

УДК 621.78

ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНІ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕРТЯ

Канд. техн. наук О. О. Волков, асп. Ж. В. Краєвська,
д-р техн. наук В. В. Субботіна, асп. О. В. Субботін, інж. Г. А. Федоренко

STRENGTHENING OF THE SURFACE BY FRICTION

PhD (Tech.) O. Volkov, postgraduate student Zh. Kraievska,
Dr. Sc. (Tech.) V. Subbotina, postgraduate student O. Subbotin,
engineer A. Fedorenko

***Анотація.** Дослідження присвячено використанню методу зміцнення поверхні за допомогою тертя. Метод дає змогу досягти високих значень твердості, міцності та зносостійкості матеріалів за короткий час і зі значно меншими витратами. Мета дослідження полягає у вивченні характеру зміцнення поверхні зразків із сталі за допомогою тертя. Зміцнений «білий» шар є однорідним на всій поверхні зразків.*

***Ключові слова:** тертя, термофрикційне оброблення, термофрикційне зміцнення, зразки, сталь 65Г, попереднє термічне оброблення, поверхневий зміцнений «білий» шар, мікротвердість, мікроструктура.*

***Abstract.** The study is devoted to the application of the method of surface hardening by friction
Object of study - the process of surface hardening by friction.*

Subject of study - samples of 65G steel the method allows achieving high values of hardness, strength and wear resistance of materials in a short time and at much lower cost compared to other processing methods. The aim and objectives of the study are to investigate the nature of surface hardening of steel samples by friction. To achieve this goal, the following tasks are envisaged: manufacturing samples from 65G steel in the form of plates, preliminary heat treatment of samples for their maximum thermal hardening, hardening of the surface of samples by friction, analysis of the microstructure and microhardness of each sample, comparison of the microstructure, microhardness and depth of hardening of these samples, conclusions on the influence of processing factors on the hardening result. Based on the experimental data obtained, we constructed graphs of microhardness changes in the cross-section of the samples and studied the microstructures. It can be seen that after friction treatment, a layer with a modified structure is formed in the surface of the samples. the microhardness of the surface is significantly higher (approximately 2 times) than the microhardness of the main part in the samples. Metallographic analysis has shown that the layer formed in the samples has a martensitic structure characterized by a higher degree of dispersion and microhardness compared to the martensitic structure obtained during the previous heat treatment. Changes in the microstructure and microhardness of the samples that were surface hardened using different processing modes were compared. Certain differences in the characteristics of their hardened «white» layers were found. It is also shown that the hardened «white» layer is located along the entire length of the surface in the samples and is continuous and homogeneous.

***Keywords:** friction, thermo-friction treatment, thermo-friction strengthening, samples, 65G steel, preliminary heat treatment, surface strengthening «white» layer, microhardness, microstructure.*

Вступ. В останні десятиліття розвиток технологій обробки матеріалів дав змогу створити різні методи обробки металів, серед яких важливе місце займає термомеханічне оброблення з використанням тертя (ТФЗ), за допомогою якого можна досягти високих значень твердості, міцності та зносостійкості матеріалів за короткий час і зі значно меншими витратами порівняно з іншими методами оброблення. Проте, залежно від характеру оброблення, може відбуватися різноманітне структуроутворення і, як результат, формуватися різні властивості.

Визначення мети та завдання дослідження – вивчення характеру зміцнення поверхні зразків із сталі за допомогою тертя. Для досягнення мети передбачені такі завдання: виготовлення зразків із сталі 65Г у вигляді пластин, проведення попереднього термічного оброблення зразків для їхнього максимального термічного зміцнення, зміцнення поверхні зразків за допомогою тертя, проведення аналізу мікроструктури та мікротвердості кожного зразка, проведення порівняння мікроструктури, мікротвердості та глибини зміцнення цих зразків, надання висновків щодо впливу факторів оброблення на результат зміцнення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Уже проведено ряд досліджень, у результаті яких виявлено різницю в структуроутворенні [1], проте в поверхні досліджених зразків і виробів спостерігається значне деформування матеріалу, що призводить до більш інтенсивного формування дрібнодисперсної мікроструктури, зокрема зерен ультрадрібних розмірів і навіть нанорозмірів, що супроводжено достатньо високими твердістю і міцністю. Отримані результати таких досліджень дають змогу більш точно налаштувати параметри термомеханічного та дотичних методів оброблення, що може допомогти поліпшити властивості виробів і забезпечити більш ефективне їх використання в різних галузях промисловості.

Науково-практичний напрям зміцнення поверхні є актуальним сьогодні, оскільки таке зміцнення може бути досягнуте за допомогою різних методів залежно від конкретних вимог та умов застосування.

Існує багато технологічних методів формування поверхневого зміцнення в металах і сплавах [2]. Так, механо-імпульсне оброблення високошвидкісним тертям, на відміну від інших методів інтенсивного деформування, дає змогу створювати дрібнодисперсні структури на поверхні деталі, виготовленої не тільки з м'яких сталевих матеріалів, а також високоміцних і тих, що важко деформовані. Деформований шар під час фрикційного зміцнення утворюється безпосередньо на поверхні матеріалу деталі та релаксується на певній глибині. Це відрізняє високошвидкісне тертя від обкочування або ударного зміцнювального оброблення, які ініціюють зони максимального контактного напруження на деякій глибині від поверхні, що може призводити до утворення підповерхневих тріщин.

Очевидно, що використання ТФО як саме методу зміцнення є актуальним нині питанням із широкою географією [3–8]. Показано, що енергію тертя використовують із різним ступенем інтенсивності і для вирішення різних технологічних питань. Акцентовано увагу, що тертя є потужним засобом розігрівання поверхні та може бути використане навіть для зварювання феритної нержавкої сталі [3], мідних листів [4], інших матеріалів. Показано, що при цьому відбувається зміна механічних властивостей по перерізу [5], що пояснюється високотемпературним розігріванням аж до температури плавлення і наступним охолодженням із певною швидкістю. Крім того, зміна механічних властивостей може бути викликана й деформацією певних структурних складових [6]. Зазначено, що для зміцнення поверхні використовують й інші альтернативні джерела, наприклад плазмові

оброблення, що дає змогу змінювати структуру поверхневого шару оброблюваних виробів [7], однак цей метод є більш витратним. Часто поверхнєве оброблення з застосуванням тертя та інших джерел енергії призводить до утворення в сталях та інших сплавах так званих поверхневих «білих» шарів [8]. Однак досі не існує однакової думки про природу та особливості саме зміцнення за термофрикційно-деформаційних методів оброблення поверхні.

У всіх описаних випадках на поверхні оброблюваного матеріалу з'являється білий шар, який ще досі не вивчений у повному обсязі та потребує детального дослідження.

Значний внесок у розвиток питань фрикційного оброблення матеріалів зробив М. Д. Кірик [9, 10].

Група дослідників під керівництвом О. В. Манько вивчала утворення «білого» шару при фрикційно-зміцнювальному обробленні тонких пластин, які є основою форми для багатьох видів поліграфічного інструменту. Показано [11], що сталь У8А, яку можна використовувати для такого інструменту, має високі показники зносостійкості. Проводили варіювання режимів зміцнення, що дало змогу отримати мікротвердість зміцненого шару 5–11 ГПа. У цій роботі зазначено, що структура

«білих» шарів являє собою механічну суміш мартенситу і залишкового аустеніту і має високу в'язкість за достатньої твердості. Також підкреслено, що природа утворення таких структур недостатньо зрозуміла, незважаючи на велику кількість проведених досліджень. Дослідження, відображені в роботі О. О. Волкова [12], дали змогу пояснити питання про структуроутворення та властивості в лійці сталей різного призначення та з різним хімічним складом.

Основна частина дослідження. У статті були досліджені зразки зі сталі 65Г, що належить до класу пружинних сталей. Вона є середньовуглецевою, низьколегованою сталлю, має високі механічні властивості, в першу чергу високі границі пружності і міцності, а також підвищену релаксаційну стійкість при достатній в'язкості пластичності [13].

Для експерименту були виготовлені два зразки зі сталі 65Г у вигляді пластин, у попередньому стані після гартування ($t = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$) і низькотемпературного відпускання ($t = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$) з метою дослідження впливу факторів оброблення при зміцненні сталей шляхом ТФЗ.

ТФЗ проводили на плоскошліфувальному верстаті, на магнітній плиті якого фіксували зразки. Схема оброблення подана на рис. 1.

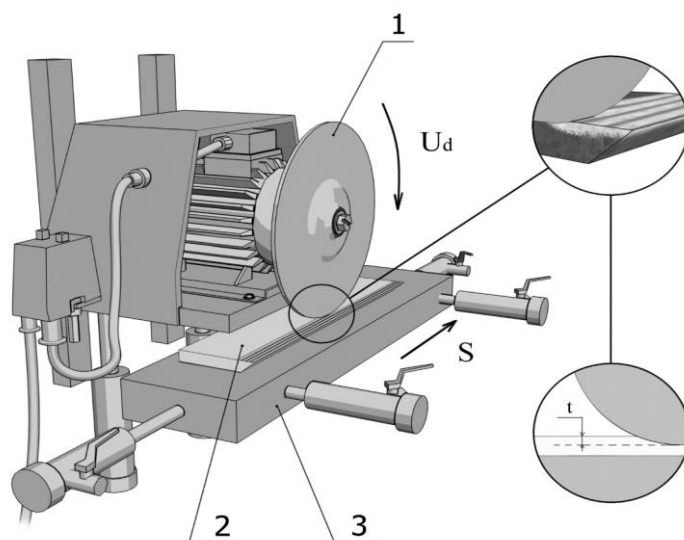


Рис. 1. Схема ТФЗ: 1 – різальний диск; 2 – зразок; 3 – магнітна плита верстата

Зміцнювальний диск виготовлений із сталі Ст3, його використовують на глибину оброблення 0,7 мм. Такий вибір глибини оброблення здійснено з урахуванням перерізу зразків, що зміцнюються, та умовами оптимальності оброблення згідно з попередніми дослідженнями [12].

Переміщення столу давало змогу якісно проводити ТФЗ на всій поверхні зразків. За контакту між різальним диском і зразком реалізувалося ТФЗ, яке проводили в умовах без змащування. Отже, обраний режим ТФЗ має високий рівень жорсткості, що обрано з урахуванням типу матеріалу та поверхні [1].

Параметри режимів оброблення дослідних зразків із сталі 65Г: $S = 30$ мм/с, $t = 0,7$ мм – режим оброблення № 1,

$S = 100$ мм/с, $t = 0,7$ мм – режим оброблення № 2.

Дослідження зразків показало, що під дією ТФЗ з'являється поверхневий шар зі зміненими структурою і властивостями. Він складається з двох різних ділянок: ділянка зі зміцненням; ділянка зі знеміцненням.

Перша розташована біля поверхні та має мікротвердість зміцненого шару H_{100} майже 13000 МПа, глибина зміцнення I близько 300 мкм, які можна спостерігати в зразку 1, обробленому за режимом № 1 (рис. 2).

Ділянка зі знеміцненням, яка знаходиться безпосередньо під ділянкою зі зміцненням, є вузькою смужкою та має знижену мікротвердість до рівня 3800 МПа (рис. 2). У зразку 1 цей підшар має товщину приблизно 70 мкм (рис. 2).

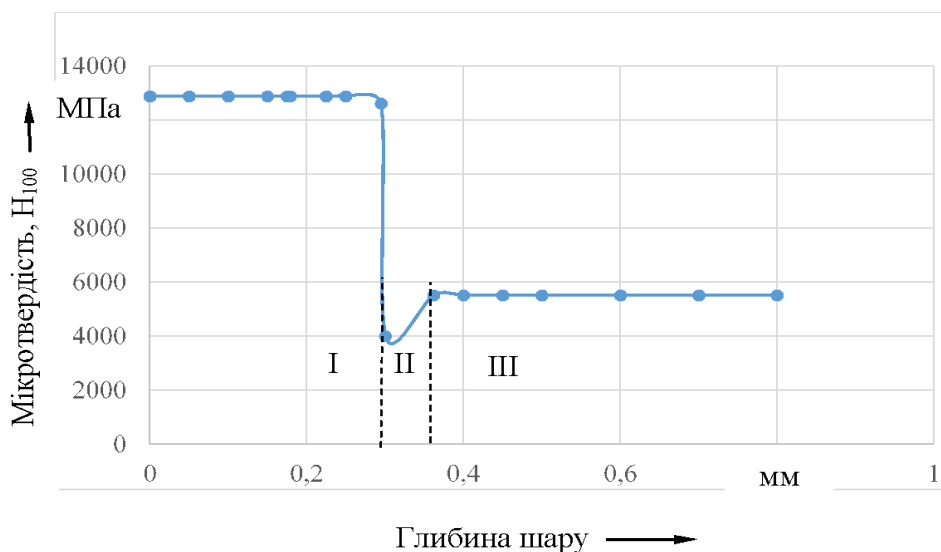


Рис. 2. Зміна мікротвердості по перерізу зразка після ТФЗ за режимом оброблення поверхні № 1 (Сталь 65Г)

Нижче знаходиться основна частина зразка, яка не зазнала впливу ТФЗ. Мікротвердість її дорівнює близько 5800 МПа.

У зразку 2, обробленому за режимом № 2, спостерігається збереження характеристик зміцнення. Мікротвердість по глибині залишається високою, але трохи нижче, ніж у зразку 1. Тобто шар із зміненими

структурою та властивостями зберігає дві структурні ділянки (із зміцненням і знеміцненням), а значення мікротвердості та глибин зміцнення в них такі: для ділянки зі зміцненням $H_{100} = 11800$ МПа, $l = 240$ мкм, для ділянки зі знеміцненням $H_{100} = 3800$ МПа, $l = 70$ мкм (рис. 3).

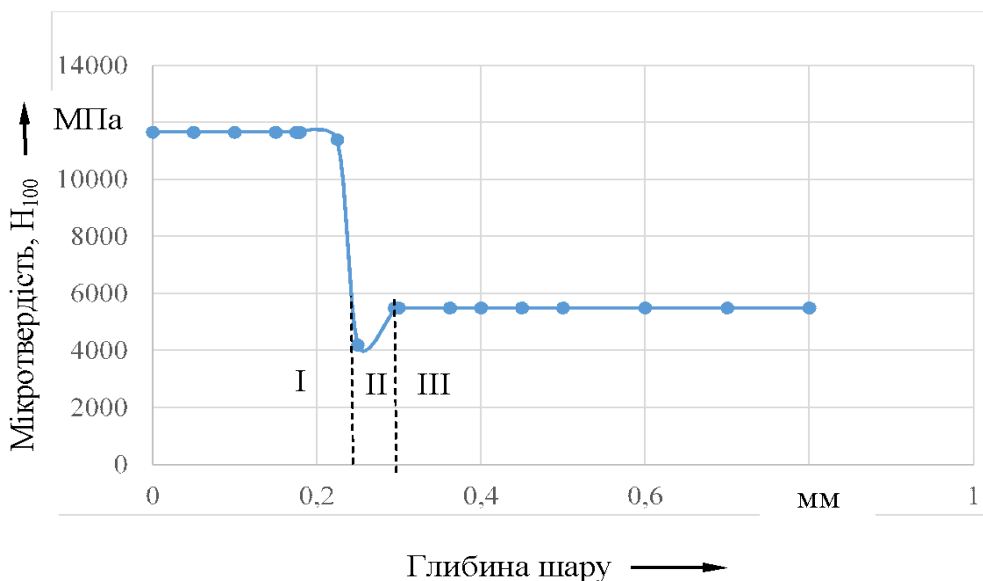


Рис. 3. Зміна мікротвердості по перерізу зразка після ТФЗ за режимом оброблення поверхні № 2 (Сталь 65Г)

Вивчення мікроструктури дослідних зразків із сталі 65Г показало, що під дією ТФЗ з'являються три різні за кольором шари, які навіть візуально суттєво відрізняються один від одного (рис. 4, 5). Перший, поверхневий «білий» шар, значно світліший порівняно зі структурою основної частини зразка, внаслідок чого цілком доцільно його називати саме так. За структурою цей шар близький до структури

мартенситу відпускання, набутої раніше, проте має сліди пластичного деформування і більш високий ступінь дисперсності, який сформувався внаслідок розігрівання і деформування поверхні при ТФЗ. Таку мікроструктуру можна характеризувати як «деформований дрібнодисперсний мартенсит» або «деформований дрібнозернистий мартенсит» з притаманними цій структурі підвищеними показниками зміцнення.

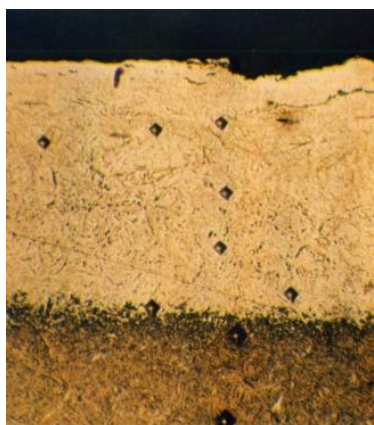


Рис. 4. Зміна мікроструктури по перерізу зразка після ТФЗ за режимом оброблення поверхні № 1 (Сталь 65Г, x250)



Рис. 5. Зміна мікротвердості по перерізу зразка після ТФЗ за режимом оброблення поверхні № 2 (Сталь 65Г, x250)

Під поверхневим шаром ми спостерігаємо шар зі структурою з більш темним кольором. Ширина його не є дуже великою, що помітно на фотографії цієї структури. У цій ділянці зразка прогрівання відповідає температурам відпускання, через зниження температури по перерізу вглиб зразка, що у свою чергу забезпечує формування сорбіто- і трооститоподібних структур із більш низькою мікротвердістю. Нижче розташована основна частина зразка, де не відбулося жодних змін внаслідок розсіювання підвищеної температури вище рівня такої глибини перерізу. Відповідно мікроструктура там обумовлена попереднім термічним обробленням і відповідає структурі мартенситу відпускання. Окрім того, слід зазначити, що зміцнений «білий» шар у зразках розташований по всій їхній довжині та є суцільним, що характеризує однорідність зміцнення поверхні зразків.

Отже, при порівнянні змін у мікроструктурі та мікротвердості зразків, зміцнених по поверхні з використанням ТФЗ, цілком очевидні мікроструктурні зміни у вигляді появи поверхневого «білого» зміцненого шару надвисокої твердості, який поєднано з основною частиною зразка тонким знеміцненням підшаром. І кожна структурна частина перерізу зразка здатна виконувати свої функції при експлуатації потенційних виробів.

Висновки. 1. Проаналізовано ряд джерел інформації, що дало змогу теоретично вивчити суть і особливості

зміцнення матеріалів із використанням тертя. Розглянуто особливості деяких подібних видів поверхневого зміцнення виробів.

2. За отриманими експериментальними даними побудовано графіки зміни мікротвердості в перерізі зразків, вивчено мікроструктури, з яких видно, що після ТФЗ в поверхні зразків формується шар із зміненою структурою, мікротвердість якого суттєво перевищує (приблизно у два рази) мікротвердість основної частини досліджених зразків.

3. Металографічний аналіз дослідних зразків показав, що сформований у зразках за ТФЗ шар має мартенситну структуру з більш високими ступенем дисперсності та рівнем мікротвердості порівняно з мартенситною структурою, отриману при попередньому обробленні – термічним шляхом.

4. Проведено порівняння змін у мікроструктурі та мікротвердості зразків, які зміцнили по поверхнях із використанням різних режимів ТФЗ. Виявлено певні відмінності у характеристиках їхніх зміцнених «білих» шарів. Також показано, що зміцнений «білий» шар у зразках розташований по всій їхній довжині та є суцільним, що характеризує однорідність і рівномірність зміцнення поверхні зразків.

5. Функціонування технологічного обладнання, використаного при виконанні роботи, не має негативного впливу на навколишнє середовище, а технологія є достатньо економічною і актуальною.

Список використаних джерел

1. Волков О. А. Исследование теплodeформационного влияния при поверхностном упрочнении сталей термофрикционной обработкой. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. Харків, 2016. № 2/5 (80). С. 38–44.
2. Голубець В. Технологічні методи поверхневого зміцнення металічних конструкційних матеріалів: навч. посібник. Львів: ВТФ «Друксервіс», 2000. 178 с.
3. Lakshminarayanan A., Balasubramanian V. Understanding the parameters controlling friction stir welding of AISI 409M ferritic stainless steel. *Metals and materials international*. 2011. Vol. 17, no. 6. P. 969–981.
4. Galvao I., Leal R., Loureiro A. Influence of tool shoulder geometry on properties of friction stir welds thin copper sheets. *Journal of materials processing technology*. 2013. Vol. 213. Is. 2. P. 129–135.

5. Rajamanickam N., Balusamy V., Magudeeswaran G., Natarajan K. Effect of process parameters on thermal history and mechanical properties of friction stir welds. *Materials & Design*. 2009. Vol. 30. Is. 7. P. 2726–2731.

6. Momeni A., Arabi H., Rezaei A., Badri H., Abbasi S.M. Hot deformation behavior of austenite in HSLA-100 microalloyed steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2011. Vol. 528, Is. 4–5, 25. P. 2158–2163.

7. Використання методу мікродугового плазмового оксидування для підвищення антифрикційних властивостей титану поверхня сплаву / В. Субботіна та ін. *Journal of nano- and electronic physics*. 2019. Т. 11, № 3. 03025.

8. Sipos K., Lopez M., Trucco M. Surface martensite white layer produced by adhesive sliding wear friction in AISI 1065 steel. *Revista latinoamericana de metalurgia y materiales*. 2008. Vol. 28, no. 1. P. 46–50.

9. Голубець В. М., Кірик М. Д., Капраль Ю. Р., Рудь А. Є. Фізико-механічні характеристики зміцненого високошвидкісним тертям наноструктурного шару на сталі 45. *Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України: зб. наук.-техн. пр.* Львів: РВВ НЛТУ України, 2012. Вип. 22.13. С. 114–117.

10. Кірик М., Голубець В., Капраль Ю., Рудь А. Встановлення режимів зміцнення високошвидкісним тертям ножів з конструкційних сталей для різання деревини. *Машинознавство*. 2013. № 3–4. С. 28–31.

11. Манько О. В., Стецько Ю. Б., Білявський М. Л. Утворення білого шару при фрикційно-зміцнюючій обробці тонких пластин. *Процеси механічної обробки в машинобудуванні*. 2005. Вип 1. С. 146–157.

12. Волков О. О. Підвищення експлуатаційної стійкості деталей та інструменту методом термофрикційного зміцнення: дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.01 Матеріалознавство. Харків, 2020. 209 с.

13. Матеріалознавство: навч. посіб. / В. Бузило та ін. Дніпро: НТУ «ДП», 2021. 243 с.

Волков Олег Олексійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри матеріалознавства, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». ORCID iD: 0000-0001-8797-0322.

Тел.: +38(057) 707-64-35. E-mail: volkovoleg1978@gmail.com.

Краєвська Жанна Владиславівна, аспірантка кафедри матеріалознавства, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». ORCID iD: 0009-0006-8741-2623. E-mail: 3294280@gmail.com.

Субботіна Валерія Валеріївна, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри матеріалознавства, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». ORCID iD: 0000-0002-3882-0368.

Тел.: +38(057) 707-64-35. E-mail: subbotina.valeri@gmail.com.

Субботін Олександр Володимирович, аспірант кафедри матеріалознавства, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». ORCID iD: 0000-0002-9422-4480. E-mail: subbotin.alex95@gmail.com.

Федоренко Ганна Анатоліївна, інженер I категорії кафедри матеріалознавства, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». E-mail: ann161169@gmail.com.

Volkov Oleg, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, department of materials science, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». ORCID iD: 0000-0001-8797-0322. Tel.: +38(057) 707-64-35. E-mail: volkovoleg1978@gmail.com.

Kraievskaja Zhanna, postgraduate student, department of Materials Science, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». ORCID iD: 0009-0006-8741-2623. E-mail: 3294280@gmail.com.

Valeria Subbotina, Doctor of Technical Sciences, professor, Head of the Department of Materials Science, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». ORCID iD: 0000-0002-3882-0368. Tel.: +38(057) 707-64-35. E-mail: subbotina.valeri@gmail.com.

Oleksandr Subbotin, postgraduate student, department of materials science, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». ORCID iD: 0000-0002-9422-4480. E-mail: subbotin.alex95@gmail.com.

Fedorenko Hanna, eng. I category, Department of Materials Science, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». E-mail: ann161169@gmail.com.

Статтю прийнято 15.05.2024 р.
