

**ЗАСТОСУВАННЯ ІМПУЛЬСНОГО БАР'ЄРНОГО РОЗРЯДУ  
ДЛЯ ОБРОБКИ ПОВЕРХНІ ПЛАСТИН ЗІ СТАЛІ МАРКИ 25ХГНМТ**

**І.В. Божко**<sup>1\*</sup>, канд.техн.наук, **І.П. Кондратенко**<sup>1\*\*</sup>, чл.-кор. НАН України  
**Л.М. Лобанов**<sup>2\*\*\*</sup>, академік НАН України, **М.О. Пашин**<sup>2\*\*\*\*</sup>, докт.техн.наук,  
**О.М. Берднікова**<sup>2\*\*\*\*\*</sup>, докт.техн.наук, **О.Л. Миходуй**<sup>2\*\*\*\*\*</sup>, канд.техн.наук,  
**О.С. Кушнарєва**<sup>2\*\*\*\*\*</sup>, канд.техн.наук, **П.В. Гончаров**<sup>2\*\*\*\*\*</sup>, канд.техн.наук

<sup>1</sup> Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна, e-mail: [dep7ied@ukr.net](mailto:dep7ied@ukr.net)

<sup>2</sup> Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,

вул. Казимира Малевича, 11, Київ, 03680, Україна, e-mail: [svarka2000@ukr.net](mailto:svarka2000@ukr.net)

*Застосування в металообробці імпульсного бар'єрного розряду (ІБР), який генерує низькотемпературну плазму на поверхні металу, що обробляється, є новим підходом до оптимізації механічних властивостей металевих матеріалів, який базується на електрофізичних процесах. В роботі вивчалось зміцнення конструктивної сталі 25ХГНМТ внаслідок дії на її поверхню ІБР. Обробка сталі ІБР проходила в розрядному пристрої за швидкості наростання напруги  $\approx 3 \cdot 10^{11}$  В/с. Досліджено вплив тривалості обробки ІБР на значення твердості по Віккерсу (HV) дослідних зразків. Дослідження структури сталі 25ХГНМТ проводили методом трансмісійної електронної мікроскопії з метою встановлення її змін внаслідок дії ІБР. Встановлено, що значення HV після обробки ІБР зростають з 420 до 500 кг/мм<sup>2</sup>, що супроводжується диспергуванням мікроструктури, яке позитивно впливає на механічні характеристики сталі 25ХГНМТ. Бібл. 14, рис. 5, табл. 1.*

**Ключові слова:** імпульсний бар'єрний розряд, обробка поверхні, конструкційна сталь, твердість по Віккерсу, мікроструктура, електронна мікроскопія, механічні характеристики, низькотемпературна плазма.

**Вступ. Актуальність дослідження. Мета роботи.** Розвиток високотехнологічних галузей промисловості стимулює зростання вимог до металевих конструкцій, комплексу їхніх основних та спеціальних властивостей. Новим трендом сучасного виробництва, що направлений на підвищення ресурсу виробів машинобудування, є розробка технологій металообробки із застосуванням електрофізичних дій. Використання імпульсних електричних розрядів, струмів плазми, імпульсних електромагнітних полів, їхніх комбінованих впливів задля підвищення механічних характеристик металів і сплавів є актуальним у зв'язку з необхідністю заміни традиційних енергоємних технологій конструкційних матеріалів на більш прогресивні. Результати досліджень електрофізичних процесів, що протікають в металевих матеріалах під час дії імпульсного електричного струму та електромагнітного поля, дають підставу вважати їх перспективними для інженерної практики з позицій енергоефективності та технологічності [1–8].

Застосування в металообробці імпульсного бар'єрного розряду (ІБР), який генерує низькотемпературну плазму на поверхні металу, що обробляється, і відрізняється від інших відомих електричних розрядів високим ступенем однорідності, є новим підходом в інженерії поверхні до оптимізації механічних властивостей металевих матеріалів, який базується на електрофізичних процесах. Критерієм доцільності практичного використання технологій зміцнення металів і сплавів із застосуванням ІБР є їхня енергоефективність  $Y$ , що визначається значно меншими витратами енергії у порівнянні із термічною обробкою. Величину енергоефективності  $Y$  будемо визначати як відношення витраченої кількості електроенергії до площі обробленої поверхні металевої пластини. Попередньо величина енергоефективності буде визначатися комплексом чинників, які характеризують імпульсний

© Божко І.В., Кондратенко І.П., Лобанов Л.М., Пашин М.О., Берднікова О.М., Миходуй О.Л., Кушнарєва О.С., Гончаров П.В., 2023

ORCID ID: \* <https://orcid.org/0000-0002-7955-246X> ; \*\* <https://orcid.org/0000-0003-1914-1383> ;

\*\*\* <https://orcid.org/0000-0001-9296-2335> ; \*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0002-2201-5137> ;

\*\*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0001-9754-9478> ; \*\*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0001-6660-7540> ;

\*\*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0002-2125-1795> ; \*\*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0002-1980-2340>

бар'єрний розряд, а саме: напруга на розрядному проміжку, швидкість її зростання, частота повторення імпульсів, тощо [9].

Особливо актуальним є застосування електрофізичних методів обробки виробів спеціального призначення, які працюють у жорстких умовах динамічних навантажень за високих температур та в умовах оперативного обслуговування. Особливі вимоги приділяються твердості конструкційних сталей, що є однією з оцінних характеристик їхніх властивостей у разі динамічних контактних взаємодій зі швидкостями до 1000 м/с. Прикладом такого матеріалу є сталь типу 25ХГНМТ, яка використовується у відповідальних конструкціях спеціального призначення. Традиційний метод підвищення твердості такої сталі полягає у проведенні закалювання, яке здійснюється за температури  $T=860^{\circ}\text{C}$  в маслі із наступним відпуском за  $T=190^{\circ}\text{C}$  в повітрі [10]. Це є досить енерговитратною технологією, що потребує габаритного металовмісного обладнання. Застосування ІБР для обробки поверхні сталі 25ХГНМТ з метою покращення її механічних характеристик відкриває нові перспективи застосування електрофізичних процесів у металообробці. Враховуючи наведене, слід вважати доцільним дослідження впливу ІБР на механічні характеристики сталі 25ХГНМТ.

**Метою роботи** є обґрунтування доцільності застосування ІБР в технологіях обробки поверхні сталі 25ХГНМТ задля покращення її механічних характеристик і ресурсу в конструкціях, які працюють у спеціальних умовах.

**Дослідні зразки, обладнання для обробки ІБР та методика досліджень.** Як предмет досліджень використовували пласкі зразки розмірами 40x40x4 мм, які підлягали обробці ІБР. Проводили хімічний аналіз зразків згідно стандарту ДСТУ ISO 10012:2005, що підтвердив відповідність матеріалу, що підлягав обробці, хімічному складу сталі 25ХГНМТ згідно ДСТУ 7806:2015. Результати аналізу хімічного складу дослідних зразків сталі 25ХГНМТ наведено у таблиці.

Метал	Масова доля у відсотках												
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Al	Ti	W
Сталь 25ХГНМТ	0,27	0,24	0,84	0,004	0,018	0,50	0,95	0,23	0,40	0,03	0,04	0,007	≤0,02

**Електродна система для дослідження впливу дії ІБР на поверхню сталі 25ХГНМТ та характеристики розряду.** Обробка ІБР поверхні зразків проводилася із застосуванням електродної системи (ЕС), конструктивну схему якої показано на рис. 1.

ЕС складалася із дослідного зразка 1 сталі 25ХГНМТ, високовольтного електроду 2 та скляного (кварцове скло) діелектричного бар'єру 3 (100x100x1мм<sup>3</sup>). Для зменшення крайового ефекту електрод 2 мав заокруглені краї. Діаметр пласкої частини цього електроду становив 36 мм. Обробка проводилася за повітряного проміжку  $\delta=1\text{мм}$  між пластиною 1 та бар'єром 3. Виходячи з розмірів електроду можна судити про величину площі поверхні, що обробляється. Вона становить близько  $10^{-3}\text{ м}^2$ . Висока напруга (ВН) на електрод 2 подавалася від генератора імпульсів (ГІ), який забезпечував уніполярні імпульси напруги амплітудою до 30 кВ за швидкості їхнього зростання  $\approx 3 \cdot 10^{11}\text{ В/с}$  та тривалості близько 150 нс. До складу ГІ також входив магнітний ключ, який сприяв розряджанню діелектричного бар'єру після проходження прямого імпульсу струму через електродну систему. Амплітуда імпульсів встановлювалася на одному фіксованому рівні для всіх режимів обробки поверхні. Осцилограми напруги та струму через електродну систему записувалися за допомогою осцилографа TDS1012 та відповідно датчиків Р6015 і Р6021. Всі дослідження виконано за частоти повторення імпульсів 300 Гц. Зовнішній вигляд розряду, який наведено на рис. 2 (час експозиції 0,1 с), свідчить про однорідний характер розряду в проміжку  $\delta$ , а не ниткоподібний.

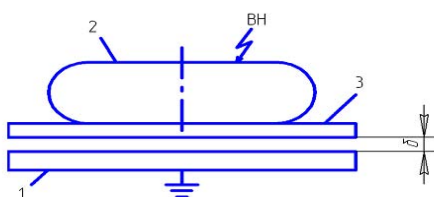


Рис. 1

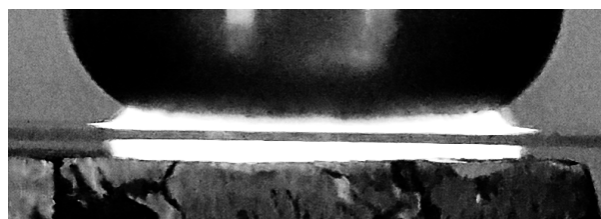


Рис. 2

Типовий вигляд осцилограм струму  $i(t)$  та напруги  $u(t)$  режиму ІБР, на якому обробляли зразки, показано на рис. 3 відповідно кривими 1 та 2. Як видно з рисунку, під час дії імпульсу напруги, амплітуда  $U_m$  якого досягає 26 кВ, струм ІБР складається з двох основних частин: прямого струму з амплітудою  $I_{m1}=80$  А та зворотного з амплітудою  $I_{m2}=65$  А, котрий обумовлений розрядженням діелектричного бар'єру через магнітний ключ. Розрахунки показують, що під час прямого імпульсу струму амплітудне значення середньої густини струму через пластину становить близько  $0,9$  А/см<sup>2</sup>. За таких параметрів енергія, що виділяється під час дії одного імпульсу, становить близько 35 мДж [11], а потужність за частоти повторення імпульсів 300 Гц – 10 Вт.

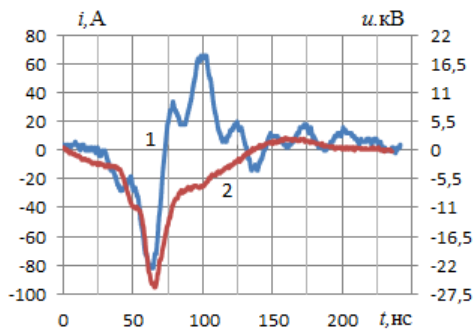


Рис. 3

Досліджено вплив періоду часу обробки на значення твердості сталі. Зразки піддавалися ІБР в режимі, який відповідає рис. 3 за варіації часу відповідно 5, 10, 15 та 20 хвилин. Таким чином, за час обробки (без урахування коефіцієнта корисної дії імпульсного перетворювача) на обробку поверхонь витрачалося відповідно 3, 6, 9, 12 кДж. Зауважимо, що термообробка зразка товщиною 4 мм і діаметром 35 мм за традиційною технологією (без урахування коефіцієнта корисної дії нагрівальної установки) потребує вкладання 13,7 кДж. Приводячи до площ оброблених поверхонь, маємо  $9,36$  кДж/м<sup>2</sup> при витраті енергії на ІБР  $9$  кДж та  $14,2$  кДж/м<sup>2</sup>, що на третину менше.

Із металу зразків готували макрошліфи згідно стандартної методики, на яких проводили дослідження структури та вимірювання мікротвердості оброблених поверхонь по Віккерсу ( $HV$ ) згідно стандарту ISO 6507-1:2005. Оцінку значень  $HV$  виконували із застосуванням мікротвердоміру M-400 фірми LECO за навантаження зразків  $P=100$  г.

Дослідження структури на просвіт проводили методом трансмісійної електронної мікроскопії (ТЕМ) на приладі JEM-200CX (фірми JEOL) за прискорювальної напруги 200 кВ з метою встановлення зміни структури сталі 25ХГНМТ внаслідок дії на її поверхню ІБР. Дослідження методом ТЕМ дали змогу отримати достовірну експериментальну інформацію на дислокаційному рівні про структурні складові та розподіл щільності дислокацій у сталі до та після обробки, які мають вплив на її міцність та тріщиностійкість.

**Результати досліджень.** Встановлено, що максимальний вплив ІБР на твердість сталі 25ХГНМТ за визначених вище параметрах імпульсів напруги досягається за тривалості обробки зразків у 15 хвилин. При цьому значення  $HV$  після обробки зростають на 20% – з 420 до 505 кг/мм<sup>2</sup> (рис. 4). Підвищення твердості  $HV$  розповсюджується на половину товщини зразка – на глибину до 2 мм. Це суттєво підвищує динамічну міцність сталі за контактних взаємодіях на швидкостях до 1000 м/с.

В результаті проведених досліджень встановлено, що первинна (до обробки) структура сталі 25ХГНМТ є мартенситно-бейнітною з об'ємною часткою відпущеного мартенситу ( $M_{відп}$ ) до 60% за рівномірного об'ємного розподілу щільності дислокацій  $\rho=(1...6)\times 10^{10}$  см<sup>-2</sup>. Під час деталізації структури металу до обробки встановлено, що ширина рейкової структури  $M_{відп}$  становить  $0,3...2,0$  мкм (рис. 5, а). На рис. 5 показано тонку структуру відпущеного мартенситу металу (а) та у металі обробленої поверхні (б) сталі 25ХГНМТ ( $\times 22000$ ). Стрілками позначено ширину рейкової структури.

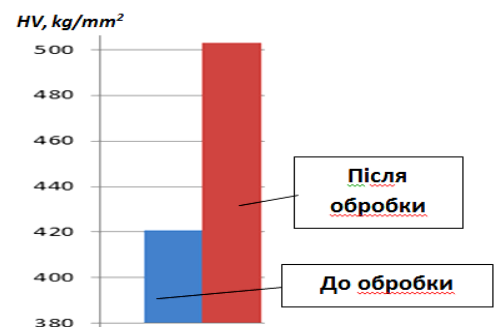


Рис. 4

На віддаленні від обробленої ІБР поверхні на глибину до 2,2 мм (тобто на половину товщини металу) у поперечному перерізі зразка виявлено зміну структури та щільності дислокацій. Це корелює з даними по збільшенню значень твердості  $HV$  після обробки ІБР. У порівнянні з металом до обробки має місце як помітне подрібнення структури  $M_{відп}$ , так і загальне підвищення щільності дислокацій в середньому у 1,5 рази до  $\rho=(2...8)\times 10^{10}$  см<sup>-2</sup> у разі рівномірного її розподілу. Ширина рейкових структур  $M_{відп}$  після обробки також зменшується в середньому у 1,6 разів і становить  $0,2...1,3$  мкм (рис. 5, б).

Виходячи з наведених вище даних, у зразку сталі 25ХГНМТ, поверхню якого було оброблено ІБР впродовж 15 хвилин, спостерігали загальне зміцнення металу, обумовлене підвищенням щільно-

сті дислокацій та диспергуванням структури у порівнянні з металом без обробки. В результаті обробки ІБР під дією імпульсного струму в нерівноважних умовах можна отримати метастабільний стан у поверхневих шарах металу. Дія прямого імпульсу струму ініціює періодичні коливання атомів, наслідком яких є перерозподіл дефектів кристалічної решітки. Результатом цього є деформаційне зміцнення металу та подрібнення рейкової структури мартенситу. Це сприятиме зміцненню сталі 25ХГНМТ та підвищенню її тріщиностійкості [12 – 14].

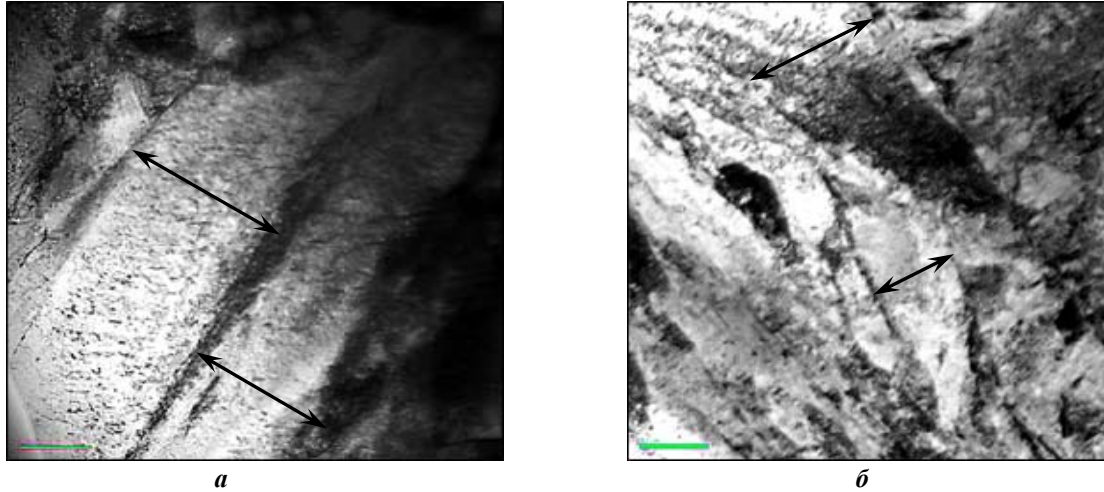


Рис. 5.

У разі обробки впродовж 5 і 10 хвилин коливання забезпечують пружну деформацію ковзання, яка не викликає помітної зміни механічних властивостей сталі після завершення циклу обробки у порівнянні із необробленою. У разі збільшення часу обробки до 20 хвилин метал піддається відпуску за рахунок зростання термічної складової дії ІБР, що викликає зниження значень  $HV$  до 250-370  $\text{кг/мм}^2$  у порівнянні з металом, який є необробленим.

Аналізуючи наведені вище результати, слід зазначити, що локальна обробка ІБР сталі 25ХГНМТ в перспективі може стати базою для розробки низки технологій інженерії поверхні, що будуть направлені на подовження ресурсу металевих матеріалів для конструкцій, які працюють у спеціальних умовах.

#### Висновки.

1. Застосування імпульсного бар'єрного розряду (ІБР) для обробки поверхні сталі 25ХГНМТ з метою покращення її механічних характеристик може стати базою для розробки низки технологій інженерії поверхні, що будуть направлені на подовження ресурсу металевих матеріалів для конструкцій, які працюють у спеціальних умовах. При цьому витрати електричної енергії за технологією, що пропонується, у порівнянні з термообробкою виробів виявляється на третину меншою – 9,36  $\text{кДж/м}^2$  у разі застосуванні ІБР та 14,2  $\text{кДж/м}^2$  – за термообробки пластини однакової товщини.

2. Встановлено, що в результаті 15 хвилинної обробки ІБР сталі 25ХГНМТ відбувається підвищення її твердості по Віккерсу ( $HV$ ) на 20% – з 420 до 505  $\text{кг/мм}^2$ , яке розповсюджується на половину товщини зразка – на глибину до 2 мм. Зміцнення зразків сталі обумовлено подрібненням мартенситної структури і підвищенням щільності дислокацій відповідно у 1,5 та 1,4 рази у порівнянні з металом у вихідному стані.

3. Запропоновано механізм зміцнення сталі в результаті обробки ІБР, який базується на отриманні в нерівноважних умовах метастабільного стану у поверхневих шарах металу. Дія прямого імпульсу струму ініціює періодичні коливання атомів, наслідком яких є перерозподіл дефектів кристалічної решітки. Результатом цього є деформаційне зміцнення металу та подрібнення рейкової структури мартенситу.

1. Dubodielov V.I., Horiuk M.S. The use of electromagnetic fields and magnetohydrodynamic phenomena to intensify the impact on metal systems: world and Ukrainian experience. Pp. 24-50. In the book: Materials science: achievements and prospects. In two volumes. Vol. 2. Kyiv: Akadempriodyka. 2018. 395 p. (Ukr.)

2. Sydorenko Y.M., Pashchin M.O., Mykhodui O.L., Khokhlova Y.A., Khokhlov M.A. Effect of Pulse Current on Residual Stresses in AMg6 Aluminum Alloy in Electrodynamics Treatment. *Strength of Materials*. 2020. Vol. 52(5). Pp. 731–737. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00226-2>.



3. Lobanov L.M., Pashchyn M.O., Mikhodui O.L., Goncharov P.V., Sydorenko Yu.M., Ustymenko P.R. Modeling of stress-strain states of AMg6 alloy due to impact action of electrode-indenter in electrodynamic treatment. *The Paton Welding J.* 2021. No 6. Pp. 2–11. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.06.01>
4. Zhang Jun; Liu Ji-De; Zhang Xin-Fang; Cui Chuan-Yong; Li Jin-Guo; Zhou Yi-Zhou; Wang, Bao-Quan; Guo Jing-Dong. Effect of High Density Current Pulses on Microstructure and Mechanical Properties of Dual-Phase Wrought Superalloy. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2021. Vol. 34. Issue 12. Pp. 1635 – 1644. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40195-021-01211-7>.
5. Qin Shuyang; Zhang Xinfang. Ultrafast regulation of nano-scale matrix defects using electrical property discrepancies to delay material embrittlement. *Journal of Materials Science and Technology*. 2022. Vol. 119. Pp. 25 – 36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.11.070>.
6. Zhang Xinfang; Qin Rongshan. Exploring the Particle Reconfiguration in the Metallic Materials under the Pulsed Electric Current. *Steel Research International Open Access*. 2018. Vol. 89. Issue 12. Article number 1800062. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.201800062>
7. Diao Aimin; Wang Jingpen; Yang Yuqiu; Liu Jide; Guo Jingdong. Fatigue Damage Recovery of 20 Carbon Steel under Pulsed Current. *Tezhong Zhuzao Ji Youse Hejin/Special Casting and Nonferrous Alloys*. 2022. Vol. 42. Issue 3. Pp. 318 - 322. DOI: <https://doi.org/10.15980/j.tzzz.2022.03.009>.
8. Guo J.D., Wang X.L., Dai W.B. Microstructure evolution in metals induced by high density electric current pulses. *Materials Science and Technology*. 2015. Vol. 31(13a). Pp. 1545-1554. DOI: <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000001>
9. Fangmin Huang, Li Chen, Honglin Wang, Zongcheng Yan. Analysis of the degradation mechanism of methylene blue by atmospheric pressure dielectric barrier discharge plasma. *Chemical Engineering Journal*. 2010. Vol. 162. Pp. 250–256. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.05.041>
10. URL: <https://s-metall.com.ua> (accessed at 25.07.2022).
11. Bozhko S.V., Serdyuk Y.V. Determination of Energy of a Pulsed Dielectric Barrier Discharge and Method for Increasing Its Efficiency. *IEEE Transaction on Plasma Science*. 2017. Vol. 85. No 10. Pp. 3064-3069. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPS.2017.2760888>
12. Kostin V.A., Poznyakov V.D., Berdnikova O.M., Zhukov V.V., Alekseyenko T. O., Alekseyenko I. I. Influence of Structural Transformations on the Mechanical Properties of Welded Joints of Armor Steels. *Materials Science*. 2021. 56(4). 472-480. <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00453-1> /
13. Berdnikova O.M., Kostin V.A., Poznyakov V.D., Gaivoronskii O.A., Alekseenko T.O., Alekseenko I.I. Structure and crack resistance of special steels with 0.25...0.31 % carbon under the conditions of simulation of thermal cycles of welding. *Automatic Welding*. 2020. No 5. Pp. 3-9. <https://doi.org/10.37434/as2020.05.01>.
14. Bernstein M.L., Zaymovskiy V.A. Mechanical properties of metals. Moskva: Metallurgiya, 1979. 496 p. (Rus)

#### PULSED BARRIER DISCHARGE FOR TREATMENT OF SURFACES OF 25XGHMT STEEL PLATES

I.V. Bozhko<sup>1</sup>, I.P. Kondratenko<sup>1</sup>, L.M. Lobanov<sup>2</sup>, M.O. Pashchin<sup>2</sup>, O.M. Berdnikova<sup>2</sup>, O.L. Mykhodui<sup>2</sup>, O.S. Kushnarova<sup>2</sup>, P.V. Goncharov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, av. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: [dep7ied@ukr.net](mailto:dep7ied@ukr.net).

<sup>2</sup> E.O. Paton Electric Welding Institute National Academy of Sciences of Ukraine, st. Kazimir Malevich, 11, Kyiv, 03680, Ukraine, e-mail: [svarka2000@ukr.net](mailto:svarka2000@ukr.net).

*The development of high-tech industries stimulates the growth of requirements to metal structures and a complex of their main and special properties. The use of pulsed electrical discharges, plasma currents, pulsed electromagnetic fields, and their combined effects to improve the mechanical characteristics of metals and alloys is relevant in connection with the need in replacing traditional energy-intensive technologies of structural materials with more advanced ones. The use of pulsed barrier discharge (PBD) in metal treatment, which generates a low-temperature plasma on the surface of the metal being treated, is a new approach to optimize the mechanical properties of metal materials, which is based on electrophysical processes. In the work, strengthening of structural 25KhGNMT steel as a result of the action of PBD on its surface was studied. The treatment of steel by PBD took place in a discharge device at a voltage increment rate of  $\approx 3 \cdot 10^{11}$  V/s. The influence of the duration of PBD treatment on the value of Vickers hardness (HV) of the test samples was studied. The study of the structure of 25KhGNMT steel was carried out by the method of transmission electron microscopy in order to determine its changes as a result of the action of PBD. It was established that HV values after PBD treatment increase from 420 to 500 kg/mm<sup>2</sup>, which is accompanied by microstructure dispersion, which positively affects the mechanical characteristics of 25KhGNMT steel. References 14, figure 5, table 1.*

**Key words:** pulsed barrier discharge, surface treatment, structural steel, Vickers hardness, microstructure, electron microscopy, mechanical characteristics, low-temperature plasma.

Надійшла 18.08.2022  
Остаточний варіант 15.09.2022