

УДК 629.341

ВПЛИВ НЕОДНОРІДНОСТІ ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ НА ХАРАКТЕР ЗНОСУ РІЗЦІВ ІЗ РІЗНИХ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Кандидати техн. наук Н. О. Лалазарова, Г. Л. Комарова,
О. В. Афанасьєва, О. Г. Попова

INFLUENCE OF THE INHOMOGENEITY OF HIGH-STRENGTH CAST IRON ON THE WEAR CHARACTER OF CUTTERS MADE OF VARIOUS TOOL MATERIALS

PhD (Tech.) N. Lalazarova, PhD (Tech.) G. Komarova, PhD (Tech.) O. Afanasieva,
PhD (Tech.) O. Popova

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.351810>



Анотація. Із високоміцного чавуну виготовляють важконавантажені деталі транспортних засобів, які повинні мати високий рівень експлуатаційних властивостей, що погіршує їх оброблюваність різанням. У роботі показано, що вирішальний вплив на стійкість інструментів із різних інструментальних матеріалів має неоднорідність чавуну, що підтверджено якісним аналізом поверхонь зносу і результатами стійкісних випробувань і розрахунками режиму різання.

Ключові слова: високоміцний чавун, неоднорідність, оброблюваність, твердий сплав, надтвердий інструментальний матеріал, мінералокераміка, знос інструменту, режим різання.

Abstract. High-strength spheroidal graphite cast iron is used to make heavily loaded vehicle parts that must have a high level of performance properties, which impairs their machinability. Research into the wear characteristics of tools made of hard alloy, superhard tool material and mineral ceramics and providing recommendations on cutting modes when turning products made of high-strength cast iron, taking into account its heterogeneity. The worn surfaces of the cutting inserts were examined using an EM-100BP electron microscope and a PEM-200 scanning electron microscope. Studies of the wear surfaces of tools made of hard alloy BK8, superhard tool material composite K10Д, mineral ceramics BOK71 showed that when machining high-strength cast iron, fatigue phenomena are characteristic of all materials, which are accompanied by the formation of microcracks, chipping, and tearing. Qualitative analysis of wear surfaces and developed recommendations on cutting modes showed that the decisive influence on tool wear and machinability of high-strength cast iron is the coefficient of heterogeneity, which takes into account the complex influence of the microstructure, chemical and structural heterogeneity of cast iron, which leads to instability of the cutting process, causes oscillatory loads on the tool and intensifies its wear. There is a good correlation between the nature of tool surface wear, durability (cutting speed) and the coefficient of cast iron heterogeneity: the highest cutting speed and the lowest degree of destruction of wear surfaces are observed when processing cast iron with the lowest degree of heterogeneity, which was subjected to double normalization. For tool materials BK8, K10Д, BOK71, recommendations on cutting modes (cutting speed) during turning have been developed, which take into account the heterogeneity of high-strength cast iron. The highest productivity in processing products from high-temperature carbon steel is achieved by the K10Д composite.

Keywords: high-strength cast iron, heterogeneity, machinability, hard alloy, superhard tool material, mineral ceramics, tool wear, cutting mode.

Вступ. На сьогодні в різних країнах широкого застосування як конструкційний матеріал знаходить високоміцний чавун із кулястим графітом (ВЧКГ) [1]. Із нього виготовляють відповідальні і важконавантажені деталі автомобілів, залізничного транспорту, тракторів, комбайнів, нафтогазового обладнання, які працюють в умовах циклічних і ударних навантажень, у корозійному середовищі, в умовах тертя: колінчасті і розподільні вали, шестірні, блоки циліндрів та ін. [2]. Тому високоміцний чавун повинен мати високий рівень експлуатаційних властивостей, що погіршує оброблюваність різанням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оброблюваність чавунів залежить від їхньої структури і властивостей, властивостей матеріалу інструменту, його геометрії, режимів обробки та інших факторів [3].

Для чорнової і напівчистої обробки високоміцних чавунів рекомендовано використовувати тверді сплави: ВК8, ВК6 без покриття і з покриттям, для чистої обробки – ВК6, ВК6ОМ [4]. Для чистої обробки також рекомендовані інструменти з мінералокераміки [4] і надтвердих інструментальних матеріалів (НТМ) [5]. Рекомендації з використання твердих сплавів, НТМ і мінералокераміки надані не диференційовано для чавунів певної твердості з певною структурою, а всієї групи чавунів. Загартовані чавуни рекомендовано обробляти інструментами з НТМ і мінералокерамікою. Аналіз рекомендацій показав, що вони мають несистематизований характер.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є дослідження особливостей зносу інструментів із твердого сплаву, надтвердого інструментального матеріалу і мінералокераміки та надання рекомендацій із режимів різання для точіння виробів із високоміцного чавуну з урахуванням його неоднорідності. Для того щоб забезпечити досягнення цієї мети, були поставлені та вирішені такі завдання:

1) дослідження особливостей зносу інструментів із різних інструментальних матеріалів для обробки ВЧКГ із різною мікроструктурою; 2) надання рекомендацій із режимів різання, що враховують неоднорідність чавуну.

Основна частина дослідження.

Дослідження проводили на високоміцному чавуні з кулястим графітом хімічного складу: 3,3-3,8 % С; 2,4-3,2 % Si; $C+1/3 Si = 4,25-4,35$ %; 0,004-0,007 % S; 0,5-0,9 % Mn; 0,045-0,008 % P; 0,05-0,1 % Cr; 0,1-0,15 % Ni; 0,04-0,09 % Mg. Цей чавун використовують для виготовлення колінчастих і розподільних валів, блоків циліндрів, поршневих кілець. Чавун обробляли різцями з механічним кріпленням змінних пластин із твердого сплаву ВК8 (п'ятигранні пластини), надтвердого інструментального матеріалу – композит К10Д (гексаніт-Р на підкладці з твердого сплаву, пластини діаметром 9 мм), мінералокераміки ВОК71 (чотиригранні пластини). Зношені поверхні різальних пластин досліджували за допомогою бінокулярного мікроскопа МБС-9, електронного мікроскопа ЕМ-100БР і растрового електронного мікроскопа РЕМ-200.

ВЧКГ має значну неоднорідність – хімічну і структурну [6].

Для ВЧКГ у литому стані характерна хімічна неоднорідність, що пов'язана з розвиненою ліквіацією ряду хімічних елементів: кремній схильний до значної зворотної ліквіації, марганець і фосфор – прямої. Хімічна ліквіація є причиною структурної неоднорідності – ферит розташований навкруги включень кулькового графіту.

Неоднорідність чавуну відіграє вирішальну роль у погіршенні його оброблюваності. Існують різні методики визначення неоднорідності чавуну, наприклад мультифрактальний аналіз [7]. У роботі використана методика оцінювання неоднорідності чавуну за миттєвими значеннями сили різання [8]. Сила різання – це результат комплексного впливу мікроструктури, хімічної та структурної неоднорідності чавуну на інструмент.

Інструментальні матеріали, які найчастіше використовують для обробки високоміцного чавуну, мають низькі границі міцності на згин. Тому для цих інструментів нестабільність процесу різання і коливальні навантаження, що викликані неоднорідністю чавуну, становлять певну небезпеку. Усе це сприяє інтенсифікації зносу інструменту і погіршенню оброблюваності чавуну. Коефіцієнт неоднорідності розраховували як відношення коефіцієнтів варіації миттєвих значень сили різання для ВЧКГ і сірого чавуну СЧ20, який був прийнятий за еталон [8].

У роботі досліджували вплив мікроструктури та властивостей чавуну, що комплексно враховано коефіцієнтом неоднорідності, на знос інструменту з різних матеріалів – твердого сплаву ВК8, надтвердого інструментального матеріалу композит К10Д, мінералокераміки ВОК71.

Ступінь неоднорідності чавуну змінювали термічною обробкою за режимами, що наведені в табл. 1.

Для практичного застосування на виробництві потрібне кількісне вираження оброблюваності високоміцного чавуну у вигляді режимів різання. Для цього на основі стійкісних випробувань були одержані експериментальні значення режимів різання (швидкість різання V_c за стійкості 60 хв) для різних інструментальних матеріалів (табл. 2).

Також розраховано швидкість різання (V_p) з урахуванням коефіцієнта неоднорідності відносно швидкості різання для сірого чавуну (табл. 2) [7].

Аналіз експериментальних і розрахункових значень швидкості різання показав, що вони близькі за величиною (табл. 2). Також існує добра кореляція між стійкістю (швидкістю різання) і коефіцієнтом неоднорідності чавуну: найбільшу швидкість різання спостерігають із обробкою чавуну з найменшим ступенем неоднорідності – чавун № 2, який піддавали подвійній нормалізації (табл. 2).

Таблиця 1

Стан і властивості високоміцного чавуну

Стан чавун	Твердість чавуну HBW	Коефіцієнт неоднорідності K_H
1. Литий стан	210-220	1,70
2. Подвійна нормалізація: нагрівання до 890 °С, витримання 1,5 год, охолодження на повітрі, нагрівання до 860 °С, витримка 1,5 год, охолодження в струмені повітря	250-260	1,26
3. Нормалізація з МКІ: нагрівання до 860 °С, витримання 1,5 год, охолодження в струмені повітря	275-285	1,36
4. Гартування і відпуск: нагрівання до 860 °С, витримання 1,5 год, охолодження в маслі. Відпуск за температури 550 °С протягом 2 год, охолодження на повітрі	330-340	1,77
5. Гартування і відпуск: нагрів до 860 °С, витримання 1,5 год, охолодження в маслі. Відпуск за температури 220 °С протягом 2 год, охолодження на повітрі	470-480	1,90

Таблиця 2

Експериментальні і розрахункові значення швидкості різання для обробки ВЧКГ різними інструментальними матеріалами

Чавун	Твердість чавуну HBW	Матеріал різальної частини			
		ВК8	К10Д	К11	ВОК71
		* V_e / V_p , м/с	* V_e / V_p , м/с	V_e / V_p , м/с	V_e / V_p , м/с
1	210-220	1,8/1,5	4,5/4,2	3,8/3,6	3,4/3,2
2	260-270	2,8/2,6	5,6/5,4	5,0/4,7	4,2/3,9
3	275-280	2,0/1,7	5,3/5,2	4,7/4,6	3,8/3,7
4	330-340	1,2/0,9	4,3/3,9	3,7/3,4	3,5/3,4
5	470-480	0,9/0,7	3,7/3,6	3,3/3,0	3,2/3,0

Примітки: V_e^* – експериментальні значення швидкості різання для стійкості 60 хв;

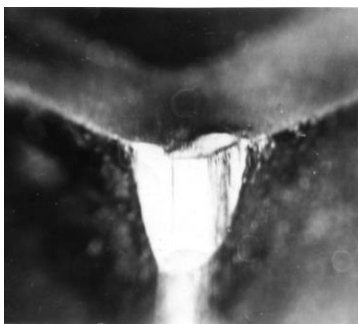
V^{**} – розрахункові значення швидкості різання для стійкості 60 хв.

Дослідження поверхонь зносу показали, що твердий сплав зношується як по задній, так і передній поверхні (рис. 1, а), а надтверді інструментальні матеріали (б) і мінералокераміка зношуються переважно по задній поверхні (в).

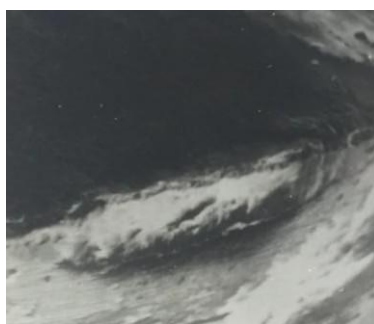
Обробка загартованого чавуну, який має найбільший ступінь неоднорідності ($k_n = 1,9$), сприяє найбільш інтенсивному втомному зносу надтвердих інструментальних матеріалів, що проілюстровано зображеннями поверхонь зносу різця з

пластиною з К10Д, які після обробки загартованого чавуну носять сліди втомних явищ (рис. 2). На задній поверхні видні осередки руйнувань, виривання (а). Втомні явища призводять також до мікрОВикришувань різальної кромки (б).

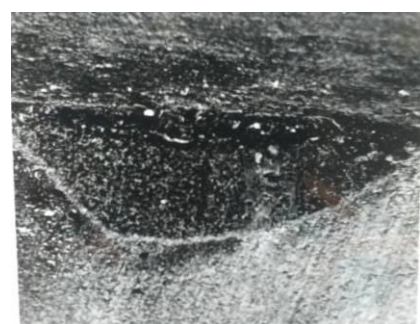
Аналіз зношених поверхонь мінералокераміки ВОК71 також підтверджує вирішальну роль неоднорідності у впливі на знос і оброблюваність чавуну (рис. 3).



а



б



в

Рис. 1. Знос різців: а – ВК8; б – К10Д; в – ВОК71

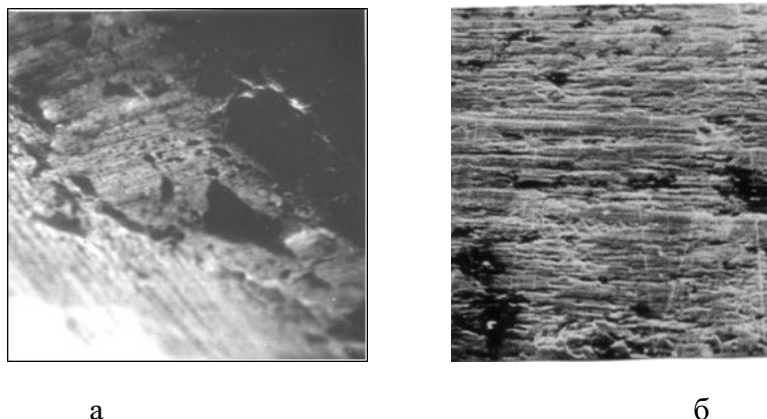


Рис. 2. Види зносу різців із K10Д після точіння загартованого чавуну:
а – втомний і абразивний знос, $\times 900$; б – мікротріщини, $\times 150$,
режим різання $S = 0,07$ мм/об, $t = 0,4$ мм, $V = 3,7$ м/с

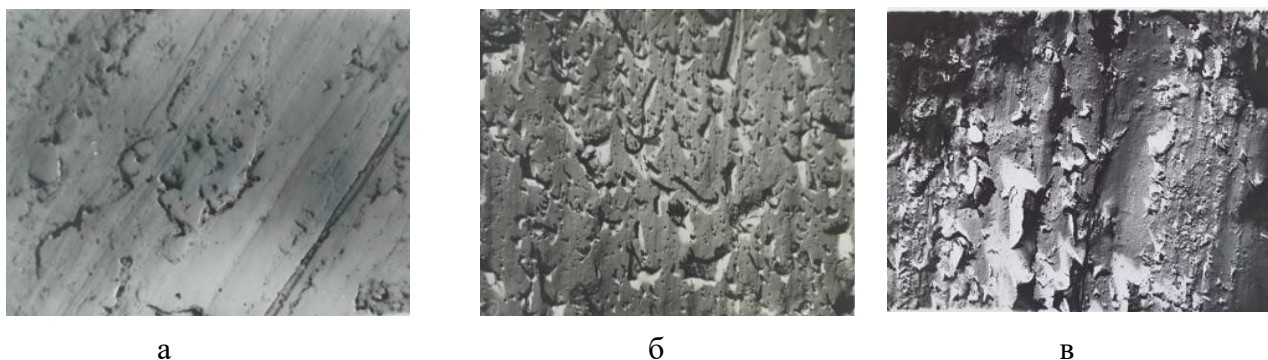


Рис. 3. Види зносу різців із керамічного сплаву BOK71: а – незношена пластина;
б – обробка чавуну після подвійної нормалізації, режим різання $S = 0,07$ мм/об, $t = 0,4$ мм,
 $V = 2,6$ м/с; в – обробка чавуну після гартування і низького відпуску,
режим різання $S = 0,07$ мм/об, $t = 0,4$ мм, $V = 2,0$ м/с, $\times 10000$

Мінералокераміка має підвищену крихкість, і для неї вплив циклічних ударних навантажень на різальну кромку є вирішальним – спостерігають інтенсивне викришування поверхонь різця і різальної кромки (рис. 3). Якісний аналіз поверхонь зносу показав, що це викришування більш інтенсивне під час обробки загартованого чавуну (в), ніж після подвійної нормалізації (б).

Ще одним підтвердженням значної ролі неоднорідності, як негативного фактора оброблюваності ВЧКГ, є аналіз

поверхонь зносу твердого сплаву BK8 (рис. 4).

Зношені поверхні твердого сплаву BK8 після точіння нормалізованого з МКІ чавуну ($k_n = 1,36$) (рис. 4, б) мають вищий ступінь руйнування, ніж після подвійної нормалізації ($k_n = 1,26$) (рис. 4, а). Поверхні зносу після точіння вкриті сіткою мікротріщин, розвиток яких призводить до сколів. Твердість чавунів при цьому не дуже відрізняється: 275-285 HBW після нормалізації з МКІ і 250-260 HBW після подвійної нормалізації.

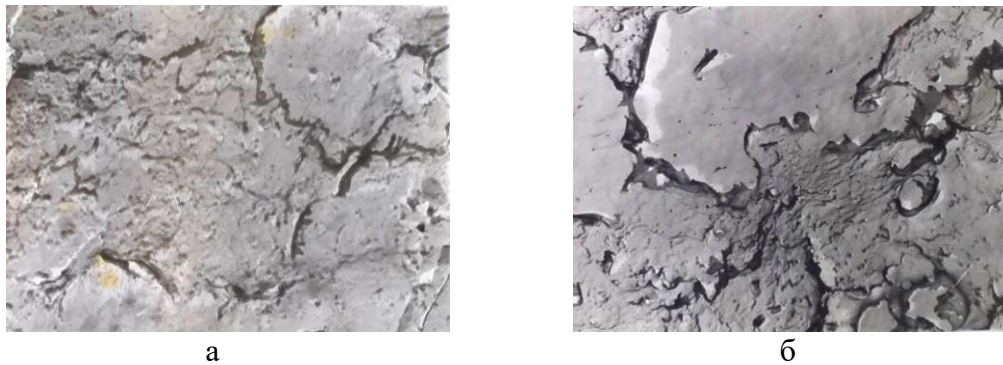


Рис. 4. Мікротріщини на поверхні зносу різців із твердого сплаву ВК8 після обробки чавуну: а – подвійна нормалізація; б – нормалізація з МКІ, режим різання $S = 0,07$ мм/об, $t = 0,4$ мм, $V = 2,0$ м/с, $\times 10000$

Аналіз зношених поверхонь твердого сплаву, надтвердого інструментального матеріалу, кераміки показав, що з обробкою високоміцного чавуну характерними для всіх матеріалів є втомні явища, які супроводжені утворенням мікротріщин, викришувань, виривів.

Збільшення ступеня неоднорідності чавуну сприяє інтенсифікації втомних руйнувань. Коефіцієнт неоднорідності більш об'єктивно відображає вплив мікроструктури і властивостей чавуну, ніж твердість, на стійкість інструменту (швидкість різання).

Аналіз зношених поверхонь інструментів після обробки високоміцного чавуну з різним ступенем неоднорідності є об'єктивним підтвердженням того, що неоднорідність чавуну має вирішальний вплив на характер зносу інструментів із різних інструментальних матеріалів і оброблюваність у цілому.

Якісні відмінності, які спостерігають у процесі зношування, добре узгоджені з розрахунковими та експериментальними значеннями швидкості різання, одержаними з проведенням стійкісних випробувань.

Проведений аналіз показав, що для визначення режиму різання (швидкості різання) необхідно враховувати не тільки твердість чавуну, а і мікроструктуру через коефіцієнт неоднорідності.

Проведений аналіз розрахованих значень режимів різання (швидкості різання) показав, що найбільшу продуктивність для обробки виробів із ВЧКГ мають різці з композиту К10Д – гексаніту-Р. Різці з кераміки ВОК71 також можна рекомендувати для напівчистої і чистої обробки високоміцного чавуну.

Висновки. Дослідження поверхонь зносу інструментів із твердого сплаву ВК8, надтвердого інструментального матеріалу композит К10Д, мінералокераміки ВОК71 показали, що з обробкою високоміцного чавуну характерними для всіх матеріалів є втомні явища, які супроводжені утворенням мікротріщин, викришувань, виривів.

Якісний аналіз поверхонь зносу і розроблені рекомендації з режимів різання показали, що вирішальний вплив на знос інструменту і оброблюваність високоміцного чавуну має коефіцієнт неоднорідності, який враховує комплексний вплив мікроструктури, хімічної та структурної неоднорідності чавуну, що призводить до нестабільності процесу різання, викликає коливальні навантаження на інструмент та інтенсифікує його знос.

Існує добра кореляція між стійкістю (швидкістю різання) і коефіцієнтом неоднорідності чавуну: найбільшу швидкість різання спостерігають із обробкою чавуну з найменшим ступенем

неоднорідності, який піддавали подвійній нормалізації.

Для інструментальних матеріалів ВК8, К10Д, ВОК71 розроблені рекомендації з режимів різання (швидкість різання) для

точіння з урахуванням неоднорідності високоміцного чавуну.

Найбільшу продуктивність для обробки виробів із ВЧКГ мають різці з пластинами К10Д – гексаніту-Р.

Список використаних джерел

1. 50th Census of World Casting Production : Modern Casting, December 2016. P. 25–29.
2. Doru M. Stefanescu. ASM Handbook, Volume 1A: Cast Iron Science and Technology. ASM International, 2017. 772 p.
3. Chikali P. B., Shinde V. D. Analysis of machinability in ductile iron casting. Materialstoday: Proceedings. 2020. Vol. 27, Part 1. P. 584-588.
4. Залога В. О., Гончаров В. Д., Залога О. О. Сучасні інструментальні матеріали у машинобудуванні: навч. посіб. / за заг. ред. В. О. Залого. Суми: Сумський державний університет, 2013. 371 с.
5. Радкевич С. І., Глембоцька, Л. Є., Мельничук П. П. Оброблюваність чавунів при фінішному торцевому фрезеруванні плоских поверхонь надтвердими матеріалами. *Технічна інженерія*. 2021. № 1 (87). С. 38-48.
6. До питання структуроутворення високоміцного чавуну при використанні діаграм стану систем «Fe-Si», «Mg-Si» та «Fe-Si-Mg» / В. М. Кропівний, М. В. Босий, О. В. Кузик та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 7(38), ч. II. С. 34-42.
7. Глушкова Д. Б., Волчук В. М. Modern approach to determining the heterogeneity of cast iron. *Вісник ХНАДУ*. 2025. Вип. 108. С. 33-38.
8. Ways of increasing the machinability of high-strength cast iron / N. Lalazarova, G. Komarova, O. Afanasieva, O. Popova. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* 2024. Вип. 209. С. 18-24.

Лалазарова Наталія Олексіївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри технології металів та матеріалознавства, Харківський національний автомобільно-дорожній університет. <https://orcid.org/0000-0002-2138-9081>. Тел.: +38 (095) 390-38-16. E-mail: lalaz1932@gmail.com.

Комарова Ганна Леонідівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. <https://orcid.org/0000-0001-8597-58-91>. Тел.: +38(067) 999-85-77. E-mail: anna.kom3793@gmail.com.

Афанасьєва Ольга Валентинівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри фізичних основ електронної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки. <https://orcid.org/0000-0002-5382-2986>. Тел.: +38 (096) 525-62-35. E-mail: 7584839@ukr.net.

Попова Олена Георгіївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри композитних конструкцій та авіаційного матеріалознавства, Харківський національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». <https://orcid.org/0000-0003-3955-3852+38>. Тел.: +38 (067) 570-12-17. E-mail: o.popova@khai.edu.

Lalazarova Nataliia, PhD, Associate Professor, Department of Technology of Metals and Materials Science, Kharkiv National Automobile and Highway University. <https://orcid.org/0000-0002-2138-9081>. Tel.: +38 (095) 390- 38-16. E-mail: lalaz1932@gmail.com.

Komarova Hanna, PhD, Associate Professor, department of wagon engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. <https://orcid.org/0000-0001-8597-58-91>. Tel.: +38 (067) 999-85-77. E-mail: anna.kom3793@gmail.com.

Afanasieva Olga, PhD, Associate Professor, Physical Foundations of Electronic Engineering Department, National University of Radio Electronics. <https://orcid.org/0000-0002-5382-2986>. Tel.: +38(096)-525- 62-35. E-mail: 7584839@ukr.net.

Popova Olena, PhD, Associate Professor, Department of Composite Structures and Aviation Materials, Kharkiv National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute». <https://orcid.org/0000-0003-3955-3852>+38.
Tel.: +38 (067) 570-12- 17. E-mail: o.popova@khai.edu.

Статтю прийнято 28.11.2025 р.