

ЗМІЦНЕННЯ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗІ СТАЛІ 25ХГНМТ ОБРОБКОЮ ІМПУЛЬСНИМ БАР'ЄРНИМ РОЗРЯДОМ

Л.М. Лобанов¹, О.М. Берднікова¹, М.О. Пашин¹, О.Л. Миходуй¹, О.С. Кушнар'єва¹,
Т.Г. Соломійчук¹, В.І. Кривий²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua
²НПО «Практика, 03057, м. Київ, вул. Металістів, 15.

Розвиток високотехнологічних галузей промисловості стимулює зростання вимог до металу зварних конструкцій, комплексу їх основних та спеціальних властивостей. Використання імпульсних електричних струмів, струмів плазми, імпульсних електромагнітних полів, їх комбінованих впливів для підвищення механічних характеристик металів і сплавів є актуальним у зв'язку з необхідністю заміни традиційних енергоємних технологій обробки зварних конструкцій на більш прогресивні. Застосування в металообробці імпульсного бар'єрного розряду (ІБР), який генерує низькотемпературну плазму на поверхні металу, що обробляється, є новим підходом до оптимізації механічних властивостей високоміцних сталей для зварних конструкцій, який базується на електрофізичних процесах. В роботі досліджувалось зміцнення сталі 25ХГНМТ внаслідок дії на її поверхню ІБР. Обробка сталі ІБР проходила в розрядному пристрої при швидкості наростання напруги $\approx 3 \cdot 10^{11}$ В/с. Досліджено вплив періоду часу 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 505 кг/мм², що супроводжується загальним підвищенням щільності дислокацій та диспергуванням мікроструктури, яке може позитивно впливати на механічні характеристики сталі 25ХГНМТ для зварних конструкцій, що працюють в умовах динамічних навантажень. Бібліогр. 13, табл. 2, рис. 7.

Ключові слова: імпульсний бар'єрний розряд, обробка поверхні, низькотемпературна плазма, конструктивна сталь, твердість по Віккерсу, електронна мікроскопія, мікроструктура, субструктура, щільність дислокацій, зміцнення, механічні характеристики

Вступ. Розвиток високотехнологічних галузей промисловості стимулює зростання вимог до зварних конструкцій зі сталей, які працюють в умовах динамічних навантажень при дії високих температур. Резервом підвищення ресурсу таких виробів є розробка технологій металообробки із застосуванням електрофізичних дій. Використання імпульсних електричних струмів (ІЕС), струмів плазми, імпульсних електромагнітних полів (ІЕМП), їх комбінованих впливів для підвищення механічних характеристик металів, сплавів і зварних з'єднань є актуальним у зв'язку з необхідністю заміни традиційних енергоємних технологій обробки елементів зварних конструкцій на більш прогресивні. Результати досліджень електрофізичних процесів, що протікають в металевих матеріалах при дії ІЕС та ІЕМП, дають підставу вважати їх перспективними для інженерної практики з позицій енергоефективності та технологічності [1–6].

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 для зварних конструкцій, який базується на електро-

фізичних процесах. Критерієм доцільності практичного використання технологій зміцнення металів і сплавів із застосуванням ІБР є їх енергоефективність *Y*, що визначається значно меншими витратами енергії у порівнянні із термічною обробкою. Величина *Y* називається енергетичним виходом (energy yield) і залежить від параметрів ІБР, таких як напруга, швидкість її зростання, частота повторення імпульсів [7].

Це особливо стосується конструкційних сталей, що використовуються у виробках спеціального призначення, які працюють при короткочасній дії високих температур в умовах динамічних навантажень. Особливі вимоги застосовуються до твердості таких сталей, що є однією з характеристик їх захисних властивостей при динамічних контактних взаємодіях зі швидкостями близько 1000 м/с. Прикладом такого матеріалу є сталь 25ХГНМТ, яка використовується у відповідальних конструкціях спеціального призначення. Традиційним методом підвищення твердості такої сталі є гартування, яке здійснюється при температурі $T = 860$ °С в маслі із наступним відпуском при $T = 190$ °С у повітрі [8]. Це є досить енерговитратною технологією, що потребує габаритного металоємного обладнання. Застосування ІБР для

Лобанов Л.М. Scopus Author ID 6603876807, Берднікова О.М. – <http://orcid.org/0000-0001-9754-9478>,

Пашин М.О. Scopus Author ID 7801572218, Миходуй О.Л. Scopus Author ID 36189953300,

Кушнар'єва О.С. – <http://orcid.org/0000-0002-2125-1795>, Кривий В.І. – <http://orcid.org/0000-0003-2611-528X>

© Л.М. Лобанов, О.М. Берднікова, М.О. Пашин, О.Л. Миходуй, О.С. Кушнар'єва, Т.Г. Соломійчук, В.І. Кривий, 2022

Таблиця 1. Результати аналізу хімічного складу досліджуваних зразків сталі 25ХГНМТ, мас. %

Метал	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Al	Ti	W
Сталь 25ХГНМТ, лист $\delta = 4$ мм	0,27	0,24	0,84	0,004	0,018	0,50	0,95	0,23	0,40	0,03	0,04	0,007	$\leq 0,02$

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 цієї роботи є дослідження впливу ІБР на твердість зразків конструкційної сталі 25ХГНМТ.

Дослідні зразки, обладнання для обробки ІБР та методика досліджень. В якості предмету досліджень використовували плоскі зразки металу розмірами $40 \times 40 \times 4$ 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 (табл. 1).

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

ЕС складалася із досліджуваного зразка 1 сталі 25ХГНМТ, високовольтного електрода 2 та скляного (кварцове скло) діелектричного бар'єру 3 ($100 \times 100 \times 1$ мм³). Для зменшення крайового ефекту електрод 2 мав заокруглені краї. Діаметр плоскої частини цього електрода становив 36 мм. Обробка велась при газовому проміжку δ завтовшки 1 мм між пластиною 1 та бар'єром 3. Висока

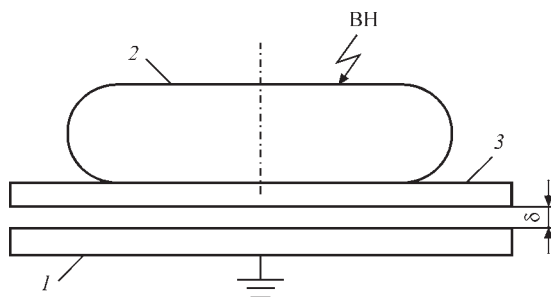


Рис. 1. Схема електродної системи (ЕС) для обробки ІБР зразків сталі 25ХГНМТ: 1 – досліджуваний зразок сталі 25ХГНМТ; 2 – високовольтний електрод; 3 – діелектричний бар'єр; δ – газовий проміжок

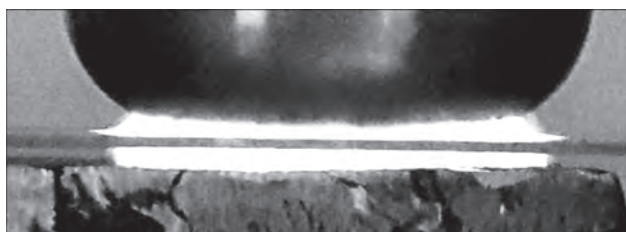


Рис. 2. Зовнішній вигляд ІБР

напруга (ВН) на електрод 2 подавалась від генератора імпульсів (ГІ), який забезпечував уніполярні імпульси напруги амплітудою до 30 кВ зі швидкістю їх зростання $\approx 3 \cdot 10^{11}$ В/с та тривалістю близько 150 нс. До складу ГІ також входив магнітний ключ, який сприяв розряджанню діелектричного бар'єру після проходження прямого імпульсу струму через електродну систему. Амплітуду імпульсів регулювали шляхом зміни постійної напруги U_0 , що подавалась на вхід ГІ. Осцилограми напруги та струму через електродну систему записувалися за допомогою осцилографа TDS1012 та відповідно датчиків P6015 і P6021. Всі дослідження виконані при частоті повторення імпульсів 300 Гц. Зовнішній вигляд розряду, який наведено на рис. 2 (час експозиції 0,1 с), свідчить про однорідний характер в проміжку δ , а не ниткоподібний.

Типовий вигляд осцилограм струму $i(t)$ та напруги $u(t)$ режиму ІБР, на якому обробляли зразки сталі 25ХГНМТ, 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 розряджанням 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/см².

Досліджували вплив періоду часу обробки на значення твердості сталі. Зразки піддавали ІБР на режимі рис. 3 при варіації часу відповідно 5, 10, 15 та 20 хв.

Із металу зразків готували макрошліфи згідно стандартної методики, на яких проводили дослі-

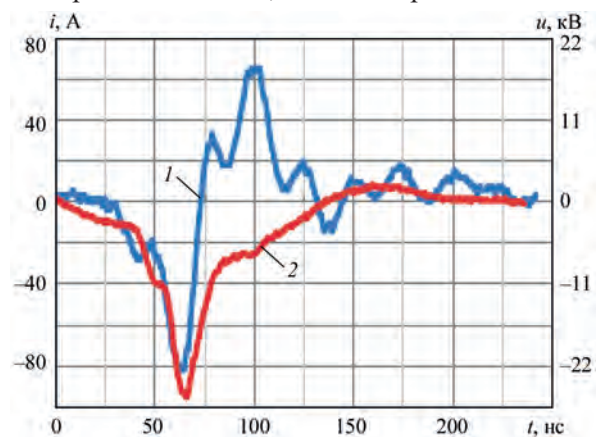


Рис. 3. Типовий вигляд осцилограм струму $i(t)$ – крива 1 та напруги $u(t)$ – крива 2 режиму ІБР, на якому обробляли зразки сталі 25ХГНМТ

дження структури та вимірювання мікротвердості оброблених поверхонь по Віккерсу (HV) згідно стандарту ISO 6507-1:2005. Оцінку значень HV виконували із застосуванням мікротвердоміру М-400 фірми LECO при навантаженні зразків $P = 100$ г.

Дослідження структури на просвіт проводили методом трансмісійної електронної мікроскопії (ТЕМ) на приладі JEM-200CX (фірми JEOL) при

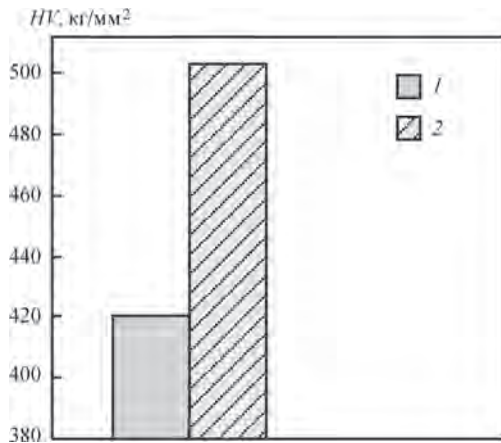


Рис. 4. Твердість сталі 25XGNMT до (1) та після (2) обробки

прискорювальній напрузі 200 кВ з метою встановлення як змінюється структура та фазовий склад металу сталі 25XGNMT внаслідок дії на її поверхню ІБР. Дослідження методом ТЕМ дозволили отримати достовірну експериментальну інформацію на дислокаційному рівні про такі структурно-фазові складові, як нижній або верхній бейніт, відпущений мартенсит та мартенсит гартування, параметри їх тонкої структури та розподіл та щільність дислокацій у сталі до та після обробки. Саме ці структурні складові мають суттєвий вплив на властивості міцності та тріщиностійкості металу високоміцних сталей, що використовуються у виробі спеціального призначення [9, 10].

Результати досліджень та їх обговорення. Встановлено, що максимальний вплив ІБР на твердість сталі 25XGNMT досягається за тривалості обробки зразків у 15 хв (на даному режимі). При цьому значення HV після обробки зростають на 20 %, з 420 до 505 кг/мм² (рис. 4). Це може сприяти підвищенню динамічної міцності зварних конструкцій із даної сталі при їх контактних взаємодіях.

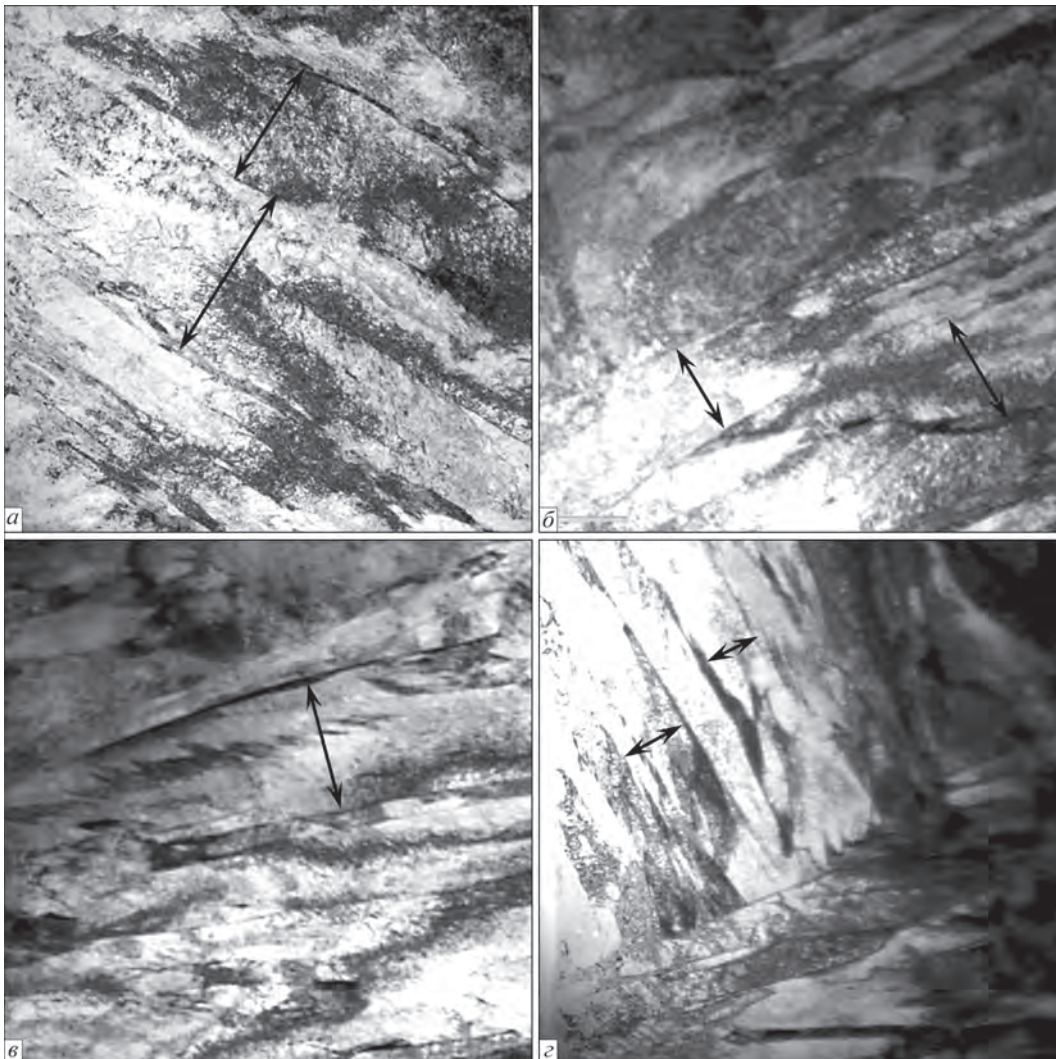


Рис. 5. Тонка структура основного металу сталі 25XGNMT: а – відпущений мартенсит ($M_{\text{відп}}$), $\times 22000$; б – нижній бейніт ($B_{\text{н}}$), $\times 22000$; мартенсит гартування ($M_{\text{гарт}}$), $\times 18000$; верхній бейніт ($B_{\text{в}}$), $\times 22000$). Стрілками позначено ширину рейок

У результаті проведених досліджень структури на просвіт методом ТЕМ встановлено наступне. Структура основного металу броньової сталі 25ХГНМТ мартенситно-бейнітна, переважно (до 60 %) відпущений мартенсит ($M_{\text{відп}}$) та бейніт нижній ($B_{\text{н}} \sim 30\%$) при рівномірному розподілі щільності дислокацій в об'ємі структурних складових з невеликою часткою мартенситу гартування ($M_{\text{гарт}}$, до 5 %) і бейніту верхнього ($B_{\text{в}} \sim 5\%$). Загальний рівень щільності дислокацій складає $\rho = (1 \dots 6) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. При деталізації структурних складових основного металу встановлено, що ширина рейкових структур (h_p) стано-

вить: 0,3...2,0 мкм ($M_{\text{відп}}$, рис. 5, а); 0,2...1,0 мкм ($B_{\text{н}}$, рис. 5, б); 0,35...1,5 мкм ($M_{\text{гарт}}$, рис. 5, в); 0,3...0,8 мкм ($B_{\text{в}}$, рис. 5, г).

По глибині від обробленої поверхні (від 0 до 2200 мкм) у поперечному перерізі зразка виявлено зміну структурно-фазового складу, параметрів тонкої структури та щільності дислокацій (табл. 2). По глибині від обробленої поверхні до 300 мкм формується виключно структура відпущеного мартенситу та нижнього бейніту при її подрібненні та рівномірному розподілі щільності дислокацій ($\rho = (2 \dots 8) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$) (рис. 6). У порівнянні з основним металом об'ємна частка

Таблиця 2. Щільність дислокацій ρ в об'ємі структурних складових бейніту нижнього ($B_{\text{н}}$) та верхнього ($B_{\text{в}}$), відпущеного мартенситу ($M_{\text{відп}}$) та мартенситу гартування ($M_{\text{гарт}}$) по глибині від обробленої поверхні та в основному металі (ОМ)

$\rho, \text{ см}^{-2}$	Відстань від поверхні, мкм					ОМ
	0...100	150...300	300...1000	1400...1900	2000...2200	
$\rho (B_{\text{н}})$	$(2 \dots 4) \cdot 10^{10}$	$(1 \dots 3) \cdot 10^{10}$	$(1 \dots 3) \cdot 10^{10}$	$9 \cdot 10^9 \dots 2 \cdot 10^{10}$	$8 \cdot 10^9 \dots 2 \cdot 10^{10}$	$8 \cdot 10^9 \dots 2 \cdot 10^{10}$
$\rho (B_{\text{в}})$	–	–	$(3 \dots 5) \cdot 10^{10}$	$(2 \dots 4) \cdot 10^{10}$	$(1 \dots 3) \cdot 10^{10}$	$(1 \dots 3) \cdot 10^{10}$
$\rho (M_{\text{відп}})$	$(5 \dots 8) \cdot 10^{10}$	$(4 \dots 6) \cdot 10^{10}$	$(4 \dots 6) \cdot 10^{10}$	$(3 \dots 6) \cdot 10^{10}$	$(2 \dots 6) \cdot 10^{10}$	$(2 \dots 6) \cdot 10^{10}$
$\rho (M_{\text{гарт}})$	–	–	–	$(4 \dots 7) \cdot 10^{10}$	$(4 \dots 7) \cdot 10^{10}$	$(5 \dots 7) \cdot 10^{10}$

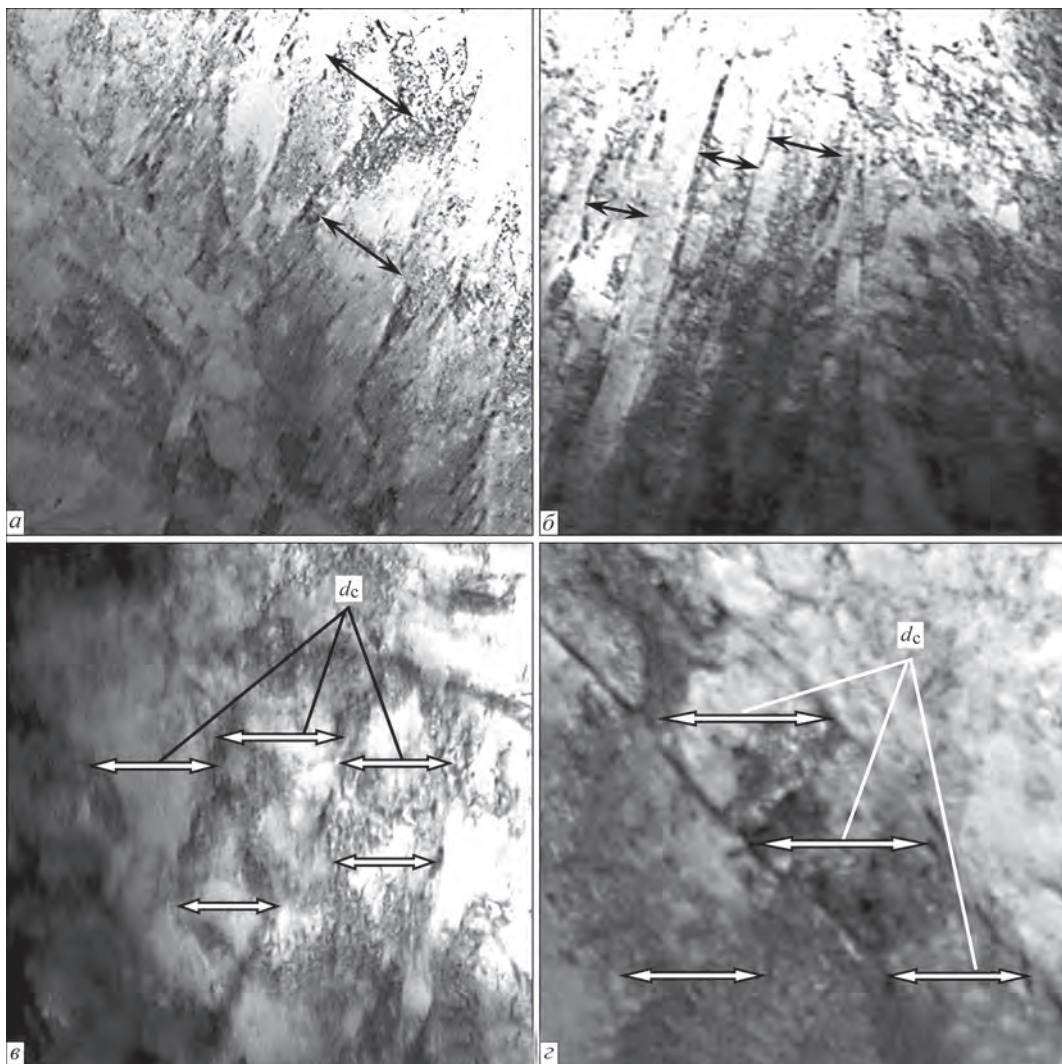


Рис. 6. Тонка структура металу обробленої поверхні сталі 25ХГНМТ: а – відпущений мартенсит ($M_{\text{відп}}$), $\times 25000$; б–г – нижній бейніт ($B_{\text{н}}$), відповідно $\times 22000$, $\times 25000$, $\times 55000$. Стрілками позначено ширину рейок h_p (а, б), комірчасту (в) та фрагментовану субструктуру (d_c) (г)

бейніту нижнього зростає (до 50 %). Ширина рейкових структур (h_p) становить: 0,2...1,3 мкм ($M_{відп}$, рис. 6, а); 0,15...0,65 мкм (B_H , рис. 6, б). На глибині 300 мкм від обробленої поверхні спостерігається незначна кількість бейніту верхнього ($B_B \leq 3\%$), а на 1400 мкм фіксується мартенсит гартування ($M_{гарт} \leq 5\%$).

Аналіз субструктури, що формується, показав, що в результаті імпульсного впливу в зоні обробленої поверхні сталі 25ХГНМТ змінюється внутрішня будова дислокаційних комірчастих структур з тенденцією до плавних розорієнтувань (рис. 6, в), що свідчить про перерозподіл дефектів кристалічної ґратки. Також з'являються елементи фрагментованої структури розміром d_c ($h \times l$, ширина \times довжина) = 0,2...0,6 \times 0,3...1,4 мкм ($M_{відп}$) та 0,1...0,4 \times 0,25...1,0 мкм (B_H) (рис. 6, з).

Середні значення щільності дислокацій в об'ємі та розміри рейок для кожної із структурних складових в поверхневих шарах та основному металі (ОМ) наведено на рис. 7.

З рис. 7 видно, що у порівнянні з основним металом у поверхневих шарах по глибині металу до 2200 мкм спостерігається загальне підвищення (у 1,5 рази, рис. 7, а) щільності дислокацій та подрібнення (у 1,4 рази) рейкових структур, як B_H , так і $M_{відп}$ (рис. 7, б).

У результаті досліджень методом ТЕМ встановлено, що внутрішній структурі металу (порівняно з ОМ) характерне загальне підвищення щільності дислокацій як в обсязі, так і по границях структурних складових (до $\rho = 7 \cdot 10^{10} \dots 1,2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$), формування спектра дислокаційних субструктур:

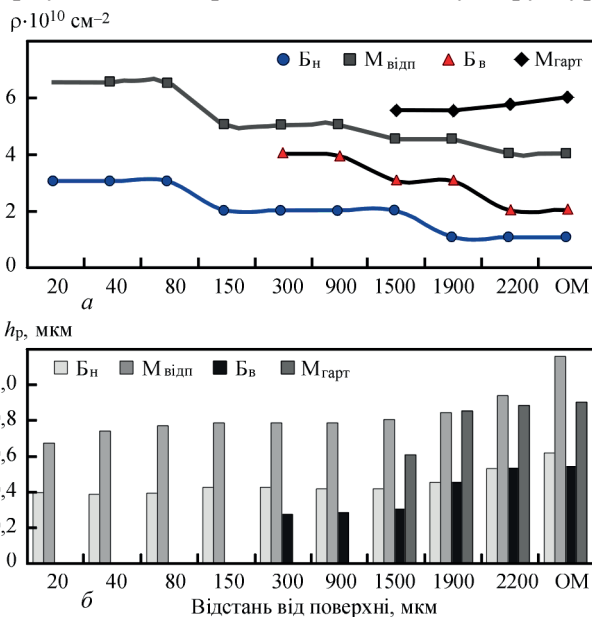


Рис. 7. Зміна середніх параметрів тонкої структури бейніту нижнього (B_H), відпущеного мартенситу ($M_{відп}$), бейніту верхнього (B_B), мартенситу гартування ($M_{гарт}$) по глибині від обробленої поверхні та в ОМ: а – щільність дислокацій (ρ) в об'ємі структурних складових; б – ширина рейок (h_p)

комірчастої; комірчастої з плавними розорієнтуваннями та з багатомірними дискретними розорієнтуваннями; з ознаками фрагментації. Такі структурно-фазові зміни сприяють підвищенню загального рівня поверхневого зміцнення металу за рахунок збільшення дислокаційного зміцнення, зумовленого міждислокаційною взаємодією (згідно з теоріями Тейлора, Зегера, Мотта та ін. [11]) та субструктурного зміцнення за рахунок диспергування структури (відповідно залежності Холла-Петча [12]).

Таким чином, у металі обробленої поверхні (порівняно з основним металом) загальне підвищення щільності дислокацій, а також диспергування структури сприятимуть збільшенню загального рівня зміцнення металу. При цьому відсутність мартенситу гартування та бейніту верхнього у поверхневих шарах броньової сталі свідчить про підвищення тріщиностійкості металу у цій зоні [11].

Виходячи з наведених вище даних, у зразку сталі 25ХГНМТ, поверхню якого було оброблено ІБР впродовж 15 хв, спостерігали загальне зміцнення металу, обумовлене підвищенням щільності 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 [13]. Дія прямого імпульсу струму вірогідно ініціює періодичні коливання атомів, наслідком яких є перерозподіл дефектів кристалічної ґратки. Результатом цього є деформаційне зміцнення металу при загальному підвищенні щільності дислокацій, подрібненні структури та формуванні субструктури. Це сприятиме зміцненню сталі 25ХГНМТ, а також підвищенню її тріщиностійкості [9, 10].

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 зварних конструкцій, які працюють у спеціальних умовах.

Висновки

1. Показано, що застосування імпульсного бар'єрного розряду (ІБР) для обробки сталі 25ХГНМТ є основою для розробки технологій інженерії поверхні, що направлені на подовження ресурсу металевих матеріалів для зварних конструкцій, які працюють у спеціальних умовах.

2. Встановлено, що в результаті 15-хвилинної обробки ІБР сталі 25ХГНМТ відбувається підвищення її твердості по Віккерсу (HV) на 20 % на глибину до 2 мм, що обумовлено подрібненням

мартенситно-бейнітної структури при зростанні частки бейніту нижнього та формуванні дислокаційних субструктур із ознаками фрагментації, яке сприяє підвищенню загального рівня поверхневого зміцнення металу за рахунок збільшення дислокаційного та субструктурного зміцнень.

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.

Список літератури/References

1. Дубодєлов В.І., Горюк М.С. (2018) *Застосування електромагнітних полів і магнітогідродинамічних явищ для інтенсифікації впливу на металеві системи: світовий та український досвід*. Наука про матеріали: досягнення та перспективи. У 2 т. Т. 2, 24–50. Київ, Академперіодика. Dubodelov, V.I., Goryuk, M.S. (2018) *Application of electromagnetic fields and magnetohydrodynamic phenomena for intensification of effect on metallic systems: World and Ukrainian experience*. In: Science of Materials. Achievements and Prospects. In: 2 Vol., Vol.2, 24–50, Kyiv, Akademperiodyka [in Ukrainian].
2. Sydorenko, Y.M., Pashchin M.O., Mykhodui, O.L. et al. (2020) Effect of Pulse Current on Residual Stresses in AMg6 Aluminum Alloy in Electrodynamic Treatment, *Strength of Materials*, 52(5), 731–737. DOI: 10.1007/s11223-020-00226-2
3. Lobanov, L.M., Pashchyn, M.O., Mikhodui, O.L. et al. (2021) Modeling of stress-strain states of AMg6 alloy due to impact action of electrode-indenter in electrodynamic treatment. *The Paton Welding J.*, 6, 2–11.
4. Zhang, Jun, Liu, Ji-De, Zhang, Xin-Fang et al. (2021) Effect of High Density Current Pulses on Microstructure and Mechanical Properties of Dual-Phase Wrought Superalloy. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 34, 12, 1635–1644. DOI 10.1007/s40195-021-01211-7
5. Diao, Aimin, Wang, Jingpen, Yang, Yuqiu et al. (2022) Fatigue Damage Recovery of 20 Carbon Steel under Pulsed Current. *Tezhong Zhuzao Ji Youse Hejin/Special Casting and Nonferrous Alloys*, 42, 3, 318–322. DOI: 10.15980/j.tzzz.2022.03.009
6. Guo, J.D., Wang, X.L., Dai, W.B. (2015) Microstructure evolution in metals induced by high density electric current pulses. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, 31 (13a), 1545–1554. <http://www.maneyonline.com/doi/pdfplus/10.1179/1743284715Y.0000000001> doi: 10.1179/1743284715Y.0000000001
7. Fangmin Huang, Li Chen, Honglin Wang, Zongcheng Yan. (2010) Analysis of the degradation mechanism of methylene blue by atmospheric pressure dielectric barrier discharge plasma. *Chemical Engineering Journal*, 162, 250–256.
8. <https://s-metall.com.ua>
9. Kostin, V.A., Poznyakov, V.D., Berdnikova, O.M. et al. (2021) Influence of Structural Transformations on the Mechanical Properties of Welded Joints of Armor Steels. *Materials Science*, 56(4), 472–480. <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00453-1>
10. Berdnikova, O.M., Kostin, V.A., Pozdnyakov, V.D. et al. (2020) 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*, 5, 3–9. <https://doi.org/10.37434/as2020.05.01>
11. Гольдштейн М.И., Литвинов В.С., Бронфин Б.М. (1986) *Металлофизика высокопрочных сплавов*. Москва, Металлургия. Goldshtejn, M.I., Litvinov, V.S., Bronfin, B. M. (1986) *Physics of metals of high-strength alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
12. Фарбер В.М., Беленький Б.З., Гольдштейн М.И. (1975) *Оценка прочности малоуглеродистых низколегированных сталей по структурным данным*. Физика металлов и металловедение, Т. 3, вып. 2, 403–409. Farber, V.M., Belenkij, B.Z., Goldshtejn, M.I. (1975) *Evaluation of strength of low-carbon low-alloy steels by structural data*. *Fizika Metallov i Metallovedenie*, Vol. 3, Issue 2, 403–409 [in Russian].
13. Гриднев В.Н., Трефилов В.И. (1988) *Фазовые и структурные превращения и метастабильные состояния в металлах*. Киев, Наукова думка. Gridnev, V.N., Trefilov, V.I. (1988) *Phase and structural transformations and metastable states in metals*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].

STRENGTHENING OF WELDED STRUCTURES OF 25KHGNMT STEEL BY PULSED BARRIER DISCHARGE TREATMENT

L.M. Lobanov¹, O.M. Berdnikova¹, M.O. Pashchyn¹, O.L. Mykhoduj¹, O.S. Kushnaryova¹, T.G. Solomiychuk¹, V.I. Kryvyi²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

²Scientific and Production Association Praktika, 15, Metalistiv Str., 03057, Kyiv, Ukraine

The development of high-tech industries stimulates the growth of requirements for metal of welded structures, a complex of their basic and special properties. The use of pulsed electric currents, 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 treatment of welded structures with more progressive. The use of a pulsed barrier discharge (PBD) in the metal treatment, which generates low-temperature plasma on the surface of the treated metal is a new approach to optimizing mechanical properties of high-strength steels for welded structures, which is based on electro-physical processes. In the work, strengthening of 25KhGNMT steel as a result of PBD action on its surface was investigated. PBD treatment of steel took place in a discharge device at an increment rate of voltage $\approx 3 \cdot 10^{11}$ V/s. The effect of PBD treatment period on Vickers hardness value (*HV*) of test specimens was investigated. Studies of the structure of 25KhGNMT steel were carried out by the method of transmission electron microscopy to reveal its changes as a result of PBD action. It was found that values of *HV* after PBD treatment increase from 420 to 505 kg/mm², accompanied by a general increase in dislocation density and dispersion of microstructure, which can positively affect the mechanical characteristics of 25KhGNMT steel for welded structures operating under dynamic loads. 13 Ref., 2 Tabl., 7 Fig.

Keywords: pulsed barrier discharge, surface treatment, low-temperature plasma, structural steel, Vickers hardness, electron microscopy, microstructure, substructure, dislocation density, strengthening, mechanical characteristics

Надійшла до редакції 02.08.2022