

## 200 РОКІВ АЛЮМІНІЮ: ВІД ВІДКРИТТЯ ДО ІНОВАЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ У БУДІВНИЦТВІ ТА ІНЖЕНЕРІЇ

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ  
Вінницький національний технічний університет

У статті, присвяченій 200-річчю відкриття алюмінію, розглянуто формування інженерної ролі цього металу – від лабораторного феномену до стратегічного конструкційного матеріалу, що визначає інноваційні підходи в сучасному машинобудуванні, авіаційній промисловості та будівництві. У контексті цієї теми розглянуто сучасні технології виготовлення складних деталей з алюмінієвих сплавів, які мають критичне значення для точного виробництва та конструкційних систем нового покоління.

Автори акцентують увагу на ключових перевагах алюмінію як конструкційного матеріалу – малій густині, високій корозійній стійкості, добрій оброблюваності, а також здатності до вторинної переробки без втрати властивостей. Особливу увагу приділено технологіям лиття під тиском, фрикційному зварюванню, лазерному напilenню та адитивному виробництву з алюмінієвих порошків, які дозволяють створювати великогабаритні тонкостінні компоненти з високою точністю та мінімальними втратами матеріалу.

У роботі наведено приклади застосування алюмінієвих сплавів у виготовленні корпусних елементів електромобілів, дронів, а також для будівельних конструкцій нового покоління. Підкреслено важливість цифрового моделювання та автоматизованого проектування, що дозволяє оптимізувати геометрію деталей, зменшити масу конструкцій і підвищити їхню енергоефективність. Розглянуто вплив легуючих елементів (Mg, Si, Cu, Li) на структуру та механічні властивості сплавів, а також методи модифікації евтектичної структури Al – Si для покращення рідкотекучості та зниження дефектності лиття.

Стаття містить порівняльний аналіз традиційних і новітніх методів обробки алюмінієвих сплавів, включаючи гіакастинг – ресурсоефективний процес лиття великих деталей на гігантських пресах. Автори роблять висновок, що інтеграція інноваційних технологій у виробничі процеси дозволяє суттєво підвищити конкурентоспроможність алюмінієвих компонентів, зменшити енергоспоживання та сприяти розвитку циркулярної економіки. Для будівельної галузі алюміній стає не лише засобом реалізації інженерних рішень, а й інструментом архітектурної виразності, енергоефективності та екологічної безпечності, що роблять його перспективним матеріалом майбутнього.

**Ключові слова:** алюмінієві сплави, лиття під тиском, адитивне виробництво, Al – Si, гіакастинг, цифрове проектування, енергоефективність, модифікація структури, будівництво.

### Вступ

У 2025 році світова наука та промисловість відзначають 200-річчя відкриття алюмінію – одного з найважливіших конструкційних матеріалів сучасності. У 1825 році данський фізик Ганс Крістіан Ерстед уперше виділив алюміній у лабораторних умовах, відновивши хлорид алюмінію амальгамою калію [1]. Це відкриття стало початком епохи, в якій легкий, хімічно активний метал перетворився з лабораторного феномену на один із фундаментів техносфери – від авіації до космосу.

Сьогодні, в умовах масштабної реконструкції та технічного оновлення, алюміній відіграє ключову роль у будівельній галузі, зокрема у виробництві металоконструкцій. Застосування металоконструкцій у будівництві має всі передумови стати високоефективним інженерним рішенням, здатним суттєво прискорити процеси відбудови країни та модернізації її інфраструктури. Поєднання легкості, корозійної стійкості, технологічності та естетичної гнучкості робить алюміній стратегічним матеріалом для створення енергоефективних, довговічних та швидкокомонтованих споруд.

### Історичний розвиток промислового виробництва алюмінію

Уже у 1854 році француз Анрі Сент-Клер Девіль започаткував перше промислове виробництво алюмінію шляхом відновлення глинозему натрієм [2]. Перші зливки масою 6...8 кг були представлені на Всесвітній виставці в Парижі у 1855 році, де алюміній демонстрували поруч із державними скарбами. Рідкісність та металевий блиск зробили алюміній символом престижу – імператор Наполеон III використовував столові прибори з алюмінію під час офіційних прийомів.

Прорив у масове використання металу стався після відкриття електролітичного способу добування алюмінію – процесу Голла-Еру (1886), який майже одночасно запропонували Чарльз Голл (США) та Пол Еру (Франція) [3]. Цей метод, заснований на електролізі глинозему розплавленому кріоліті, зробив алюміній доступним для промисловості. Вже до 1893 року світове виробництво перевищило 1000 тон на рік.

Алюміній – третій за поширеністю елемент у земній корі після кисню і кремнію, але через високу хімічну активність він майже не зустрічається у вільному вигляді. Основною сировиною для його промислового добування стали боксити – алюмосилікатні породи з високим вмістом глинозему [4].

### **Фізико-хімічні параметри та сплави для ливарного виробництва**

Унікальне поєднання властивостей – низька густина ( $2,7 \text{ г/см}^3$ ), висока корозійна стійкість, добра електро- та теплопровідність, пластичність – зробили алюміній ідеальним конструкційним матеріалом. У сплавах, таких як дюралюміній, алюмінієво-літєві системи або силуміни, він досягає міцності понад 500 МПа при збереженні малої маси [5]. Саме ці сплави стали основою для ливарного виробництва складних тонкостінних деталей. Зокрема, сплави на основі системи Al – Si (силуміни) евтектичної та заевтектичної груп мають найвищу рідкотекучість серед кольорових сплавів, що забезпечує точне заповнення ливарних форм і мінімізацію усадкових дефектів у литві [6, 7].

У перші десятиліття після відкриття алюмінію промислове застосування отримали переважно деформовані сплави, в яких кремній (Si) вважався шкідливою домішкою. Цей підхід вплинув також і на ливарників, які тривалий час уникали використання кремнію у ливарних алюмінієвих сплавах. Прорив стався на початку ХХ століття, коли було відкрито модифікуючу дію натрію (Na) на евтектику Al – Si. Саме це дозволило стабілізувати структуру сплаву, покращити механічні властивості та забезпечити широке промислове застосування ливарних алюмінієвих сплавів [8]. Цей етап розвитку припадає приблизно на 1910 – 1920 роки, коли ливарне виробництво кольорових металів почало активно формуватися як окрема галузь [9].

### **Алюміній у транспорті, авіації та космічній техніці**

Перші літаки братів Райтів уже містили елементи з алюмінію. Під час Першої світової війни він став стратегічним матеріалом, а з другої половини ХХ століття – незамінним у авіаційній та космічній техніці [10, 11]. У сучасних літаках понад 70% маси конструкцій припадає на алюмінієві сплави. У автомобілебудуванні алюміній дозволив істотно знизити масу кузовів, поліпшити аеродинаміку, а також зменшити споживання пального. Першим серійним автомобілем з повністю алюмінієвим кузовом став Audi A8 (1994) [12, 13]. У 2020-х роках Tesla впровадила масштабне лиття алюмінієвих кузовних елементів методом лиття під тиском на гігантських пресах – Giga Press – що дозволило замінити десятки зварених деталей цільними ливарними компонентами, зменшивши вагу та витрати [14].

У космічній галузі алюміній – основа для баків ракет, опорних структур супутників та теплових екранів. Його застосування стало критичним для NASA та ESA завдяки ідеальному співвідношенню міцності до ваги та стійкості до температурних коливань [15...17].

### **Алюміній у сучасному будівництві: фасади, профілі, композити**

Особливо вагомим є внесок алюмінію у сучасне будівництво. Метал та його сплави стали базовим матеріалом для створення фасадних систем, віконно-дверних профілів, легких мостових конструкцій та композитних панелей. Завдяки корозійній стійкості, а також декоративним властивостям алюмінієві композити активно використовуються в архітектурі для вентиляованих фасадів, дахових систем та інтер'єрних рішень [24]. Сучасні багатошарові панелі на основі алюмінію поєднують легкість, високу жорсткість і енергоефективність, що робить їх конкурентними матеріалами у «зеленому» будівництві [25]. Крім того, розвиток цифрових технологій проектування дозволяє створювати складні просторові конструкції з алюмінієвих сплавів, що поєднують міцність і естетику [26].

### **Циркулярна економіка та екологічна ефективність**

Ще однією перевагою алюмінію є його майже 100% – придатність до переробки без втрати властивостей. Переробка алюмінію потребує лише 5% енергії, порівняно з первинним виробництвом, що дозволяє знизити викиди CO<sub>2</sub> до 90% [18...21]. Близько 75% алюмінію, будь-коли виробленого, досі перебуває в обігу [19, 21]. Це робить його ключовим ресурсом у циркулярній економіці та «зеленій» металургії [20].

### **Новітні технології обробки та виготовлення алюмінієвих конструкцій**

Сучасні дослідження алюмінієвих матеріалів охоплюють широкий спектр напрямів – від створення наноструктурованих сплавів [22] та адитивного виробництва з алюмінієвих порошків чи дроту до

фрикційного зварювання, лазерного напилення, а також гігакастингу – ресурсоефективного процесу лиття великих тонкостінних деталей. Ці технології суттєво підвищують конкурентоспроможність алюмінієвих компонентів у точному машинобудуванні, авіації, електромобілях, дронах, а також у будівельній індустрії нового покоління [19, 23, 24...26].

Інтеграція цифрових інструментів проектування – таких як параметричне моделювання, топологічна оптимізація та віртуальне тестування – дозволяє створювати складні просторові конструкції з мінімальною масою та максимальною функціональністю. Це особливо актуально для будівництва енергоефективних споруд, де важливу роль відіграє не лише міцність, а й термічна інерція, жорсткість, адаптивність до навантажень.

Застосування адитивних технологій у будівництві – зокрема 3D-друку з алюмінієвих сплавів – відкриває нові можливості для виготовлення нестандартних фасадних елементів, криволінійних профілів, декоративних конструкцій та інтегрованих систем вентиляції чи освітлення. Такі рішення вже тестуються у пілотних проектах «розумних будинків» та модульних споруд.

### Висновки

- Таким чином, алюміній сьогодні – це не просто конструкційний матеріал, а універсальний елемент техносфери: від побутових виробів і транспортних систем до енергетики, архітектури та цифрових технологій. Його еволюція – від експерименту Ерстеда до понад 60 мільйонів тон щорічного виробництва – є прикладом того, як наука, технології та промисловість здатні змінити світ [11].
- Для будівельної галузі алюміній став не лише засобом реалізації інженерних рішень, а й інструментом архітектурної виразності, енергоефективності та екологічної відповідальності. Його здатність до переробки, легкість, технологічність і естетика роблять його матеріалом майбутнього – у прямому сенсі слова.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Habashi F. The beginnings of the aluminum industry. *Nano Studies*. – 2013. – Vol. 8. – P. 333 – 344.
- [2] Eskin D.G. Physical Metallurgy of Direct Chill Casting of Aluminum Alloys. – Boca Raton: CRC Press, 2008. – 326 p.
- [3] Ashkenazi D. How aluminum changed the world: A metallurgical revolution through technological and cultural perspectives. *Technol. Forecast. Soc. Change*. – 2019. – Vol. 146. – P. 431 – 439.
- [4] European Aluminium Association [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://european-aluminium.eu>
- [5] Polmear I.J. Light Alloys: From Traditional Alloys to Nanocrystals. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006. – 379 p.
- [6] Aluminum Silicon Alloys Guide: Types, Properties and Machining Practices [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://richconn.com/aluminum-silicon-alloys>
- [7] Advantages of Casting Aluminium Alloys with Silicon [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://aluminium-guide.com/aluminium-silicon-casting-alloys>
- [8] Möller H., Govender G., Stumpf W. The effect of sodium modification on the fatigue properties of Al–Si–Mg casting alloys. *International Journal of Cast Metals Research*. – 2009. – Vol. 22, № 6. – P. 417 – 421. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1179/174313309x436682>
- [9] Davis J.R. Aluminum and Aluminum Alloys. - ASM International, 1993. – 416 p.
- [10] Zaki A., Fouad H., Abdelwahab M. et al. Applications of aluminum and aluminum alloys in aerospace industry. *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – Vol. 27. – P. 2401 – 2406.
- [11] History of aluminium in the aerospace industry [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://femltd.com/2022/12/08/history-of-aluminium-in-the-aerospace-industry>
- [12] Hirsch J. Aluminium in innovative light-weight car design. *Materials Transactions*. – 2011. – Vol. 52, № 5. – P. 818 –824. – <https://doi.org/10.2320/matertrans.L-MZ201132>.
- [13] Aluminium Car Body in Audi A8 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://aluminium-guide.com/aluminium-car-body>
- [14] Giga Press [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://en.wikipedia.org/wiki/Giga\\_Press](https://en.wikipedia.org/wiki/Giga_Press)
- [15] NASA Technical Reports Server (NTRS) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ntrs.nasa.gov> (дата звернення: 14.05.2025).
- [16] Cooling aluminium alloy research [Електронний ресурс] // ESA. – Режим доступу: [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Human\\_and\\_Robotic\\_Exploration/Research/Cooling\\_aluminium\\_alloy\\_research](https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Research/Cooling_aluminium_alloy_research)
- [17] Aluminum in Space Travel: Beyond Earth's Atmosphere [Електронний ресурс] // Elka Mehr. – Режим доступу: <https://elkamehr.com/en/aluminum-in-space-travel-beyond-earths-atmosphere>
- [18] Subramanian S. Recycling of Aluminum: Science and Technology. – Boca Raton: CRC Press, 2017. – 284 p.
- [19] Kumar K.S., Suresh S., Chisholm M.F., Horton J.A., Wang P. High strength, high ductility nanostructured metals. *Progress in Materials Science*. – 2003. – Vol. 48, № 4. – P. 377–416. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(02\)00003-2](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(02)00003-2)
- [20] Aluminium recycling saves 95% of energy [Електронний ресурс] // International Aluminium Institute. – Режим доступу: <https://international-aluminium.org>
- [21] Sustainability – Recycling [Електронний ресурс] // Aluminum Association. – Режим доступу: <https://www.aluminum.org/Recycling>
- [22] Гнатуш В.А., Дорошенко В.С. Рост производства алюминиевого литья в начале XXI века. *Металл и литье Украины*. – 2019. – № 3-4. – С. 25-33.

- [23] Martin J.H., Yahata B.D., Hundley J.M. та ін. 3D Printing of High-Strength Aluminium Alloys // *Nature*. – 2017. – Vol. 549. – P. 365 – 369. <https://doi.org/10.1038/nature23894>
- [24] Chalco Aluminum. Алюмінієві сендвіч-панелі: повний спектр для різноманітних застосувань [Електронний ресурс] / Chalco Aluminum. – Режим доступу: <https://www.chalcoaluminum.com/uk/knowledge/sandwich-panel/>, вільний. – Назва з екрана.
- [25] Швець Л. В. Новітні технології виготовлення складних та асиметричних деталей із алюмінієвих сплавів [Електронний ресурс] // *Матеріали XX Міжнар. наук. конф., присвяч. 119-й річниці з дня народження акад. П. М. Василенка, 17–19 жовт. 2019 р.* – Вінниця: ВНАУ, 2019. – С. 137. – Режим доступу: <http://repository.vsau.org/card.php?lang=uk&id=24666>.
- [26] GALAXYBOND. Алюмінієві композитні панелі GALAXYBOND: переваги, застосування, сертифікація [Електронний ресурс] / GALAXYBOND. – Режим доступу: <https://alusteelbond.com/ua/>

## REFERENCES

- [1] Habashi F. The beginnings of the aluminum industry. *Nano Studies*. – 2013. – Vol. 8. – P. 333 – 344.
- [2] Eskin D.G. *Physical Metallurgy of Direct Chill Casting of Aluminum Alloys*. – Boca Raton: CRC Press, 2008. – 326 p.
- [3] Ashkenazi D. How aluminum changed the world: A metallurgical revolution through technological and cultural perspectives. *Technol. Forecast. Soc. Change*. – 2019. – Vol. 146. – P. 431 – 439.
- [4] European Aluminium Association [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://european-aluminium.eu>
- [5] Polmear I.J. *Light Alloys: From Traditional Alloys to Nanocrystals*. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006. – 379 p.
- [6] Aluminum Silicon Alloys Guide: Types, Properties and Machining Practices [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://richconn.com/aluminum-silicon-alloys>
- [7] Advantages of Casting Aluminium Alloys with Silicon [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://aluminium-guide.com/aluminium-silicon-casting-alloys>
- [8] Möller H., Govender G., Stumpf W. The effect of sodium modification on the fatigue properties of Al – Si – Mg casting alloys. *International Journal of Cast Metals Research*. – 2009. – Vol. 22, № 6. – P. 417 – 421. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1179/174313309x436682>
- [9] Davis J.R. *Aluminum and Aluminum Alloys*. - ASM International, 1993. – 416 p.
- [10] Zaki A., Fouad H., Abdelwahab M. et al. Applications of aluminum and aluminum alloys in aerospace industry. *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – Vol. 27. – P. 2401 – 2406.
- [11] History of aluminium in the aerospace industry [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://femltd.com/2022/12/08/history-of-aluminium-in-the-aerospace-industry>
- [12] Hirsch J. Aluminium in innovative light-weight car design. *Materials Transactions*. – 2011. – Vol. 52, № 5. – P. 818 –824. – <https://doi.org/10.2320/matertrans.L-MZ201132>.
- [13] Aluminium Car Body in Audi A8 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://aluminium-guide.com/aluminium-car-body>
- [14] Giga Press [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://en.wikipedia.org/wiki/Giga\\_Press](https://en.wikipedia.org/wiki/Giga_Press)
- [15] NASA Technical Reports Server (NTRS) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ntrs.nasa.gov> (дата звернення: 14.05.2025).
- [16] Cooling aluminium alloy research [Електронний ресурс] // ESA. – Режим доступу: [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Human\\_and\\_Robotic\\_Exploration/Research/Cooling\\_aluminium\\_alloy\\_research](https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Research/Cooling_aluminium_alloy_research)
- [17] Aluminum in Space Travel: Beyond Earth's Atmosphere [Електронний ресурс] // Elka Mehr. – Режим доступу: <https://elkamehr.com/en/aluminum-in-space-travel-beyond-earths-atmosphere>
- [18] Subramanian S. *Recycling of Aluminum: Science and Technology*. – Boca Raton: CRC Press, 2017. – 284 p.
- [19] Kumar K.S., Suresh S., Chisholm M.F., Horton J.A., Wang P. High strength, high ductility nanostructured metals. *Progress in Materials Science*. – 2003. – Vol. 48, № 4. – P. 377–416. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(02\)00003-2](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(02)00003-2)
- [20] Aluminium recycling saves 95% of energy [Електронний ресурс] // International Aluminium Institute. – Режим доступу: <https://international-aluminium.org>
- [21] Sustainability – Recycling [Електронний ресурс] // Aluminum Association. – Режим доступу: <https://www.aluminum.org/Recycling>
- [22] Hnatush V.A., Doroshenko V.S. (2019). Rost proizvodstva alyuminievogo lit'ya v nachale XXI veka. *Metall i lit'e Ukrainy*, (3–4), 25 – 33. [in Russian]
- [23] Chalco Aluminum. (n.d.). *Aluminiïevi sendvich-paneli: povnyi spekt dlia riznomanitnykh zastosovan* [Aluminum sandwich panels: full range for various applications]. Retrieved from <https://www.chalcoaluminum.com/uk/knowledge/sandwich-panel/> [in Ukrainian]
- [24] Shvets L.V. (2019). *Novitni tekhnolohii vyhotovlennia skladnykh detaley iz alyuminiïevykh splaviv* [Modern technologies for manufacturing complex aluminum alloy parts]. In *Proceedings of the 20th International Scientific Conference dedicated to the 119th anniversary of Academician P.M. Vasilenko* (p. 137). Vinnytsia: VNAU. Retrieved from <http://repository.vsau.org/card.php?lang=uk&id=24666> [in Ukrainian]
- [25] Galaxybond. (n.d.). *Aluminiïevi kompozytni paneli Galaxybond: perevahy, zastosuvannia, sertyfikatsiia* [Aluminum composite panels Galaxybond: advantages, applications, certification]. Retrieved from <https://alusteelbond.com/ua/> [in Ukrainian]

**Дорошенко Володимир Степанович** – д-р техн. наук, провідний науковий співробітник відділу фізико-хімії ливарних процесів, Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (м. Київ), e-mail: [doro55v@gmail.com](mailto:doro55v@gmail.com), [orcid.org/0000-0002-0070-5663](https://orcid.org/0000-0002-0070-5663).

**Янченко Олександр Борисович** – к.т.н. / Ph.D., доцент, кафедри галузевого машинобудування, Вінницький національний технічний університет, e-mail: [1961yab@gmail.com](mailto:1961yab@gmail.com), [orcid.org/0000-0002-3888-3772](https://orcid.org/0000-0002-3888-3772).

V. Doroshenko  
O. Yanchenko

## 200 YEARS OF ALUMINUM: FROM DISCOVERY TO INNOVATIVE MATERIALS AND STRUCTURES IN CONSTRUCTION AND ENGINEERING

Physical and Technical Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

Vinnitsia National Technical University

*The article, dedicated to the 200th anniversary of the discovery of aluminum, examines the formation of its engineering role – from a laboratory phenomenon to a strategic structural material that shapes innovative approaches in modern mechanical engineering, the aviation industry, and construction. In this context, modern technologies for manufacturing complex parts from aluminum alloys, which are of critical importance for precision manufacturing and next-generation structural systems, are considered.*

*The authors focus on the key advantages of aluminum as a structural material – low density, high corrosion resistance, good machinability, and the ability to be recycled without losing its properties. Particular attention is paid to technologies such as pressure casting, friction welding, laser spraying, and additive manufacturing using aluminum powders, which enable the creation of large-sized, thin-walled components with high accuracy and minimal material loss.*

*The paper provides examples of the use of aluminum alloys in the manufacture of body elements for electric vehicles and drones, as well as in advanced building structures. The importance of digital modeling and automated design is emphasized, as these tools allow for the optimization of part geometry, reduction of structural mass, and enhancement of energy efficiency.*

*The influence of alloying elements (Mg, Si, Cu, Li) on the structure and mechanical properties of aluminum alloys is analyzed, along with methods for modifying the Al–Si eutectic structure to improve fluidity and reduce casting defects.*

*The article presents a comparative analysis of traditional and modern methods for processing aluminum alloys, including gigacasting – a resource-efficient process for casting large parts using giant presses. The authors conclude that the integration of innovative technologies into production processes significantly enhances the competitiveness of aluminum components, reduces energy consumption, and promotes the development of a circular economy. For the construction industry, aluminum has become not only a means of implementing engineering solutions, but also a tool for architectural expressiveness, energy efficiency, and environmental safety – qualities that make it a highly promising material for the future.*

**Keywords:** aluminum alloys, die casting, additive manufacturing, Al–Si, gigacasting, digital design, energy efficiency, structure modification, construction.

**Doroshenko Volodymyr** – Dr. Sci. (Engin.), Leading Researcher, Department of Physical Chemistry of Foundry Processes, Physical and Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv), e-mail: [doro55v@gmail.com](mailto:doro55v@gmail.com), [orcid.org/0000-0002-0070-5663](https://orcid.org/0000-0002-0070-5663).

**Yanchenko Olexander** – PhD (Engin.), Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Vinnitsia National Technical University, e-mail: [1961yab@gmail.com](mailto:1961yab@gmail.com), [orcid.org/0000-0002-3888-3772](https://orcid.org/0000-0002-3888-3772).