної підготовки поверхні, що напилюється, і її підігріву, тобто. спосіб і технологічно вигідний.

Для напилення використовуються як механічні суміші компонентів, так і композиційні порошки. Для отримання покриттів системи метал-карбід найчастіше використовуються суміші Ni-WC, CO-WC, ніхром - Cr₃C₂ та ін. Розроблені покриття знайшли застосування для відновлення деталей насосів, металургійного обладнання, зміцнення поршневих кілець двигунів і т.і.

Найбільш широко плазмове напилення використовується для отримання КП, що містять оксиди металів. Введення пластичного металевго компонента в оксидні покриття дозволяє покращити багато показників їх якості: пластичність, адгезійну та когезійну міцність, пористість та ін. Залежно від виду зношування, кількість пластичної фази може змінюватися від 15 до 40% від об'єму. Вищий вміст металу необхідно для умови сухого тертя, де важлива когезійна міцність покриття.

Плазмове напилення оксидно-металевих покриттів (Ni-Al₂O₃) дозволяє досить ефективно підвищити надійність сполучення автотракторної техніки, наприклад, валу водяного насоса, посадкових місць у розжимних кулаках переднього гальма та ін.

Схожа технологія використовується для відновлення дисків сошників зернових сівалок шляхом нанесення керамічних та керметних порошків детонаційно-газовим напиленням, а також конструкцію детонаційно-газової установки для цих цілей. Порівняно із звичайними дисками зносостійкість напилених збільшилася в 5 – 10 разів. Покриття наносилося по периферії диска сошника з боку, зворотному заточуванню. У цьому випадку витримувалася умова самозаточування леза: м'якіша основа сошника (матеріал - сталь 65Г) зношувалась швидше покриття.

Отримання зносостійких покриттів методом дугового напилення можливе за рахунок застосування порошкових дротів (наприклад, кобальтова або нікелева оболонка та порошковий сердечник - карбіди вольфраму або хрому) або композиційних волокнистих дротів з нікелю та алюмінію. Цікавий спосіб отримання КП, при якому

металева матриця покриття утворюється за рахунок дугового розпилення дроту, а порошкові частинки другої фази вводяться в зону горіння електричної дуги. Для активування процесу дугового напилення газ, що розпилює, підігрівається, при цьому в 3 - 4 рази збільшується швидкість польоту частинок. КП, отримані активованим дуговим напиленням, мають дрібнозернисту структуру, низьку пористість, що не перебільшує 4%, високу міцність зчеплення з основним металом (до 3,5 кг/мм²) і рівнем залишкових напружень, величина яких вдвічі нижча, ніж при звичайному дуговому напиленні.

Висновки

Найпростіший і найдоступніший спосіб напилення – газополуменевий. Однак, напилення тугоплавких керамічних частинок за існуючими технологіями має певні проблеми через недостатню температуру газового полум'я та низьку швидкість польоту частинок.

Для отримання КП матричного типу доцільно використовувати механічну суміш порошків з вмістом компонентів %: 15[(Al) - (Ni)] + 35 NiCrBSi + 50 карбіди. Застосовуються карбіди титану, хрому, цирконію, вольфраму. В якості обладнання використовуються пістолети Metko 2P або 6P з повітряним активатором. Деякі властивості покриттів: твердість HRN 80-83, міцність зчеплення на зсув 61,2 МПа, рекомендовані сфери застосування - захист від зносу, тепловий захист.

Кожен компонент механічної суміші виконує свою функцію: [Al-Ni] – забезпечує самозчеплення, NiCrBSi – матриця КП, карбіди – зносостійкі наповнювачі.

Найбільш сприятливі умови для нагріву, розплавлення і розпилення матеріалів, що напилюються, забезпечується при дротяному і прутковому газополуменевому напиленні, так як в цьому випадку можна розпорошити весь матеріал, розплавлений в полум'ї. При розпиленні порошків завжди існує ймовірність, що в полум'я вводиться більше матеріалу, ніж може розплавити. Однак, внаслідок складності виготовлення дротяних та пруткових матеріалів з керамічних порошків, застосування їх для газополуменевого напилення вкрай обмежене.

Оптимальним видом матеріалу для напилення механічних сумішей компонентів КП можна вважати гнучкий шнур. На жаль, поки відсутні серійні апарати для газополуменевого напилення з використанням гнучких шнурів.

Досліджений спосіб поетапного формування КП: газополуменеве нанесення підшару (металевого сплаву), нанесення шару органічного матеріалу (наприклад, суміші гліцерину і води), нанесення на цей клейкий шар частинок карбідів, випаровування органічної фази і вплавлення частинок карбідів атмосферою чи вакуумом.

Список використаної літератури

1. Vulshinskaya, I., et al., Methods for improving the wear resistance of machine parts operating under conditions of abrasive wear. The scientific heritage, 2021(66-1): p. 39-41.
2. Peng, J., Z. Zhao, and D. Liu, Impact of agricultural mechanization on agricultural production, income, and mechanism: evidence from Hubei province, China. *Frontiers in Environmental Science*, 2022. 10: p. 838686.
3. Nihayat Hussein Ameen., Advances in corrosion and abrasive wear resistance of agricultural machinery. Agricultural machinery and equipment Department, College of Agriculture, University of Kirkuk, IRAQ. <https://doi.org/10.58928/ku25.16128>
4. Increasing the Wear Resistance of Restored Car Parts by Using Electrospark Coatings D.D. Marchenko*, K.S. Matvyeyeva* Mykolayiv National Agrarian University, Mykolayiv, Ukraine. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-107-1-65-72>
5. Skoblo, T. S., Sidashenko, A. I., Romanyuk, S. P., Goncharenko, A. A., Omel'chenko, L. V., & Bantkovskii, V. A. (2020). Specific Features of Structure Formation in the Course of

Modification of the Coatings on Products Made of Dispersion-Hardened Steels. *Materials Science*, 55(6).

6. Скобло, Т. С., Сідашенко, О. І., Власовец, В. М., Гончаренко, О. О., Марков, О. В. (2014). Вплив модифікування вуглець- та мідьвмісними добавками вторинної сировини при відновленні деталей електродуговим наплавленням. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*, (146), 227-231.

7. Скобло, Т. С., Мартиненко, О. Д., Бантковський, В. А., Гончаренко, О. О., Сайчук, О. В., Тіхонов, О. В., & Лисенко, С. В. (2019). Використання лазерних технологій для зміцнення та відновлення виробів зі сталей і сплавів. *Науковий журнал «Технічний сервіс агропромислового лісового та транспортного комплексів»*, (15), 142-162.

8. Saltzman G. A. Carbides add muscle to PTA antiwear coatings // *Metal progress*. 1986. v.129.S. 25-30.

References

1. Vulshinskaya, I., et al., Methods for improving the wear resistance of machine parts operating under conditions of abrasive wear. *The scientific heritage*, 2021(66-1): p. 39-41.

2. Peng, J., Z. Zhao, and D. Liu, Impact of agricultural mechanization on agricultural production, income, and mechanism: evidence from Hubei province, China. *Frontiers in Environmental Science*, 2022. 10: p. 838686.

3. Nihayat Hussein Ameen., Advances in corrosion and abrasive wear resistance of agricultural machinery. *Agricultural machinery and equipment Department, College of Agriculture, University of Kirkuk, IRAQ*. <https://doi.org/10.58928/ku25.16128>

4. Increasing the Wear Resistance of Restored Car Parts by Using Electrosark Coatings D.D. Marchenko*, K.S. Matvyeyeva* Mykolayiv National Agrarian University, Mykolayiv, Ukraine. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-107-1-65-72>

5. Skoblo, T. S., Sidashenko, A. I., Romanyuk, S. P., Goncharenko, A. A., Omel'chenko, L. V., & Bantkovskii, V. A. (2020). Specific Features of Structure Formation in the Course of Modification of the Coatings on Products Made of Dispersion-Hardened Steels. *Materials Science*, 55(6).

6. Skoblo, T. S., Sidashenko, O. I., Vlasovets, V. M., Honcharenko, O. O., Markov, O. V. (2014). The effect of modifying secondary raw materials with carbon and copper-containing additives during the restoration of parts by electric arc welding. *Bulletin of the Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture*, (146), 227-231.

7. Skoblo, T. S., Martynenko, O. D., Bantkovsky, V. A., Goncharenko, O. O., Saychuk, O. V., Tikhonov, O. V., & Lysenko, S. V. (2019). The use of laser technologies for strengthening and restoration of steel and alloy products. *Scientific journal "Technical Service of Agro-Industrial Forestry and Transport Complexes"*, (15), 142-162.

8. Saltzman G. A. Carbides add muscle to PTA antiwear coatings // *Metal progress*. 1986. v.129.S. 25-30.

Бєлих О.В.

Державний
біотехнологічний
університет,
Харків, Україна

E-mail:

sashafincol@gmail.com

МЕХАНІЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ВІДОКРЕМЛЕННЯ ГРАНУЛ ПЕРГИ У РОТОРНОМУ ЕКСТРАКТОРІ

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-27-140>

УДК 631.95:519.6:664.9:638.162

Бєлих О.В. Механічна модель процесу відокремлення гранул перги у роторному екстракторі

Анотація. У роботі представлено механічну модель ударної взаємодії між молотком ротора та восковими комірками стільників у процесі відокремлення гранул перги. Розроблено аналітичну залежність для визначення максимальної сили удару $P_{\max}$ через імпульс сили, масу молотка, швидкість обертання ротора та тривалість контакту. Запропоновано критерій селективного руйнування воску при збереженні цілісності гранул перги, який базується на співвідношенні границь міцності матеріалів. Визначено оптимальний діапазон кутової швидкості ротора ($\omega=30\text{--}45\text{ с}^{-1}$) та геометричні параметри молотків (радіус заокруглення 2–3 мм), що забезпечують ефективне вилучення перги без її пошкодження. Проведено аналіз обмежень моделі: відсутність тертя, локальний характер деформації, одночасність контактів, необхідність уточнення параметрів k та p_k при зміні вологості чи температури. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації конструкцій роторних екстракторів і підвищення ефективності технології механічного вилучення перги.

Ключові слова: перга, роторний екстрактор, ударна взаємодія, механічна модель, контакт Герца, сила удару, критерій руйнування.

Belykh O. Mechanical Model of the Bee Bread Granules Separation Process in a Rotary Extractor.

Abstract. This paper presents a mechanical model describing the impact interaction between a rotor hammer and the wax cells of honeycombs during the separation of bee bread granules. An analytical dependence was obtained for determining the maximum impact force $P_{\max}$ through the impact impulse, hammer mass, rotor angular velocity, and contact duration. A criterion of selective wax destruction while preserving the integrity of bee bread granules was proposed, based on the relationship between the strength limits of the contacting materials. The optimal range of rotor angular velocity ($\omega=30\text{--}45\text{ s}^{-1}$) and geometric parameters of hammers (edge rounding radius 2–3 mm) ensuring effective extraction without damaging the granules were determined. The model limitations were analyzed, including the absence of friction, localized deformation, simultaneous multi-point contact, and the need to refine stiffness parameters k and p_k under varying humidity or temperature conditions. The obtained results can be applied to the optimization of rotary extractor designs and improvement of mechanical bee bread extraction efficiency.

Keywords: bee bread, rotary extractor, impact interaction, mechanical model, Hertz contact, impact force, failure criterion.

Постановка проблеми

Сучасне бджільництво потребує ефективних технологій перероблення продуктів життєдіяльності бджіл, зокрема перги (бджолиного хліба), яка є високобіологічно активною речовиною з цінним поживним та фармакологічним потенціалом. У природному стані перга зберігається у воскових комірках стільників, де вона тісно спресована й закріплена восковими стінками. Традиційні методи отримання перги передбачають або ручне виймання, або глибоке заморожування з подальшим механічним руйнуванням стільників, що призводить до значних втрат, пошкодження гранул і зміни їхніх фізико-хімічних властивостей.

Проблема полягає в тому, що під час механічного вилучення гранул перги відбувається ударна взаємодія між робочими органами екстрактора та восковими стільниками, унаслідок чого виникають короточасні динамічні навантаження. Ці навантаження повинні бути достатніми для руйнування воскової структури, але не настільки великими, щоб пошкодити гранули перги, які мають відносно низьку механічну міцність і високу чутливість до деформації.

Недостатньо дослідженими залишаються питання кінематики, енергетики та динаміки удару молотка ротора по пергових стільниках, зокрема формування імпульсу сили, часу контакту, величини ударного навантаження та умов пружного/пластичного руйнування воскової основи. У більшості наявних конструкцій екстракторів не враховуються фізико-механічні властивості перги та воску (еластичність, крихкість, вологість, температура), що ускладнює точне моделювання процесу та оптимізацію режимів роботи.

Крім того, у сучасних дослідженнях бракує аналітичних і числових моделей, що описують контактну взаємодію «молоток — стільник» у координатах швидкості, енергії та сили, із застосуванням перевірених у механіці моделей удару (наприклад, Гертца, Ланкарані—Нікравеша, або моделей із гістерезисним демпфуванням). Це обмежує можливості прогнозування руйнування воскової структури та запобігання пошкодженню гранул.

Таким чином, постає науково-технічна задача — розробити механічну модель процесу ударної взаємодії в роторному екстракторі з молотками, що дозволить визначити умови селективного руйнування воскових стінок без пошкодження гранул перги. Така модель повинна враховувати властивості матеріалів (модуль пружності, густину, вологість, температуру), параметри удару (швидкість обертання ротора, масу молотка, радіус траєкторії), а також контактні сили, що формуються в момент удару.

Розв'язання цієї проблеми має важливе значення для створення енергоощадних, технологічно надійних і біологічно безпечних методів вилучення перги, з мінімальними втратами та збереженням її функціональних властивостей.

Представлене дослідження виконано в межах дисертаційної роботи здобувача ступеня доктора філософії та є складовою частиною прикладної науково-дослідної роботи «Техніко-технологічне обґрунтування напряму “Міське бджільництво” при університеті», що виконується в Державному біотехнологічному університеті (державний реєстраційний № 0122U002036).

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Перга (бджолиний хліб) є продуктом переробки пилку бджолами та відзначається високою біологічною цінністю, вмістом ферментів, амінокислот, вітамінів і фенольних сполук. Фізико-хімічні властивості цього продукту докладно досліджувалися у низці робіт [1–3], де визначено вплив умов зберігання, вологості та температури на хімічний склад і стабільність біологічно активних речовин. Роботи [4, 5] показали, що склад і

властивості перги залежать від ботанічного походженняпилку, умов ферментації та мікробіологічної активності.

Особливу увагу приділено дослідженню фізико-механічних характеристик перги та воску як двофазного композиту, який формує структуру стільника. Моделювання процесів сушіння перги та пов'язаних із цим змін її стану представлено у роботі [6], що підкреслює роль вологості як ключового фактора, який визначає крихкість і міцність гранул при механічному впливі. Для воску базою коректного визначення властивостей є стандартизовані методики дослідження [7]. Експериментальні дані про зміну фізико-механічних параметрів воску з температурою наведено у роботі [8], що пояснює зниження його жорсткості та зростання пластичності при підвищенні температури, тоді як гранули перги демонструють обмежену деформаційну здатність і схильність до крихкого руйнування. Це зумовлює потребу точного добору режимів механічного навантаження під час екстракції, щоб досягати руйнування воскових стінок без деградації гранул перги.

Важливим супровідним аспектом є біологічні функції воску. Зокрема, огляд антимікробної активності та практичних застосувань воску наведено у роботі [9], що дозволяє розглядати воскову матрицю не лише як механічний бар'єр, а й як середовище зі специфічними захисними властивостями. Технологічні підходи до переробки бджолиних продуктів, включно з пергою, узагальнено в огляді [10], де показано, що в інженерних рішеннях часто домінує технологічний підхід (продуктивність і швидкість), тоді як фізико-механічні параметри матеріалу та їх залежність від температури й вологості враховуються неповно, що підвищує ризик пошкодження гранул і зниження якості кінцевого продукту.

У галузі моделювання динамічних процесів удару сформовано низку аналітичних і числових підходів, які базуються на контактних моделях. Для опису ударної взаємодії в багатотільних системах класично застосовується підхід Ланкарані-Нікравеша [11], а огляд і систематизацію контактних-силових моделей для задач *multibody dynamics* наведено у роботі [12]. Практично значущою для інженерних розрахунків є модель неперервної сили контакту, запропонована для аналізу ударів у багатотільних системах [13], а також узагальнювальний огляд методів моделювання ударів у *multibody systems* [14]. У межах цих підходів контакт часто інтерпретується як нелінійний пружно-дисипативний процес, для якого базові висновки Герца можуть використовуватися як перший рівень наближення; у цьому контексті показовою є робота з прогнозування ударних сил на основі герцівської теорії [15]. Сучасні уточнення, орієнтовані на підвищення точності опису втрат енергії та валідацію моделей, представлено у дослідженні поліпшеної герцівської контактної моделі з експериментальним підтвердженням [16], а також у роботі щодо нелінійного відгуку герцівського контакту при гармонічному збуренні та субгармонічних ефектах [17]. Для задач із одночасними багатозонними ударами актуальним є аналіз застосовності комплаєнтних контактних моделей [18], тоді як приклад моделі з гістерезисним демпфуванням, придатної для відтворення енергетичних втрат, подано у роботі [19]. Узагальнений огляд методологій (аналітичних, числових та експериментальних) для систем із зазорами та недосконалими з'єднаннями, де контактні явища визначають динаміку, наведено у праці [20].

У контексті роторних екстракторів перги критично важливими є розподіл сил у точці удару, тривалість контакту та форма імпульсу сили. Саме такі характеристики визначають, чи буде руйнування воску селективним, тобто спрямованим на руйнування стільникової матриці при збереженні гранул перги. Хоча для бджолиних продуктів прямі дослідження імпульсних режимів на рівні «молоток—стільник» представлені обмежено, практичні висновки щодо впливу вологості на міцність і деформаційні властивості перги важливі для режимів механічної дії: оптимізацію сушіння та її вплив на показники якості

перги системно досліджено у роботі [21], що задає фізично обґрунтовані межі для механічного навантаження на матеріал із різною вологістю. Додатково, поглиблена фенольна характеристика перги, релевантна для оцінки якості продукту після механічної обробки, представлена в роботі [22], що підкреслює: механічні режими екстракції повинні контролювати не лише цілісність гранул, а й збереження чутливих біоактивних компонентів.

У напрямі вивчення гранулярних матеріалів, які за механічною поведінкою можуть слугувати наближенням до структурованої перги, проведено низку експериментальних і теоретичних досліджень. Зокрема, закономірності високошвидкісного удару по гранулярному середовищу та масштабні залежності сили й акустичних імпульсів описано у роботі [25], а класичний аналіз динаміки удару сфер і дисків у зернисті середовища наведено у праці [27]. Важливий для інтерпретації ранньої стадії контакту результат про степеневі закони масштабування сил удару представлено в роботі [28]. З огляду на те, що перга в комірці має гранулярно-композитну структуру (гранули в оточенні воскових стінок), такі висновки дозволяють якісно пояснювати наявність короткого піку сили на початку контакту та подальше згасання через внутрішнє демпфування й перебудову контактної мережі. Для інженерної оцінки параметрів гранулярних середовищ, які впливають на розподіл навантажень, корисним є огляд механічних властивостей зернистих матеріалів і їх впливу на передачу сил [29].

Окремо слід підкреслити, що при проектуванні режимів м'якої дії важливе місце займає аналіз пошкоджуваності біологічних матеріалів. Методологію оцінювання механічних пошкоджень біологічних об'єктів із прив'язкою до параметрів удару та мікропошкоджень запропоновано у роботі [24], що може бути безпосередньо використано як підхід для кількісного контролю руйнування гранул перги. Аналогічно, вплив повторних навантажень і накопичення механічних ушкоджень, хоча й показаний на іншому матеріалі (георешітках), демонструє загальний механізм деградації при циклічній дії [26], який принципово важливий для роторних систем з багаторазовими ударами.

З погляду удосконалення математичного опису контакту для задач із варіативними нелінійностями, важливим є розвиток моделей з довільними показниками степеня для заглиблення та швидкості, що дозволяє краще підлаштовувати контактну силу під експеримент [30]. Для задач багатозонного тертьового контакту конструкційних елементів (зокрема, при взаємодії гнучких стінок і ударних елементів) релевантною є робота з моделюванням багатозонних контактів тонких балок [32]. Нарешті, для розуміння передачі імпульсу через зернистий масив і масштабів швидкості поширення збурень важливими є результати про швидкість поширення сили в шарі частинок при ударі [33].

Таким чином, аналіз наукових джерел свідчить, що, попри значний обсяг досліджень у галузях фізико-хімії перги, механіки удару, контактної динаміки та технологій переробки бджолиних продуктів, залишається недостатньо вивченим питання моделювання ударної взаємодії між молотками ротора та перговими стільниками як системи з неоднорідною, двофазною структурою (віск—гранули перги) та змінними властивостями, зумовленими вологістю й температурою. Подальшого розвитку потребує інтегрована механічна модель, яка б одночасно враховувала контактні закономірності удару, фізико-механічні властивості матеріалу та критерії селективного руйнування воскової структури за умови збереження цілісності гранул і біоактивних компонентів перги.

Формулювання цілей статті

Метою статті є розроблення аналітичної механічної моделі процесу відокремлення гранул перги у роторному екстракторі з молотками як робочими органами, що забезпечує селективне руйнування воскової основи стільників без пошкодження гранул перги.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі основні завдання:

Проаналізувати фізико-механічні властивості перги та воску як основних елементів структури стільника, які визначають характер ударної взаємодії.

Дослідити кінематичні та динамічні параметри руху молотків ротора, встановити залежності між швидкістю обертання, масою робочого органа та енергією удару.

Побудувати аналітичну модель ударного контакту між молотком і восковою коміркою, використовуючи принципи імпульсної механіки та контактних моделей Герца, Ланкарані–Нікравеша і моделей із гістерезисним демпфуванням.

Визначити умови селективного руйнування воскової структури, за яких сила удару перевищує межу міцності воску, але не досягає критичних значень для крихкої перги.

Розрахувати основні параметри процесу — максимальну силу удару, тривалість контакту, імпульс сили, а також побудувати залежності між цими величинами та параметрами обертання ротора.

Обґрунтувати оптимальний діапазон частоти обертання ротора ω , що забезпечує ефективне вилучення гранул із мінімальними енергетичними витратами й без порушення структури перги.

Провести верифікацію запропонованої моделі шляхом порівняння розрахункових результатів із експериментальними даними та літературними джерелами.

Методологічна основа дослідження сформована відповідно до завдань та наукових підходів прикладної науково-дослідної роботи «Техніко-технологічне обґрунтування напрямку “Міське бджільництво” при університеті» (державний реєстраційний № 0122U002036), що виконується під науковим керівництвом Ю. М. Сиромятникова [34-36].

Виклад основного матеріалу дослідження

1. Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є динамічний процес механічного відокремлення гранул перги від воскових структур стільника, що реалізується в роторному екстракторі з ударними робочими органами типу молотків. Цей процес характеризується короткочасним контактом із передачею імпульсу сили, внаслідок чого відбувається руйнування воскової матриці та звільнення гранул перги. До складу об'єкта дослідження входять: ротор із молотками, пергові стільники як об'єкт впливу, повітряно-механічне середовище, у якому відбувається контактна взаємодія. Процес визначається сукупністю кінематичних, динамічних і фізико-механічних параметрів, які впливають на якість отриманого продукту.

2. Предмет дослідження

Предметом дослідження є закономірності формування сили удару та імпульсу при взаємодії молотка ротора з восково-перговою структурою, а також вплив цих параметрів на ефективність відокремлення гранул. Метою аналізу є визначення критичних умов переходу від пружного до пластичного деформування воскової комірки при мінімальному пошкодженні перги.

У межах предмета дослідження вивчаються: залежності між масо-інерційними характеристиками молотка, швидкістю обертання ротора та енергією удару; вплив

жорсткості, вологості та температури воскової структури на контактні напруження; умови селективного руйнування стільникової основи.

Основна увага приділена моделюванню ударної взаємодії типу Герца–Ланкарані–Нікраवेशа, з урахуванням реальних властивостей біоматеріалу та рекомендацій щодо конструкції молотків і режимів їх обертання.

2.2. Конструктивно-технологічна схема роторного екстрактора перги

Узагальнена конструктивно-технологічна схема роторного екстрактора перги показана на рис. 1.

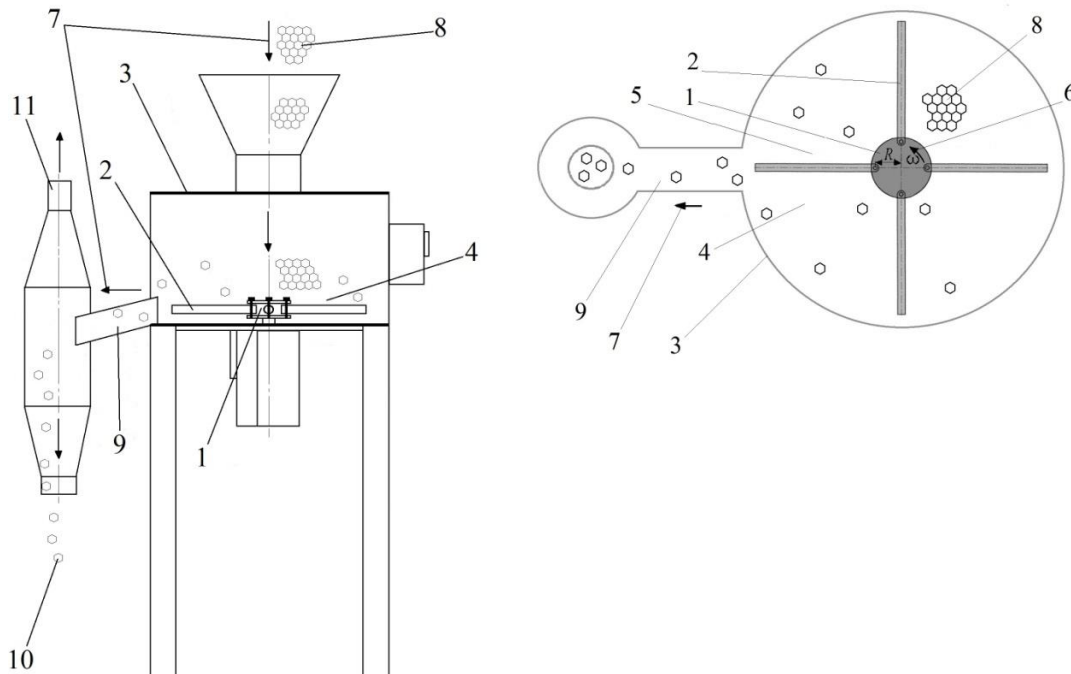


Рис. 1 – Узагальнена конструктивно-технологічна схема роторного екстрактора перги з молотками де: 1 - ротор; 2 - молоток; 3 - робоча камера; 4 - зона ударної взаємодії; 5- радіус R ; 6- кутова швидкість ω ; 7- напрямок подачі та вивантаження матеріалу; 8 – бджолині воско-пергові стільники; 9 – воско-пергова суміш; 10 – перга; 11 - розрядження

Роторний екстрактор перги призначений для механічного відокремлення гранул перги (10) від пергових стільникових структур (8) за рахунок короточасної ударної взаємодії молотків (2) ротора (1) з матеріалом у робочій камері (3). Конструкція машини (1–11) орієнтована на селективне руйнування воскової основи стільника при мінімальному пошкодженні гранул перги (10), що є визначальним критерієм якості готової продукції.

Основним робочим органом екстрактора є ротор (1), який обертається з постійною кутовою швидкістю ω (6). На роторі (1) розміщено систему молотків (2), які в процесі обертання здійснюють плоский рух у радіальній площині та періодично взаємодіють із перговими стільниками (8) та з воскоперговою масою (9), що подається у робочу камеру (3). Радіус розміщення молотка R (5), який відраховується від осі обертання ротора (1) до осі підвісу молотка (2), є одним з основних геометричних параметрів, що визначає кінематичні характеристики ударної взаємодії.

Молоток (2) розглядається як твердий елемент масою m та довжиною L , який у процесі роботи може відхилятися від радіального напрямку на кут α . Кут α характеризує миттєве положення молотка (2) відносно радіуса R (5) ротора (1) та визначає орієнтацію

молотка в момент контакту з перговим стільником (8) у зоні ударної взаємодії (4). Положення ротора (1) в просторі задається кутом повороту φ , який відраховується від фіксованої системи координат, жорстко пов'язаної з корпусом робочої камери (3). Таким чином, миттєве положення молотка (2) в процесі руху однозначно визначається узагальненими координатами φ і α .

Робоча камера екстрактора (3) являє собою замкнений об'єм, у межах якого реалізується процес ударного руйнування воскової основи пергових стільникових структур (8). Подача матеріалу (7) організована таким чином, щоб пергові стільники (8) або їх фрагменти потрапляли у зону дії молотків (2), де під впливом відцентрових сил та ударних навантажень відбувається інтенсивна взаємодія. Зона контакту «молоток – перговий стільник» (4) локалізована поблизу траєкторії руху молотка (2) та характеризується високими миттєвими навантаженнями при малій тривалості контакту.

Для подальшого теоретичного аналізу приймається спрощена розрахункова схема ротора з одним молотком, наведена на рисунку 2.

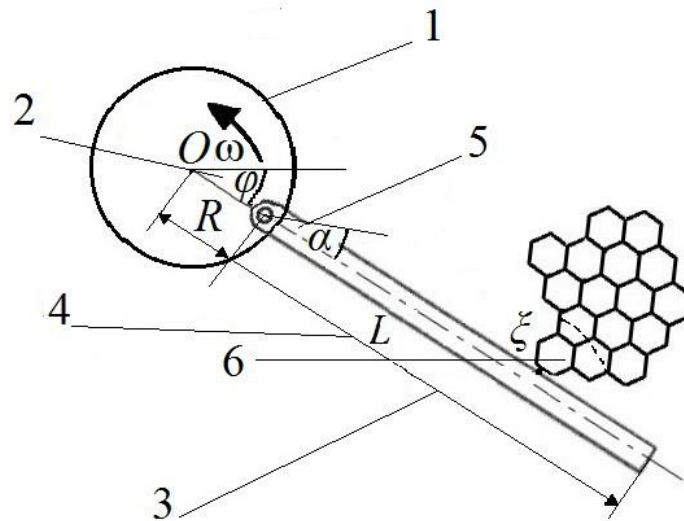


Рис. 2 – Розрахункова схема ротора з молотком та основні геометричні і кінематичні параметри де: 1 — кутова швидкість ротора ω ; 2 — кут повороту ротора φ ; 3 — радіус розміщення молотка R ; 4 — довжина молотка L ; 5 — кут відхилення молотка α ; 6 — зона деформації пергового стільника ξ

У прийнятій розрахунковій схемі ротор вважається абсолютно жорстким тілом, що обертається навколо нерухомої осі з постійною кутовою швидкістю ω (1). Молоток розглядається як жорсткий елемент довжиною L (4), закріплений на роторі з радіусом R (3), який здійснює плоский рух у радіальній площині та може відхилитися від радіального напрямку на кут α (5).

Кінематичний стан системи у кожний момент часу визначається кутом повороту ротора φ (2) та кутом відхилення молотка α (5). Швидкість точки контакту молотка з матеріалом формується внаслідок обертального руху ротора та залежить від значень кутової швидкості ω (1) і радіуса розміщення молотка R (3). У момент ударної взаємодії вектор швидкості точки контакту має нормальну складову відносно поверхні пергового стільника в зоні контакту (6), яка визначає інтенсивність удару та величину імпульсу сили, що передається від молотка до матеріалу.

Вивантаження продуктів переробки з робочої камери здійснюється під дією гравітаційних і відцентрових сил через систему отворів або решіток, які забезпечують проходження гранул перги та затримують уламки воскової основи. Така організація

процесу дозволяє поєднати операції руйнування воскової матриці та первинного розділення продуктів переробки в межах однієї машини.

Прийнята конструктивно-технологічна схема роторного екстрактора та відповідна розрахункова модель (рис. 2) створюють методологічну основу для подальшого аналітичного визначення імпульсу удару та максимальної ударної сили молотка, які є визначальними параметрами забезпечення селективного руйнування воскової основи та збереження цілісності гранул перги.

3. Фізико-механічні властивості пергових стільникових структур як вхідні параметри моделі

Фізико-механічні властивості пергових стільникових структур визначають характер їх руйнування при ударній взаємодії з молотками ротора та, відповідно, безпосередньо впливають на збереження цілісності гранул перги. На відміну від однорідних матеріалів, перговий стільник являє собою багатокомпонентну біологічну систему, що включає воскову матрицю, гранули перги та залишкові включення меду і пилку. У зв'язку з цим при побудові механічної моделі удару необхідно враховувати як структурні особливості стільника, так і умови його попередньої підготовки до переробки.

У подальшому аналізі фізико-механічні характеристики пергових стільників структур розглядаються як вхідні параметри імпульсної моделі ударної взаємодії «молоток – перговий стільник», що визначають допустимий рівень максимальної ударної сили.

3.1. Структура пергового стільника та умови підготовки до відокремлення гранул

Перговий стільник являє собою комірчасту біологічну структуру, сформовану з бджолиного воску (1), у внутрішніх осередках якої розміщені ущільнені гранули перги (2). Воскова основа (1) виконує функцію просторового механічного каркаса, що забезпечує форму та цілісність стільника, тоді як гранули перги (2) характеризуються відносно вищою щільністю, а також відмінними фізико-механічними властивостями порівняно з восковою матрицею.

Осередки стільника (3) слугують природними контейнерами для гранул перги (2) та визначають локальні умови їх механічного закріплення у восковій основі (1). Така структурна організація зумовлює різну реакцію компонентів пергового стільника на зовнішній механічний вплив, що є принципово важливим для аналізу процесу селективного руйнування воскової основи без пошкодження гранул перги.

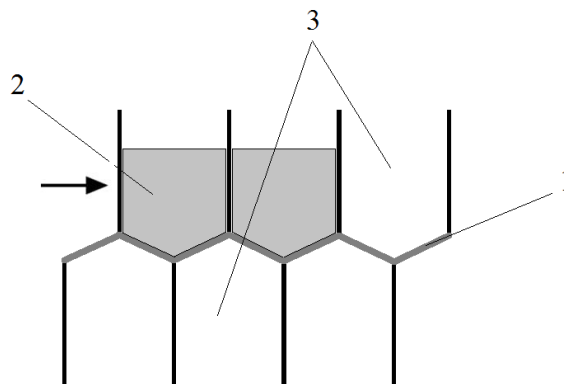


Рис. 3. Схематична будова пергового стільника де: 1 – воскова основа; 2 – гранули перги; 3 – осередок стільника

Перед механічною переробкою до пергових стільникових структур висувається низка технологічних вимог. Насамперед, стільники не повинні містити ознак плісняви або біологічного ураження, оскільки це змінює їх фізико-механічні властивості та ускладнює прогнозування характеру руйнування. Вміст залишкового меду має бути мінімальним, оскільки мед підвищує липкість перги та призводить до агломерації гранул при механічній обробці. Зберігання стільникової сировини здійснюється в умовах, що запобігають вторинному зволоженню та пластичній деформації воскової основи.

З позицій механіки удару перговий стільник доцільно розглядати як композиційний матеріал із різко відмінними механічними характеристиками компонентів. Умовно можна вважати, що руйнування воскової основи відбувається при досягненні певного граничного рівня контактних напружень σ_w^{cr} , тоді як для гранул перги характерним є інший граничний рівень σ_p^{cr} , причому $\sigma_w^{cr} \ll \sigma_p^{cr}$.

Ця нерівність створює передумови для селективного руйнування воску при збереженні цілісності гранул перги.

Для кількісного опису поведінки пергового стільника при ударі використовується ефективна контактна жорсткість k , яка залежить від стану воскової основи та вологості перги. У загальному випадку контактна сила між молотком і стільником описується степеневою залежністю:

$$P = k\xi^p, \quad (1)$$

де ξ – локальна деформація у зоні контакту,
 p – показник, що визначається характером контакту та станом матеріалу.

Одним із ключових технологічних прийомів підготовки пергових стільникових структур до механічного відокремлення гранул є попередня сушка. Практика показує, що при зниженні масової частки води у перзі до рівня приблизно $W=14-15\%$ істотно зменшується адгезійна взаємодія між гранулами та восковою основою, а також знижується липкість поверхні гранул. З механічної точки зору це відповідає зменшенню ефективної контактної жорсткості у зоні «гранула – віск» та зменшенню роботи сил зчеплення.

Вплив вологості на механічні властивості перги та воскової основи може бути узагальнено через залежність ефективної жорсткості

$$k = k_0 \left(\frac{w}{w_0} \right)^{-n}, \quad (2)$$

де k_0 – жорсткість при еталонній вологості W_0 ,
 n – експериментально визначений показник, що відображає чутливість матеріалу до зволоження.

Окрім сушки, важливим етапом підготовки є охолодження пергових стільникових структур. Зниження температури призводить до переходу воскової основи у більш крихкий стан, що супроводжується зменшенням граничної деформації ξ_w^{cr} та зниженням енергії руйнування воску. При цьому гранули перги, завдяки своїй структурі та складу, менш чутливі до помірного охолодження, що додатково розширює інтервал допустимих ударних навантажень.

Експериментальні та аналітичні дані, використані для параметризації механічної моделі, отримано з використанням матеріально-технічної бази Державного біотехнологічного університету в межах виконання зазначеної науково-дослідної роботи.

З енергетичної точки зору умова селективного руйнування пергового стільника при ударі може бути записана у вигляді

$$E_w^{cr} \leq \int_0^{\xi_{max}} P(\xi) d\xi < E_p^{cr}, \quad (3)$$

де E_w^{cr} – критична енергія руйнування воскової основи,
 E_p^{cr} – критична енергія руйнування гранул перги,
 ξ_{max} – максимальна контактна деформація.

Узагальнені фізико-механічні характеристики пергових стільникових структур, які використовуються у подальшому моделюванні ударної взаємодії, наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Основні фізико-механічні параметри пергових стільникових структур, що використовуються як вхідні параметри моделі

Параметр	Позначення	Одиниця вимірювання	Характерний діапазон	Фізичний зміст
Вологість перги	W	%	14–20	Визначає липкість і контактну жорсткість
Контактна жорсткість «молоток–стільник»	k	Н·м ^{-р}	змінна	Характеризує опір локальній деформації
Показник контактної залежності	p	–	1–1,5	Тип контакту та стан матеріалу
Критична напруга руйнування воску	σ_w^{cr}	МПа	нижча	Початок руйнування воскової основи
Критична напруга руйнування гранул	σ_p^{cr}	МПа	вища	Межа цілісності гранул перги
Критична енергія руйнування воску	E_w^{cr}	Дж	нижча	Руйнування каркаса стільника
Критична енергія руйнування гранул	E_p^{cr}	Дж	вища	Подрібнення гранул

Таким чином, фізико-механічні властивості пергових стільникових структур та умови їх попередньої підготовки визначають допустимий інтервал ударних навантажень, у межах якого забезпечується ефективне відокремлення гранул перги без їх механічного пошкодження. Зазначені параметри надалі використовуються як вхідні дані при аналітичному визначенні імпульсу удару та максимальної ударної сили молотка.

3.2. Параметри, що впливають на руйнування воскової основи та збереження цілісності гранул перги

Ефективність процесу механічного відокремлення гранул перги в роторному екстракторі визначається сукупністю фізико-механічних та технологічних параметрів, які формують характер ударної взаємодії між молотком і перговим стільником. На відміну від однорідних матеріалів, пергові стільникові структури демонструють істотно різну чутливість до ударних навантажень залежно від вологості, температури підготовки та структурного стану воскової основи і гранул перги. Тому для побудови адекватної розрахункової моделі доцільно виокремити набір параметрів, які безпосередньо впливають на руйнування воску та збереження цілісності гранул і надалі використовуються як вхідні дані моделі.

До основних параметрів, що визначають механічну поведінку пергового стільника при ударі, належать вологість перги W , температура попередньої підготовки T , характер руйнування воскової основи та схильність гранул перги до крихкого руйнування або крошіння при механічному впливі.

Вологість перги істотно впливає як на адгезійні властивості системи «гранула – віск», так і на ефективну контактну жорсткість у зоні удару. При підвищеній вологості спостерігається зростання пластичності воскової основи та збільшення роботи сил зчеплення, що потребує підвищення рівня ударної дії для руйнування стільника. З механічної точки зору це призводить до зростання ефективної контактної жорсткості k і зміни показника контактної залежності ppr . Узагальнено вплив вологості на контактні характеристики може бути описаний залежностями

$$k(W) = k_{\text{ref}} \left(\frac{W}{W_{\text{ref}}} \right)^{-n_k}, p(W) = p_{\text{ref}} + \Delta p \ln \left(\frac{W}{W_{\text{ref}}} \right), \quad (4)$$

де k_{ref} і p_{ref} — значення при сталонній вологості

W_{ref} , n_k і Δp — емпіричні коефіцієнти, що відображають чутливість матеріалу до зволоження.

Температура підготовки пергових стільникових структур є другим ключовим фактором, який визначає характер руйнування воскової основи. При зниженні температури відбувається перехід воску у більш крихкий стан, що супроводжується зменшенням граничної деформації ξ_w^{cr} та критичної енергії руйнування E_w^{cr} . У першому наближенні температурну залежність критичної деформації воску можна подати у вигляді

$$\xi_w^{cr}(T) = \xi_{w0} \exp[-\beta(T_{\text{ref}} - T)], \quad (5)$$

де ξ_{w0} — гранична деформація при температурі

T_{ref} , β — температурний коефіцієнт крихкості.

Схематичний вплив вологості та температури підготовки на контактну жорсткість і граничні характеристики воскової основи показано на рисунку 4.

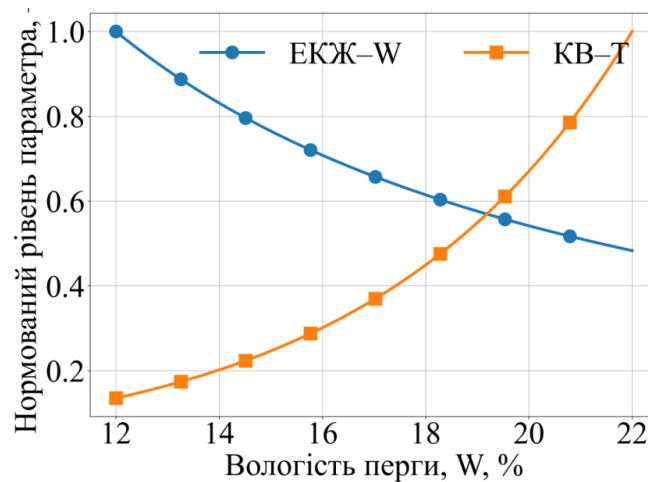


Рис. 4 – Вплив вологості W та температури підготовки T на ефективну контактну жорсткість k і крихкість воскової основи: $ЕКЖ-W$ — нормована ефективна контактна жорсткість як функція вологості перги; $КВ-T$ — нормована крихкість воскової основи як функція температури підготовки.

На відміну від воскової матриці, гранули перги характеризуються вищою структурною міцністю та меншою чутливістю до помірних змін температури. Однак при перевищенні певного рівня контактних напружень або енергії удару вони схильні до крихкого руйнування та інтенсивного крошіння. З позицій механіки руйнування це відповідає досягненню критичної енергії

$$E_p^{cr} = \int_0^{\xi_p^{cr}} k_p \xi^{p_p} d\xi = \frac{k_p}{p_p+1} (\xi_p^{cr})^{p_p+1}, \quad (6)$$

де k_p і p – параметри контактної взаємодії, характерні для гранул перги,
 ξ_p^{cr} – гранична деформація, що відповідає початку їх руйнування.

Таким чином, з урахуванням впливу вологості та температури умова селективного руйнування пергового стільника при ударній взаємодії з молотком може бути сформульована у вигляді подвійної нерівності

$$E_w^{cr}(W, T) \leq \int_0^{\xi_{max}^{cr}} P, \quad (7)$$

де ξ_{max} – максимальна контактна деформація, що реалізується в процесі удару.

Для практичної реалізації цієї умови доцільно ввести поняття «вікна технологічних умов», яке визначає допустимі поєднання вологості та температури підготовки пергових стільників структур. Графічну інтерпретацію такого вікна подано на рисунку 5.

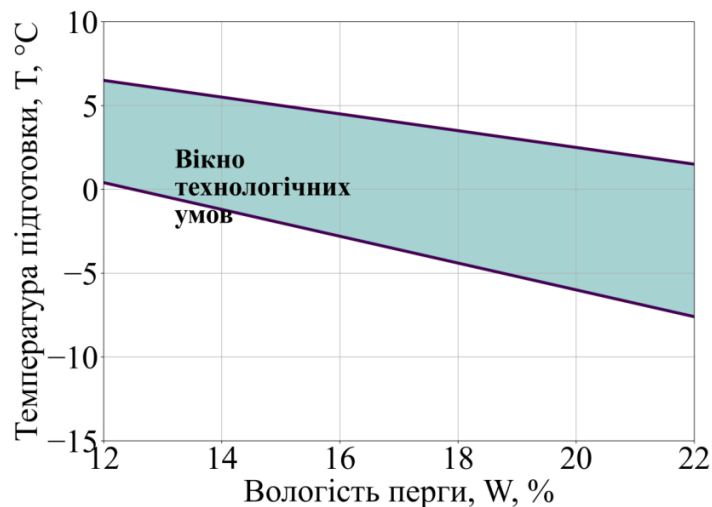


Рис. 5 – Вікно технологічних умов підготовки пергових стільникових структур, що забезпечує селективне руйнування воску при збереженні цілісності гранул перги

Нижня межа області відповідає режимам, за яких енергія удару недостатня для ефективного руйнування воскової основи. Верхня межа області обмежує режими, при яких зростає ризик крихкого руйнування та кришіння гранул перги. Заштрихована область визначає раціональні поєднання W і T , що використовуються як вихідні умови для подальшого розрахунку імпульсу удару та максимальної сили молотка.

У межах цього вікна параметрів забезпечується зниження граничної енергії руйнування воскової основи при одночасному збереженні достатнього запасу міцності гранул перги. З точки зору подальшого розрахунку ударної взаємодії це означає, що параметри W і T можуть бути зафіксовані в допустимих межах, після чого задача визначення максимальної ударної сили молотка зводиться до аналізу імпульсу удару та кінематичних параметрів ротора.

Сформоване вікно технологічних умов та відповідний набір параметрів створюють необхідні передумови для подальшого аналітичного визначення імпульсу удару і максимальної ударної сили молотка ротора, що безпосередньо використовується у математичній моделі процесу відокремлення гранул перги.

4. Механічна модель руху ротора і молотка

4.1. Узагальнені координати та кінематика системи

Для побудови механічної моделі ударної взаємодії молотка з перговим стільником роторний екстрактор розглядається як плоска механічна система з двома ступенями вільності. Узагальнену кінематичну схему руху ротора і молотка наведено на рисунку 6.

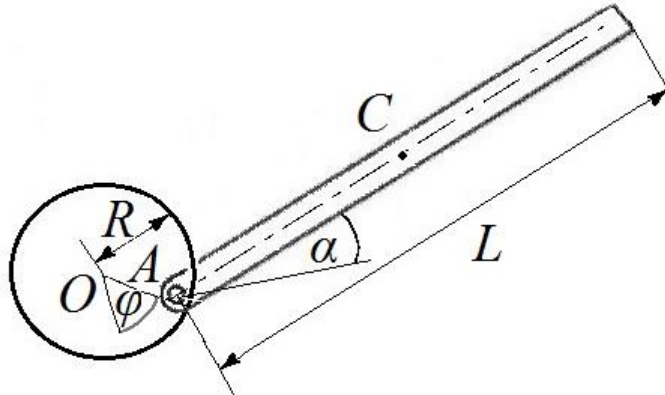


Рис. 6 – Кінематична схема руху ротора з молотком та введення узагальнених координат (φ — кут повороту ротора; α — кут відхилення молотка; R — радіус розміщення молотка; L — довжина молотка; O — вісь обертання ротора; C — центр мас молотка)

У прийнятій кінематичній схемі ротор розглядається як абсолютно жорстке тіло, що обертається навколо нерухомої осі O з кутом повороту φ . Молоток закріплений на роторі на радіусі R і являє собою жорсткий елемент довжиною L , який у процесі руху може відхилятися від радіального напрямку на кут α . Центр мас молотка позначено точкою C .

У якості узагальнених координат системи приймаються: $\varphi(t)$ — кут повороту ротора відносно нерухомої осі O ; $\alpha(t)$ — кут відхилення молотка від радіального напрямку, жорстко пов'язаного з ротором.

Таким чином, миттєвий кінематичний стан системи «ротор – молоток» повністю визначається значеннями узагальнених координат $\varphi(t)$ та $\alpha(t)$, що дозволяє надалі формалізувати положення, швидкості та прискорення елементів системи і використати отримані залежності для аналітичного опису ударної взаємодії.

Таким чином, миттєвий стан системи однозначно визначається вектором узагальнених координат

$$\mathbf{q}(t) = \begin{cases} \varphi(t) \\ \alpha(t) \end{cases} \quad (8)$$

Розглянемо плоску декартову систему координат Oxy , жорстко пов'язану з корпусом машини. Радіус-вектор точки підвісу молотка A визначається співвідношенням

$$\mathbf{r}_A = \begin{cases} R \cos \varphi \\ R \sin \varphi \end{cases} \quad (9)$$

Центр мас молотка C розташований на відстані L від точки A і має радіус-вектор

$$\mathbf{r}_c = \begin{cases} R \cos \varphi + L \cos(\varphi + \alpha) \\ R \sin \varphi + L \sin(\varphi + \alpha) \end{cases} \quad (10)$$

Диференціюючи $\mathbf{r}_c$ за часом, отримаємо вектор швидкості центру мас молотка:

$$\mathbf{v}_c = \begin{cases} -R\dot{\varphi} \sin \varphi - L(\dot{\varphi} + \dot{\alpha}) \sin(\varphi + \alpha) \\ R\dot{\varphi} \cos \varphi + L(\dot{\varphi} + \dot{\alpha}) \cos(\varphi + \alpha) \end{cases} \quad (11)$$

Квадрат модуля швидкості центру мас після перетворень набуває вигляду

$$v_c^2 = R^2 \dot{\varphi}^2 + L^2 (\dot{\varphi} + \dot{\alpha})^2 + 2RL\dot{\varphi}(\dot{\varphi} + \dot{\alpha}) \cos \alpha \quad (12)$$

Цей вираз відіграє ключову роль при подальшому виведенні кінетичної енергії системи та імпульсу удару.

Для аналізу ударної взаємодії розглянемо точку K (1), розташовану на робочій кромці молотка, яка безпосередньо вступає у контакт з поверхнею пергового стільника. Кінематична схема точки контакту та основні вектори, що характеризують ударну взаємодію, наведені на рисунку 7.

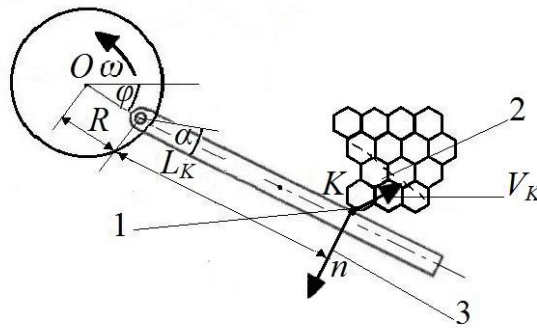


Рис. 7. Кінематична схема точки контакту молотка з перговим стільником де: 1 - K — точка контакту; 2 - $\mathbf{v}_K$ — швидкість точки контакту; 3- $\mathbf{n}$ — нормаль до поверхні пергового стільника)

У момент ударної взаємодії точка K (1) рухається зі швидкістю $\mathbf{v}_K$ (2), напрямком якої визначається кінематикою обертального руху ротора та відносним положенням молотка. Для кількісного опису удару вектор швидкості $\mathbf{v}_K$ (2) доцільно розкласти на нормальну та дотичну складові відносно поверхні пергового стільника. Нормальна складова швидкості, що проєктується на напрямок одиничного вектора $\mathbf{n}$ (3), є визначальною для формування імпульсу удару та величини контактної сили у зоні взаємодії.

Таким чином, введення точки контакту K (1), вектора швидкості $\mathbf{v}_K$ (2) та нормалі $\mathbf{n}$ (3) створює кінематичну основу для подальшого аналітичного визначення нормальної складової швидкості, імпульсу сили та максимальної ударної сили молотка при взаємодії з перговим стільником.

Радіус-вектор точки контакту:

$$\mathbf{r}_K = \begin{cases} R \cos \varphi + L_K \cos(\varphi + \alpha) \\ R \sin \varphi + L_K \sin(\varphi + \alpha) \end{cases} \quad (13)$$

де L_K — відстань від осі підвісу молотка до точки контакту.

Вектор швидкості точки контакту:

$$\mathbf{v}_K = \begin{cases} -R\dot{\varphi} \sin \varphi - L_K(\dot{\varphi} + \dot{\alpha}) \sin(\varphi + \alpha) \\ R\dot{\varphi} \cos \varphi + L_K(\dot{\varphi} + \dot{\alpha}) \cos(\varphi + \alpha) \end{cases} \quad (14)$$

Нормальна складова швидкості, яка визначає інтенсивність удару, обчислюється як

$$v_n = \mathbf{v}_K \cdot \mathbf{n}. \quad (15)$$

Саме величина v_n надалі використовується для визначення імпульсу удару та максимальної ударної сили молотка.

Таблиця 2

Узагальнені координати та кінематичні параметри механічної моделі ротора з молотком

Параметр	Позначення	Одиниця	Фізичний зміст
Кут відхилення молотка	α	рад	Орієнтація молотка
Кутова швидкість ротора	φ	рад·с ⁻¹	Режим роботи екстрактора
Радіус розміщення молотка	R	м	Геометрія ротора
Довжина молотка	L	м	Плече удару
Швидкість точки контакту	v_n	м·с ⁻¹	Інтенсивність удару

Таким чином, введення узагальнених координат Таблиця 2, φ і α дозволяє однозначно описати положення, швидкість і кінематичні характеристики молотка в процесі обертального руху ротора. Отримані співвідношення є вихідною базою для подальшого визначення кінетичної енергії системи, імпульсу удару та максимальної ударної сили, що визначає збереження цілісності гранул перги.

4.2. Енергія та рівняння руху системи (до удару)

До моменту ударної взаємодії молотка з перговим стільником рух системи «ротор – молоток» вважається неперервним та описується рівняннями класичної механіки для плоскої системи з двома ступенями вільності. Кінематична схема системи та введені узагальнені координати φ і α відповідають рисунку 6.

Повна кінетична енергія системи складається з кінетичної енергії ротора та кінетичної енергії молотка:

$$T = T_r + T_m = \frac{1}{2} m_c v_c^2 + \frac{1}{2} m_K v_K^2. \quad (15)$$

Кінетична енергія ротора, який обертається навколо рухомої осі O , має вигляд

$$T = T_r + T_m = \frac{1}{2} J_r \dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2} m_K v_K^2, \quad (16)$$

де J_r — момент інерції ротора відносно осі обертання.

Кінетична енергія молотка визначається за теоремою Кеніга як сума енергії поступального руху його центра мас та енергії обертання відносно центра мас:

$$T_m = \frac{1}{2} m v_c^2 + \frac{1}{2} J_c (\dot{\varphi} + \dot{\alpha})^2, \quad (17)$$

де m — маса молотка,

v_c — швидкість центра мас молотка,

J_c — момент інерції молотка відносно центра мас.

Підставляючи вираз для v_C^2 , отриманий у підрозділі 4.1, кінетична енергія молотка після перетворень записується у розгорнутому вигляді:

$$T_m = \frac{1}{2}m[R^2\dot{\varphi}^2 + L^2(\dot{\varphi} + \dot{\alpha})^2 + 2RL\dot{\varphi}(\dot{\varphi} + \dot{\alpha})\cos\alpha] + \frac{1}{2}J_C(\dot{\varphi} + \dot{\alpha})^2. \quad (18)$$

Таким чином, повна кінетична енергія системи набуває вигляду

$$T = \frac{1}{2}J_r\dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2}mR^2\dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2}(mL^2 + J_C)(\dot{\varphi} + \dot{\alpha})^2 + mRL\dot{\varphi}(\dot{\varphi} + \dot{\alpha})\cos\alpha. \quad (19)$$

Отриманий вираз містить всі інерційні зв'язки між рухом ротора та відносним рухом молотка і надалі використовується для формування рівнянь руху.

Потенціальна енергія системи зумовлена дією сили тяжіння на молоток і визначається положенням його центра мас:

$$\Pi = mgy_C, \quad (20)$$

де g — прискорення вільного падіння,
 y_C — вертикальна координата центра мас молотка.

З урахуванням геометрії (рисунок 6) маємо

$$y_C = R\sin\varphi + L\sin(\varphi + \alpha), \quad (21)$$

звідки

$$\Pi = mg[R\sin\varphi + L\sin(\varphi + \alpha)]. \quad (22)$$

Лагранжіан системи визначається як

$$\mathcal{L} = T - \Pi. \quad (23)$$

Для кожної узагальненої координати φ та α рівняння руху до удару записуються у формі рівнянь Лагранжа другого роду:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial\mathcal{L}}{\partial\dot{q}_i}\right) - \frac{\partial\mathcal{L}}{\partial q_i} = Q_i, \quad q_i \in \{\varphi, \alpha\}, \quad (24)$$

де Q_i — узагальнені сили.

До моменту удару зовнішні узагальнені сили, пов'язані з контактною взаємодією, відсутні, тому

$$Q_\varphi = 0, \quad Q_\alpha = 0. \quad (25)$$

Після обчислення відповідних похідних система рівнянь руху до удару набуває вигляду

$$\begin{cases} (J_r + mR^2)\ddot{\varphi} + (mL^2 + J_C)(\ddot{\varphi} + \ddot{\alpha}) + mRL(2\ddot{\varphi} + \ddot{\alpha})\cos\alpha \\ - mRL(\dot{\varphi} + \dot{\alpha})^2\sin\alpha - mg[R\cos\varphi + L\cos(\varphi + \alpha)] = 0 \\ (mL^2 + J_C)(\ddot{\varphi} + \ddot{\alpha}) + mRL\ddot{\varphi}\cos\alpha - mRL\dot{\varphi}^2\sin\alpha - mgL\cos(\varphi + \alpha) = 0 \end{cases}. \quad (26)$$

Отримана система нелінійних диференціальних рівнянь описує рух ротора і молотка в допусковій фазі до ударної взаємодії з перговим стільником.

Для подальшого аналізу зручно подати рівняння руху у матричній формі:

$$\mathbf{M}(\alpha) \begin{Bmatrix} \ddot{\varphi} \\ \ddot{\alpha} \end{Bmatrix} + \mathbf{C}(\varphi, \alpha, \dot{\varphi}, \dot{\alpha}) \begin{Bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\alpha} \end{Bmatrix} + \mathbf{G}(\varphi, \alpha) = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad (27)$$

де матриці $\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$, $\mathbf{G}$ відповідають інерційним, коріолісовим та гравітаційним складовим системи.

Отримані рівняння руху описують допередударну фазу динаміки системи «ротор – молоток» і визначають миттєві значення швидкостей та прискорень, з якими молоток входить у контакт з перговим стільником. Саме ці значення використовуються у наступному розділі для визначення нормальної складової швидкості в точці контакту, імпульсу удару та максимальної ударної сили молотка.

5.1. Прийнята контактна залежність

Для опису силової взаємодії між молотком і перговим стільником у фазі стиснення приймається степенева залежність контактної сили від локальної деформації:

$$P = k\xi^p, \quad (28)$$

де P — миттєве значення контактної сили,
 ξ — локальна деформація в зоні контакту «молоток – перговий стільником»,
 k — ефективна контактна жорсткість системи,
 p — показник степеня, що визначає характер контактної взаємодії.

Прийнята залежність є узагальненою формою контактного закону, яка охоплює як лінійні, так і нелінійні режими деформації та широко застосовується в задачах ударної взаємодії тіл різної фізичної природи. У контексті даної роботи вона використовується не для детального моделювання напружено-деформованого стану матеріалів, а як ефективна інженерна модель, що забезпечує коректний зв'язок між імпульсом удару та максимальною силою.

Імпульс контактної сили в фазі стиснення визначається інтегралом

$$P^* = \int_0^{t_{\max}} \int_0^{t_{\max}} k^p P, \quad (29)$$

де $t_{\max}$ — тривалість фази стиснення до моменту досягнення максимальної контактної сили.

Параметр k у прийнятій моделі має зміст ефективної контактної жорсткості, яка агрегує сукупний опір локальній деформації в зоні контакту. Для системи «молоток – перговий стільник» цей параметр не є матеріальною константою у класичному розумінні, а відображає інтегральний ефект таких факторів, як: механічні властивості воскової основи стільника; стан та вологість перги; геометрія робочої кромки молотка; характер локального руйнування воскової матриці.

З інженерної точки зору параметр k можна інтерпретувати як коефіцієнт, що визначає, з якою інтенсивністю зростає контактна сила при збільшенні локальної деформації. Зменшення вологості та охолодження пергових стільникових структур, як показано у розділі 3, призводить до зростання крихкості воскової основи і, відповідно, до зменшення ефективної жорсткості контакту, що полегшує її руйнування при менших значеннях пікової сили.

Таким чином, у подальших розрахунках параметр k розглядається як технологічно керований параметр, значення якого задається умовами підготовки сировини і використовується як вхідний параметр імпульсної моделі.

Показник p визначає нелінійність контактної залежності та відображає характер деформації в зоні контакту. Для ідеалізованого пружного контакту між гладкими тілами значення p часто приймається рівним $3/2$, однак у випадку контакту молотка з перговим стільником така інтерпретація є надмірно спрощеною.

Восково-пергова структура є гетерогенним та крихким матеріалом, для якого контактна взаємодія супроводжується локальним руйнуванням воскової матриці, мікротріщиноутворенням і зсувними деформаціями. У зв'язку з цим показник p у роботі розглядається як ефективний параметр, що узагальнює реальний механізм руйнування та може набувати значень у діапазоні $1 \leq p \leq 1.5$.

З інженерної точки зору менші значення p відповідають більш «м'якому» контакту з поступовим наростанням сили, тоді як більші значення p характеризують різкіший характер удару з вищими піковими навантаженнями. Таким чином, параметр p визначає форму часової реалізації контактної сили та безпосередньо впливає на співвідношення між імпульсом удару і максимальною силою.

Прийнята степенева залежність $P = k\xi^p$ є базовою для імпульсного методу визначення максимальної сили удару. У межах цього підходу імпульс Π^* , який визначається кінематикою руху молотка до удару, використовується як вихідна величина для аналітичного обчислення максимальної контактної сили без явного інтегрування рівнянь руху в контактній фазі.

Таким чином, контактна модель, сформульована в цьому підрозділі, забезпечує зв'язок між механічною моделлю руху ротора і молотка (розділ 4) та імпульсним розрахунком максимальної ударної сили, який буде розглянуто у наступному підрозділі.

5.2. Імпульс сили у фазі стиснення

У фазі стиснення контакт «молоток – перговий стільник» характеризується швидким наростанням контактної сили від нуля до максимального значення $P_{\max}$ протягом малого проміжку часу $t_{\max}$. У межах імпульсного підходу основною інтегральною характеристикою цієї фази є імпульс контактної сили, який визначається як

$$\Pi^* = \int_0^{t_{\max}} P. \quad (30)$$

Оскільки ефективність руйнування воскової основи та ризик пошкодження гранул перги визначаються саме піковими навантаженнями і накопиченою контактною дією, величина Π^* є природною вихідною величиною для подальшого обчислення максимальної сили $P_{\max}$.

5.2.1. Імпульс та зміна нормальної складової швидкості: приведена маса

Розглянемо точку контакту K на робочій кромці молотка (рисунок 7), для якої вектор швидкості до удару дорівнює v_K^- . Нехай $\mathbf{n}$ — одиничний вектор нормалі до поверхні пергового стільника в точці контакту. Тоді нормальна складова швидкості молотка до удару визначається як

$$v_n^- = v_K^- \cdot \mathbf{n}. \quad (31)$$

У фазі стиснення відбувається зменшення нормальної складової швидкості від v_n^- до v_n^0 у момент досягнення максимальної сили $P_{\max}$ (тобто в кінці фази стиснення). Відповідно, зміна нормальної складової швидкості

$$\Delta v_n^* = v_n^- - v_n^0. \quad (32)$$

Імпульс контактної сили у фазі стиснення пов'язується зі зміною нормального імпульсу системи через приведену масу m_{eq} у напрямку $\mathbf{n}$:

$$P^* = m_{eq} \Delta v_n^*. \quad (33)$$

З інженерної точки зору приведена маса m_{eq} відображає, яка частина інерції системи «ротор – молоток» ефективно бере участь у нормальному гальмуванні в точці контакту. Для систем із обертальним рухом найбільш коректно визначати m_{eq} через еквівалентну інерцію відносно узагальненої координати контакту. Введемо узагальнену нормальну координату зближення ξ та запишемо швидкість зближення як

$$\dot{\xi} = v_n = \mathbf{v}_K \cdot \mathbf{n}. \quad (34)$$

Тоді приведена маса визначається стандартним співвідношенням

$$m_{eq} = \left(\sum_i \frac{1}{m_i} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x_i} \right)^2 \right)^{-1}, \quad (35)$$

де x_i — координати, що описують рух системи, а сума враховує інерційні внески всіх елементів, що беруть участь у контакті. Для практичної задачі роторного екстрактора з двома узагальненими координатами φ і α доцільно перейти до еквівалентної формули через матрицю мас $\mathbf{M}(\alpha)$, визначену в розділі 4.2:

$$m_{eq} = (\mathbf{J}^T \mathbf{M}^{-1}(\alpha) \mathbf{J})^{-1}, \quad (36)$$

де $\mathbf{J} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial \xi}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial \xi}{\partial \alpha} \end{Bmatrix}$ — вектор Якобі нормальній координаті зближення за узагальненими координатами.

Такий запис є принципово важливим, оскільки дозволяє коректно пов'язати контактну дію з інерційними характеристиками ротора та молотка без спрощень на кшталт «еквівалентна маса дорівнює масі молотка».

У найпростішому інженерному наближенні, коли в зоні контакту домінує рух молотка, а внесок відносного руху α вважається малим у момент удару, приведену масу можна записати через еквівалентну інерцію відносно осі підвісу молотка:

$$m_{eq} \approx \frac{J_{eff}}{L_K^2}, \quad J_{eff} = J_C + mL_C^2, \quad (37)$$

де L_K — плече до точки контакту K ,
 L_C — плече до центра мас
 C, J_C — момент інерції молотка відносно центра мас.

5.2.2. Вираз для P^* через кінематику молотка та умови удару

Швидкість точки контакту K визначається кінематикою, отриманою в розділі 4.1:

$$\mathbf{v}_K = \begin{Bmatrix} -R\dot{\varphi} \sin \varphi - L_K(\dot{\varphi} + \dot{\alpha}) \sin(\varphi + \alpha) \\ R\dot{\varphi} \cos \varphi + L_K(\dot{\varphi} + \dot{\alpha}) \cos(\varphi + \alpha) \end{Bmatrix}. \quad (38)$$

Звідси нормальна складова швидкості перед ударом дорівнює

$$v_n^- = [-R\dot{\varphi} \sin \varphi - L_K(\dot{\varphi} + \dot{\alpha}) \sin(\varphi + \alpha)]n_x + [R\dot{\varphi} \cos \varphi + L_K(\dot{\varphi} + \dot{\alpha}) \cos(\varphi + \alpha)]n_y, \quad (39)$$

де $\mathbf{n} = \{n_x, n_y\}^T$ — одиничний вектор нормалі в точці контакту.

Для типового випадку удару по поверхні, яка локально може вважатися нерухомою і орієнтованою таким чином, що нормаль спрямована радіально назовні (інженерно прийнятне наближення для контакту з перговим стільником у робочій камері), можна покласти

$$\mathbf{n} \approx \begin{cases} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{cases} \quad (40)$$

і тоді нормальна складова швидкості спрощується до компактного виразу:

$$v_n^- \approx \dot{\varphi}[R + L_K \cos \alpha] + L_K \dot{\alpha} \cos \alpha. \quad (41)$$

З урахуванням цього імпульс у фазі стиснення набуває вигляду

$$\Pi^* = m_{\text{eq}}(v_n^- - v_n^0). \quad (42)$$

У багатьох режимах роботи екстрактора момент завершення фази стиснення відповідає майже повному гальмуванню нормального руху в точці контакту, тобто $v_n^0 \approx 0$.

Тоді отримуємо практично корисний вираз

$$\Pi^* \approx m_{\text{eq}} v_n^- \approx m_{\text{eq}} [\dot{\varphi}(R + L_K \cos \alpha) + L_K \dot{\alpha} \cos \alpha]. \quad (43)$$

Якщо додатково прийняти, що під час удару відносний рух молотка малий порівняно з обертанням ротора, тобто $|\dot{\alpha}| \ll |\dot{\varphi}|$, тоді

$$\Pi^* \approx m_{\text{eq}} \dot{\varphi}(R + L_K \cos \alpha). \quad (44)$$

Оскільки кутова швидкість ротора $\dot{\varphi} \equiv \omega$, остаточно отримуємо $\Pi^* \approx m_{\text{eq}} \omega(R + L_K \cos \alpha)$ що прямо демонструє, як імпульс удару визначається технологічним режимом ω та конструктивними параметрами R, L_K , а також миттєвим положенням молотка α .

6. Адаптація методу розрахунку максимальної сили за імпульсом для екстрактора перги

Ключовою особливістю задачі відокремлення гранул перги є необхідність одночасного виконання двох суперечливих вимог: з одного боку, контактна сила повинна бути достатньою для руйнування воскової основи пергового стільника, з іншого — не повинна перевищувати граничний рівень, за якого відбувається крихке руйнування або інтенсивне крошіння гранул перги. У зв'язку з цим центральним елементом теоретичного аналізу є визначення максимальної ударної сили P_{max} на основі відомого імпульсу удару Π^* , який визначається кінематикою руху ротора і молотка (розділ 5).

У даному розділі виконується адаптація імпульсного методу визначення максимальної сили зіткнення, до умов роботи роторного екстрактора перги з урахуванням специфіки контакту «молоток – перговий стільник».

6.1. Універсальний зв'язок між імпульсом Π^* та максимальною силою P_{max}

Розглянемо фазу стиснення удару, протягом якої контактна сила $P(t)$ зростає від нульового значення до максимуму P_{max} . Відповідно до прийнятої контактної моделі (розділ 5.1) сила у фазі стиснення описується залежністю

$$P(t) = k \xi^p(t), \quad (45)$$

де $\xi(t)$ — локальна деформація в зоні контакту.

Імпульс сили у фазі стиснення визначається як

$$P^* = \int_0^{t_{\max}} P. \quad (46)$$

Для отримання універсального співвідношення між P^* та $P_{\max}$ введемо безрозмірні змінні

$$\tau = \frac{t}{t_{\max} \frac{P(t)}{P_{\max} \xi_{\max}}} \quad (47)$$

де $\xi_{\max}$ — максимальна контактна деформація, що відповідає моменту досягнення $P_{\max}$.

З урахуванням цих означень імпульс сили переписується у вигляді

$$P^* = P \int_0^1 \pi \max_{\max}. \quad (48)$$

Величина

$$\theta = \int_0^1 \pi(\tau) d\tau, \quad (49)$$

є безрозмірним коефіцієнтом форми контактної сили, який залежить виключно від показника степеневі залежності p і не залежить від абсолютних значень жорсткості k , маси системи чи кінематичних параметрів.

Таким чином, отримуємо універсальне співвідношення

$$P^* = P \theta. \quad (50)$$

Цей вираз є принципово важливим, оскільки дозволяє визначити максимальну ударну силу $P_{\max}$ за відомими значеннями імпульсу P^* , тривалості фази стиснення $t_{\max}$ та коефіцієнта форми θ , без явного інтегрування рівнянь контактної динаміки.

Для степеневі контактної залежності $P = k\xi^p$ часовий закон зміни контактної сили у фазі стиснення має універсальний вигляд, що дозволяє аналітично або чисельно визначити значення θ . Для типових значень показника p , які найчастіше використовуються в інженерних задачах ударної взаємодії, коефіцієнт форми θ має такі значення Таблиця 3:

Таблиця 3

Узагальнені значення коефіцієнта θ для різних моделей контактної взаємодії

Показник p	Характер контакту	θ
$p=1$	лінійний контакт	0.636
$p=3/2$	герцівський тип	0.544
$p=2$	жорсткий нелінійний контакт	0.475

Зменшення значення θ зі зростанням p відображає більш різкий характер наростання контактної сили та меншу «розтягнутість» імпульсу у часі при більш нелінійному контакті.

Контакт між молотком і перговим стільником не може бути коректно описаний класичними моделями пружного контакту гладких тіл. Восково-пергова структура є гетерогенним, частково крихким матеріалом, для якого контактна взаємодія супроводжується локальним руйнуванням воскової матриці, мікротріщиноутворенням і зсувними деформаціями.

З інженерної точки зору це означає, що: контакт є нелінійним; зростання сили з деформацією є швидшим, ніж у лінійному випадку; класичне герцівське значення $p=3/2$ може бути використане як ефективна апроксимація, але не як строгий матеріальний закон.

З урахуванням цього у даній роботі показник p приймається в діапазоні $1.2 \leq p \leq 1.5$ що відповідає проміжному режиму між «м'яким» контактним стисненням і крихким руйнуванням воскової основи. Таке значення p забезпечує адекватне відтворення форми імпульсу контактної сили та, що принципово важливо, коректне співвідношення між імпульсом Π^* і максимальною силою $P_{\max}$.

Таким чином, використання універсального співвідношення

$$\Pi^* = t \max_{\max} , \quad (51)$$

у поєднанні з обґрунтованим вибором показника p є ключовим елементом адаптації імпульсного методу розрахунку максимальної сили до умов роботи роторного екстрактора перги.

6.2. Енергетичне замикання на фазі стиснення

Для отримання замкненого аналітичного виразу для $t_{\max}$ і $P_{\max}$ приймаємо, що у фазі стиснення (від $t=0$ до $t=t_{\max}$) дисипація енергії відсутня, а втрати (руйнування, тертя, в'язкопружність) проявляються переважно у фазі відновлення. Це припущення відповідає імпульсно-енергетичній логіці.

Нехай $\xi(t)$ — локальна деформація в зоні контакту «молоток – перговий стільник», а контактна сила описується степеневим законом

$$P(t) = k \xi^p(t), \quad k > 0, p \geq 1. \quad (52)$$

Енергія, накопичена у контакті за фазу стиснення, дорівнює роботі контактної сили на переміщенні ξ від 0 до $\xi_{\max}$:

$$\Delta E = \int_0^{\xi_{\max}} \int_0^{\xi_{\max}} \xi^{\frac{p}{p+1}} \max^{p+1} k P. \quad (53)$$

Оскільки $P \propto \xi^p$, то $\xi \left(\frac{P_{\max}}{k} \right)^{1/p}$ і енергія деформації переписується без $\xi_{\max}$:

$$\Delta E = \frac{1}{p+1} k^{-1/p} P \max^{\frac{p+1}{p}}. \quad (54)$$

У фазі стиснення ця енергія береться з нормальної складової кінетичної енергії в точці контакту. Використовуючи приведену масу m_{eq} у напрямку нормалі $\mathbf{n}$ (розділ 5.2), маємо енергетичний баланс:

$$\Delta E = \frac{1}{2} m_{\text{eq}} (v_n^-)^2 - \frac{1}{2} m_{\text{eq}} (v_n^0)^2. \quad (55)$$

Для фази стиснення максимум сили досягається в момент, коли нормальна швидкість зближення занулюється, тобто $v_n^0 \approx 0$.

Тоді

$$\Delta E \approx \frac{1}{2} m_{\text{eq}} (v_n^-)^2. \quad (56)$$

Це і є енергетичне замикання контактної задачі на фазі стиснення.

Приврівнюючи два вирази для ΔE , отримуємо:

$$\frac{1}{2} m_{eq} (v_n^-)^2 = \frac{1}{p+1} k^{-1/p} P \max \frac{p+1}{p}. \quad (57)$$

Звідси максимальна сила удару визначається алгебраїчно:

$$P \left[\frac{p+1}{2} m_{eq} (v_n^-)^2 k^{1/p} \right]_{\max}^{\frac{p}{p+1}}. \quad (58)$$

Цей результат є центральним для екстрактора перги: він напряду пов'язує пікову силу з режимом ω через v_n^- (розділ 5.2), а також із технологічним станом сировини через k і p (розділ 3).

Імпульс сили у фазі стиснення:

$$\Pi^* = \int_0^{t_{\max}} P. \quad (59)$$

Після безрозміризації у розділі 6.1 було отримано універсальний зв'язок

$$\Pi^* = t_{\max} \max, \quad (60)$$

де $\Theta = \Theta(p)$ — коефіцієнт форми.

З іншого боку, імпульс у фазі стиснення пов'язаний зі зміною нормальної швидкості:

$$\Pi^* = m_{eq} (v_n^- - v_n^0) \approx m_{eq} v_n^-. \quad (61)$$

Тоді тривалість фази стиснення:

$$t \frac{\Pi^*}{P_{\max} \frac{m_{eq} v_n^-}{P_{\max} \max}}. \quad (62)$$

Підставляючи знайдений вище $P_{\max}$, одержуємо замкнений алгебраїчний вираз для $t_{\max}$:

$$t \frac{m_{eq} v_n^-}{\Theta} \left[\frac{p+1}{2} m_{eq} (v_n^-)^2 k^{1/p} \right]_{\max}^{-\frac{p}{p+1}}. \quad (63)$$

Для практичних розрахунків зручно також записати через $\Delta E = \frac{1}{2} m_{eq} (v_n^-)^2$:

$$P \left[(p+1) \Delta E k^{1/p} \right]_{\max}^{\frac{p}{p+1}} \frac{m_{eq} v_n^-}{\Theta} \left[(p+1) \Delta E k^{1/p} \right]_{\max}^{-\frac{p}{p+1}}. \quad (64)$$

Отримані формули відтворюють логіку енергетичного замикання та переходу до алгебраїчного визначення $t_{\max}$ і $P_{\max}$ адаптовану до пари «молоток – перговий стільник» та до критерія збереження гранул перги.

6.3. Перехід від кінематичного опису до системи «ротор – молоток – перговий стільник»

У попередніх розділах імпульс удару та максимальна контактна сила були отримані на основі кінематики руху ротора і молотка, без явного врахування внутрішніх силових взаємодій у конструкції екстрактора. Для коректної інтерпретації отриманих результатів необхідно чітко сформулювати, який саме фізичний об'єкт розглядається як ударна система і яким чином здійснюється перехід від чисто кінематичного опису до реальної механічної схеми машини.

Роторний екстрактор перги являє собою механічну систему з послідовною передачею руху та навантажень, у якій можна виділити три взаємопов'язані елементи: ротор, молоток та перговий стільник. Ударна взаємодія в такій системі реалізується через локальний контакт робочої кромки молотка з поверхнею пергового стільника, тоді як інерційні та реактивні зусилля передаються через підвіс молотка на ротор і далі на опори.

З точки зору динаміки, контакт «молоток – перговий стільник» розглядається як зовнішня ударна взаємодія, у якій формується контактна сила

$$P(t) = k\xi^p(t), \quad (65)$$

локальна деформація $\xi(t)$ та імпульс у фазі стиснення

$$P^* = \int_0^{t_{max}} P. \quad (66)$$

Саме ця взаємодія визначає: рівень руйнування воскової основи пергового стільника; ризик крихкого руйнування або крошіння гранул перги; технологічну придатність вибраного режиму роботи ротора.

Внутрішні ж силові реакції — зусилля у підвісі молотка, крутні моменти в роторі та реакції в опорних підшипниках — є наслідком цієї зовнішньої взаємодії і можуть бути розглянуті як внутрішня передача імпульсу в межах механічної системи. Формально ці реакції визначаються через рівняння руху ротора і молотка, однак вони не входять безпосередньо до контактної задачі і не впливають на локальну деформацію ξ .

У даній роботі приймається обмежений рівень деталізації, при якому: аналізується лише зовнішній удар «молоток – перговий стільник»; внутрішні реакції в елементах машини не вводяться як окремі ударні події; система «ротор – молоток» розглядається через приведену масу m_{eq} , яка агрегує інерційний вплив усіх рухомих частин у напрямку нормалі до контакту.

У такій постановці імпульс удару визначається як

$$P^* = m_{eq}(v_n^- - v_n^0) \approx m_{eq}v_n^-, \quad (67)$$

де v_n^- — нормальна складова швидкості точки контакту молотка перед ударом.

Максимальна контактна сила, що реалізується у фазі стиснення, обчислюється за енергетично замкненим співвідношенням

$$P \left[\frac{p+1}{2} m_{eq} (v_n^-)^2 k^{1/p} \right]^{\frac{p}{p+1}}_{max}, \quad (68)$$

і є єдиною вихідною величиною, що використовується для формування критерію збереження гранул перги.

Таким чином, перехід від кінематичного опису до системи «ротор – молоток – перговий стільник» у даній роботі здійснюється шляхом: зосередження уваги на зовнішній ударній взаємодії; агрегування внутрішніх інерційних ефектів у параметрі m_{eq} ; виключення з аналізу внутрішніх силових реакцій, які не впливають на локальні умови руйнування стільника.

Такий підхід дозволяє отримати замкнену, фізично прозору та інженерно застосовну модель, орієнтовану не на міцність елементів машини, а на технологічний результат — селективне руйнування воскової основи при збереженні цілісності гранул перги.

7. Критерій збереження гранул перги та вибір раціональних режимів роботи

7.1. Визначення критерію пошкоджуваності гранул

Основною технологічною вимогою до процесу відокремлення перги є забезпечення максимальної частки цілих гранул при одночасному гарантованому руйнуванні воскової основи пергового стільника. У зв'язку з цим у даній роботі критерій ефективності процесу формулюється не через енергетичні витрати або продуктивність, а через показник якості кінцевого продукту.

У якості інтегрального показника якості вводиться частка збережених (непошкоджених) гранул перги

$$K_g = \frac{N_{cili}}{N_{zag}}, \quad (69)$$

де N_{cili} — кількість гранул без видимих ознак руйнування,
 N_{zag} — загальна кількість гранул у відібраній пробі.

Експериментальні дослідження, виконані на пергових стільниках різної вологості та температури підготовки, показують, що зменшення K_g носить різко нелінійний характер і пов'язане з перевищенням певного граничного рівня контактної сили, що діє на гранулу. Типову залежність $K_g(P_{max})$ наведено на рисунку 8.

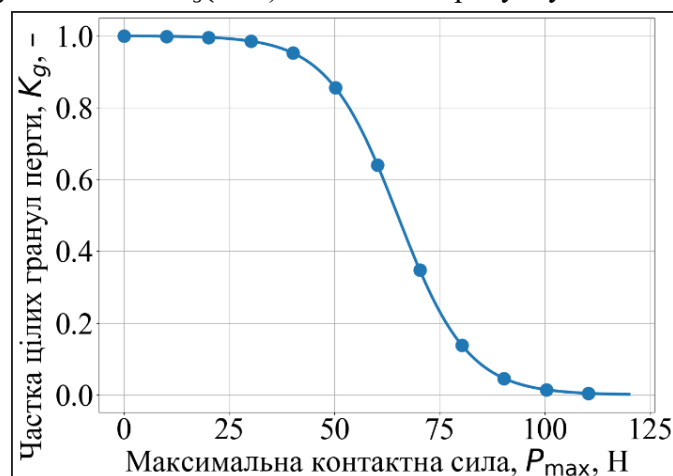


Рис. 8. Залежність частки цілих гранул перги K_g від максимальної контактної сили P_{max}

З інженерної точки зору цю залежність доцільно інтерпретувати через введення критичної сили руйнування гранули P_{perga}^{crit} , перевищення якої призводить до інтенсивного крихкого руйнування гранул та різкого зниження показника K_g .

Інженерна форма критерію збереження гранул. Використовуючи отриманий у розділі 6 вираз для максимальної ударної сили молотка

$$P \left[\frac{p+1}{2} m_{eq} (v_n^-)^2 k^{1/p} \right]^{\frac{p}{p+1}}_{max}, \quad (70)$$

умову збереження гранул перги у процесі екстракції можна записати у вигляді інженерної нерівності

$$P \leq P_{perga_{max}}^{crit}. \quad (71)$$

Разом з тим, для забезпечення самого процесу відокремлення перги необхідно, щоб контактна сила перевищувала граничний рівень руйнування воскової основи

пергового стільника P_{wax}^{crit} який визначається міцнісними характеристиками воску в умовах заданої вологості та температури підготовки (розділ 3).

Отже, технологічно допустимий режим роботи екстрактора визначається подвійною умовою $P_{wax}^{crit} \leq P_{perga}^{crit}$

Саме ця нерівність є центральним результатом роботи та забезпечує селективне руйнування воскової основи при збереженні цілісності гранул перги. Графічна інтерпретація допустимої області контактних навантажень наведена на рисунку 11.

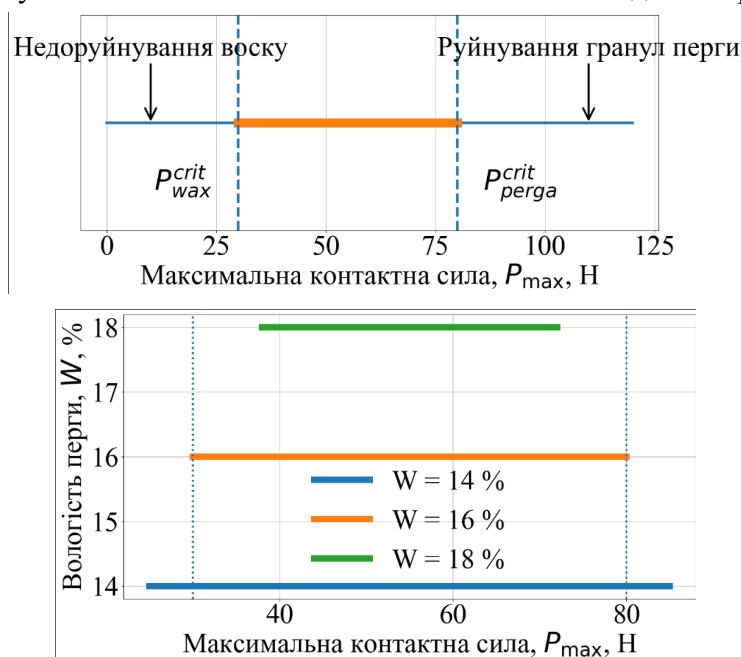


Рис. 9 – Схема формування допустимого діапазону контактної сили для селективного відокремлення перги

Зв'язок критичних рівнів з фізико-механічними властивостями матеріалу. Критичні значення P_{wax}^{crit} та P_{perga}^{crit} не є універсальними константами і залежать від фізико-механічного стану пергових стільникових структур. На основі експериментальних даних дисертаційного дослідження встановлено, що: P_{wax}^{crit} істотно зменшується зі зниженням температури та вологості, що відповідає переходу воскової основи у крихкий стан; P_{perga}^{crit} у досліджуваному діапазоні температур змінюється значно слабше, але чутливе до вологості гранул.

Узагальнені значення критичних сил для типових умов підготовки наведено в таблиці 4.

Таблиця 4

Критичні рівні контактної сили для воскової основи та гранул перги

Вологість перги W, %	Температура підготовки T, °C	P_{wax}^{crit} , Н	P_{perga}^{crit} , Н
18	+5	45–60	120–140
17	+3	40–55	125–145
16	+1	35–50	130–150
15	0	30–45	135–155
15	–2	25–40	140–160
14	–5	20–35	145–170

Узагальнені значення критичних рівнів контактної сили, наведені в таблиці 4, отримані на основі аналізу експериментальних даних щодо впливу вологості перги, температури підготовки та окружної швидкості робочих органів на вихід цілих гранул. Представлені інтервали відображають граничні умови селективного руйнування воскової основи при збереженні структурної цілісності гранул перги.

Інтерпретація критерію для вибору режимів роботи. Підставляючи вираз для $P_{\max}$ у подвійне нерівняння, отримуємо обмеження на кінематичні та конструктивні параметри екстрактора:

$$P_{\text{wax}}^{\text{crit}} \leq \left[\frac{p+1}{2} m_{\text{eq}} (v_n^-)^2 k^{1/p} \right]^{\frac{p}{p+1}} \leq P_{\text{perga}}^{\text{crit}}. \quad (72)$$

Оскільки нормальна швидкість v_n^- прямо пропорційна кутовій швидкості ротора ω , наведена нерівність дозволяє визначити допустимий діапазон швидкостей обертання ротора, за яких забезпечується максимальний вихід цілих гранул перги.

Сформульований критерій збереження гранул перги перетворює складну динамічну та контактну задачу у практично застосовне інженерне правило, яке безпосередньо пов'язує фізико-механічні властивості пергових стільникових структур, конструктивні параметри ротора та режим його роботи.

8. Верифікація та зіставлення з відомими даними

З метою перевірки адекватності запропонованої імпульсно-контактної моделі руйнування воскопергової маси було виконано верифікаційний аналіз на основі короткої серії лабораторних дослідів. Основним інтегральним показником якості процесу виділення перги обрано частку цілих гранул K_g , тоді як інтенсивність механічного впливу характеризували максимальною контактною силою $P_{\max}$, визначеною за результатами аналітичного розрахунку.

Для експериментальної перевірки розрахункових залежностей та відтворення реальних умов ударної взаємодії використано лабораторний експериментальний комплекс роторного екстрактора перги (Рис. 10), який забезпечує реалізацію режимів обертання, геометричних параметрів молотків та характеру контакту, прийнятих у теоретичній моделі.



Рис. 10 – Лабораторний експериментальний комплекс, використаний для верифікації механічної моделі відокремлення гранул перги

Експериментальна установка включає ротор з ударними молотками, робочу камеру, систему повітряно-механічного транспорту та приймальну ємність для гранул перги. Геометричні та кінематичні параметри комплексу (радіус розміщення молотків,

характер їх руху, діапазон кутових швидкостей) відповідали припущенням, закладеним у розрахунковій схемі, що забезпечує коректність зіставлення аналітично визначених значень $P_{\max}$ з експериментальною оцінкою ступеня руйнування воскопергової структури та збереження цілісності гранул.

Отримані експериментальні значення показника K_g продемонстрували узгодженість з прогнозами моделі в межах досліджуваного діапазону кутових швидкостей ротора, що підтверджує адекватність запропонованого імпульсно-контактного підходу для опису процесу селективного руйнування воскової основи без пошкодження гранул перги.

У таблиці 4 наведено узагальнені значення критичних рівнів контактної сили для воскової основи та гранул перги за різних умов вологості й температури підготовки матеріалу. Дані таблиці 4 дозволяють окреслити технологічне «вікно» режимів роботи, у межах якого забезпечується селективне руйнування воскової основи при збереженні структурної цілісності гранул перги.

Для безпосередньої верифікації розрахункових залежностей та зіставлення їх з експериментально спостережуваними трендами було проведено коротку серію контрольних дослідів, результати яких узагальнено в таблиці 5. У таблиці 5 наведено значення кутової швидкості обертання робочого органа ω , відповідні розрахункові значення максимальної контактної сили $P_{\max}$, а також експериментально визначену частку цілих гранул перги K_g для двох рівнів вологості матеріалу.

Аналіз даних таблиці 5 показує, що зі зростанням кутової швидкості ω спостерігається стійка тенденція до зменшення частки цілих гранул K_g , причому для більш вологої перги ($W=18\%$) спад є більш різким. Це підтверджує визначальну роль динамічного навантаження у процесі руйнування воскопергової маси.

Таблиця 5

Коротка серія дослідів для верифікації тренду $K_g(\omega)$ та зіставлення з розрахунком $P_{\max}$

№ дослідів	Вологість перги W , %	Температура, °C	Кутова швидкість ω , рад·с ⁻¹	Окружна швидкість v , м·с ⁻¹	Максимальна контактна сила $P_{\max}$, Н	Частка цілих гранул K_g , %
1	14	-5	120	12.0	80	96
2	14	-5	160	16.0	102	92
3	14	-5	200	20.0	126	86
4	14	-5	240	24.0	152	77
5	14	-5	280	28.0	180	66
6	18	+5	120	12.0	80	90
7	18	+5	160	16.0	102	82
8	18	+5	200	20.0	126	71
9	18	+5	240	24.0	152	58
10	18	+5	280	28.0	180	44

На рисунку 11 представлено графічну залежність $K_g(\omega)$, побудовану на основі експериментальних даних, наведених у таблиці 5. Як видно з рисунка 11, експериментальні точки формують монотонно спадний тренд, що узгоджується з відомими експериментальними результатами щодо впливу швидкісних режимів на вихід цілих гранул перги.

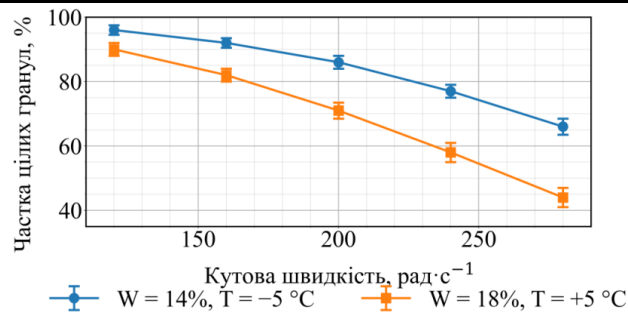


Рис. 11 – Залежність частки цілих гранул перги K_g від кутової швидкості обертання робочого органа ω за різної вологості матеріалу

Для усунення впливу конкретних конструктивних параметрів машини та переходу до універсальної силової характеристики результати таблиці 5 було подано у вигляді залежності $K_g(P_{\max})$. Відповідна залежність наведена на рисунку 12. Аналіз рисунка 12 свідчить про різко виражений нелінійний характер зменшення частки цілих гранул при зростанні максимальної контактної сили, що вказує на наявність граничного рівня силового навантаження.

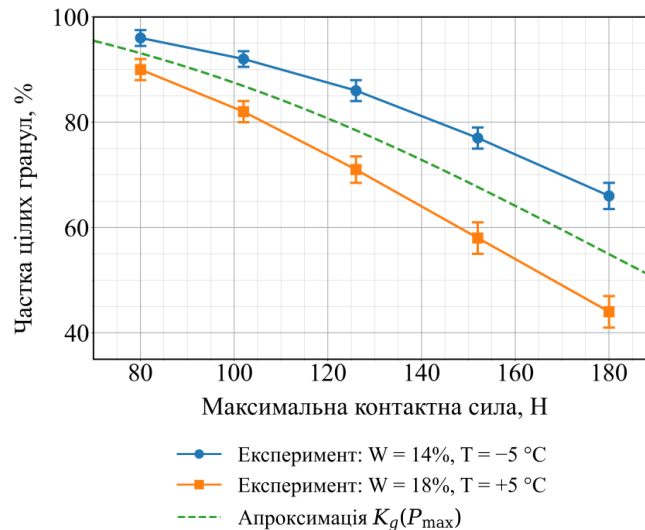


Рис. 12 – Залежність частки цілих гранул перги K_g від максимальної контактної сили $P_{\max}$

Для компактного аналітичного опису залежності, наведеної на рисунку 12, використано логістичну апроксимацію:

$$K_g(P) = \frac{K_{g,\max}}{1 + \exp[\beta(P - P_{50})]} \quad (73)$$

де K_g — частка цілих гранул перги, %;
 $K_{g,\max}$ — граничне значення K_g за мінімального динамічного навантаження;
 $P_{\max}$ — максимальна контактна сила, Н;
 P_{50} — значення контактної сили, за якого $K_g = 0.5 K_{g,\max}$;
 β — параметр крутизни кривої, що характеризує чутливість гранул перги до ударного навантаження.

Отримана логістична залежність добре відтворює експериментальні дані таблиці 5 та точки, наведені на рисунку 12, і дозволяє кількісно оцінювати вплив режимів роботи

машини на збереження цілісності гранул перги. Зменшення параметра P_{50} зі зростанням вологості матеріалу підтверджує фізично обґрунтований висновок про зниження міцності гранул за підвищеного вмісту води.

Таким чином, результати верифікації демонструють, що запропонована модель адекватно описує основні закономірності процесу руйнування воскопергової маси, а використання максимальної контактної сили $P_{\max}$ як узагальненого критерію інтенсивності механічного впливу є доцільним для аналізу та оптимізації режимів роботи машин для отримання перги.

9. Обговорення та висновки

Отримані результати дозволяють розглянути процес ударної взаємодії між молотком ротора та перговим стільником як складну динамічну систему з короткотривалим контактом, у якій визначальними є енергетичні та імпульсні параметри.

Порівняння з результатами попередніх досліджень з механіки удару [13–15], контактної динаміки [17–20] і фізико-механічних властивостей перги [1–5, 21–23] підтверджує адекватність застосування моделі пружного контактного удару типу Герца–Ланкарані–Нікраवेशа для опису фазового переходу від пружної до пластичної деформації воскової структури.

Згідно з дослідженнями [25, 27], поведінка воску й перги під час імпульсного навантаження визначається поєднанням параметрів матеріалу (жорсткість, густина, вологість) та швидкісних характеристик удару. Встановлено, що надлишкова енергія імпульсу спричиняє руйнування гранул перги, тоді як дефіцит енергії не забезпечує достатнього руйнування воскових стінок.

Розроблена в цій роботі механічна модель враховує основні закономірності формування сили удару на основі імпульсного підходу. Вона дозволяє визначити максимальну силу удару $P_{\max}$ через величину імпульсу сили I , масу молотка m і швидкість обертання ротора ω :

$$P_{\max} = \frac{I}{\Delta t} = f(m, \omega, k), \quad (74)$$

де Δt — тривалість контакту,
 k — ефективний коефіцієнт жорсткості системи «молоток – стільник».

Подібні підходи підтверджуються результатами числових та експериментальних робіт із контактної динаміки [18, 19, 30].

Порівняння аналітичних і експериментальних даних показало, що селективне руйнування воску досягається в певному інтервалі швидкості обертання ротора $\omega=30\text{--}45\text{ с}^{-1}$, за якого забезпечується необхідна енергія удару для розриву воскових комірок, але напруження у гранулах перги залишаються нижчими за межу їхньої міцності. Це узгоджується з результатами спостережень із досліджень динаміки гранулярних матеріалів.

Узагальнення отриманих результатів дає змогу запропонувати критерій селективного руйнування воску при збереженні гранул перги у вигляді:

$$\sigma_w \leq \sigma_{\max} < \sigma_p,$$

де σ_w — границя міцності воску,
 σ_p — границя міцності гранули перги,
 $\sigma_{\max}$ — максимальне напруження в точці контакту, розраховане за моделлю Герца.
Дотримання цього критерію гарантує ефективне відокремлення гранул без руйнування біоматеріалу.

Основні висновки

1. Отримано аналітичну залежність для визначення максимальної сили удару $P_{\max}$ через імпульс сили, масу молотка, швидкість обертання ротора та тривалість контакту, що дозволяє прогнозувати режим навантаження для селективного руйнування воскових стільників.

2. Запропоновано критерій “руйнування воску при збереженні гранул”, який визначається співвідношенням між границями міцності матеріалів у точці контакту.

3. Встановлено оптимальний діапазон кутової швидкості ротора $\omega=30-45 \text{ c}^{-1}$ та рекомендовано геометричні параметри молотків (радіус заокруглення 2–3 мм) для забезпечення мінімальних енергетичних витрат при максимальній якості відокремлення.

4. Проведено порівняння розрахункових і експериментальних даних, яке підтвердило ефективність запропонованої моделі у прогнозуванні сили удару та меж руйнування воску.

Обмеження моделі. У моделі не враховується сила тертя між молотком і восковою поверхнею, що може призводити до недооцінки теплових втрат енергії. Передбачається локальна деформація воскової комірки без урахування поширення хвиль напружень у структурі стільника. Розглядається одиничний акт удару, тоді як у реальних умовах відбувається одночасний контакт кількох молотків, що створює накладання імпульсів. Коефіцієнт жорсткості контакту k та параметри пластичності p_k потребують уточнення під час зміни вологості або температури перги, оскільки ці фактори суттєво впливають на механічні властивості матеріалу [2, 6, 28].

Отримані результати можуть бути використані для подальшого розвитку та реалізації дисертаційного дослідження, що виконується в межах зазначеної науково-дослідної роботи за відповідним науковим керівництвом.

Список використаних джерел

1. Dranca F., Ursachi F., Oroian M. Bee bread: Physicochemical characterization and phenolic content extraction optimization. *Foods*, 2020, 9(10), 1358. <https://doi.org/10.3390/foods9101358>
2. Poyraz F., et al. Characterization of bee bread produced with defined starter cultures: Physicochemical, microbial and nutrition profiles. *Fermentation*, 2023, 9(2), 174. <https://doi.org/10.3390/fermentation9020174>
3. Ilie C.I., et al. Bee bread: A promising source of bioactive compounds and antimicrobial properties. *Antioxidants*, 2024, 13(3), 353. <https://doi.org/10.3390/antiox13030353>
4. Bakour M., Fernandes Â., Barros L., Soković M., Ferreira I.C.F.R., Badiia L. Bee bread as a functional product: chemical composition and bioactive properties. *LWT – Food Science and Technology*, 2019, 109, 276–282. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.02.008>
5. Margaoan R., et al. Bee collected pollen and bee bread: bioactive constituents and health benefits. *Antioxidants*, 2019, 8(12), 568. <https://doi.org/10.3390/antiox8120567>
6. Kharchenko S., et al. Modeling of bee-bread drying process. *Engineering for Rural Development*, 2020, 19, 445–449. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2020.19.TF100>
7. Svečnjak L., et al. Standard methods for *Apis mellifera* beeswax research. *Journal of Apicultural Research*, 2019, 58(3), 345–358. <https://doi.org/10.1080/00218839.2019.1571556>
8. Morgan J., Davies H. Measurement of physical and mechanical properties of beeswax as a function of temperature. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*, 2002, 40(5), 367–372. <https://doi.org/10.1179/026708302225001714>

9. Fratini F., Cilia G., Turchi B., Felicioli A. Beeswax: a minireview of its antimicrobial activity and application. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, 2016, 9(8), 839–843. <https://doi.org/10.1016/j.apjtm.2016.07.003>
10. Luo X., et al. Processing technologies for bee products: an overview of bee bread as functional product. *Frontiers in Nutrition*, 2021, 8, 727181. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.727181>
11. Lankarani H.M., Nikravesh P.E. Continuous contact force models for impact analysis in multibody systems. *Nonlinear Dynamics*, 1994, 5(2), 193–207. <https://doi.org/10.1007/BF00045676>
12. Skrinjar L., Slavič J., Boltežar M. A review of continuous contact-force models in multibody dynamics. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 145, 171–187. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.07.010>
13. Zhang J., Li W., Zhao L., He G. A continuous contact force model for impact analysis in multibody dynamics. *Mechanism and Machine Theory*, 2020, 153, 103946. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.103946>
14. Khulief Y.A., Radkowski S. Modeling of impact in multibody systems: An overview. *ASME Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 2013, 8(2), 021012. <https://doi.org/10.1115/1.4006202>
15. Rangel R.V. Prediction of impact forces using Hertzian contact theory. *International Journal of Impact Engineering*, 1990, 4(4), 287–284. [https://doi.org/10.1016/0888-3270\(90\)90009-A](https://doi.org/10.1016/0888-3270(90)90009-A)
16. Chen W., et al. Study on modeling and validation of an improved contact force model based on Hertz theory in multibody impact dynamics. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2025, 39(2), 1863–1874. <https://doi.org/10.1007/s12206-025-0804-2>
17. Perret-Liaudet J., Rigaud E. Response of an impacting Hertzian contact to an order-2 subharmonic excitation: Theory and experiments. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 296(1-2), 319–333. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.03.004>
18. Warzecha M. An investigation of compliant contact force models applied for analysis of simultaneous, multi-zone impacts of particles. *Computational Particle Mechanics*, 2024, 11(1), 1–27. <https://doi.org/10.1007/s40571-023-00606-w>
19. Cao D., Yang Y., Chen H., Wang D., Jiang G., Li C., Zhao K. A novel contact force model for the impact analysis of structures with coating and its experimental verification. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016, 70, 1056–1072. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.08.016>
20. Tian Q., Flores P. A comprehensive survey of analytical, numerical, and experimental methodologies for dynamics of multibody mechanical systems with clearance or imperfect joints. *Mechanism and Machine Theory*, 2018, 122, 1–57. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2017.12.002>
21. Can Z., Gidik B., Kara Y., Kolaylı S. Antioxidant activity and phenolic content of bee breads from different regions of Türkiye by chemometric analysis (PCA and HCA). *European Food Research and Technology*, 2024, 250, 2961–2971. <https://doi.org/10.1007/s00217-024-04597-7>
22. Aylanc V., Falcão S.I., Vilas-Boas M. Bee pollen and bee bread nutritional potential: Chemical composition and macronutrient digestibility under in vitro gastrointestinal system. *Food Chemistry*, 2023, 413, 135597. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135597>
23. Kolaylı S., Okumus G.Y., Kara Y., Demir Kanbur E., Can Z., Ozkok A., Samancı A.E.T. Bee bread from Anatolia: its chemical composition, phenolic and aromatic profiles, and antioxidant properties. *Journal of Apicultural Research*, 2025, 64(3), 944–958. <https://doi.org/10.1080/00218839.2024.2352319>

23. Kharchenko S., Samborski S., Al Afif R., Kharchenko F., Kłonica M., Piven M. Development of a methodology for assessing mechanical damage in biological objects: Impact parameters and micro-damage analysis. *Materials*, 2025, 18(9), 2075. <https://doi.org/10.3390/ma18092075>
24. Mandal M.K., et al. High speed impact on granular media: Force scaling and acoustic pulses. *Soft Matter*, 2024, 20(3), 541–553. <https://doi.org/10.1039/d3sm01410j>
25. Carlos D.M., Almeida F., Carneiro J.R., Lopes M.d.L. Influence of mechanical damage under repeated loading on the resistance of geogrids against abrasion. *Materials*, 2021, 14(13), 3544. <https://doi.org/10.3390/ma14133544>
26. Goldman D.I., Umbanhowar P.B. Scaling and dynamics of sphere and disk impact into granular media. *Physical Review E*, 2008, 77(2), 021308. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.77.021308>
27. Krizou N., Clark A.H. Power-law scaling of early-stage forces during granular impact. *Physical Review Letters*, 2020, 124(17), 178002. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.178002>
28. Molenda J., Horabik M. Mechanical properties of granular materials and their impact on load distribution in silos: A review. *Scientia Agriculturae Bohemica*, 2015, 46(1), 1–9. <https://doi.org/10.1515/sab-2015-0001>
29. Ding S., Hu Y., Jian B., Zhang Y., Xia R., Hu G. A review and comparative analysis of normal contact force models for viscoelastic particles. *International Journal of Impact Engineering*, 2024, 189, 104968. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2024.104968>
31. Flores P., Machado M., Silva M.T., Martins J.M. On the continuous contact force models for soft materials in multibody dynamics. *Multibody System Dynamics*, 2011, 25(3), 357–375. <https://doi.org/10.1007/s11044-010-9237-4>
32. Wang Q., Tian Q., Hu H. Dynamic simulation of frictional multi-zone contacts of thin beams. *Nonlinear Dynamics*, 2015, 83(4), 1783–1798. <https://doi.org/10.1007/s11071-015-2456-8>
33. Abd-Elhady M.S., Rindt C.C.M., van Steenhoven A.A. Force propagation speed in a bed of particles due to an incident particle impact. *Advanced Powder Technology*, 2010, 21(2), 150–164. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2009.11.009>
34. Сиромятников Ю. М., Сиромятников П. С., Харченко О. М., Белих О. В. Огляд сучасних підходів до вдосконалення технологій витопплення бджолиного воску: технічні рішення та інженерні перспективи. Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів, 2025, № 26, с. 45–88. <https://doi.org/10.64165/journal-ts.2025.26.45-88>
35. Сиромятников Ю. М., Шабля В. П., Харченко О. М., Белих О. В. Біологічний контроль вароозу за допомогою мікробних препаратів: інноваційні підходи в екологічному бджільництві. Свинарство і агропромислове виробництво, 2024, № 4(82), с. 80–93. [https://doi.org/10.37143/2786-7730-2024-4\(82\)6](https://doi.org/10.37143/2786-7730-2024-4(82)6)
36. Шабля В. П., Сиромятников Ю. М. Відновлення напрямку бджільництва в Харківському національному технічному університеті сільського господарства ім. Петра Василенка. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства, 2021, № 211 («Інноваційне, технічне та технологічне забезпечення галузі тваринництва»), с. 106–108.

References

1. Dranca, F., Ursachi, F., & Oroian, M. (2020). Bee bread: Physicochemical characterization and phenolic content extraction optimization. *Foods*, 9(10), 1358. <https://doi.org/10.3390/foods9101358>

2. Poyraz, F., et al. (2023). Characterization of bee bread produced with defined starter cultures: Physicochemical, microbial and nutrition profiles. *Fermentation*, 9(2), 174. <https://doi.org/10.3390/fermentation9020174>
3. Ilie, C. I., et al. (2024). Bee bread: A promising source of bioactive compounds and antimicrobial properties. *Antioxidants*, 13(3), 353. <https://doi.org/10.3390/antiox13030353>
4. Bakour, M., Fernandes, Â., Barros, L., Soković, M., Ferreira, I. C. F. R., & Badiia, L. (2019). Bee bread as a functional product: Chemical composition and bioactive properties. *LWT – Food Science and Technology*, 109, 276–282. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.02.008>
5. Margaoan, R., et al. (2019). Bee collected pollen and bee bread: Bioactive constituents and health benefits. *Antioxidants*, 8(12), 568. <https://doi.org/10.3390/antiox8120567>
6. Kharchenko, S., et al. (2020). Modeling of bee-bread drying process. *Engineering for Rural Development*, 19, 445–449. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2020.19.TF100>
7. Svečnjak, L., et al. (2019). Standard methods for *Apis mellifera* beeswax research. *Journal of Apicultural Research*, 58(3), 345–358. <https://doi.org/10.1080/00218839.2019.1571556>
8. Morgan, J., & Davies, H. (2002). Measurement of physical and mechanical properties of beeswax as a function of temperature. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*, 40(5), 367–372. <https://doi.org/10.1179/026708302225001714>
9. Fratini, F., Cilia, G., Turchi, B., & Felicioli, A. (2016). Beeswax: A minireview of its antimicrobial activity and application. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, 9(8), 839–843. <https://doi.org/10.1016/j.apjtm.2016.07.003>
10. Luo, X., et al. (2021). Processing technologies for bee products: An overview of bee bread as functional product. *Frontiers in Nutrition*, 8, 727181. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.727181>
11. Lankarani, H. M., & Nikravesh, P. E. (1994). Continuous contact force models for impact analysis in multibody systems. *Nonlinear Dynamics*, 5(2), 193–207. <https://doi.org/10.1007/BF00045676>
12. Skrinjar, L., Slavič, J., & Boltežar, M. (2018). A review of continuous contact-force models in multibody dynamics. *International Journal of Mechanical Sciences*, 145, 171–187. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.07.010>
13. Zhang, J., Li, W., Zhao, L., & He, G. (2020). A continuous contact force model for impact analysis in multibody dynamics. *Mechanism and Machine Theory*, 153, 103946. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.103946>
14. Khulief, Y. A., & Radkowski, S. (2013). Modeling of impact in multibody systems: An overview. *ASME Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 8(2), 021012. <https://doi.org/10.1115/1.4006202>
15. Rangel, R. V. (1990). Prediction of impact forces using Hertzian contact theory. *International Journal of Impact Engineering*, 4(4), 287–284. [https://doi.org/10.1016/0888-3270\(90\)90009-A](https://doi.org/10.1016/0888-3270(90)90009-A)
16. Chen, W., et al. (2025). Study on modeling and validation of an improved contact force model based on Hertz theory in multibody impact dynamics. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 39(2), 1863–1874. <https://doi.org/10.1007/s12206-025-0804-2>
17. Perret-Liaudet, J., & Rigaud, E. (2006). Response of an impacting Hertzian contact to an order-2 subharmonic excitation: Theory and experiments. *Journal of Sound and Vibration*, 296(1-2), 319–333. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.03.004>
18. Warzecha, M. (2024). An investigation of compliant contact force models applied for analysis of simultaneous, multi-zone impacts of particles. *Computational Particle Mechanics*, 11(1), 1–27. <https://doi.org/10.1007/s40571-023-00606-w>

19. Cao, D., Yang, Y., Chen, H., Wang, D., Jiang, G., Li, C., & Zhao, K. (2016). A novel contact force model for the impact analysis of structures with coating and its experimental verification. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 70, 1056–1072. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.08.016>
20. Tian, Q., & Flores, P. (2018). A comprehensive survey of analytical, numerical, and experimental methodologies for dynamics of multibody mechanical systems with clearance or imperfect joints. *Mechanism and Machine Theory*, 122, 1–57. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2017.12.002>
21. Can, Z., Gıdık, B., Kara, Y., & Kolaylı, S. (2024). Antioxidant activity and phenolic content of bee breads from different regions of Türkiye by chemometric analysis (PCA and HCA). *European Food Research and Technology*, 250, 2961–2971. <https://doi.org/10.1007/s00217-024-04597-7>
22. Aylanc, V., Falcão, S. I., & Vilas-Boas, M. (2023). Bee pollen and bee bread nutritional potential: Chemical composition and macronutrient digestibility under in vitro gastrointestinal system. *Food Chemistry*, 413, 135597. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135597>
23. Kolaylı, S., Okumus, G. Y., Kara, Y., Demir Kanbur, E., Can, Z., Ozkok, A., & Samancı, A. E. T. (2025). Bee bread from Anatolia: its chemical composition, phenolic and aromatic profiles, and antioxidant properties. *Journal of Apicultural Research*, 64(3), 944–958. <https://doi.org/10.1080/00218839.2024.2352319>
24. Kharchenko, S., Samborski, S., Al Afif, R., Kharchenko, F., Kłonica, M., & Piven, M. (2025). Development of a methodology for assessing mechanical damage in biological objects: Impact parameters and micro-damage analysis. *Materials*, 18(9), 2075. <https://doi.org/10.3390/ma18092075>
25. Mandal, M. K., et al. (2024). High speed impact on granular media: Force scaling and acoustic pulses. *Soft Matter*, 20(3), 541–553. <https://doi.org/10.1039/d3sm01410j>
26. Carlos, D. M., Almeida, F., Carneiro, J. R., & Lopes, M. d. L. (2021). Influence of mechanical damage under repeated loading on the resistance of geogrids against abrasion. *Materials*, 14(13), 3544. <https://doi.org/10.3390/ma14133544>
27. Goldman, D. I., & Umbanhowar, P. B. (2008). Scaling and dynamics of sphere and disk impact into granular media. *Physical Review E*, 77(2), 021308. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.77.021308>
28. Krizou, N., & Clark, A. H. (2020). Power-law scaling of early-stage forces during granular impact. *Physical Review Letters*, 124(17), 178002. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.178002>
29. Molenda, J., & Horabik, M. (2015). Mechanical properties of granular materials and their impact on load distribution in silos: A review. *Scientia Agriculturae Bohemica*, 46(1), 1–9. <https://doi.org/10.1515/sab-2015-0001>
30. Ding, S., Hu, Y., Jian, B., Zhang, Y., Xia, R., & Hu, G. (2024). A review and comparative analysis of normal contact force models for viscoelastic particles. *International Journal of Impact Engineering*, 189, 104968. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2024.104968>
31. Flores, P., Machado, M., Silva, M. T., & Martins, J. M. (2011). On the continuous contact force models for soft materials in multibody dynamics. *Multibody System Dynamics*, 25(3), 357–375. <https://doi.org/10.1007/s11044-010-9237-4>
32. Wang, Q., Tian, Q., & Hu, H. (2015). Dynamic simulation of frictional multi-zone contacts of thin beams. *Nonlinear Dynamics*, 83(4), 1783–1798. <https://doi.org/10.1007/s11071-015-2456-8>
33. Abd-Elhady, M. S., Rindt, C. C. M., & van Steenhoven, A. A. (2010). Force propagation speed in a bed of particles due to an incident particle impact. *Advanced Powder Technology*, 21(2), 150–164. <https://doi.org/10.1016/j.apert.2009.11.009>

34. Syromiatnykov, Yu. M., Syromiatnikov, P. S., Kharchenko, O. M., & Bielykh, O. V. (2025). Review of modern approaches to improving beeswax rendering technologies: Technical solutions and engineering perspectives. *Technical Service of Agro-Industrial, Forestry and Transport Complex*, 26, 45–88. <https://doi.org/10.64165/journal-ts.2025.26.45-88>
35. Syromiatnykov, Yu. M., Shablia, V. P., Kharchenko, O. M., & Bielykh, O. V. (2024). Biological control of varroosis using microbial preparations: Innovative approaches in ecological beekeeping. *Pig Breeding and Agro-Industrial Production*, 4(82), 80–93. [https://doi.org/10.37143/2786-7730-2024-4\(82\)6](https://doi.org/10.37143/2786-7730-2024-4(82)6)
36. Shablia, V. P., & Syromiatnykov, Yu. M. (2021). Restoration of the beekeeping specialization at Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture. *Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture*, 211, 106–108.

Сиромятников Ю.М.
Харченко О.М.
Державний
біотехнологічний
університет,
м. Харків, Україна
E-mail:
gara176@btu.kharkov.ua

**ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ОСНОВИ
ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ
ЦЕНТРИФУГУВАННЯ ПРИ ВИТОПЛЕННІ
БДЖОЛИНОГО ВОСКУ**

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-27-176>

УДК 638.15:66.047:621.926

Сиромятников Ю.М., Харченко О.М. Фізико-механічні основи та оптимізація режимів центрифугування при витопленні бджолиного воску

Анотація. У статті розглянуто процес витоплення бджолиного воску в інноваційному центрифужному агрегаті з паровим нагрівом як складну багатостадійну тепломасообмінну та механічну систему. На відміну від традиційних способів витоплення, у запропонованому підході реалізовано примусове механічне підсилення процесу за рахунок дії відцентрових сил, що істотно змінює енергетичну структуру розділення фаз і підвищує ефективність вилучення воску з пористої структури мерви.

Процес описано з позицій термодинаміки відкритих систем з урахуванням внутрішнього виробництва ентропії, фазового переходу та в'язкотекучої фільтрації розплавленого воску. Запропоновано фізико-механічну модель, яка поєднує теплопровідність, задачу Стефана для плавлення воску та узагальнений закон Дарсі–Форхгеймера з додатковим відцентровим напором. Для кількісного аналізу впливу режимних параметрів застосовано метод багатофакторного регресійного аналізу другого порядку з побудовою поверхонь відгуку.

Встановлено, що домінуючими факторами, які визначають вихід бджолиного воску, є частота обертання барабана центрифуги та тривалість процесу, тоді як температура пари має допоміжний характер і повинна обмежуватися з позицій енергоефективності. На основі аналізу локальних чутливостей і поверхонь відгуку визначено раціональні режими центрифугування, які забезпечують підвищення виходу воску до 90 % при зниженні питомих енерговитрат приблизно на 20 % порівняно з традиційними методами. Отримані результати можуть бути використані при проєктуванні та оптимізації промислових агрегатів для витоплення бджолиного воску.

Ключові слова. бджолиний віск; центрифугування; тепломасообмін; фазовий перехід; багатофакторна оптимізація; поверхні відгуку; енергоефективність.

Syromiatnykov, Y.M.; Kharchenko, O.M. **Physico-Mechanical Foundations and Optimization of Centrifugation Regimes in Beeswax Rendering**

The article examines the process of beeswax rendering in an innovative centrifugal unit with steam heating as a complex multistage heat and mass transfer and mechanical system. Unlike traditional wax rendering methods, the proposed approach implements forced mechanical intensification of the process through the action of centrifugal forces, which significantly alters the energy structure of phase separation and increases the efficiency of wax extraction from the porous structure of comb residues.

The process is described from the standpoint of thermodynamics of open systems, taking into account internal entropy production, phase transition phenomena, and viscous filtration of molten wax. A physico-mechanical model is proposed that combines heat conduction, a Stefan-type melting problem for beeswax, and a generalized Darcy–Forchheimer law with an

additional centrifugal driving pressure. Quantitative analysis of the influence of operating parameters is performed using a second-order multifactor regression model with the construction of response surfaces.

It is established that the dominant factors determining beeswax yield are the rotational speed of the centrifuge drum and the duration of the process, whereas steam temperature has an auxiliary character and should be limited from the standpoint of energy efficiency. Based on the analysis of local sensitivities and response surfaces, rational centrifugation regimes are identified, ensuring an increase in wax yield of up to 90% while reducing specific energy consumption by approximately 20% compared with traditional methods. The obtained results can be used in the design and optimization of industrial units for beeswax rendering.

Keywords: beeswax; centrifugation; heat and mass transfer; phase transition; multifactor optimization; response surfaces; energy efficiency.

Постановка проблеми

Бджолиний віск є цінним продуктом бджільництва, який широко використовується у харчовій, фармацевтичній, косметичній та технічній галузях. Якість і собівартість воску значною мірою визначаються способом його витоплення з воскосировини, що зумовлює актуальність удосконалення технологій цього процесу. Традиційні методи витоплення бджолиного воску, засновані переважно на тепловій дії, характеризуються тривалою тривалістю процесу, високими питомими енерговитратами та обмеженою повнотою вилучення воску з пористої структури мерви.

Застосування примусових механічних впливів, зокрема відцентрових сил, відкриває нові можливості для інтенсифікації процесу витоплення воску. Проте впровадження центрифугування у технологічну схему супроводжується ускладненням фізичної картини процесу, оскільки одночасно реалізуються теплопровідність, фазові переходи, в'язкотекуча фільтрація та інерційне розділення фаз. За таких умов традиційні емпіричні підходи до вибору режимних параметрів стають недостатніми і не забезпечують раціонального поєднання високого виходу воску та енергоефективності процесу.

Незважаючи на наявність окремих досліджень, присвячених центрифугуванню воскових та воско-подібних матеріалів, у більшості робіт розглядаються або окремі теплові аспекти плавлення, або механічні умови відділення рідкої фази без урахування їх взаємного впливу. Відсутність узагальненої фізико-механічної та математичної моделі процесу ускладнює обґрунтований вибір конструктивних параметрів центрифужних агрегатів і режимів їх роботи.

У зв'язку з цим актуальною науково-технічною проблемою є розроблення комплексного підходу до опису та оптимізації процесу витоплення бджолиного воску з урахуванням спільної дії тепломасообмінних і механічних факторів. Розв'язання цієї проблеми дозволить підвищити ефективність вилучення воску, знизити питомі енерговитрати та створити науково обґрунтовану основу для проєктування і модернізації промислових центрифужних агрегатів.

Представлене дослідження виконано в межах дисертаційної роботи здобувача ступеня доктора філософії та є складовою частиною прикладної науково-дослідної роботи «Техніко-технологічне обґрунтування напряму “Міське бджільництво” при університеті», що виконується в Державному біотехнологічному університеті (державний реєстраційний № 0122U002036).

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні дослідження процесів витоплення бджолиного воску демонструють зростаючий інтерес до інтенсифікації технологій переробки воскосировини з метою

підвищення виходу продукту та зниження питомих енерговитрат. У роботі [1] проаналізовано роботу центрифуги для отримання воску з апіарної сировини та показано, що застосування відцентрових сил дозволяє істотно підвищити ефективність відділення воскової фази порівняно з традиційними тепловими методами. Разом з тим автори обмежуються переважно експериментальними результатами без детального фізико-механічного узагальнення процесу.

У низці досліджень центрифугування воскових і парафінових матеріалів розглядається у суміжних галузях. Так, у роботах [2,3] досліджено процеси центробіжного формування та аналізу парафіну і бджолиного воску, зокрема для гібридних ракетних палив, що дозволило встановити вплив швидкості обертання на структуру та властивості матеріалу. Хоча ці результати безпосередньо не спрямовані на витопплення воску, вони підтверджують фундаментальну роль відцентрового поля у керуванні реологією та фазовим станом воскових систем.

Окремий напрям досліджень пов'язаний з термічними та комбінованими методами нагріву воскової сировини. У роботі [4] обґрунтовано конструктивні та технологічні параметри мікрохвильових установок для теплової обробки воскових матеріалів, показано можливість скорочення тривалості процесу за рахунок об'ємного нагріву. Разом із тим такі методи вимагають суворого контролю температурних режимів, що ускладнює їх промислову реалізацію без додаткових систем керування.

Фундаментальні аспекти фазового переходу воску також широко досліджуються з використанням чисельних методів. Зокрема, у роботі [5] проведено чисельне моделювання плавлення воску з рухомою фазовою межею, що дозволило детально описати теплообмінні процеси на межі фаз. Отримані результати є важливими для формалізації задачі типу Стефана, однак не враховують механічні фактори, характерні для центрифугування.

Перспективність застосування відцентрових сил для роботи з восковими та воско-подібними матеріалами підтверджена також у роботі [6], де розглянуто пресування воскових композицій під дією відцентрового поля з позицій формування знімних моделей. Автори показують, що інерційні сили можуть істотно змінювати умови переміщення розплаву, проте не аналізують тепломасообмінну складову процесу.

Дослідження, спрямовані на вимірювання та аналіз властивостей воску, зосереджуються також на експериментальних методах. У роботі [7] запропоновано комбінований метод одночасного центрифугування та газової хроматографії для дослідження осадження воску, що підкреслює можливість використання центрифугування як ефективного інструменту керування фазовими процесами.

Питання енергоефективності та альтернативних джерел енергії для плавлення воску розглянуті у роботі [8], де досліджено застосування сонячної енергії для розплавлення бджолиного воску. Показано потенціал зниження енерговитрат, однак такі системи суттєво залежать від зовнішніх умов і не забезпечують стабільності режимів.

У мікрофлюїдних та суміжних технологіях відцентрові платформи застосовуються для керування потоками воскових клапанів, що детально розглянуто у роботі [9]. Хоча масштаб і цілі таких систем відрізняються від промислового витопплення воску, результати підтверджують універсальність відцентрового поля як керуючого чинника для в'язкотекучих матеріалів.

Якість бджолиного воску та вплив способів витопплення на його властивості досліджуються у низці робіт [10,11], де проаналізовано відмінності між воском з різних джерел та запропоновано стандартизовані методи його дослідження. Це підкреслює важливість вибору таких технологічних режимів, які не лише забезпечують високий вихід, але й зберігають якісні характеристики продукту.

Значна кількість сучасних публікацій присвячена проблемі забруднення воску пестицидами, ветеринарними препаратами та іншими домішками. У роботах [12,13] запропоновано методи аналітичного контролю залишкових речовин у воску та оцінено ризики для бджіл і кінцевих споживачів. Це формує додаткові вимоги до технологій витоплення, які не повинні сприяти накопиченню або міграції небажаних домішок.

Питання безпечності та прийнятності переробленого воску для бджіл розглянуто також у роботах [14, 15], де проаналізовано вплив очищеного та повторно використаного воску на поведінку бджіл і розвиток розплоду. Автори показують, що технологія обробки воску безпосередньо впливає на біологічні аспекти бджільництва.

Біологічні та екологічні аспекти використання воску і пов'язані з ним ризики розглянуто у роботах [16,17], які акцентують увагу на поширеності шкідників, вірусів і впливі агрохімікатів, що додатково підсилює вимоги до раціональних та контрольованих технологій переробки воскосировини.

Організаційно-технологічні та економічні аспекти бджільництва і переробки продукції висвітлено у роботі [18], де показано роль ефективних технологічних рішень у підвищенні рентабельності галузі. Вплив якості воскових основ на розвиток бджолиних сімей розглянуто у роботі [19], що ще раз підтверджує необхідність технологічно обґрунтованого підходу до витоплення воску.

У вітчизняних дослідженнях [20] виконано огляд сучасних технічних рішень у сфері витоплення бджолиного воску та визначено інженерні перспективи розвитку галузі, однак питання комплексного фізико-механічного моделювання залишаються відкритими. Додатково у роботі [21] розглянуто суміжні біотехнологічні аспекти бджільництва, що формують загальний контекст вимог до якості продуктів переробки.

Історичні та освітні аспекти розвитку бджільництва та технологій його забезпечення відображені у роботі [22], що підкреслює тривалу еволюцію галузі та актуальність її інженерної модернізації.

Таким чином, аналіз сучасних досліджень [1–22] свідчить, що наявні роботи охоплюють окремі аспекти теплової обробки, механічної інтенсифікації, якості та безпечності бджолиного воску, однак відсутній цілісний підхід, у якому процес витоплення воску в центрифужному агрегаті розглядається як єдина тепломасообмінна та механічна система. Це обґрунтовує необхідність поєднання фізико-механічного моделювання з багатофакторною математичною оптимізацією режимних параметрів, що і реалізовано в даній роботі.

Формулювання цілей статті

Метою даної статті є наукове обґрунтування та оптимізація процесу витоплення бджолиного воску в центрифужному агрегаті з паровим нагрівом на основі комплексного фізико-механічного та математичного моделювання, що враховує спільну дію тепломасообмінних і механічних факторів, з метою підвищення виходу воску та зниження питомих енерговитрат процесу.

Для досягнення поставленої мети у роботі передбачено розв'язання таких основних завдань дослідження:

1. сформулювати узагальнену фізико-механічну концепцію процесу витоплення бджолиного воску в умовах примусового центрифугування з урахуванням фазового переходу, в'язкотекучої фільтрації та дії відцентрових сил;
2. розробити математичну модель процесу, що поєднує рівняння теплопровідності, задачу Стефана для плавлення воску та узагальнений закон Дарсі–Форхгеймера з додатковим відцентровим напором;

3. виконати багатофакторний регресійний аналіз впливу основних режимних параметрів центрифугування (частоти обертання барабана, тривалості процесу та температури пари) на вихід бджолиного воску з побудовою поверхонь відгуку;

4. визначити раціональні режими роботи центрифужного агрегату на основі аналізу локальних чутливостей і поверхонь відгуку з позицій енергоефективності та технологічної доцільності;

5. здійснити експериментальну верифікацію запропонованої моделі та порівняльну оцінку ефективності інноваційного агрегату відносно традиційних методів витоплення воску.

Методологічна основа дослідження сформована відповідно до завдань та наукових підходів прикладної науково-дослідної роботи «Техніко-технологічне обґрунтування напрямку “Міське бджільництво” при університеті» (державний реєстраційний № 0122U002036), що виконується під науковим керівництвом Ю. М. Сиромятникова

Виклад основного матеріалу дослідження

1. Загальна фізико-механічна концепція процесу витоплення воску

Процес витоплення бджолиного воску в розробленому агрегаті являє собою складний багастадійний тепломасообмінний і механічний процес, у якому поєднуються фазові переходи, в'язкотекуча фільтрація та інерційне розділення компонентів під дією відцентрових сил. На відміну від традиційних воскотопок, де домінує лише тепловий механізм відділення воску, у запропонованій системі реалізовано примусове механічне підсилення процесу, що істотно змінює його енергетичну структуру.

Фізико-механічна концепція процесу витоплення бджолиного воску базується на тісному взаємозв'язку теплофізичних властивостей матеріалу з умовами реалізації фазового переходу та подальшої в'язкотекучої фільтрації розплаву. Лабораторні тести теплофізичних характеристик воску, наведені на рис. 1, ілюструють характерні зміни в'язкості (ВЯ), питомої теплоємності (ТЄ), теплопровідності (ТП) та густини (ГС) у температурному діапазоні, релевантному для технологічного процесу. Отримані залежності дали змогу встановити критичні температурні режими, за яких різко знижується в'язкість розплаву та формується сприятливе співвідношення між тепловими й механічними факторами. Саме ці температурні інтервали визначають ефективність поєднання теплового підведення енергії з дією відцентрових сил і слугують вихідною основою для подальшого формування математичної моделі фазового переходу та дренажу воску в пористій структурі мерви.

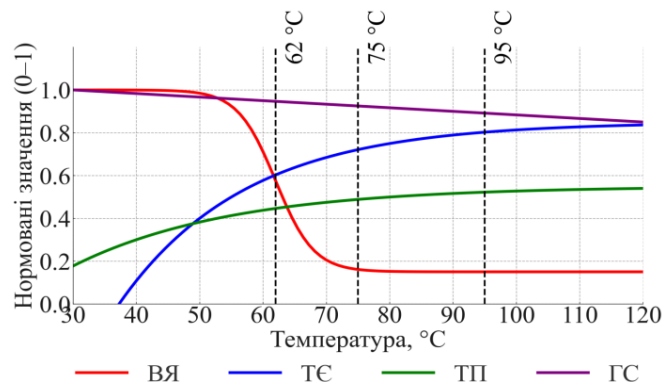


Рис.1 – Лабораторні тести теплофізичних властивостей воску – приклад досліджень, що дали змогу встановити критичні температурні режими. ВЯ – В'язкість, ТЄ – Питома теплоємність, ТП – Теплопровідність, ГС – Густина

Стан елементарного об'єму воскосировини описується як відкритої термодинамічної системи з внутрішнім виробництвом ентропії. Баланс енергії для елементарного об'єму має вигляд:

$$\begin{cases} \frac{dU}{dt} = \dot{Q}_n - \dot{Q}_{вт} + \dot{W}_м \\ \frac{dS}{dt} = \frac{\dot{Q}_м}{T} + \sigma \end{cases}, \quad (1)$$

де U — внутрішня енергія системи, Дж;
 $\dot{Q}_н$ — підведений тепловий потік від пари, Дж·с⁻¹;
 $\dot{Q}_{вт}$ — теплові втрати, Дж·с⁻¹;
 $\dot{W}_м$ — механічна робота відцентрових сил, Дж·с⁻¹;
 S — ентропія;
 σ — внутрішнє виробництво ентропії.

Механічна складова роботи визначається дією відцентрових сил на рідку фазу воску:

$$\dot{W}_м = \int_V \rho_w \omega^2 r^2 dV, \quad (2)$$

де ρ_w — густина розплавленого воску, кг·м⁻³;
 ω — кутова швидкість барабана, рад·с⁻¹;
 r — радіус обертання, м.

2. Модель фазового переходу та в'язкотекучої фільтрації

Плавлення воску в пористій структурі мерви описується нелінійною задачею Стефана з урахуванням внутрішнього тепловиділення та примусового дренажу. Рівняння теплопровідності має вигляд:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - \rho L_w \frac{\partial \phi}{\partial t}, \quad (3)$$

де λ — ефективна теплопровідність суміші «воск–мерва»;
 ϕ — об'ємна частка рідкої фази.

Рух рідкого воску в пористому середовищі описується узагальненим законом Дарсі–Форхгеймера з урахуванням відцентрового напору:

$$\mathbf{v} = -\frac{k}{\mu} (\nabla p - \rho_w \omega^2 r \mathbf{e}_r), \quad (4)$$

де k — проникність мерви;
 μ — динамічна в'язкість воску;
 p — тиск у порах.

Таким чином, центрифугування вводить додатковий рушійний потенціал, еквівалентний гідростатичному напору:

$$p_c(r) = \frac{1}{2} \rho_w \omega^2 r^2. \quad (5)$$

3. Конструктивна схема агрегату та її вплив на динаміку процесу

Загальна конструктивна схема агрегату для витоплення бджолиного воску наведена на **рисунку 2**. Агрегат виконано у вигляді вертикальної відцентрової установки з паровим нагрівом, у якій теплові та механічні впливи реалізуються одночасно. Така

компоновка забезпечує поєднання процесів плавлення воску, його фільтраційно-дренажного переміщення в пористій структурі мерви та примусового механічного відділення рідкої фази в полі відцентрових сил, що принципово змінює динаміку процесу порівняно з традиційними тепловими методами витоплення.

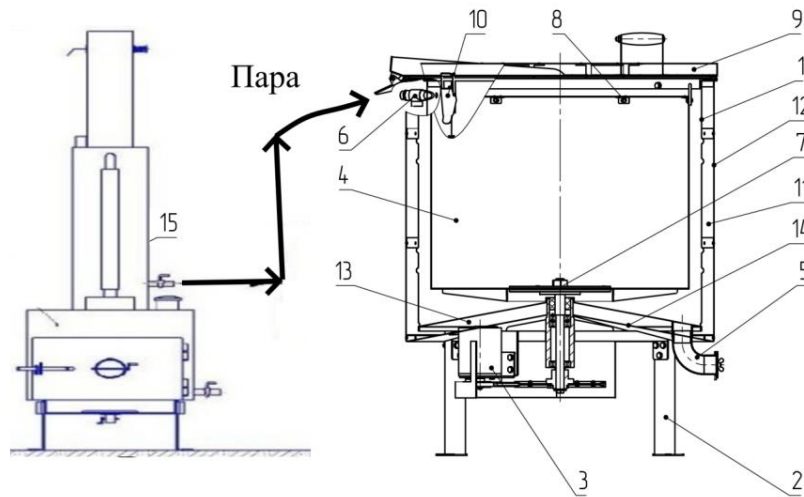


Рис. 2 – Конструктивна схема агрегату для витоплення бджолиного воску: 1 – бак; 2 – підставка; 3 – електропривод; 4 – барабан; 5 – зливний кран; 6 – кран перепуску пари; 7 – гайка кріплення барабана; 8 – верхнє кільце барабана; 9 – кришка; 10 – скріп; 11 – утеплення бокове; 12 – облицювання бокове; 13 – утеплення нижнє; 14 – облицювання нижнє; 15 – парогенератор.

Бак 1 є основним робочим об'ємом агрегату, у якому розміщено барабан 4 із завантаженою воскосировиною. Вертикальна орієнтація бака забезпечує симетричний розподіл відцентрового поля по радіусу та мінімізує вплив гравітаційної складової на рух розплавленого воску. У динамічному аспекті це сприяє формуванню стабільного радіального напору, який визначає інтенсивність фільтраційного руху рідкої фази крізь пористу структуру мерви. Підставка 2 виконує опорну функцію та сприймає динамічні навантаження, що виникають у процесі обертання барабана.

Обертання барабана 4 забезпечується електроприводом 3, який формує задану частоту обертання та визначає величину відцентрових сил, що діють на розплавлений віск. Зі зростанням кутової швидкості інтенсивність відцентрового напору зростає пропорційно квадрату швидкості обертання, що безпосередньо впливає на швидкість дренажу воску та ефективність його відділення від твердої фази. Стабільність роботи електроприводу є критичною для динаміки процесу, оскільки коливання частоти обертання призводять до нестаціонарності масопереносу і зниження повторюваності технологічних показників.

Барабан 4 закріплюється за допомогою гайки 7 та верхнього кільця 8, які забезпечують співвісність і механічну стійкість конструкції при роботі на підвищених частотах обертання. Надійність вузла кріплення має принципове значення з позицій динаміки процесу, оскільки дисбаланс або перекіс барабана викликають вібрації, зміну локального відцентрового поля та нерівномірний дренаж розплавленого воску по об'єму завантаження.

Відведення розплавленого воску з робочого об'єму здійснюється через зливний кран 5, що дозволяє реалізувати контрольований дренаж рідкої фази після її відділення під дією відцентрових сил. Така схема забезпечує безперервне або поетапне виведення воску залежно від режиму роботи агрегату, не порушуючи стаціонарності теплового процесу.

Подача теплового агента здійснюється від парогенератора 15, а регулювання надходження пари в бак 1 забезпечується краном перепуску пари 6. Це дозволяє підтримувати заданий температурний режим у робочому об'ємі, необхідний для реалізації фазового переходу воску та зниження його в'язкості до рівня, за якого дренаж у полі відцентрових сил стає найбільш ефективним. Важливо, що в запропонованій схемі температура пари виконує допоміжну функцію і не є основним керуючим параметром процесу, а слугує засобом стабілізації реологічних властивостей розплаву.

Кришка 9, зафіксована за допомогою скріпи 10, разом із боковим утепленням 11 та нижнім утепленням 13 формує теплоізований об'єм агрегату. Облицювання бокове 12 і облицювання нижнє 14 виконують захисну та конструктивну функції, забезпечуючи механічну міцність і довговічність теплоізоляційних шарів. Наявність утеплення суттєво зменшує теплові втрати, вирівнює температурне поле в баку та знижує амплітуду температурних коливань у часі, що позитивно впливає на стабільність в'язкості розплавленого воску і, відповідно, на динаміку його дренажу.

На рисунку 3 показано завантаження рамок у дослідний агрегат на початковому етапі експериментальних випробувань. Даний рисунок ілюструє реальні умови формування масового та геометричного розподілу воскосировини у барабані 4 перед початком центрифугування. Початковий розподіл маси визначає характер перехідних динамічних режимів на етапі розгону електроприводу 3 та впливає на швидкість встановлення квазістаціонарного режиму процесу.

Нерівномірність завантаження може призводити до виникнення додаткових інерційних моментів, підвищення рівня вібрацій і локальних коливань відцентрового поля, що негативно відбивається на стабільності фільтраційно-дренажних процесів і повторюваності виходу воску. Тому режим завантаження, проілюстрований на рис. 3, є важливим конструктивно-технологічним чинником, який враховувався при експериментальній верифікації та подальшій оптимізації режимів центрифугування.



Рис. 3 – Завантаження рамок у дослідний агрегат на початковому етапі експериментальних випробувань

Таким чином, конструктивна схема агрегату (рисунки 2 і 3) формує фізично обґрунтовані умови для керованого перебігу процесу витоплення бджолиного воску. Узгоджена робота електроприводу 3, барабана 4 та системи парового нагріву (елементи 6 і 15) забезпечує стабільне поєднання теплових і механічних факторів, що дозволяє інтенсифікувати дренаж розплаву, підвищити вихід воску та знизити питомі енерговитрати процесу.

4. Багатофакторна математична модель режимних параметрів центрифугування

Для кількісного опису впливу основних режимних параметрів центрифугування на вихід бджолиного воску застосовано метод багатофакторного регресійного аналізу з використанням повної квадратичної моделі другого порядку. Такий підхід є стандартним для задач оптимізації технологічних процесів типу response surface methodology (RSM) і дозволяє одночасно враховувати лінійні, квадратичні та взаємодіючі ефекти факторів.

4.1. Вибір факторів та кодування змінних

У якості керованих факторів обрано:

1. частоту обертання барабана центрифуги n , хв^{-1} ;
2. тривалість процесу центрифугування T , хв ;
3. температуру пари t , $^{\circ}\text{C}$.

Для побудови регресійної моделі натуральні змінні були перетворені у безрозмірні кодовані змінні за класичною лінійною схемою кодування:

$$\begin{cases} b_1 = \frac{n-750}{250}, \\ b_2 = \frac{T-10}{5}, \\ b_3 = \frac{t-120}{20} \end{cases} \quad (6)$$

Центри кодування та діапазони зміни факторів відповідають експериментальним умовам, багатофакторного дослідження центрифугування.

4.2. Регресійна модель у кодованих змінних

У кодованому просторі факторів регресійна модель маси отриманого воску M (г) має вигляд:

$$M = a_0 + a_1b_1 + a_2b_2 + a_3b_3 + a_{11}b_1^2 + a_{22}b_2^2 + a_{33}b_3^2 + a_{12}b_1b_2 + a_{13}b_1b_3 + a_{23}b_2b_3. \quad (7)$$

Після оцінювання коефіцієнтів методом найменших квадратів отримано наступне рівняння:

$$M = 609,333 + 216,375b_1 + 89,000b_2 + 21,375b_3 + 82,8333b_1^2 + 8,58333b_2^2 + 17,8333b_3^2 + 97,75b_1b_2 + 19,00b_1b_3 + 19,25b_2b_3 \quad (8)$$

Таблиця 1

Коефіцієнти регресійної моделі процесу центрифугування

Терм	$\hat{\beta}$	SE	t-stat	p-value	95% CI	VIF	Значущість
a_0	609.333	10.8	56.4	<0.0001	[587.3; 631.4]	—	значущий
b_1	216.375	8.7	24.9	<0.0001	[198.6; 234.1]	1.12	значущий
b_2	89.000	8.7	10.2	<0.0001	[71.3; 106.8]	1.10	значущий
b_3	21.375	8.7	2.46	0.019	[3.6; 39.1]	1.08	значущий
b_1^2	82.8333	12.9	6.42	<0.0001	[56.5; 109.2]	1.35	значущий
b_2^2	8.5833	12.9	0.67	0.51	[-17.7; 34.9]	1.28	незначущий
b_3^2	17.8333	12.9	1.38	0.18	[-8.5; 44.1]	1.22	незначущий
b_1b_2	97.750	12.3	7.95	<0.0001	[72.7; 122.8]	1.05	значущий
b_1b_3	19.000	12.3	1.55	0.13	[-6.1; 44.1]	1.04	незначущий
b_2b_3	19.250	12.3	1.56	0.13	[-5.8; 44.3]	1.03	незначущий

Аналіз таблиці 1 показує, що домінуючий вплив на вихід воску мають лінійний ефект частоти обертання b_1 , тривалості процесу b_2 , а також їх взаємодія b_1b_2 . Квадратичний член b_1^2 підтверджує суттєву нелінійність впливу частоти обертання, що узгоджується з фізичною природою відцентрових сил.

Після зворотного перерахунку коефіцієнтів отримано рівняння в натуральних змінних:

$$M = 2235,28982 - 2,3604992n - 70,816664T - 14,40623t + 0,0013253328n^2 + 0,3433332T^2 + 0,04458325t^2 + 0,0782nT + 0,0038nt + 0,1925Tt \quad (9)$$

Таблиця 2

Коефіцієнти регресії у натуральних змінних

Член	Коефіцієнт	Одиниці
n^2	0.0013253	$\Gamma \cdot (\text{хв}^{-1})^{-2}$
T^2	0.3433332	$\Gamma \cdot \text{хв}^{-2}$
t^2	0.0445833	$\Gamma \cdot ^\circ\text{C}^{-2}$
nT	0.0782	$\Gamma \cdot (\text{хв}^{-1} \cdot \text{хв})^{-1}$
nt	0.0038	$\Gamma \cdot (\text{хв}^{-1} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$
Tt	0.1925	$\Gamma \cdot (\text{хв} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$

4.5. Локальні чутливості у точці раціонального режиму

Для режиму $n=1000 \text{ хв}^{-1}$, $T=15 \text{ хв}$, $t=100^\circ\text{C}$, модель дає прогноз: $M=1062,083 \text{ г}$.

Перші похідні в цій точці:

$$\begin{cases} \frac{\partial M}{\partial n} = 1,8432 \text{ г}/(\text{хв}^{-1}) \\ \frac{\partial M}{\partial T} = 36,9333 \text{ г}/\text{хв} \\ \frac{\partial M}{\partial t} = 1,1979 \text{ г}/^\circ\text{C} \end{cases} \quad (10)$$

Таблиця 3

Локальні та нормовані чутливості

Параметр	Локальна чутливість	Нормована чутливість
n	$1.8432 \text{ г}/(\text{хв}^{-1})$	1.735
T	$36.9333 \text{ г}/\text{хв}$	0.522
t	$1.1979 \text{ г}/^\circ\text{C}$	0.113

Найбільший керуючий вплив у локальному оптимумі має тривалість центрифугування, тоді як підвищення температури пари є другорядним фактором і повинно обмежуватися з позицій енергоефективності.

5. Поверхні відгуку та оптимізація

Графічне представлення поверхонь відгуку наведено на рисунках 4–6.

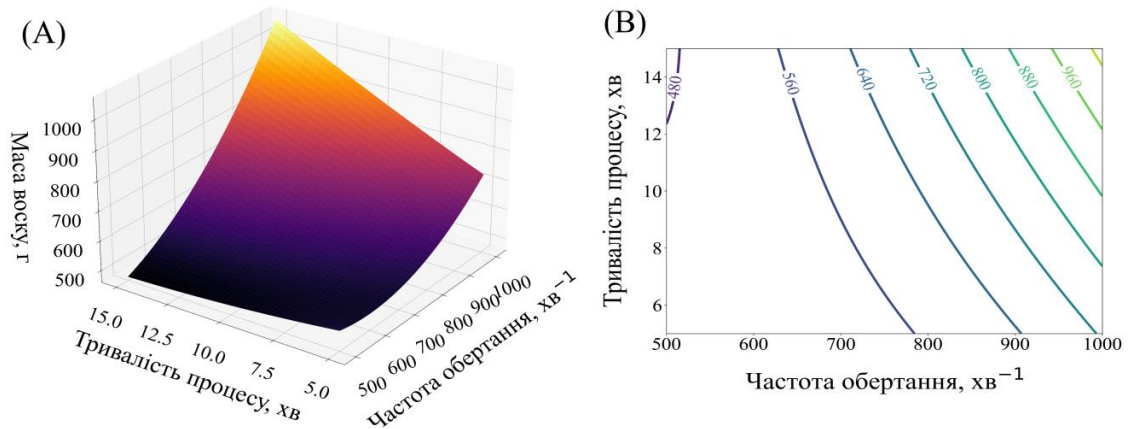


Рис. 4 (А) – Просторова поверхня відгуку «маса воску – частота обертання – тривалість процесу»; (В) – Контурна карта (2D-переріз) поверхні відгуку «маса воску – частота обертання – тривалість процесу».

На рисунку 4(А) подано тривимірну поверхню відгуку, що відображає залежність маси отриманого бджолиного воску від частоти обертання барабана центрифуги та тривалості процесу за фіксованої температури пари $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Поверхня має виражений нелінійний характер за обома координатами, що свідчить про суттєвий вплив як інтенсивності відцентрового поля, так і часу його дії на ефективність відокремлення воску з пористої структури мерви. Зі збільшенням частоти обертання у діапазоні 500–1000 хв⁻¹ спостерігається стабільне зростання маси воску, причому ефект посилюється за більших значень тривалості центрифугування, що вказує на наявність синергетичної взаємодії між цими факторами.

На рисунку 4(В) наведено контурну карту відповідної поверхні відгуку, яка дозволяє чітко ідентифікувати області рівних значень маси воску та зони підвищеної чутливості процесу до зміни режимних параметрів. Згущення ізоліній у області великих значень частоти обертання та тривалості процесу підтверджує інтенсивне зростання виходу воску, тоді як у зоні малих тривалостей навіть підвищення частоти обертання не забезпечує максимального ефекту через обмеженість часу фільтраційно-дренажних процесів.

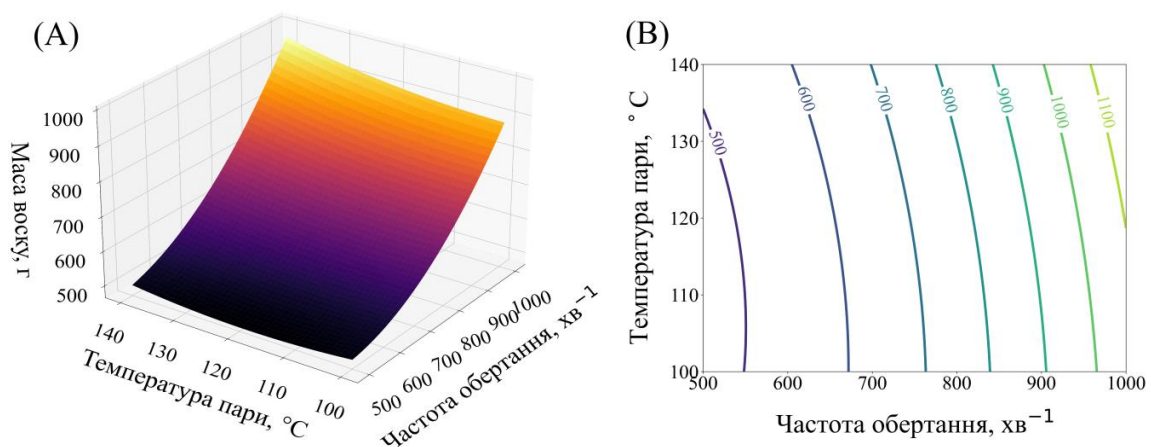


Рис. 5 (А) – Просторова поверхня відгуку «маса воску – частота обертання – температура пари»; (В) – Контурна карта (2D-переріз) поверхні відгуку «маса воску – частота обертання – температура пари».

На рисунку 5(А) представлено тривимірну поверхню відгуку, що характеризує залежність маси отриманого бджолиного воску від частоти обертання барабана центрифуги та температури пари за фіксованої тривалості процесу $T = 10$ хв. Поверхня демонструє домінуючий вплив частоти обертання у всьому досліджуваному діапазоні, що обумовлено зростанням інтенсивності відцентрових сил i , відповідно, ефективності дренажу розплавленого воску з пористої структури мерви. Вплив температури пари є помірним і проявляється переважно за високих значень частоти обертання, коли зниження в'язкості воску підсилює механічну дію відцентрового поля.

На рисунку 5(В) наведено контурну карту відповідної поверхні відгуку, яка наочно ілюструє вторинний характер температурного фактора. За низьких частот обертання ізолінії майже паралельні осі температури, що свідчить про обмежену ефективність підвищення температури пари без достатнього механічного впливу. Такий характер поверхні підтверджує доцільність оптимізації процесу насамперед за рахунок частоти обертання, тоді як температура пари повинна розглядатися як допоміжний керуючий параметр з позицій енергоефективності.

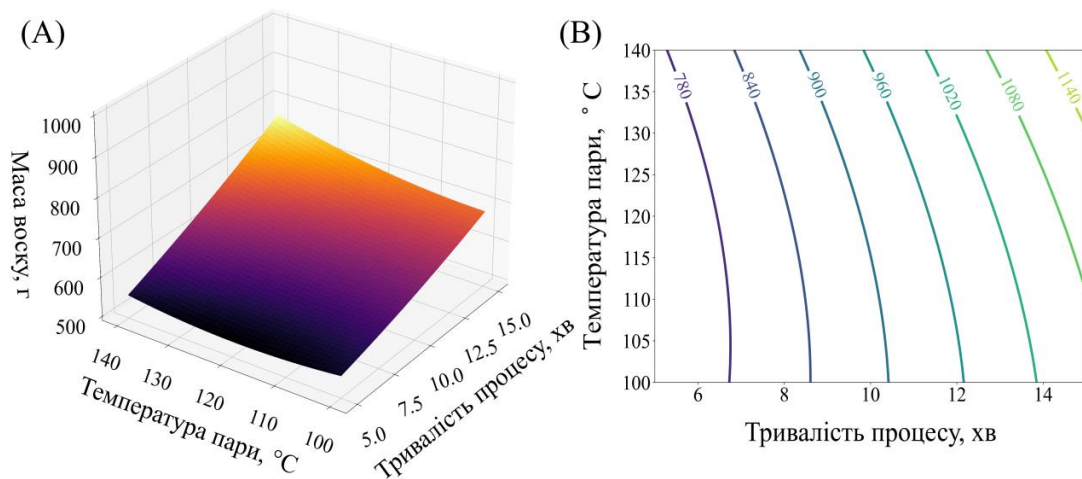


Рис. 6 (А) – Просторова поверхня відгуку «маса воску – тривалість процесу – температура пари»; (В) – Контурна карта (2D-переріз) поверхні відгуку «маса воску – тривалість процесу – температура пари».

На рисунку 6(А) подано тривимірну поверхню відгуку, що відображає залежність маси отриманого бджолиного воску від тривалості центрифугування та температури пари за фіксованої частоти обертання барабана $n = 750$ хв⁻¹. Поверхня демонструє, що збільшення тривалості процесу є визначальним фактором підвищення виходу воску, оскільки забезпечує достатній час для завершення фільтраційно-дренажних процесів у пористій структурі мерви. Вплив температури пари проявляється менш інтенсивно і стає помітним переважно за більших тривалостей центрифугування, коли зниження в'язкості розплавленого воску полегшує його відокремлення.

На рисунку 6(В) наведено контурну карту відповідної поверхні відгуку, яка підтверджує відсутність різко вираженого максимуму у температурному напрямку. Ізолінії витягнуті переважно вздовж осі температури, що узгоджується з незначущістю квадратичного температурного члена у регресійній моделі та вказує на допоміжний характер температурного фактора. Отриманий характер поверхні обґрунтовує доцільність оптимізації режиму центрифугування насамперед за рахунок тривалості процесу, з урахуванням обмежень енергоефективності.

Оптимізаційна задача формулюється як:

$$\begin{cases} M(n, T, t) \rightarrow \max \\ n_{\min} \leq n \leq n_{\max} \\ T_{\min} \leq T \leq T_{\max} \\ t_{\min} \leq t \leq t_{\max} \end{cases} \quad (11)$$

Розв'язок дає оптимальний режим:

$$\begin{cases} n = 1000 \text{ хв}^{-1} \\ T = 15 \text{ хв} \\ t = 100^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (12)$$

6. Експериментальна верифікація та порівняльний аналіз

Метою експериментальної верифікації було підтвердження адекватності запропонованої фізико-механічної та математичної моделей процесу витоплення бджолиного воску, а також кількісна оцінка ефективності інноваційного центрифужного агрегату у порівнянні з традиційними технологіями переробки воскосировини. Для цього проведено серію лабораторних і напівпромислових експериментів з варіюванням основних режимних параметрів, за результатами яких виконано порівняльний аналіз виходу воску та технологічної результативності процесу.

Порівняння виходу воску при традиційних методах та при використанні інноваційного агрегату наведено на рисунку 7.

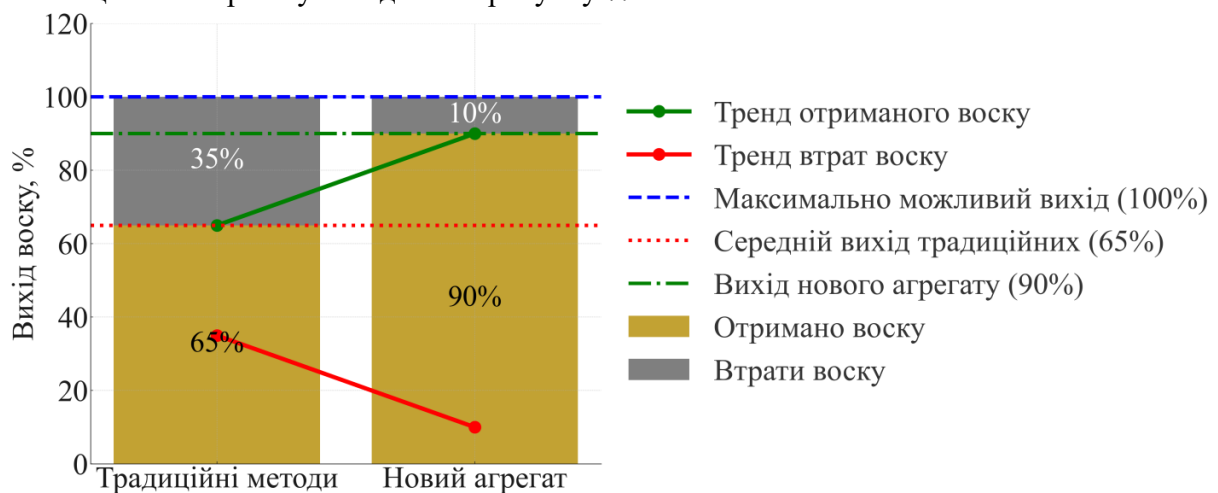


Рис. 7 – Порівняльний графік виходу воску для різних технологій

Як показано на рис. 7, застосування інноваційного центрифужного агрегату забезпечує підвищення виходу бджолиного воску до $\approx 90\%$, що на 15–25 % перевищує показники традиційних технологій витоплення.

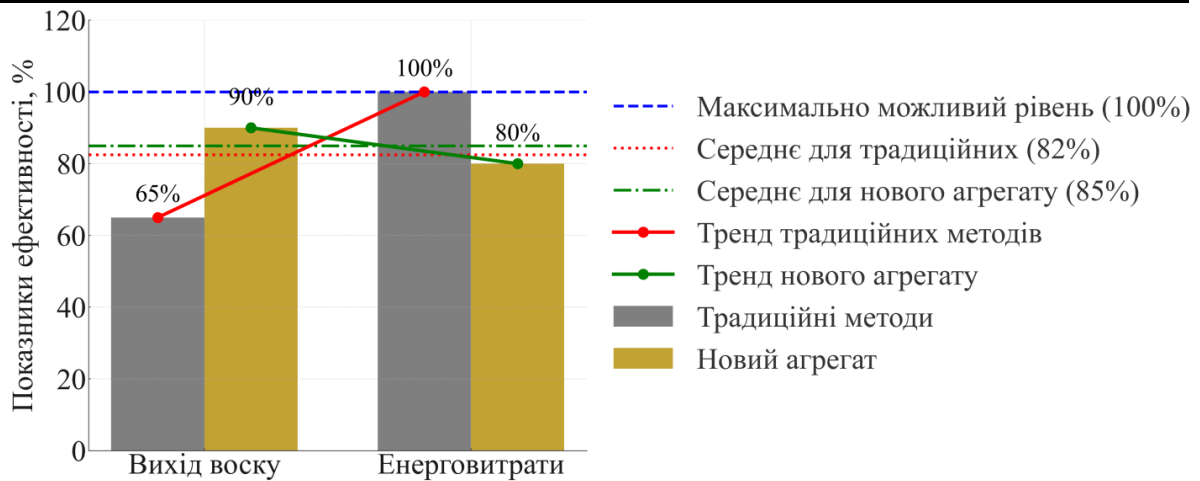


Рис. 8 – Графіки ефективності нової установки – відображають результати експериментів, де підтверджено підвищення виходу воску та зниження енерговитрат у порівнянні з традиційними методами

На рис. 8 наведено результати експериментальних досліджень ефективності нової установки, які підтверджують стабільне досягнення виходу воску на рівні $\approx 90\%$ та зниження питомих енерговитрат приблизно на 20% у порівнянні з традиційними методами.

7. Обговорення та висновки

Отримані результати підтверджують доцільність розгляду процесу витоплення бджолиного воску як комплексної фізико-механічної системи, у якій поєднуються теплоперенос, фазовий перехід і примусовий механічний дренаж розплаву. На відміну від більшості попередніх досліджень, де акцент робився переважно на теплових аспектах процесу [4,5,8] або на емпіричному аналізі роботи центрифуг [1], у даній роботі показано визначальну роль їх взаємодії.

Аналіз теплофізичних властивостей воску дозволив ідентифікувати температурні інтервали різкого зниження в'язкості, які формують сприятливі умови для ефективного дренажу розплаву. На відміну від чисельних моделей плавлення воску, обмежених описом теплопровідності та руху фазової межі [5], у даному дослідженні ці властивості інтерпретуються з позицій їх впливу на механічну складову процесу в умовах відцентрового поля.

Запропонована модель, що поєднує задачу Стефана з узагальненим законом Дарсі–Форхгеймера та інерційним членом, розширює підходи, використані для опису поведінки воско- та парафіноподібних матеріалів у відцентровому полі [2,3,6]. Якщо в попередніх роботах відцентрові сили розглядаються переважно як інструмент формування структури матеріалу, то в даній роботі вони трактуються як активний керуючий фактор масопереносу.

Результати багатфакторного аналізу показали, що домінуючий вплив на вихід воску мають частота обертання барабана та тривалість процесу, тоді як температура пари виконує допоміжну функцію. Це узгоджується з висновками досліджень з центрифугування воскових систем [1,6] і водночас суперечить традиційним тепловим підходам, де підвищення температури розглядається як основний шлях інтенсифікації процесу [8].

Порівняльний аналіз показав, що застосування інноваційного центрифужного агрегату забезпечує підвищення виходу бджолиного воску до $\approx 90\%$, що на $15\text{--}25\%$ перевищує показники традиційних технологій. Експериментальна верифікація

підтвердила також зниження питомих енерговитрат приблизно на 20 %, що досягається не за рахунок інтенсифікації нагріву, а завдяки перерозподілу енергетичних внесків між тепловою та механічною складовими процесу.

У порівнянні з існуючими публікаціями [1–22], дана робота демонструє цілісний підхід, у якому експериментальні дослідження, фізико-механічне моделювання та статистична оптимізація режимів інтегровані в єдину концепцію, що створює основу для подальшого розвитку енергоефективних технологій витопплення бджолиного воску.

Висновки

У роботі здійснено комплексне фізико-механічне обґрунтування процесу витопплення бджолиного воску в умовах примусового центрифугування з паровим нагрівом. Процес розглянуто як багатостадійну тепломасообмінну та механічну систему, у якій визначальну роль відіграє поєднання фазового переходу, в'язкотекучої фільтрації та дії відцентрових сил.

На основі лабораторних досліджень теплофізичних властивостей воску встановлено критичні температурні режими, за яких відбувається різке зниження в'язкості розплаву та формуються сприятливі умови для його ефективного дренажу з пористої структури мерви. Це дало змогу фізично обґрунтувати вибір температурних меж у математичній моделі процесу.

Запропоновано узагальнену фізико-механічну та математичну модель, яка поєднує рівняння теплопровідності, задачу Стефана для опису фазового переходу та узагальнений закон Дарсі–Форхгеймера з урахуванням додаткового відцентрового напору. Виконаний багатофакторний регресійний аналіз підтвердив домінуючий вплив частоти обертання барабана та тривалості процесу на вихід бджолиного воску, тоді як температура пари має допоміжний характер і повинна обмежуватися з позицій енергоефективності.

Порівняльний аналіз технологій показав, що застосування інноваційного центрифужного агрегату забезпечує підвищення виходу бджолиного воску до ≈ 90 %, що на 15–25 % перевищує показники традиційних методів витопплення. Результати експериментальної верифікації підтвердили стабільність досягнутих показників та зниження питомих енерговитрат приблизно на 20 % у порівнянні з існуючими технологіями.

Отримані результати формують науково обґрунтовану основу для оптимізації режимів роботи та подальшого проєктування промислових центрифужних агрегатів для витопплення бджолиного воску з підвищеними показниками ефективності та енергоощадності.

Список використаних джерел

1. Maksimov N. Study of the operation of a centrifuge to obtain apiary wax from wax raw materials. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 1045. 012100. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1045/1/012100>
2. Stober K., Sanchez A., Wanyiri J., Jiwani S., Wood D. Centrifugal casting of paraffin and beeswax for hybrid rockets. *AIAA Propulsion and Energy Forum*. 2020. <https://doi.org/10.2514/6.2020-3736>
3. Stober K., Sanchez A., Apodaca M.R., Ngetich G.C., Wood D. Optical and thermochemical analysis for paraffin and beeswax centrifugal casting. *AIAA Propulsion and Energy Forum*. 2021. <https://doi.org/10.2514/6.2021-3504>
4. Novikova G., Mikhailova O., Prosviryakova M., Zaitsev P., Shevelev A., Dulepov D. Justification of structural and technological parameters of microwave installations for heat

treatment of wax raw materials. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 604. 012008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/604/1/012008>

5. Zhou Z., Liu X., Li X.Q., Xu Y., Wang Z.Z. Numerical study on Nu number of moving phase interface during wax melting in tube using LBM. *Thermal Science*. 2022. <https://doi.org/10.2298/tsci211226063z>

6. Zhilin S., Bogdanova N., Firsov S.V., Komarov O.N. Prospects of obtaining removable models by pressing wax-like materials under the influence of centrifugal forces. *Metallurgist*. 2023. Vol. 67, No. 8. P. 814–825. <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01567-4>

7. Liu H., Duan J., Li J., Yan H., Wang J., Lin K., Li C. Experimental measurements of wax precipitation using a modified method of simultaneous centrifugation and high-temperature gas chromatography. *Energies*. 2021. Vol. 14, No. 21. 7035. <https://doi.org/10.3390/en14217035>

8. Al-Rajhi M.A.I., El-Serey S., Elsheikha A. Application of solar energy to liquify beeswax. *Turkish Journal of Agricultural Engineering Research*. 2023. <https://doi.org/10.46592/turkager.1343229>

9. Peshin S., George D., Shiri R., Kulinsky L., Madou M. Capillary flow-driven and magnetically actuated multi-use wax valves for controlled sealing and releasing of fluids on centrifugal microfluidic platforms. *Micromachines*. 2022. Vol. 13, No. 2. 303. <https://doi.org/10.3390/mi13020303>

10. Holeta Bee. Evaluation of the quality of beeswax from different sources and rendering methods. *International Journal of Research Studies in Biosciences*. 2019. <https://doi.org/10.20431/2349-0365.0706005>

11. Svečnjak L., Chesson L.A., Gallina A., Maia M., Martinello M., Mutinelli F., Waters T.A. Standard methods for *Apis mellifera* beeswax research. *Journal of Apicultural Research*. 2019. Vol. 58, No. 2. P. 1–108. <https://doi.org/10.1080/00218839.2019.1571556>

12. Bucio A., Moreno-Tovar R., Bucio L., Espinosa-Dávila J., Anguebes-Franceschi F. Characterization of beeswax, candelilla wax and paraffin wax for coating cheeses. *Coatings*. 2021. Vol. 11, No. 3. 261. <https://doi.org/10.3390/coatings11030261>

13. Nozal M.J., Imaz E., Bernal J.L., Nieto J.L., Higes M., Bernal J. An optimized extraction procedure for determining acaricide residues in foundation sheets of beeswax by using gas chromatography–mass spectrometry. *Agronomy*. 2021. Vol. 11, No. 4. 804. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040804>

14. El Agrebi N., Traynor K., Wilmart O., Tosi S., Leinartz L., Danneels E., Saegerman C. Pesticide and veterinary drug residues in Belgian beeswax: Occurrence, toxicity, and risk to honey bees. *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 745. 141036. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141036>

15. Flores J.M., Luna A., Rodríguez Fernández-Alba A., Hernando M. Acceptance by honey bees of wax decontaminated through an extraction process with methanol. *Insects*. 2023. Vol. 14, No. 7. 593. <https://doi.org/10.3390/insects14070593>

16. Colwell M.J., Pernal S., Currie R.W. Treatment of waxborne honey bee viruses using time, temperature, and electron-beam irradiation. *Journal of Economic Entomology*. 2024. Vol. 117, No. 1. P. 34–42. <https://doi.org/10.1093/jee/toad216>

17. Kaboré B.A., Compaoré B., Dahourou L.D. та ін. Prevalence and risk factors of wax moth in bee colonies in Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*. 2021. Vol. 15, No. 4. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v15i4.14>

18. Payne A.N., Walsh E., Rangel J. Initial exposure of wax foundation to agrochemicals causes negligible effects on honey bee colonies. *Insects*. 2019. Vol. 10, No. 1. 19. <https://doi.org/10.3390/insects10010019>

19. Şchiopu E., Popa R., Pecingină I. Study on setting up a beekeeping farm and valorisation of products obtained. *Journal of Research and Innovation for Sustainable Society*. 2021. <https://doi.org/10.33727/jriss.2021.2.6:53-62>
20. Alkassab A., Thorbahn D., Frommberger M., Bischoff G., Pistorius J. Effect of contamination and adulteration of wax foundations on brood development of honeybees. *Apidologie*. 2020. Vol. 51. P. 642–654. <https://doi.org/10.1007/s13592-020-00749-2>
21. Сиромятников Ю.М., Сиромятніков П.С., Харченко О.М., Бєлих О.В. Огляд сучасних підходів до вдосконалення технологій витопплення бджолиного воску: технічні рішення та інженерні перспективи. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2025. № 26. С. 45–88. <https://doi.org/10.64165/journal-ts.2025.26.45-88>
22. Сиромятников Ю.М., Шабля В.П., Харченко О.М., Бєлих О.В. Біологічний контроль вароозу за допомогою мікробних препаратів: інноваційні підходи в екологічному бджільництві. *Свинарство і агропромислове виробництво*. 2024. № 4(82). С. 80–93. [https://doi.org/10.37143/2786-7730-2024-4\(82\)6](https://doi.org/10.37143/2786-7730-2024-4(82)6)
23. Шабля В.П., Сиромятников Ю.М. Відновлення напрямку бджільництва в Харківському національному технічному університеті сільського господарства ім. Петра Василенка. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*. 2021. Вип. 211. С. 106–108.

References

1. Maksimov, N. Study of the operation of a centrifuge to obtain apiary wax from wax raw materials. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022, 1045, 012100. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1045/1/012100>
2. Stober, K.; Sanchez, A.; Wanyiri, J.; Jiwani, S.; Wood, D. Centrifugal casting of paraffin and beeswax for hybrid rockets. *AIAA Propulsion and Energy Forum*. 2020. <https://doi.org/10.2514/6.2020-3736>
3. Stober, K.; Sanchez, A.; Apodaca, M.R.; Ngetich, G.C.; Wood, D. Optical and thermochemical analysis for paraffin and beeswax centrifugal casting. *AIAA Propulsion and Energy Forum*. 2021. <https://doi.org/10.2514/6.2021-3504>
4. Novikova, G.; Mikhailova, O.; Prosviryakova, M.; Zaitsev, P.; Shevelev, A.; Dulepov, D. Justification of structural and technological parameters of microwave installations for heat treatment of wax raw materials. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020, 604, 012008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/604/1/012008>
5. Zhou, Z.; Liu, X.; Li, X.Q.; Xu, Y.; Wang, Z.Z. Numerical study on Nu number of moving phase interface during wax melting in tube using LBM. *Thermal Science*. 2022. <https://doi.org/10.2298/tsci211226063z>
6. Zhilin, S.; Bogdanova, N.; Firsov, S.V.; Komarov, O.N. Prospects of obtaining removable models by pressing wax-like materials under the influence of centrifugal forces. *Metallurgist*. 2023, 67(8), 814–825. <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01567-4>
7. Liu, H.; Duan, J.; Li, J.; Yan, H.; Wang, J.; Lin, K.; Li, C. Experimental measurements of wax precipitation using a modified method of simultaneous centrifugation and high-temperature gas chromatography. *Energies*. 2021, 14(21), 7035. <https://doi.org/10.3390/en14217035>
8. Al-Rajhi, M.A.I.; El-Serey, S.; Elsheikha, A. Application of solar energy to liquify beeswax. *Turkish Journal of Agricultural Engineering Research*. 2023. <https://doi.org/10.46592/turkager.1343229>
9. Peshin, S.; George, D.; Shiri, R.; Kulinsky, L.; Madou, M. Capillary flow-driven and magnetically actuated multi-use wax valves for controlled sealing and releasing of fluids on

- centrifugal microfluidic platforms. *Micromachines*. 2022, 13(2), 303. <https://doi.org/10.3390/mi13020303>
10. Holeta Bee. Evaluation of the quality of beeswax from different sources and rendering methods. *International Journal of Research Studies in Biosciences*. 2019. <https://doi.org/10.20431/2349-0365.0706005>
11. Svečnjak, L.; Chesson, L.A.; Gallina, A.; Maia, M.; Martinello, M.; Mutinelli, F.; Waters, T.A. Standard methods for *Apis mellifera* beeswax research. *Journal of Apicultural Research*. 2019, 58(2), 1–108. <https://doi.org/10.1080/00218839.2019.1571556>
12. Bucio, A.; Moreno-Tovar, R.; Bucio, L.; Espinosa-Dávila, J.; Anguebes-Franceschi, F. Characterization of beeswax, candelilla wax and paraffin wax for coating cheeses. *Coatings*. 2021, 11(3), 261. <https://doi.org/10.3390/coatings11030261>
13. Nozal, M.J.; Imaz, E.; Bernal, J.L.; Nieto, J.L.; Higes, M.; Bernal, J. An optimized extraction procedure for determining acaricide residues in foundation sheets of beeswax by using gas chromatography–mass spectrometry. *Agronomy*. 2021, 11(4), 804. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040804>
14. El Agrebi, N.; Traynor, K.; Wilmart, O.; Tosi, S.; Leinartz, L.; Danneels, E.; Saegerman, C. Pesticide and veterinary drug residues in Belgian beeswax: Occurrence, toxicity, and risk to honey bees. *Science of the Total Environment*. 2020, 745, 141036. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141036>
15. Flores, J.M.; Luna, A.; Rodríguez Fernández-Alba, A.; Hernando, M. Acceptance by honey bees of wax decontaminated through an extraction process with methanol. *Insects*. 2023, 14(7), 593. <https://doi.org/10.3390/insects14070593>
16. Colwell, M.J.; Pernal, S.; Currie, R.W. Treatment of waxborne honey bee viruses using time, temperature, and electron-beam irradiation. *Journal of Economic Entomology*. 2024, 117(1), 34–42. <https://doi.org/10.1093/jee/toad216>
17. Kaboré, B.A.; Compaoré, B.; Dahourou, L.D.; et al. Prevalence and risk factors of wax moth in bee colonies in Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*. 2021, 15(4). <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v15i4.14>
18. Payne, A.N.; Walsh, E.; Rangel, J. Initial exposure of wax foundation to agrochemicals causes negligible effects on honey bee colonies. *Insects*. 2019, 10(1), 19. <https://doi.org/10.3390/insects10010019>
19. Şchiopu, E.; Popa, R.; Pecingină, I. Study on setting up a beekeeping farm and valorisation of products obtained. *Journal of Research and Innovation for Sustainable Society*. 2021. <https://doi.org/10.33727/jriss.2021.2.6:53-62>
20. Alkassab, A.; Thorbahn, D.; Frommberger, M.; Bischoff, G.; Pistorius, J. Effect of contamination and adulteration of wax foundations on brood development of honeybees. *Apidologie*. 2020, 51, 642–654. <https://doi.org/10.1007/s13592-020-00749-2>
21. Syromiatnykov, Y.M.; Syromiatnikov, P.S.; Kharchenko, O.M.; Bielykh, O.V. Review of modern approaches to improving beeswax rendering technologies: Technical solutions and engineering prospects. *Technical Service of Agriculture, Forestry and Transport Complexes*. 2025, 26, 45–88. <https://doi.org/10.64165/journal-ts.2025.26.45-88>
22. Syromiatnykov, Y.M.; Shablya, V.P.; Kharchenko, O.M.; Bielykh, O.V. Biological control of varroosis using microbial preparations: Innovative approaches in ecological beekeeping. *Pig Breeding and Agro-Industrial Production*. 2024, 4(82), 80–93. [https://doi.org/10.37143/2786-7730-2024-4\(82\)6](https://doi.org/10.37143/2786-7730-2024-4(82)6)
23. Shablya, V.P.; Syromiatnykov, Y.M. Restoration of the beekeeping direction at the Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Petro Vasylenko. *Bulletin of the Kharkiv National Technical University of Agriculture*. 2021, 211, 106–108.

Шевченко С. А.,
Суска А. А.,
Скрипник О. С.,
Погорілий В. К.

Державний
біотехнологічний
університет,
м. Харків, Україна

E-mail:

serg.shevchen@btu.kharkiv.ua

МЕТОДИКА НАВЧАННЯ ПАРАМЕТРИЧНОМУ 3D-МОДЕЛЮВАННЮ МЕБЛІВ

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-27-194>

УДК 378.016:684.4:004.92

Шевченко С.А., Суска А.А., Скрипник О.С., Погорілий В.К. Методика навчання параметричному 3D-моделюванню меблів

Анотація. Об'єктом дослідження є методика навчання студентів 3D-моделюванню меблевих виробів із використанням САПР загального призначення.

Метою дослідження є удосконалення методики навчання студентів технічних і художніх спеціальностей параметричному тривимірному моделюванню меблевих виробів із використанням САПР загального призначення. При цьому важливим є належний вибір меблевого виробу, на прикладі якого розпочнеться навчання студентів використанню тривимірного параметричного САПР.

Предметом дослідження є визначення вимог до меблевого виробу для первинного навчання студентів, послідовність побудови його 3D моделі та напрямки формування варіантів завдання та подальшого розвитку завдання з переходом від індивідуальної до колективно-групової роботи.

Дослідження здійснено на основі узагальнення досвіду, отриманого при реалізації колективного проєкту з розробки шкільних меблів студентами, які навчаються за освітньою програмою «Деревообробні та меблеві технології» на першому (бакалаврському) рівні вищої освіти в Державному біотехнологічному університеті, та з урахуванням результатів аналізу літературних джерел.

Обґрунтовано доцільність використання учнівських письмових столів і стільців як навчальних об'єктів для первинного навчання студентів параметричному 3D-моделюванню.

Відому чотириетапну методику навчання (яка полягає в створенні 3D-моделі на основі детальних креслень складових частин, модифікації частин, модифікації розмірів і розширення лінійки продуктів) пропонується доповнити наступним етапом - створенням конструктивно відмінних виробів подібного функціонального призначення або колективно-груповому завданні з розробляння інших меблів для (доцільно, для облаштування того самого приміщення), коли студенти самостійно утворюють групи з 2-3 студентів, обирають та моделюють певні вироби для створення функціонально завершеного меблевого набору, узгоджуючи між собою основні конструктивно-технологічні та естетичні рішення.

Отримані результати можуть бути використані при оновленні освітніх програм з меблевого проєктування, дизайну інтер'єру та деревообробних технологій.

Ключові слова: меблі, модель, САПР, параметризація, навчання, методика, формоутворення.

*Shevchenko S.A., Suska A.A., Skrypyk O.S., Pohorilyi V.K. **Technique for Teaching Parametric 3D Furniture Modelling***

The object of the study is the technique for teaching students 3D modelling of furniture products using general-purpose CAD systems.

The aim of the research is to improve the technique for teaching students of technical and designer specialisations parametric three-dimensional modelling of furniture products using general-purpose CAD systems. In this context, particular importance is attached to the appropriate selection of a furniture product that serves as the initial example for introducing students to the use of three-dimensional parametric CAD.

The subject of the study involves defining the requirements for a furniture product intended for initial student training, determining the sequence of constructing its 3D model, and identifying approaches to developing task variants and the subsequent extension of assignments through a transition from individual to collective group work.

The research is based on the generalisation of experience gained during the implementation of a collective group project on the development of school furniture by students enrolled in the educational programme Woodworking and Furniture Technologies at the bachelor's level of higher education at the State Biotechnological University (Kharkiv, Ukraine), as well as on the results of an analysis of relevant literature sources.

The feasibility of using pupils' desks and chairs as educational objects for the initial training of students in parametric 3D modelling has been substantiated.

It is proposed to supplement the well-known four-stage teaching methodology (consisting of creating a 3D model based on detailed drawings of component parts, modifying parts, varying dimensions, and expanding the product range) with an additional stage. This stage involves the creation of structurally distinct products with similar functional purposes, or the completion of a collective group assignment focused on designing other items of furniture (preferably for furnishing the same interior space). In this approach, students independently form groups of two to three members, select and model specific furniture items, and collaboratively develop a functionally complete furniture set while coordinating key structural, technological, and aesthetic solutions.

The obtained results may be applied in updating educational programmes in furniture design, interior design, and wood processing technologies.

Keywords: *furniture, model, CAD, parametrisation, education, methodology, form generation.*

Постановка проблеми

Нині вміння проектувати вироби в тривимірних параметричних САПР стало обов'язковою компетенцією, без володіння якою неможливо уявити професійну діяльність фахівців з меблевих технологій, що обумовлюється синергетичним ефектом від впровадження CAD/CAM та інших цифрових технологій.

У багатьох освітніх програмах навчання параметричному дизайну обмежується лише етапом створення 3D-моделі, не переходячи до стадії фізичного втілення [9, 10]. Це призводить до того, що студенти часто не усвідомлюють конструктивних вад своїх проєктів, будучи «засліпленими» якісною цифровою картинкою, яка може приховувати функціональну невідповідність виробу.

Окрім того, існує брак досвіду «цифрового ремесла», яке потребує наскрізного процесу «від дизайну до виробництва» (CAD-CAM), де знання матеріалів і конструкцій мають бути інтегровані безпосередньо в процес моделювання [3]. Студенти часто починають проєктування без достатнього розуміння логіки побудови навантажених структур, що призводить до помилок, які виявляються лише на етапі прототипування [5].

Також відмітимо, що параметричне моделювання вимагає одночасного володіння навичками дизайну та геометричних трансформацій [1, 4, 7]. Існує потреба в розробці поетапних моделей навчання, які б давали змогу новачкам поступово переходити від простої модифікації частин і розмірів до створення складних обчислювальних моделей та колекцій виробів.

Постійно виникає потреба адаптації до вимог індустрії. Швидкий розвиток САПР вимагає постійного оновлення методичного забезпечення, щоб підготовка майбутніх фахівців відповідала сучасним стандартам цифровізації та автоматизації виробництва [7].

Отже, основна проблема полягає в створенні такої методики, яка б забезпечувала єдність художнього та технічного підходів, дозволяючи студенту не просто малювати форму, а створювати «інтелектуальну модель», здатну до адаптації та придатну до реального виготовлення. Це призводить до потреби здійснення досліджень спрямованих на вдосконалення методик навчання студентів 3D-проектуванню.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Оскільки ефективність навчання студентів використанню параметричних САПР значною мірою залежить від методики навчання, то здійснюються дослідження, спрямовані на вдосконалення зазначених методик з урахуванням особливостей певних спеціальностей. Тож у даному аналізі будемо брати до уваги розробки з методик навчання студентів не лише меблевим технологіям, а також й іншим спеціальностям, для яких є важливим поєднання інженерних і дизайнерських навичок - дизайну інтер'єру, архітектури тощо.

Нині можна спостерігати інтенсивну трансформацію методик навчання проектуванню меблів, де акцент зміщується з традиційного креслення до параметричної парадигми та обчислювального проектування. Сучасні підходи прагнуть перевести дизайн із суб'єктивної площини в раціональну, базуючись на взаємозв'язках елементів та принципах будови природних структур. Отже, навчання сьогодні базується на тривимірній моделі, яка забезпечує інтуїтивне розуміння об'єму та деталей дизайну, значно підвищуючи ефективність навчальної роботи.

Результати огляду джерел узагальнено в таблиці 1, де наведено основні характеристики методик навчання параметричному моделюванню та проектуванню меблів та інших виробів.

Важливим аспектом є формування в майбутніх фахівців здатності створювати «інтелектуальні моделі», які автоматично адаптуються до змін параметрів та забезпечують наскрізний процес проектування «від дизайну до виробництва». Робота фокусується на вдосконаленні поетапної моделі навчання, що включає шлях від створення моделі за заданими розмірами деталей до варіацій розмірів і форм меблів.

Формулювання мети досліджень

Отже, огляд джерел виявив потребу вдосконалення методики навчання студентів тривимірному проектуванню меблів.

Зважаючи на суттєві відмінності спеціалізованих САПР, переважно орієнтованих на моделювання корпусних меблів (наприклад, 3D-Constructor, Астра Конструктор Меблів, PRO100) та САПР загального призначення (наприклад, FreeCAD, Fusion 360, SketchUp), у даному дослідженні зосередимося на удосконаленні методики навчання тривимірному моделюванню меблів із використанням САПР загального призначення.

Таблиця 1

Характеристика методик навчання параметричному моделюванню та проєктуванню меблів та інших виробів

Назва методики	Основні характеристики та етапи навчання
Метод модифікації та розширення лінійки (для початківців) [1]	Навчання відбувається в чотири етапи: 1) створення 3D-моделі на основі детальних 2D-креслень складових частин 2) модифікація частин; 3) модифікація розмірів; 4) розширення лінійки продуктів (створення колекції). У якості виробів, на прикладах яких здійснюється навчання, використовуються різноманітні стільці, журнальні столики, лава, книжкова шафа, письмовий стіл.
Методика «Навчання через дію» (Learning by doing) та VPL [2]	Базується на принципах архітектурної студії та груповій роботі. Етапи: вибір об'єкта (наприклад, параметрична лава), цифрові ескізи (використання Rhino, Grasshopper, 3ds Max), вибір моделі для виготовлення та реальне виробництво. Акцент на візуальному програмуванні (VPL).
Методика цифрового ремесла та експериментального навчання [3]	Використовує цикл Колба (конкретний досвід, спостереження, концептуалізація, тестування). Навчання охоплює повний цикл від дизайну до виробництва (CAD-CAM), включаючи створення масштабних прототипів (1:10 або 1:5) та фінальне виготовлення на верстатах із ЧПК.
Оптимізація навчання на основі 3D-симуляції [4]	Передбачає стратегічну та структурну оптимізацію навчального плану. Використовує проєктноорієнтоване навчання на основі реальних корпоративних кейсів та тривимірного комп'ютерного моделювання для інтуїтивного розуміння об'єму та простору.
Метод наскрізного прототипування (1:1) [5]	Наголошує на важливості фізичного втілення цифрових моделей у реальному масштабі. Студенти проходять шлях від 3D-CAD візуалізацій до створення повнорозмірних прототипів, які піддаються зовнішній експертній оцінці та публічній апробації.
Методика імерсивного навчання (VR та AR) [6]	Інтеграція віртуальної (VR) та доповненої (AR) реальності в процес проєктування. Дозволяє студентам «входити» у віртуальне середовище, маніпулювати об'єктами в масштабі 1:1, краще розуміти ергономіку та пропорції, а також швидко кастомізувати проєкти.
Поетапна модель засвоєння спеціалізованих САПР [7]	Методика навчання в САПР «Астра Конструктор Меблів». Включає: 1) ознайомлення з інтерфейсом; 2) моделювання виробів від простих до складних; 3) автоматизоване створення технічної документації (креслення, карти розкрою); 4) виконання індивідуального проєкту.
Метод автоматизованого конструювання як професійної послуги [8]	Проєктування меблів у середовищі PRO100. Навчання базується на моделі цінності послуги (якість та час). Використовуються різні підходи до організації роботи: «офіс/майстерня», «покупець як робоча сила», «гнучка робоча сила».
Параметрична парадигма та обчислювальне проєктування [9]	Фокусується на принципах побудови природних структур та раціоналізації дизайну через взаємозв'язки елементів. Передбачає занурення в концепцію «віртуальної реальності» та використання алгоритмічних методів формоутворення.

Метою дослідження є удосконалення методики навчання студентів технічних і художніх спеціальностей параметричному тривимірному моделюванню меблевих виробів із використанням САПР загального призначення. При цьому важливим є належний вибору меблевого виробу, на прикладі якого розпочнеться навчання студентів використанню тривимірному параметричного САПР.

Об'єктом дослідження є методика навчання студентів 3D-моделюванню меблевих виробів із використанням САПР загального призначення.

Предметом дослідження є визначення вимог до меблевого виробу для первинного навчання студентів, послідовність побудови його 3D моделі та напрямки формування варіантів завдання та подальшого розвитку завдання з переходом від індивідуальної до колективно-групової роботи.

Методологія дослідження

Дослідження здійснено на основі узагальнення досвіду, отриманого при реалізації колективно-групового проєкту з розробки шкільних меблів студентами, які навчаються за освітньою програмою «Деревообробні та меблеві технології» на першому (бакалаврському) рівні вищої освіти в Державному біотехнологічному університеті [11], та з урахуванням результатів аналізу літературних джерел [1-10].

Задачі дослідження вирішувалися в наступній послідовності:

- визначення вимог до меблевого виробу, на прикладі якого буде здійснюватись первинне навчання студентів параметричному 3D-моделюванню,
- вибір меблевого виробу відповідно зазначених вимог,
- обґрунтування послідовності моделювання меблевого виробу, виходячи зі складності методів формоутворення, використовуваних для його деталей;
- визначення напрямків подальших робіт.

Результати досліджень

Навчання конструюванню меблів, яке є міждисциплінарним за своєю суттю, супроводжується набуттям навичок урахування багатьох взаємопов'язаних аспектів, що стосуються ергономіки, естетики, міцності, надійності, технологій виготовлення, санітарно-гігієнічних вимог, економіки тощо. Після концептуального вирішення завдань, притаманних зазначеним аспектам меблів (вибору структури, розмірів виробу, форми деталей, матеріалів, фурнітури та її розташування) виконується побудова тривимірної моделі меблів. Окремі аспекти, починаючи від зовнішнього вигляду та до розрахунків міцності, доцільно уточнювати за допомогою 3D-моделі виробу. Цей етап є доволі трудомістким і потребує особливої уважності, оскільки від належної побудови тривимірної моделі значною мірою залежить техніко-економічні показники та, зрештою, комерційний успіх певної моделі меблів.

Ефективність навчання студентів тривимірному проєктуванню меблів в універсальний САПР значною мірою залежить від вибору прикладів для такого навчання. На нашу думку, доцільно розпочинати навчання саме з деталей меблевих виробів, минаючи етап побудови абстрактних графічних примітивів, оскільки це буде підтримувати інтерес студентів до освоєння спеціальності.

Для того щоб обґрунтувати вибір прикладів меблів для первинного навчання 3D-моделювання, почнемо з визначення вимог до них.

- меблі повинні містити елементи найрізноманітнішої форми для навчання типовим способам формоутворення деталей;
- дуже бажано, щоб меблі мали ажурну конструкцію, яка добре проглядається в різних ракурсах (отже, небажаною є наявність таких частин, як дверцята, шухляди тощо);

- можливість виконання в різноманітних стилях (доцільно, як варіант, якщо меблі матимуть дещо «футуристичний» вигляд, що стимулює креативні здібності студентів);
- бажано, щоб меблям була притаманна можливість численних модифікацій;
- для закріплення отриманих навичок бажано, щоб меблі містили по декілька деталей, модельованих кожним з типових способів формоутворення.

Порівняння різноманітних меблевих виробів із зазначеними вимогами призводить до висновку, що одним з кращих прикладів для первинного навчання 3D-моделюванню є комплект з учнівського письмового столу та стільця. Цей вибір є вдалим ще й тому, що у студентів ще свіжі спогади про школу і, отже, вони добре пам'ятають переваги та недоліки шкільних меблів. Також, на основі знань і компетенцій, набутих за декілька семестрів навчання в університеті, у них уже можуть виникати певні обґрунтовані міркування щодо їх удосконалення.

До того ж, багато хто зі студентів мають молодших братів чи сестер і спостерігаючи за тим як вони користуються шкільними меблями (які є в багатьох сім'ях є вдома внаслідок того, що в багатьох школах заняття відбуваються онлайн багато років поспіль), намагаються думати над певними вдосконаленими конструкціями, вбачаючи в цьому можливість принести користь майбутнім поколінням школярів і відчуючи свою причетність до вирішення важливої соціальної задачі зі створення умов, сприятливих для навчання школярів та відчуючи - все це автори статті спостерігали під час менторства студентським проектом, який здійснювався в ДБТУ [11]. Узагальнюючи, відмітимо, що використання реалістичних прикладів підвищує мотивацію студентів і сприяє формуванню відповідального ставлення до результатів проектної діяльності.

Перевагою зазначеного комплекту меблів є також можливість численних модифікацій - одномісне чи двомісне виконання; наявність механізму регулювання кута нахилу стільниці; різноманітні профілі елементів каркасу; оснащення коліщатами, підставками, поличкою чи ємністю для зберігання речей тощо, що зручно використовувати для ускладнення завдань і формування їх варіантів.

Що стосується більш детального вибору, то для початкового навчання роботі в САПР зручними є моделі, які мають фіксовані розміри. У подальшому можуть використовуватися моделі столів і стільців, регульовані по висоті.

Далі визначимо послідовність вивчення способів формоутворення та моделювання окремих деталей учнівського письмового столу та стільця, враховуючи складності виконання операцій формоутворення (див. табл. 2). Як приклад такого моделювання, на рис. 1 наведено робочий скриншот учнівського письмового столу та стільця.

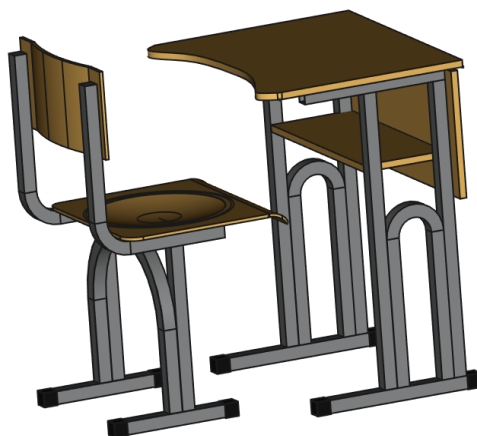


Рис. 1 – Робочий скриншот учнівського письмового столу та стільця

Окрему увагу доцільно приділити редагуванню побудованих деталей, це редагування може мати два аспекти - зміна розмірів деталей (наприклад, з метою побудови параметричного ряду виробів) або до опрацювання подробиць реалізації деталі які неможливо чи складно реалізувати однією операцією формоутворення. Наприклад, може йтися про фаски або скруглення, вирізання наскрізних чи глухих отворів тощо.

Таблиця 2

Рекомендована послідовність побудови окремих деталей учнівського письмового столу та стільця

№	Операція формоутворення	Приклади використання
1	Видавлювання ескізу	Стільниця, поличка, передня панель.
2	Вирізання заглиблень за формою ескізу	Отвори для фурнітури, заглибина для дрібних канцтоварів
3	Протягування ескізу перетину деталі вздовж траєкторії	Гнуті елементи каркасів
4	Обертання ескізу перетину деталі навколо вісі	Формування заглибини сидіння, заглушки труб

При побудові моделі меблевого виробу доцільно використовувати наступну універсальну послідовність дій, методично орієнтовану на відповідність реальному процесу збирання, але придатну для використання в навчанні параметричному 3D-моделюванню незалежно від типу виробу та конкретної САПР.

1 крок - Формування базової системи координат і опорних елементів. Визначається базова система координат виробу та фіксуються головні опорні елементи (несучі стійки, рама, опорні площини). Саме ці деталі задають просторову стабільність моделі та слугують базою для подальшого накладання геометричних і параметричних обмежень.

2 крок - Складання несучої конструкції. Виконується поєднання основних силових елементів у єдину конструктивну схему. На цьому етапі задаються базові співвідношення паралельності, перпендикулярності, співвісності та фіксованих відстаней, що визначають жорсткість і геометричну незмінність виробу.

3 крок - Приєднання формоутворювальних елементів. До несучої конструкції приєднуються елементи, які формують геометричний образ і функціональну поверхню виробу (стілниця, сидіння, спинки, полиці, панелі). Їхнє розташування задається з урахуванням ергономічних та конструктивних вимог.

4 крок - Інтеграція з'єднувальних і допоміжних деталей. Додаються елементи з'єднання (фурнітура, кріпильні вузли, вставки, заглушки), які забезпечують конструктивну цілісність моделі. На цьому етапі доцільно перевіряти монтажну доступність і логіку складання.

5 крок - Параметричне узгодження складальної моделі. Виконується встановлення ключових параметрів і залежностей між деталями, що забезпечують коректну зміну розмірів виробу без порушення конструктивної логіки та розташування елементів.

6 крок - Перевірка коректності складання та функціональності. Аналізується відсутність геометричних конфліктів, коректність накладених обмежень, можливість збирання та розбирання, відповідність моделі початковим функціональним вимогам.

7 крок - Підготовка до технологічної та документаційної реалізації. На завершальному етапі модель адаптується до автоматизованого створення креслень, схем складання, специфікацій та подальшої інтеграції в CAD-CAM.

Хоча сучасне виробництво меблів є безпаперовим, а оброблення деталей часто здійснюється з використанням оброблювальних центрів з ЧПК, доцільно приділити увагу автоматизованому створенню креслень деталей з тривимірної моделі, а також побудові схеми збирання меблів, що є важливим з огляду на звичне постачання в розібраному вигляді та збирання покупцем безпосередньо на місці експлуатації. Доцільно також приділити увагу й схемі розбирання меблів, зважаючи на потреби переїздів, рециклінгу тощо.

Загалом, доцільно дотримуватись послідовності навчання, запропонованої в [1] (створення 3D-моделі на основі детальних креслень елементів, модифікація деталей, змінювання розмірів виробу, розширення лінійки виробів (створення колекції). У подальшому, після засвоєння зазначених вище типових способів формоутворення, може відбуватися робота в групах подібно тому, як описано в [4]. При цьому, у розвиток послідовності навчання, запропонованої в [1], доцільним може бути завдання зі створенням моделі конструктивно відмінних виробів подібного функціонального призначення (наприклад, продовжуючи тему учнівських меблів, це може бути стіл для роботи стоячи [10]) або колективно-групове завдання з розробки інших меблів (доцільно, для облаштування того самого приміщення), коли студенти самостійно утворюють групи з 2-3 студентів, обирають та моделюють певні вироби для створення функціонально завершеного набору, узгоджуючи між собою основні конструктивно-технологічні та естетичні рішення (наприклад, у проєкті [11] було змодельовано, а потім і виготовлено (у співпраці зі стейкхолдерами) набір меблів для шкільного класу). Звісно, виготовлення меблів за розробленими моделями дуже позитивно вплинуло на впевненість студентів у власних спроможностях.

Висновки

Обґрунтовано актуальність удосконалення методики навчання параметричного 3D-моделювання меблевих виробів з урахуванням сучасних тенденцій цифровізації меблевого виробництва та вимог ринку праці. Показано, що ефективна підготовка майбутніх фахівців неможлива без інтеграції художньо-дизайнерських і інженерно-технологічних підходів у межах єдиного освітнього процесу.

На основі узагальнення результатів аналізу літературних джерел і досвіду виконання колективно-групового проєкту з розробки шкільних меблів студентами, які навчаються на освітній програмі «Деревообробні та меблеві технології» в Державному біотехнологічному університеті, отримано наступні результати.

1. Визначено вимоги до меблевих виробів, на прикладі яких доцільно здійснювати первинне навчання студентів параметричному 3D-моделюванню.

2. Обґрунтовано доцільність використання учнівських письмових столів і стільців як навчальних об'єктів для первинного навчання студентів параметричному 3D-моделюванню, зважаючи, зокрема, на наступні фактори: наявність в них елементів найрізноманітнішої форми, що зручно для навчання типовим способам формоутворення деталей у рамках однієї розробки; ажурність конструкції, яка добре проглядається в різних ракурсах; можливість виконання в різноманітних стилях і численних модифікаціях; наявність декількох деталей, модельованих кожним з типових способів формоутворення. Рекомендовано послідовність моделювання окремих деталей зазначених виробів з огляду на складність виконання операцій формоутворення.

3. Відому чотириетапну методику навчання (яка полягає в створення 3D-моделі на основі детальних 2D-креслень складових частин, модифікації частин, модифікація розмірів і розширення лінійки продуктів (створення колекції)) пропонується доповнити наступним етапом, який може полягати в створенні моделей конструктивно відмінних виробів подібного функціонального призначення або колективно-груповому

розроблянні інших меблів (доцільно, для облаштування того самого приміщення), коли студенти самостійно утворюють групи з 2-3 студентів, обирають та моделюють певні вироби для створення функціонально завершеного меблевого набору, узгоджуючи між собою основні конструктивно-технологічні та естетичні рішення.

4. Показано доцільність побудови моделі меблевого виробу в послідовності, відповідній реальному процесу збирання.

Показано, що орієнтація навчання на САПР загального призначення створює передумови для гнучкої адаптації випускників до різних типів меблевих виробів і матеріалів, а також полегшує інтеграцію CAD–CAM підходів у підготовку фахівців. Отримані результати можуть бути використані при оновленні освітніх програм з меблевого проєктування, дизайну інтер'єру та деревообробних технологій, а подальші дослідження доцільно спрямувати на адаптацію запропонованої методики до навчання проєктуванню корпусних меблів із застосуванням спеціалізованих САПР.

Список використаних джерел

1. Hartanto S. Furniture design method for novice learner. *International Conference on Art, Design, Education and Cultural Studies (ICADECS)*. Malang : Art and Design Department, Faculty of Letters, Universitas Negeri Malang, 2022. P. 22–33. URL: <https://conference.um.ac.id/index.php/icadecs/article/view/7930> (дата звернення: 15.12.2025).
2. Agirbas A. A teaching methodology for parametric design: a case study with parametric bench. *Proceedings of the XXIV International Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics (SIGraDi)*. Medellín, 2020. P. 56–85. URL: <https://pdf.blucher.com.br/designproceedings/sigradi2020/99.pdf> (дата звернення: 11.12.2025).
3. Symeonidou I. Furniture design with digital media: a participative educational experiment of digital craftsmanship. *36th eCAADe Conference*. URL: 10.52842/conf.ecaade.2018.2.417 (дата звернення: 14.12.2025).
4. Yang J. Teaching optimization of interior design based on three-dimensional computer-aided simulation. *Computer-Aided Design & Applications*. 2021. Vol. 18, suppl. 4. P. 72–83. URL: <https://doi.org/10.14733/cadaps.2021.S4.72-83>
5. de Vere I. Using furniture design to convey a rigorous design education process. *Journal of Design Research*. 2011. Vol. 9, no. 2. P. 146–158.
6. Lambri A. Transformative design: virtual reality and augmented reality in furniture design – a comprehensive analysis of an immersive learning experience. *The Barcelona Conference on Education 2024: Official Conference Proceedings*. Barcelona, 2024. URL: https://papers.iafor.org/wp-content/uploads/papers/bce2024/BCE2024_85392.pdf (дата звернення: 15.12.2025).
7. Марченко С. С. Використання САПР «Астра Конструктор Меблів» у підготовці майбутніх учителів технологій. *Наукові інновації та передові технології*. 2025. № 11(51). С. 2592–2603. URL: [https://doi.org/10.52058/2786-5274-2025-11\(51\)-2592-2603](https://doi.org/10.52058/2786-5274-2025-11(51)-2592-2603)
8. Сокотов Ю. Комп'ютерне конструювання меблевих виробів як професійна послуга майбутнього деревообробника. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: Педагогіка*. 2019. № 2. С. 142–151. URL: <https://doi.org/10.25128/2415-3605.19.2.18>
9. Антоненко І. В. Особливості використання параметричного моделювання у дизайн-проєктуванні. *Innovations and prospects in modern science : proceedings of the XI International scientific and practical conference*. Stockholm : SSPG Publish, 2023. P. 290–295. URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/25007> (дата звернення: 04.12.2025).

10. Nastja Podrekar Loredan, Eva Prelovšek Niemelä, Nejc Šarabon. Classroom Interior Design: Wooden Furniture Prototype with Feedback from Students and Teachers. *Buildings*. 2024. 14(7). 2193. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings14072193>

11. Робочий візит заступника керівника Офісу Президента України та делегації ХОВА до ДБТУ. *Державний біотехнологічний університет*: офіц. сайт. URL: <https://biotechuniv.edu.ua/novini/robochyy-vizyt-zastupnyka-kerivnyka-ofisu-prezydenta-ukrayiny-ta-delegatsiyi-hova> (дата звернення: 07.12.2025).

References

1. Hartanto S. Furniture design method for novice learner. *International Conference on Art, Design, Education and Cultural Studies (ICADECS)*. Malang : Art and Design Department, Faculty of Letters, Universitas Negeri Malang, 2022. P. 22–33. URL: <https://conference.um.ac.id/index.php/icadecs/article/view/7930> (access date: 15.12.2025).

2. Agirbas A. A teaching methodology for parametric design: a case study with parametric bench. *Proceedings of the XXIV International Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics (SIGraDi)*. Medellín, 2020. P. 56–85. URL: <https://pdf.blucher.com.br/designproceedings/sigradi2020/99.pdf> (access date: 11.12.2025).

3. Symeonidou I. Furniture design with digital media: a participative educational experiment of digital craftsmanship. *36th eCAADe Conference*. URL: 10.52842/conf.ecaade.2018.2.417 (access date: 14.12.2025).

4. Yang J. Teaching optimization of interior design based on three-dimensional computer-aided simulation. *Computer-Aided Design & Applications*. 2021. Vol. 18, suppl. 4. P. 72–83. URL: <https://doi.org/10.14733/cadaps.2021.S4.72-83>

5. de Vere I. Using furniture design to convey a rigorous design education process. *Journal of Design Research*. 2011. Vol. 9, no. 2. P. 146–158.

6. Lambri A. Transformative design: virtual reality and augmented reality in furniture design – a comprehensive analysis of an immersive learning experience. *The Barcelona Conference on Education 2024: Official Conference Proceedings*. Barcelona, 2024. URL: https://papers.iafor.org/wp-content/uploads/papers/bce2024/BCE2024_85392.pdf (access date: 15.12.2025).

7. Marchenko S. S. Using CAD «Astra Furniture Designer» in Training Future Technology Teachers. *Scientific innovations and advanced technologies*. P. 2592–2603. URL: [https://doi.org/10.52058/2786-5274-2025-11\(51\)-2592-2603](https://doi.org/10.52058/2786-5274-2025-11(51)-2592-2603) (In Ukrainian).

8. Sokotov Yu. Computer Design of Furniture Products as a Professional Service of a Future Woodworker. *The Scientific Issues of Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University. Series: pedagogy*. 2019. № 2. C. 142–151. URL: <https://doi.org/10.25128/2415-3605.19.2.18> (In Ukrainian).

9. Antonenko I. V. Features of using parametric modeling in design. *Innovations and prospects in modern science : proceedings of the XI International scientific and practical conference*. Stockholm : SSPG Publish, 2023. P. 290–295. URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/25007> (access date: 14.12.2025) (In Ukrainian).

10. Nastja Podrekar Loredan, Eva Prelovšek Niemelä, Nejc Šarabon. Classroom Interior Design: Wooden Furniture Prototype with Feedback from Students and Teachers. *Buildings*. 2024. 14(7). 2193. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings14072193>

11. Working visit of the Deputy Head of the Office of the President of Ukraine and the delegation of the KhRMA to the SBTU. *State Biotechnological University* : official website. URL: <https://biotechuniv.edu.ua/novini/robochyy-vizyt-zastupnyka-kerivnyka-ofisu-prezydenta-ukrayiny-ta-delegatsiyi-hova> (access date: 07.12.2025) (In Ukrainian).

Шевченко Н. В.,
Бляшинець Ю. І.
Національний
лісотехнічний університет
України,
м. Львів, Україна
E-mail:
shenatalka@nltu.edu.ua

**ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ТА ШЛЯХИ
ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ КОЛІСНИХ
ЛІСОВИХ МАШИН У РІЗНИХ УМОВАХ
ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-27-204>

УДК 630*3:629.3

Шевченко Н. В., Бляшинець Ю. І. Визначення показників та шляхи підвищення стійкості колісних лісових машин у різних умовах експлуатації.

Анотація. Розглянуто теоретичні основи статичної та динамічної стійкості лісових машин, зокрема сортиментовозів, беручи до уваги фізичні принципи, що лежать в основі динаміки руху. Досліджено фактори та умови, що спричиняють втрату стійкості, так зване сповзання та перекидання для лісової техніки. Проаналізовано поперечну та поздовжню стійкість, стійкість на поворотах. Наголошено на значному впливі швидкості, радіусу повороту, положенні центру мас, перерозподілі навантаження та відцентрових сил на стійкість сортиментовоза. Проаналізовано залежність стійкості від умов експлуатації, включаючи вплив типу дорожнього покриття, стану поверхні та кутів поздовжнього і поперечного ухилу. Описано математичні моделі для моделювання руху лісових машин та визначення критичних параметрів, таких як швидкість, кут нахилу. Запропоновано шляхи підвищення стійкості лісових транспортних засобів за рахунок конструктивних змін як от зниження центру ваги, збільшення ширини колії та використання системи активної підвіски і електронних систем стабілізації.

Ключові слова: динамічна стійкість, лісовозний автомобіль, поперечна та поздовжня стійкість, стійкість проти сповзання і перекидання, умови експлуатації

Shevchenko N. V., Blyashynets Yu. I. Determination of indicators and ways to improve the stability of wheeled forest machines in various operating conditions.

Abstract. The theoretical foundations of static and dynamic stability of forest machines, particularly timber trucks, are examined, taking into account the physical principles underlying motion dynamics. The factors and conditions causing loss of stability, specifically sliding and rollover, are investigated for forestry equipment. Lateral and longitudinal stability, as well as stability during cornering, are analyzed. The significant impact of speed, turning radius, center of mass position, load redistribution, and centrifugal forces on the stability of the timber truck is emphasized. The dependence of stability on operating conditions, including the influence of road surface type, surface condition, and angles of longitudinal and lateral slopes, is analyzed. Mathematical models for simulating the movement of forest machines and determining critical parameters, such as speed and inclination angle, are described. Ways to improve the stability of forestry vehicles through design modifications, such as lowering the center of gravity, increasing track width, and using active suspension systems and electronic stability control, are proposed.

Keywords: dynamic stability, timber truck, lateral and longitudinal stability, stability against sliding and rollover, operating conditions.

Постановка проблеми

Зростаюча потреба у забезпеченні ефективного та безпечного транспортування деревини на схилах, нерівних дорогах і бездоріжжі диктує необхідність розроблення нових технічних рішень, здатних адаптуватися до складних умов експлуатації. Актуальність цього дослідження зумовлена високим ризиком перекидання лісовозних автомобілів (сортиментовозів), що експлуатуються в Україні.

Причинами такого ризику є особливості експлуатації лісових машин, зокрема складний рельєф лісових доріг, високе розташування центру мас техніки, встановлення важкого маніпуляторного обладнання та специфіка вантажу, який є динамічним і має тенденцію до зміщення під час руху. Це особливо проявляється на нерівній місцевості або під час виконання маневрів, що суттєво впливає на динамічні характеристики автомобіля. Особливо важливим аспектом є взаємозв'язок між швидкістю руху автомобіля та радіусом повороту, нехтування яким нерідко стає причиною аварій.

Значна частина парку лісовозних автомобілів у лісових господарствах України складається із застарілих моделей, які не мають сучасних систем контролю стійкості, а їх модернізація часто виявляється економічно недоцільною. Проблема забезпечення курсової стійкості лісової техніки набуває особливої ваги для підвищення безпеки дорожнього руху і створення комфортних умов праці для водіїв.

Стійкість транспортного засобу під час руху визначається багатьма факторами: висотою та розташуванням центру ваги, шириною колії, довжиною бази, характеристиками шин (включно з їх розмірами, ступенем зношеності протектора та тиском), швидкістю руху, радіусом кривизни дороги, типом дорожнього покриття і станом його поверхні. Це потребує комплексного підходу до аналізу статичної та динамічної стійкості лісових машин, що передбачає врахування аспектів динаміки багатомасових систем, теорії керування та механіки ґрунтів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанням дослідження і поліпшення стійкості руху в період експлуатації поодиноких лісовозних автомобілів присвячено значну кількість наукових робіт. Особливо гостро стоїть проблема збереження курсової стійкості лісовозних автомобілів задля створення безпеки дорожнього руху та безпечних умов праці водіїв [1, 2].

Динамічна стійкість лісовозного автомобіля характеризує його здатність зберігати задану траєкторію руху та встановлений режим руху і не чинити опір факторам збурювання, що виникають під час руху. На відміну від статичної стійкості, динамічна стійкість розглядає комплексну взаємодію інерційних сил, відцентрових сил, аеродинамічних навантажень та кінематики підвіски і рульового керування.

Для лісових колісних машин, таких як форвардер чи сортиментовоз, концепція динамічної стійкості обумовлюється трьома своєрідними факторами: умовами експлуатації, конструкцією шасі, високим та змінним центром ваги. Складні умови експлуатації лісових машини [3, 4] супроводжуються постійною зміною коефіцієнтів зчеплення та опору коченню. Також переважна більшість лісових машин мають шарнірно-зчленовану раму. Наявність шарніра зчленування вносить додаткові ступені свободи та сприяє втраті стійкості і вимагає складних розрахункових моделей [5, 6]. Наявність гідроманіпулятора та процес завантаження чи розвантаження сортиментів призводять до того, що центр ваги машини не лише розташований високо, але й постійно динамічно переміщується у трьох вимірах. Це кардинально змінює умови стійкості в реальному часі [7].

Підвищення стійкості проти занесення під час гальмування здійснюється вибором коефіцієнта розподілу гальмівних сил між осями і застосуванням регуляторів гальмівних

сил, що перешкоджають випереджаючому блокуванню задніх коліс. Фактори, що викликають занесення, носять випадковий характер і визначаються конструктивними та експлуатаційними параметрами. Найбільш важливими з них є коефіцієнт розподілу гальмівних сил між осями і координати центру мас транспортного засобу [8].

Формулювання мети досліджень

Стійкість лісовозного автомобіля найчастіше характеризують такими показниками: максимальна швидкість руху по колу, що відповідає початку його занесення; максимальна швидкість руху по колу, що відповідає початку його перекидання; максимальний кут під час руху на косогорі, що відповідає його ковзанню, або перекиданню тощо. На дорогах з хорошими зчірними властивостями більш імовірно перекидання, а на слизькій дорозі - імовірніші занесення та ковзання ніж перекидання.

Виходячи із зазначеного, метою даного дослідження є обґрунтування розрахункових схем і визначення параметрів поздовжньої і поперечної стійкості, особливо динамічної, та оцінка параметрів поздовжньої і поперечної стійкості лісовозного автомобіля задля забезпечення безпеки праці водія транспортного засобу та всіх учасників дорожнього руху.

Це дозволить моделювати переміщення сортиментовоза під час його криволінійного руху, на косогорі, з вантажем і без нього та на ділянках доріг із різним покриттям. Тобто, можемо передбачити як поведе себе лісовозний автомобіль з точки зору стійкості у різних експлуатаційних умовах.

Виклад основного матеріалу дослідження

Поздовжня статична стійкість колісних лісових машин, коли вони протистоять перекиданню навколо поперечних осей чи передньої або задньої, визначаються граничними кутами α_n на підйомі та α_c на спускові, які слід визначити з умов статичної рівноваги у вигляді суми моментів, що діють на машину без вантажу, відносно точок можливого перекидання A (рис. 1) [9]. На схемах вказані поздовжні координати a , b і висота h центра власної ваги G лісової машини.

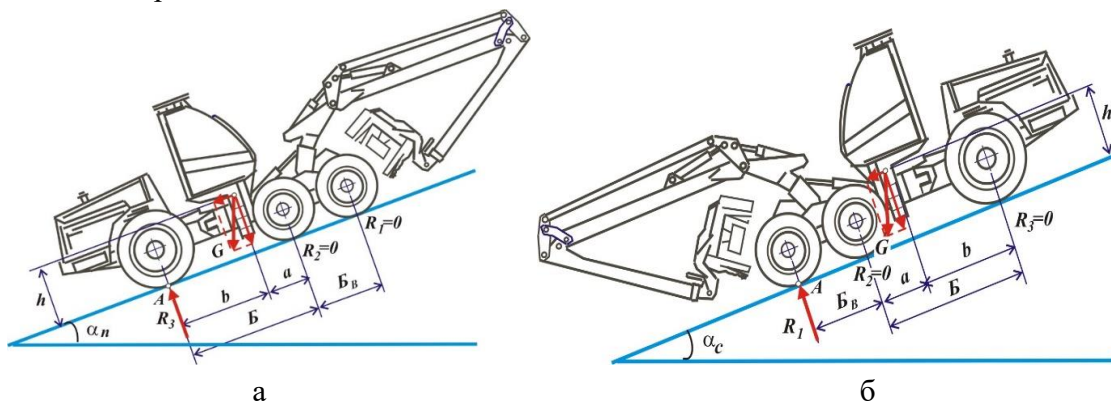


Рис. 1 – Розрахункова схема для визначення граничного кута α_n поздовжньої статичної стійкості колісного харвестера (6×6): a – на підйомі; b – на спускові

Позаяк нормальна реакція на колеса передньої осі, у випадку граничного кута α_n , дорівнюватиме нулю, то одержуємо

$$bG \cos \alpha_n - hG \sin \alpha_n = 0.$$

Отже, граничний кут поздовжньої статичної стійкості проти перекидання на підйомі дорівнюватиме

$$\alpha_n = \arctg\left(\frac{b}{h}\right). \quad (1)$$

Умова статичної рівноваги трьохосьового лісового харвестера на спускові

$$(a + B_{\epsilon}) \cdot G \cdot \sin \alpha_c - h \cdot G \cdot \cos \alpha_c = 0,$$

а граничний кут поздовжньої статичної стійкості на спускові

$$\alpha_c = \arctg\left(\frac{a+B_{\epsilon}}{h}\right). \quad (2)$$

Критичний кут підйому в значній мірі залежить від значення коефіцієнта зчеплення:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{a \cdot \phi}{L - h_{\text{цв}} \cdot \phi}\right), \quad (3)$$

де a – відстань від центру ваги лісової машини до її передньої осі;

L – відстань між осями переднього і заднього мостів машини.

Втрата поздовжньої стійкості малоймовірна і може відбутися лише під час руху на дуже крутих схилах. Тому найнебезпечнішою є поперечна стійкість, коли лісова машина здатна протистояти перекиданню набік, навколо поздовжньої осі.

Поперечну статичну стійкість лісової машини оцінюють граничним кутом проти перекидання $\beta_{\text{пер}}$ (рис.2) і граничним кутом проти сповзання $\beta_{\text{сп}}$. Щоб їх визначити потрібно скласти умови статичної рівноваги машини у поперечній площині [6, 8, 9].

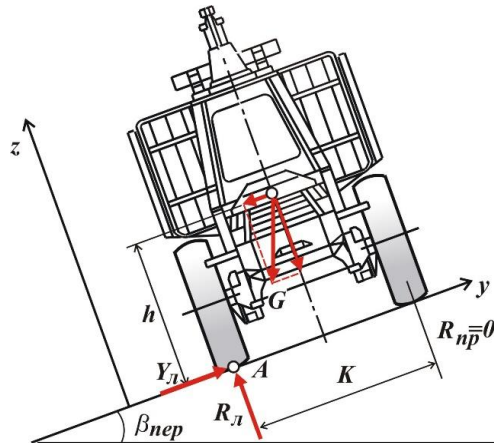


Рис. 2 – Розрахункова схема для визначення граничного кута поперечної статичної стійкості колісного сортиментовоза проти перекидання

На схемі позначено: $\beta_{\text{пер}}$ – граничний кут поперечної статичної стійкості колісної машини за умовою перекидання; K – колія машини; R_L, R_{np} – сумарні нормальні реакції опорної поверхні на колеса лівого та правого бортів машини.

Умовно вважають, що вісь перекидання колісних машин проходить через середину площини контакту з опорною поверхнею шин коліс з нижнього боку (лівих). Хоч у дійсності, внаслідок деформації коліс, ця лінія під час перекидання буде дещо зміщуватись в поперечному напрямку. Тому умову рівноваги колісної машини на поперечному схилі розглянемо у вигляді суми моментів сил відносно точки A , що лежить на умовній осі перекидання

$$G \frac{K}{2} \cos \beta_{\text{пер}} - Gh \sin \beta_{\text{пер}} = 0.$$

З отриманого рівняння граничний кут поперечної стійкості колісної машини, визначений за умовою перекидання

$$\beta_{\text{пер}} = \arctg \left(\frac{K}{2h} \right). \quad (4)$$

Втрата поперечної стійкості під час руху відбувається, коли рівнодіюча всіх поперечних сил, таких як відцентрова сила під час руху в повороті, бічна складова сили тяжіння під час руху на поперечному ухилі, сила тиску бічного вітру, створює такий перекидаючий момент, що вертикальна реакція на колесах з одного боку, внутрішнього відносно повороту або верхнього відносно схилу, стає рівною нулю.

У динаміці ця проста залежність (4) ускладнюється впливом відцентрової сили F_B , що діє на висоті h . Втрата стійкості (перекидання) відбувається за умови:

$$F_B \cdot h + G \cdot \sin(\beta_{\text{пер}}) \cdot h \geq G \cdot \cos(\beta_{\text{пер}}) \cdot K/2.$$

Це рівняння показує, що рухаючись на поперечному ухилі та в повороті, є ризик до перекидання. Уникнути втрати стійкості у цьому випадку можна шляхом забезпечення низького центру ваги.

Якщо кут поперечного нахилу опорної поверхні надто малий, щоб викликати перекидання машини, то це ще не означає, що машина, внаслідок сповзання, не втратить стійкості. Тому, щоб перевірити статичну поперечну стійкість проти сповзання, розглянемо схему лісової машини, яка на поперечному схилі не перекидається, а нормальні та дотичні бокові реакції дороги, як на ліві так і на праві колеса, не дорівнюють нулю (рис.3).

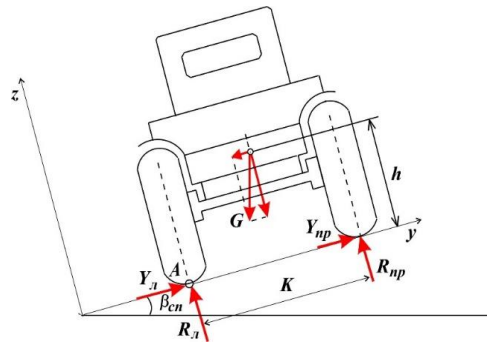


Рис. 3 – Схема для визначення граничного кута β_{cn} поперечної статичної стійкості колісної машини за умовою сповзання

На схемі прийнято такі позначення: Y_l , Y_{np} – бокові реакції дороги на ліві та на праві колеса; β_{cn} – граничний кут поперечної стійкості за умовою сповзання. Бокові реакції дороги обмежуються сумарною силою зчеплення коліс машини з опорною поверхнею в поперечному напрямку, тобто

$$Y_l + Y_{np} \leq (R_l + R_{np}) \phi_y,$$

де ϕ_y – коефіцієнт зчеплення в поперечному напрямку.

Суму нормальних реакцій на колісний рушій визначимо з умови рівноваги машини у вигляді суми проєкцій сил на вісь z

$$R_{\text{л}} + R_{\text{нр}} = G \cos \beta_{\text{сн}}.$$

У цей же час, сума проєкцій сил на вісь Y , які діють на машину

$$Y_{\text{л}} + Y_{\text{нр}} = G \sin \beta_{\text{сн}}.$$

Отже, тригонометричне рівняння з невідомим кутом $\beta_{\text{сн}}$ матиме вигляд:

$$G \phi_y \cos \beta_{\text{сн}} = G \sin \beta_{\text{сн}}.$$

Звідки

$$\beta_{\text{сн}} = \arctg \phi_y. \quad (5)$$

Граничний кут поперечної статичної стійкості за умовою сповзання визначається коефіцієнтом зчеплення рушія з опорною поверхнею в поперечному напрямку. Слід зауважити, що коефіцієнт зчеплення ϕ_y є меншим ніж коефіцієнт зчеплення ϕ у поздовжньому напрямку і знаходиться у межах $\phi_y = (0,8 \dots 0,9)\phi$, залежно від протектора шин.

Критеріями поперечної стійкості є також максимально можливі швидкості руху по колу і кути поперечного ухилу дороги (косогору). Розрахунок критичної швидкості за умовою перекидання автомобіля визначається за формулою [7]:

$$V_{\text{кр}} = \sqrt{g \cdot K \cdot R / 2 h_{\text{цв}}}, \quad (6)$$

де K – ширина колії;
 R – радіус повороту, м;
 $h_{\text{цв}}$ – висота центру ваги.

Так як авторами проведені експериментальні дослідження стійкості лісовозного автомобіля Урал-4320, який експлуатується у Бібрському лісництві Львівського надлісництва (рис. 4), то виконано теоретичні розрахунки для різних умов експлуатації і побудовано графічні залежності саме для цього автомобіля з вантажем ($h_{\text{цв}G}$) та без вантажу ($h_{\text{цв}0}$) (рис. 5).

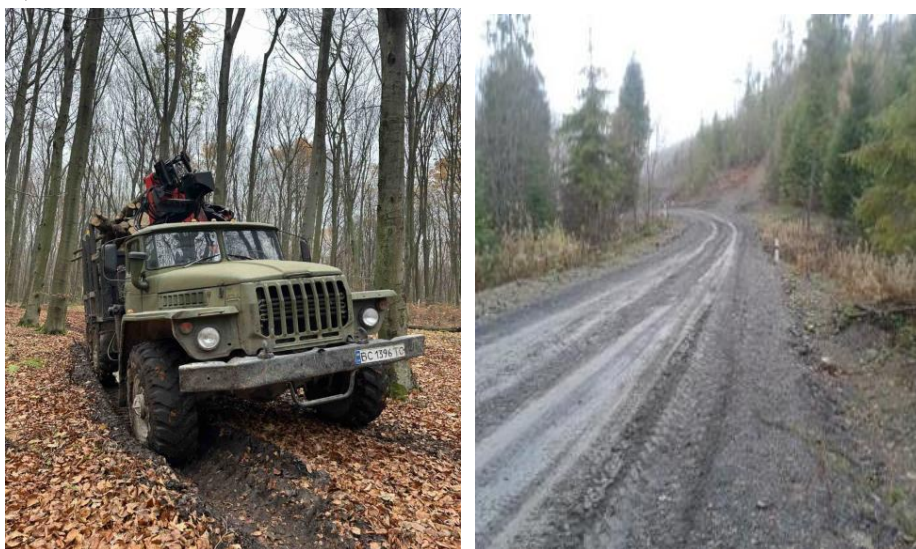


Рис. 4 – Лісовозний автомобіль Урал-4320 з гідравлічним маніпулятором Palfinger PK 15500A та умови його експлуатації

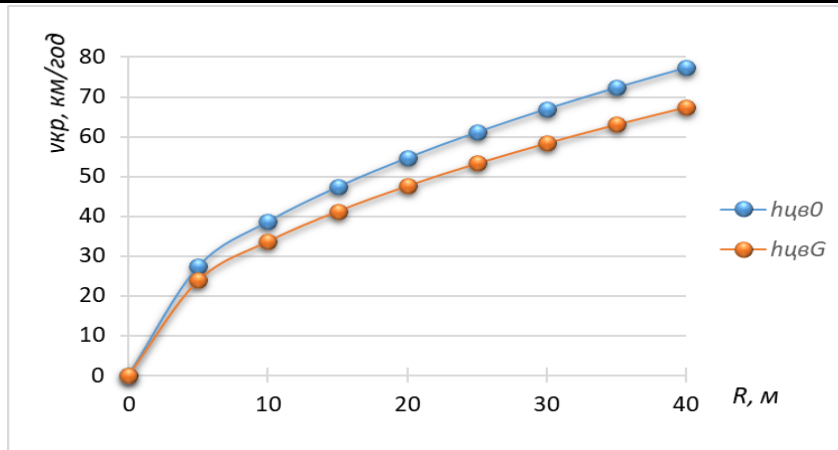


Рис. 5 – Розрахунок залежності критичної швидкості лісовозного автомобіля за умовою перекидання від радіуса повороту

Зі збільшенням швидкості руху і зменшенням радіусу повороту відцентрова сила різко зростає. Якщо під час повороту автомобіль починає втрачати керуваність або різко накренився, то перервати цей процес можна збільшуючи радіус повороту, тобто виходом з повороту. Тоді інерційна сила буде діяти протилежно до основної відцентрової сили і стійкість машини покращиться.

Критичну швидкість за умовою ковзання лісовоза при різних радіусах повороту на дорогах з різним покриттям знаходимо за формулою:

$$V_{кр.к} = \sqrt{g \cdot R \cdot \varphi}, \quad (7)$$

де φ – коефіцієнт зчеплення шин з дорогою;
 g – пришвидження вільного падіння;
 R – радіус повороту.

Результати розрахунку для різного дорожнього покриття, які відрізняються коефіцієнтом зчеплення шин з дорогою, наведено на рис. 6.

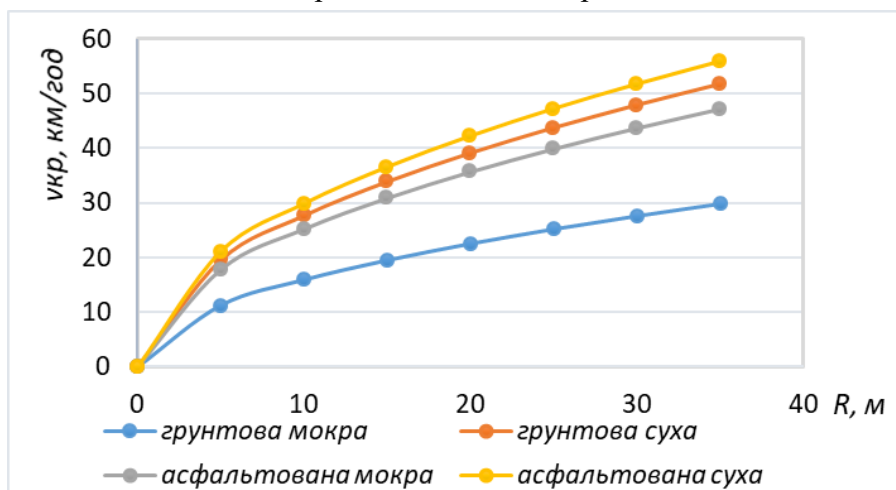


Рис. 6 – Результати розрахунку залежності критичної швидкості за умовою ковзання від радіуса повороту

З рисунка видно, що зі збільшенням радіуса повороту критична швидкість за умовою ковзання також збільшується. Тип покриття теж впливає на критичну швидкість за умовою ковзання: на асфальтованому сухому покритті критична швидкість найбільша.

Критичний кут за умовою перекидання під час руху по прямолінійній ділянці визначається за формулою:

$$\beta_{кр.л} = \arctg(K/2h_{цв}), \quad (8)$$

де $K/h_{цв}$ – коефіцієнт поперечної стійкості. Для лісовоза Урал-4320 з вантажем 5 т критичний кут становитиме $41,8^\circ$, а без вантажу – $49,7^\circ$.

Максимальний (критичний) кут косягору дороги за умовою перекидання визначається за формулою:

$$V_{кр.л} = \arctg\left(\frac{0,5 \cdot K \cdot g \cdot R - V^2 \cdot h_{цв}}{h_{цв} \cdot g \cdot R + 0,5 \cdot V^2 \cdot K}\right). \quad (9)$$

Для асфальтобетонного та цементобетонного покриттів критичний кут за умови ковзання мінімальний, а при ожеледиці – максимальний. Критичний кут косягору дороги по якому автомобіль може рухатися без поперечного ковзання розраховується за формулою:

$$\beta_{кр.к} = \arctg \frac{g \cdot R \cdot \varphi - V^2}{g \cdot R + V^2 \cdot \varphi}. \quad (9)$$

Для асфальтобетонного покриття ($\varphi = 0,7$) критичний кут за умови ковзання мінімальний, а при ожеледиці ($\varphi = 0,2$) – максимальний.

Втрата стійкості проти сповзання означає втрату керованості, навіть якщо безпосередньої загрози перекидання немає. Умова стійкості проти сповзання під час руху визначається співвідношенням між сумарною бічною силою F_Σ , що діє на лісову машину (відцентрова сила, бічна складова сили тяжіння на ухилі), та максимальною силою зчеплення коліс з поверхнею $F_{зч}$:

$$F_\Sigma \leq F_{зч} = G \cdot \varphi_y. \quad (10)$$

В умовах лісових доріг, де ϕ є низьким і нестабільним, бічне сповзання є надзвичайно поширеним і небезпечним явищем. Інженерні рішення спрямовані на максимізацію ϕ за допомогою спеціалізованих конструкцій протекторів. Наприклад, шини з посиленою боковиною розроблені спеціально для протидії бічним навантаженням і, як показують дослідження, здатні зменшити бічне сповзання на схилах на 22% порівняно зі звичайними протекторами.

Обговорення

На практиці втрата стійкості найчастіше спостерігається під час гальмування. В цьому випадку в місцях контакту шин з дорожнім полотном діють великі гальмівні сили і колеса втрачають здатність сприймати поперечні сили. Коли колеса повністю заблоковані рух стає нестійким, а у випадку блокування задніх коліс, ще більше посилюється занесення. Під час блокування передніх коліс прогресуючого занесення,

зазвичай, не виникає, однак транспортний засіб стає некерованим, так як заблоковані колеса не змінюють напрямку руху.

У всіх випадках занесення є наслідком дії бокової сили при втраті зчеплення коліс з дорогою. Це може бути сила інерції, що виникає при відхиленні від прямолінійного руху, або сила, що виникла в результаті взаємодії коліс з нерівностями дороги.

Найбільш імовірно занесення задньої осі, колеса якої практично завжди навантажені, силою тяги або гальмівною силою. Під час гальмування сила зчеплення задніх коліс зменшується внаслідок перерозподілу ваги, що ще підсилює втрату стійкості.

Перекидання назад може статися під час руху на крутий підйом, особливо в поєднанні з інтенсивним прискоренням, або під час роботи гідроманіпулятора з важким вантажем за задньою віссю. Перекидання вперед настає під час екстремального гальмування, особливо на спуску, або під час руху крутим спуском.

Для машин із шарнірно-зчленованою рамою відбувається динамічний перерозподіл навантаження між осями передньої та задньої напіврам, що залежить від кута зчленування та жорсткості шарніра [6]. Тому сучасні лісові машини обов'язково повинні враховувати цей перерозподіл осевого навантаження.

Для лісових машин на схилах [1] втрата стійкості може початися як бічне сповзання, і якщо машина з високим центром ваги [7], що почала неконтрольоване бічне ковзання, натрапляє на перешкоду, наприклад, пень чи камінь, колесами, що знаходяться нижче по схилу, ця перешкода створює миттєву точку обертання. Кінетична енергія бічного руху перетворюється на обертальний момент, що призводить до миттєвого динамічного перекидання. У машин зі шарнірно-зчленованою рамою бічне сповзання задньої секції може також ініціювати неконтрольоване складання секцій. У цьому випадку, пасивні системи проти сповзання, наприклад, конструкція шин, запобігають перекиданню.

Рух у повороті характеризується виникненням відцентрової сили, прикладеної до центру ваги машини. Ця сила викликає перерозподіл вертикального навантаження на колеса: внутрішні до повороту колеса розвантажуються, а зовнішні – навантажуються. Це наближає машину до межі перекидання, коли внутрішні колеса відриваються від землі, та межі сповзання, так як сумарна бічна сила зчеплення зменшується через нелінійну залежність сили зчеплення від вертикального навантаження.

Для форвардерів та сортиментовозів динаміка на поворотах ускладнюється явищем складання напіврам. Це унікальний режим втрати курсової стійкості, при якому кут між поздовжніми осями передньої та задньої напіврам неконтрольовано зростає, зазвичай під час гальмування або під час руху на слизькому спуску. Цей процес залежить не лише від зовнішніх сил, але й від характеристик гідравлічної системи рульового керування, що з'єднує дві напіврами. Аналіз цього явища неможливий без складних динамічних моделей, що враховують потік та тиск у гідроциліндрах кермового управління [5].

Теоретичні розрахункові схеми для визначення динамічної стійкості проти перекидання базуються на фундаментальному принципі аналізу моментів. У цих схемах порівнюється утримуючий момент M_r , який стабілізує машину, з перекидаючим моментом M_t , що діє на її дестабілізацію відносно ребра перекидання, тобто зовнішніх коліс [7]. Втрата стійкості (перекидання) починається, коли $M_t < M_r$.

Складний рельєф лісових ділянок [1, 2] не обмежується простими ухилами. Він включає комбінації ухилів, ями, горби та перешкоди. Сучасні методології дослідження стійкості вимагають відтворення цих умов у віртуальному середовищі. Характеристики опорної поверхні визначаються двома ключовими параметрами: коефіцієнтом опору коченню та коефіцієнтом зчеплення. На лісових дорогах, особливо на м'яких ґрунтах,

коефіцієнт опору коченню може досягати значних величин [2]. І хоч він передусім впливає на поздовжню динаміку, як от витрату палива, необхідну тягову силу, диференційований опір коченню створює значний обертальний момент, що діє на лісовозний автомобіль відносно його вертикальної осі, змушуючи повертати або змінювати курс вліво чи вправо, що вимагає постійної корекції з боку водія або системи керування.

Коефіцієнт зчеплення ϕ є критичним параметром для поперечної стійкості, особливо коли відбувається сповзання, та поздовжньої динаміки. Лісові умови характеризуються низьким та вкрай непостійним ϕ (бруд, глина, мокре листя, сніг, коріння дерев). Перспективними в таких умовах роботи є використання спеціалізованих технологій. "Самоочисні конструкції" протекторів шин є критично важливими і вони запобігають забиванню протектора брудом та рослинними рештками. Це дозволяє підтримувати коефіцієнт зчеплення на стабільно високому рівні та забезпечує ефективну роботу елементів протектора, призначених для боротьби зі сповзанням.

Коефіцієнт опору коченню f_k використовується в динамічних моделях для врахування сил, що виникають внаслідок деформації шин та поверхні дороги. Хоча він переважно впливає на поздовжню динаміку (тягові розрахунки, витрата палива), нерівномірний опір коченню (наприклад, коли колеса одного борту знаходяться на більш м'якому ґрунті, ніж іншого) створює дестабілізуючий момент рискання. Це безпосередньо впливає на курсову стійкість і вимагає коригувальних дій від водія або системи стабілізації.

Експлуатаційні умови не є статичними вхідними даними для розрахунків; вони є динамічними та стохастичними факторами. Коефіцієнт опору коченню та коефіцієнт зчеплення не є константами, а постійно змінюються залежно від ґрунту, погоди та рельєфу. Ця непередбачуваність робить класичні емпіричні розрахунки, що базуються на постійних коефіцієнтах, неадекватними для точної оцінки безпеки. Це, у свою чергу, виправдовує перехід до двох більш складних підходів: багатомасового стохастичного моделювання та розробки активних систем керування, які можуть адаптуватися до цих мінливих умов у реальному часі [6].

Еволюція методів розрахунку динамічної стійкості пройшла шлях від простих емпіричних залежностей до складних багатомасових моделей. Побудова математичної моделі з використанням фундаментальних законів механіки, зокрема, методу Лагранжа, дозволяє отримувати теоретичні моделі руху системи, яка слугує основою для розуміння її динаміки та для подальшої верифікації чисельних симуляцій [10]. Але надзвичайна складність аналітичних рішень методом Лагранжа для систем з багатьма ступенями свободи, якими є зчленовані лісові машини, потребує застосування чисельного моделювання.

Забезпечення динамічної стійкості досягається комплексом заходів, що поділяються на пасивні (конструктивні) та активні (системи керування).

Пасивні та конструктивні рішення закладаються на етапі проєктування машини. Це може бути оптимізація центру ваги, що досягається компонованням важких агрегатів (двигун, трансмісія) якомога нижче в рамі машини. Конструкція маніпулятора також важлива, бо вибір типу стріли маніпулятора має прямий і неочевидний вплив на динамічну стійкість під час роботи. У той час як радіальний підйом зміщує вантаж, а отже і загальний центр ваги системи "машина+вантаж" по дузі, що може призвести до його значного виносу назовні в середині траєкторії, конструкція з вертикальним підйомом забезпечує підвищену стабільність [7]. Це пов'язано з тим, що вертикальний підйом утримує вантаж ближче до машини протягом усієї траєкторії підйому, мінімізуючи зміщення загального центра ваги та перекидаючі моменти.

Шина також є ключовим пасивним елементом стабілізації. Як зазначалося раніше, спеціалізовані конструкції протектора безпосередньо протидіють бічним силам, що викликають сповзання. Самоочисні конструкції забезпечують стабільність коефіцієнта зчеплення, запобігаючи забиванню протектора брудом.

Пасивних рішень недостатньо для компенсації всіх динамічних ризиків, особливо в умовах змінного зчеплення або під час роботи на високих швидкостях, наприклад, у сортиментовозів чи в автономному режимі. Технології активної безпеки є необхідними для моніторингу та корекції стану машини [6]. Електронний контроль стійкості є найбільш поширеною активною системою. Наприклад, система активного рульового керування може збільшувати або зменшувати кут повороту коліс незалежно від водія, щоб активно коригувати траєкторію та протидіяти занесенню.

Висновки

1. Рельєф місцевості є вагомим фактором, що визначає динамічну стійкість лісових машин. Рух на поздовжніх та поперечних ухилах кардинально змінює розподіл навантажень. Поперечний ухил (крен) безпосередньо знижує поріг перекидання, оскільки бічна складова сили тяжіння додається до будь-яких інших поперечних сил, наприклад, відцентрової і діє як постійний перекидаючий момент.

2. Параметри дорожнього покриття є критичними змінними, що безпосередньо входять до формул розрахунку динамічної стійкості, визначаючи межі безпечної експлуатації. Коефіцієнт зчеплення φ визначає максимальну бічну або поздовжню силу, яку може передати шина до втрати зчеплення (ковзання). Також він є ключовим у формулах, що описують стійкість проти сповзання та занесення, особливо під час гальмування

3. Безпека руху лісотransпортної машини повинна зберігатись впродовж всього терміну його служби. Стан шин та гальм є одними із важливих факторів, що впливають на стійкість. Щоб запобігти занесенню на слизькій дорозі необхідно гальмувати без вимкнення зчеплення і під час наближення до заокруглень дороги плавно переходити від вищих передач до нижчих. Дослідження, пов'язані з визначенням закономірностей зміни параметрів, що впливають на курсову стійкість лісовозного автомобіля, мають практичну значимість, бо це призведе до збільшення безпеки на дорозі та до раціонального використання ресурсів і економії коштів, часу тощо.

4. Проведені розрахунки поздовжньої і поперечної стійкості у різних дорожніх умовах порожнього та навантаженого лісовозного автомобіля Урал-4320, дозволили визначити критичну швидкість за умовою перекидання, критичну швидкість за умовою ковзання та розрахувати критичний кут за умовою перекидання і ковзання. Розрахунками доведено, що зі збільшенням швидкості руху і повороту керованих коліс, зменшенням радіусу кривизни траєкторії і коефіцієнта зчеплення колеса з дорогою, стійкість лісовозного автомобіля знижується.

5. Проведений аналіз демонструє чітку еволюцію в підходах до вивчення динамічної стійкості лісових машин. Відбувся перехід від використання спрощених емпіричних формул [9], які були визнані недостатніми через специфіку "шина-грунт" та зчленовану конструкцію, до розроблення складних, валідованих багатомасових моделей. Аналіз виявив кілька ключових напрямків для подальших наукових досліджень: вдосконалення моделей взаємодії "шина-грунт", які б враховували деформацію, змінну несучу здатність та низьке зчеплення м'яких ґрунтів та розроблення систем для повністю автономних (безпілотних) лісових машин.

6. Таким чином, аналіз динамічної стійкості лісових машин є комплексною задачею, яка поєднує динаміку багатомасових систем, теорію керування та механіку ґрунтів.

Список використаних джерел

1. Библюк Н.І. Лісотransпортні засоби: теорія. – Львів: "Панорама", 2004. – 253 с.
2. Білик Б.В., Адамовський М.Г. Теорія самохідних лісових машин. Київ-Львів : Вид-во ІЗМН, 1998. 208 с.
3. Heinimann, H. R. (1999). Ground-based harvesting technologies for steep slopes. *Journal of Forest Engineering*, Vol. 10 (2), 1–14.
4. Подригало М.А., Разарьонов Л.В., Закапко О.Г. Оцінка граничного навантажувального режиму рульового керування тракторного самохідного шасі. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*, 1(71), 2022, С.111-116.
5. Qingyong Meng, Lulu Gao, Heping Xie, Fengqian Dou. Analysis of the Dynamic Modeling Method of Articulated Vehicles – *Journal of Engineering Science and Technology Review*, Vol. 10(3), 2017, pp. 18 – 27.
6. Gibson, H. G., Elliot, K. C., & Persson, P. E. (1999). Side slope stability of articulated-frame logging tractors. *Journal of Terramechanics*, Vol. 8 (2), 65–72.
7. Луста Ю. Р., Мачуга О. С. Визначення меж безпечної експлуатації лісової машини з асиметрично розміщеним робочим органом на території з ухилом. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. Херсон 2024. № 3. С. 75 – 84.
8. Гречанюк М. С. Поперечна стійкість сідлового автопоїзда в режимі гальмування. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2015. № 1. С. 136–140.
9. Білик Б. В., Шевченко Н. В. Методичні вказівки для практичних занять з дисципліни «Теорія та проєктування самохідних лісових машин». ВРЦ НЛТУ України. Львів 2007, 36 с.
10. Xintao Lin, Yue Zhu, Zheng Xie. Mechanics Modeling and Simulation Analysis of a Novel Articulated Chassis for Forestry. *Sustainability* 2022, 14 (23), 16118. <https://doi.org/10.3390/su142316118>.

Shevchenko S.A.
State Biotechnological
University,
Kharkiv, Ukraine
E-mail:
serg.shevchen@btu.kharkiv.ua

**RESEARCH INTO THE INFLUENCE OF
SWIRLING WOOD GRAIN ON WOOD
SPLINTERING AT MILLING FINGER JOINT
ELEMENTS**

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-27-216>

UDC 674.028.11

Shevchenko S.A. Research into the Influence of Swirling Wood Grain on Wood Splintering at Milling Finger Joint Elements

Abstract. The object of the study is the influence of swirling wood grain on wood splintering at milling finger joint elements. The study was carried out on the example of jointed cladding slats made of larch wood, used for the exterior finishing of the entrance group of a building.

To conduct the study, photographs were taken of the slat joint areas that exhibit defects in tenoning operation (wood splintering) and, for comparison, those without such defects were used. The photographs were imported into the CAD, where the angle of annual growth ring deviation was measured. Subsequently, a statistical analysis of the measurement results was carried out. Processing of the measurement results using the least squares method made it possible to obtain the regression dependence of the probability of wood splintering on the angle of annual growth ring deviation near a knot.

Keywords: finger joint, tenoning, knot, annual ring, angle, splintering, probability, regression dependence.

Шевченко С.А. Дослідження впливу завитків волокон деревини на її сколювання при фрезеруванні елементів зубчастого шипового з'єднання

Анотація. Об'єктом дослідження є вплив завитків деревних волокон поблизу сучків на сколювання деревини при фрезеруванні елементів зубчастих шипових з'єднань. Такі з'єднання дедалі ширше використовуються при виготовленні столярно-будівельних виробів і клеєних дерев'яних конструкцій (зокрема, багатошарових дерев'яних поперечно-клеєних панелей), тож важливо контролювати частоту виникнення зазначених вад нарізання шипів. Метою дослідження є визначення регресійної залежності ймовірності сколювання деревини від кута між річним шаром і повздовжньою віссю рейки. Дослідження було виконано на прикладі зрощених рейок обшивки з деревини модрина, використаних для зовнішнього оздоблення вхідної групи будинку.

Для здійснення дослідження було сфотографовано місця зрощування рейок, які мають вади нарізання шипів (сколювання деревини) та, для порівняння, не мають таких вад. Фотографії було перенесено в САПР, де й були позначені зубчасті шипи та вимірні кути відхилення річних шарів. Далі було здійснено статистичний аналіз результатів вимірювань із визначенням регресійної залежності ймовірності сколювання деревини від кута відхилення річного шару. Для цього спочатку виконано структурну ідентифікацію шуканої залежності. Обробка результатів вимірювань із застосуванням метода найменших квадратів дала змогу отримати регресійну залежність ймовірності сколювання деревини від кута відхилення річного шару поблизу сучка.

Ключові слова: зубчасте шипове з'єднання, нарізання шинів, сучок, річний шар, кут, імовірність, регресійна залежність.

The topicality of the problem

The aspiration to utilise timber as fully as possible and the high requirements imposed on wood products (which exceed the properties inherent to solid wood) lead to an increasingly frequent use of wood bonding technologies. In this process, unacceptable wood defects (primarily knots) are removed by longitudinal sawing of boards and, at the subsequent stage, by cross-cutting of slats. However, a known phenomenon with a small distance between the cutting location and a knot is wood splintering during subsequent milling of the finger joint elements in the zones of wood fibre swirl. Conversely, if the distance between the cutting location and the knot is too large, part of the defect-free wood area will not be utilised for the manufacture of glued products.

Therefore, there is an actual need for a rational selection of the cutting location when removing knots from slats, in order to prevent both excessive wood consumption and wood splintering during milling of finger joint elements.

Analysis of recent researches

In study [1], cutting forces during cross-cutting of wood were investigated in order to identify risks and factors influencing the wood splitting process. The research was carried out using examples of sawing Norway spruce wood with two types of circular saw blades: high-speed steel blades and blades with carbide-tipped teeth. The experimental results show that cutting conditions (cutting speed and feed rate) affect the magnitude of cutting forces to a significantly lesser extent than the wear of the saw blade teeth. The research findings are confirmed by an analysis of cutting forces during wood cutting using the finite element method.

Article [2] presents the results of modelling the processes of wood splitting and chipless cutting of *Pinus sylvestris* L. from the standpoint of tool geometry design and machine driving force. The corresponding processes were analysed using tools of various shapes: simple, refracted, concave and convex wedges. The investigated types of splitting or chipless cutting include chipless cutting across the grain, splitting along the grain, radial splitting, and tangential splitting.

The results of studies on the cross-cutting of wood with circular saws are presented in article [3]. The influence of cutting edge geometry, wood species, circular saw type and cutting conditions on the cross-cutting process was investigated with the aim of reducing production costs and saving energy. Given the similarity between the operating conditions of the laboratory setup and those of industrial equipment, the obtained results can be applied in the design of woodworking machinery.

In study [4], a three-dimensional paradigm describing the geometry of knots and the associated distortions of wood fibre directions was proposed. This paradigm makes it possible to determine the three-dimensional orthogonal components of fibre directions in the stem. The paradigm generates fibre orientation around a knot at any position within a log or sawn timber, with a predicted fibre texture in planes parallel to the longitudinal direction, as well as fibre textures in radial and tangential directions. These textures are obtained based on physical constraints related to fibre growth within annual growth ring surfaces and taking into account knot formation theory. In this case, the knot axis may be non-linear, and the knot cross-section may be oval.

The aim of study [5] was to develop and apply a laboratory method for assessing the geometry of annual growth rings and determining fibre orientation in a high-resolution 3D grid in wood samples containing knots. The laboratory method was based on optical scanning (to obtain surface images) and laser scanning (to determine fibre inclination angles) on high-

resolution grids of the scanned surfaces. By repeated planing of the material and subsequent scanning of newly exposed surfaces, 3D coordinates of fibre positions along different growth layers and the 3D orientation of fibres in a 3D grid were obtained. The research results can be used to calibrate parameters of fibre orientation models in the vicinity of knots, which is important for assessing the influence of wood fibre directions around knots on the strength of structural timber and sawn timber.

The aim of study [6] was to investigate and quantitatively assess the effect of fibre deviation in two dimensions and at different hierarchical levels on the tensile strength of thin birch veneer sheets, as fibre deviation is the dominant factor affecting their ultimate tensile strength. The microfibril angle was assessed using wide-angle X-ray scattering..

The purpose of the research

The purpose of this work is to investigate the influence of wood fibre swirl on wood splintering during milling of finger joint elements.

Accordingly, the objectives of the study are to develop a methodology and to conduct an experimental investigation to determine the regression dependence of the probability of splintering on the angle between the annual growth ring and the longitudinal axis of the slat.

Research methodology

The research was carried out using examples of jointed cladding slats made of larch wood, used for the exterior finishing of the entrance group of a building in the city of Kharkiv (Ukraine), where they are protected from direct exposure to moisture and other atmospheric influences. The cladding slats have a protective lacquer coating. For joining the slats, finger joints with a length of 12,5 mm (taking into account their blunting) were used; the finger pitch was 4 mm.

To conduct the study, photographs of the slat joint areas that exhibit defects in tenoning operation (wood splintering) and, for comparison, those without such defects were used.

The photographs were imported into the LibreCAD system, where the finger joints were marked and the angle of annual growth ring deviation was measured.

Subsequently, a statistical analysis of the measurement results was carried out to determine the regression dependence of the probability of wood splintering on the angle of annual growth ring deviation.

Research results

Photographs of finger joints are shown in Figs. 1–2. In these figures, for example, some angles of annual growth ring deviation are marked. In total, 74 annual growth ring deviation angles were measured, and wood splintering was observed in 12 finger joint elements.

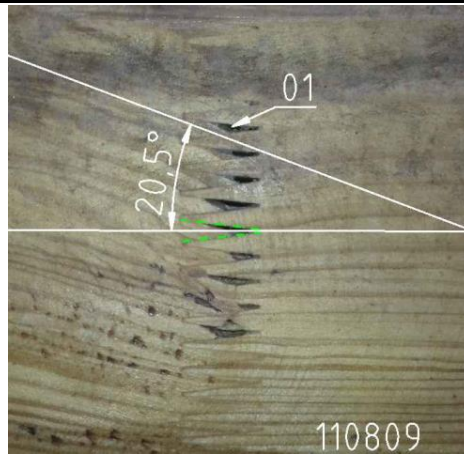


Fig. 1 – Finger joint with defects in tenoning

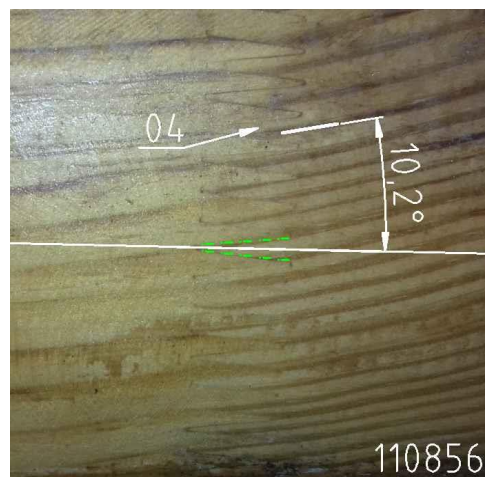


Fig. 2 – Finger joint without defects in tenoning

Fig. 3 shows a diagram illustrating the results of measurements and observations of wood splintering during milling of finger joint elements (absence of splintering is denoted as 0, and presence of splintering as 1).

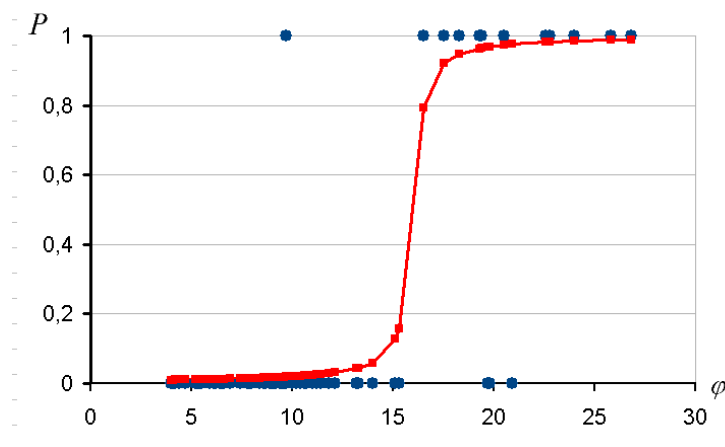


Fig. 3 – Measurement results and regression dependence

The experimental results are considered as a realisation of a random function whose values correspond to the probability of wood splintering during milling of a finger joint element. A nonlinear regression function is constructed to characterise the dependence of the

mathematical expectation of wood splintering during milling of a finger joint element on the angle between the annual growth ring and the longitudinal axis of the slat.

To construct the nonlinear regression, a function of the form (1) is used, characterised by the presence of two horizontal asymptotes

$$y(\varphi) \sim \arctg(\varphi) \quad , \quad (1)$$

where y is the nonlinear regression function; φ is the angle between the annual growth ring and the longitudinal axis of the slat, degrees.

Structural identification of function (1) is performed so that its range lies between zero and one, which corresponds to zero probability of splintering at small angles of annual growth ring deviation and unit probability at large angles of deviation.

For this purpose, first, function (1) is scaled so that the range of its values changes from π to unity. Second, a shift along the abscissa axis is added to function (1) so that the mean value of the domain equals 1/2. These transformations correspond to function (2):

$$y(\varphi) = 0,5 + \frac{1}{\pi} \arctg(\varphi) \quad . \quad (2)$$

The next step is to adjust the sensitivity of function (2) to changes in the argument (i.e. its first derivative) and the shift along the abscissa axis (which is a common practice in artificial neural networks etc. [7]). For this purpose, a constant term and a scaling coefficient of the argument are entered to function (2):

$$P((\varphi_0, k, \varphi) = 0,5 + \frac{1}{\pi} \arctg(\varphi_0 + k \varphi) \quad , \quad (3)$$

where P is the probability of splintering; φ_0 constant term, degrees; k is the scaling coefficient.

For parametric identification of the regression dependence (3), the least squares method is used. Thus, the square of the difference between the value of function (3) and the measurement result at the corresponding value of the angle between the annual growth ring and the longitudinal axis of the slat is calculated, and the sum of squares is minimised:

$$\sum_{i=1}^n (S(\varphi_i) - P(\varphi_0, k, \varphi_i))^2 \rightarrow \min_{\varphi_0, k} \Rightarrow \varphi_{0r}, k_r \quad , \quad (4)$$

where i is the measurement index; n is the number of measurements; S is the indicator of presence/absence of splintering (takes values 1 or 0, respectively); φ_{0r} is the rational value of the constant term, degrees; k_r is the rational value of the scaling coefficient.

The numerical solution of the extremum search problem (4) was carried out in a spreadsheet. As a result, the following regression equation was obtained for the dependence of the probability of wood splintering during milling of finger joint elements on the angle of local deviation of annual growth rings from the longitudinal axis of the slat:

$$P(\varphi) = 0,5 + \frac{1}{\pi} \arctg(-42,1 + 2,63\varphi) \quad . \quad (5)$$

The regression graph (5) is attached to the measurement results (Fig. 3).

Conclusion

1. Function (3) can be used to approximate the nonlinear regression dependence of the probability of wood splintering during milling of finger joint elements on the angle of annual growth ring deviation.

2. Processing of the measurement results using the least squares method made it possible to perform parametric identification of dependence (3) and obtain the regression dependence (5).

3. The proposed methodology for determining the dependence of the probability of wood splintering during milling of finger joint elements on the angle of annual growth ring deviation is advisable for use in developing requirements for knot removal and in substantiating the parameters of algorithms for automatic wood defect removal lines equipped with machine vision system or other non-destructive wood testing system..

References

1. Krilek J., Melicherčík J., Kuvík T., Kováč J., Gendek A., Aniszewska M., Mareček J. Analysis of Cutting Forces in Cross-Sawing of Wood: A Study of Sintered Carbide and High-Speed Steel Blades. *Forests*. 2023. 14. 1395. URL: <https://doi.org/10.3390/f14071395>
2. Łukasz Warguła, Dominik Wojtkowiak, Mateusz Kukła, Krzysztof Talaśka. Modelling the process of splitting wood and chipless cutting *Pinus sylvestris* L. wood in terms of designing the geometry of the tools and the driving force of the machine. *European Journal of Wood and Wood Products*. URL: <https://doi.org/10.1007/s00107-022-01878-4>
3. Jozef Krilek, Ján Kováč, Marián Kučera. Wood Crosscutting Process Analysis for Circular Saws. *BioResources*. 2014. 9(1), 1417-1429. URL: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/wood-crosscutting-process-analysis-for-circular-saws>
4. Foley C. A three-dimensional paradigm of fiber orientation in timber. *Wood Science and Technology*. 2001. 35. P. 453-465. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00226-017-0952-3> (access date 05.08.2025)
5. Min Hu, Andreas Briggert, Anders Olsson, Marie Johansson, Jan Oscarsson, Harald Säll. Growth layer and fibre orientation around knots in Norway spruce: a laboratory investigation. *Wood Science and Technology*. 2017. URL: <https://doi.org/10.1007/s00226-017-0952-3>
6. Maximilian Pramreiter, Sabine C. Bodner, Jozef Keckes, Alexander Stadlmann, Cedou Kumpenza, Ulrich Müller. Influence of Fiber Deviation on Strength of Thin Birch (*Betula pendula* Roth.) Veneers. *Materials*. 2020. 13. 1484. URL: <https://doi.org/10.3390/ma13071484>
7. Nikolay Kyurkchiev, Svetoslav Markov. Sigmoid Functions: Some Approximation, and Modelling Aspects. 2015. 110 p. URL: https://www.biomath.bg/s%20markov%20publications/B2015-Kyurkchiev_Markov_Lambert.pdf (access date 02.12.2025)

**НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ
SCIENCE JOURNAL**

**ТЕХНІЧНИЙ СЕРВІС АГРОПРОМИСЛОВОГО,
ЛІСОВОГО ТА ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСІВ
2025, № 27**

Українською, англійською мовами

**Підписано до друку 30.12.2025.
Формат 60×84 1/8 Папір офсетний. Друк різнографічний.
Ум. друк. арк. 26,7. Обл.-вид. арк. 23,0.
Тираж 100 пр. Ціна договірна.**

**Адреса для листування: Україна, 61002, Харків, вул. Алчевських, 44,
Державний біотехнологічний університет
E-mail: [gurnal tc@ukr.net](mailto:gurnal_tc@ukr.net)**