

## ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 621.791.92

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/01>

**Бернацький А.В.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Сіора О.В.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Соколовський М.В.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Лукашенко В.А.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Данилейко О.О.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України;  
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

**Набок Т.М.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Бондарєва В.І.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Шамсутдінова Н.О.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

## ОСОБЛИВОСТІ ЛАЗЕРНОГО НАПЛАВЛЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ СКАНАТОРУ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

До недоліків лазерної обробки круглою плямою варто віднести нерівномірність часу впливу в центрі й на периферії променя, що приводить до нерівномірності фізико-механічних властивостей по ширині зони обробки. Для вирівнювання часу впливу лазерного променя й регулювання густини потужності на поверхні деталі необхідне застосування технологічних прийомів, до яких належить розгортання лазерного випромінювання за допомогою спеціалізованого устаткування, – сканаторів. Променева стійкість сучасних дзеркал, дозволяє використовувати для віддзеркалення випромінювання високопотужних твердотільних, волоконних та діодних лазерів оптичні елементи без примусового водяного охолодження. Тому актуальними постають проблеми розробки технологічного обладнання для сканування лазерного випромінювання, та дослідження їх застосування для розширення технологічних можливостей різноманітних процесів лазерної обробки (зварювання, наплавлення, легування тощо). Створено сканатор лазерного випромінювання, що представляє собою оптико-механічний пристрій, що складається з відхиляючого дзеркала і механізму переміщення (коливання) даного дзеркала. Лазерне випромінювання після фокусуючої лінзи потрапляло на дзеркало сканатора, розташоване (та таке, що здійснювало коливання) під кутом  $45^\circ$  до осі поширення лазерного випромінювання. За рахунок коливань дзеркала, забезпечувалося відхилення лазерного випромінювання на задану відстань в площині розташованій перпендикулярно напрямку наплавлення. За рахунок застосування сканованого лазерного випромінювання забезпечувався більш рівномірний прогрів матеріалу основи і збільшувалася продуктивність процесу наплавлення. Встановлено, що при використанні концентрованого джерела нагрі-

вання, що рухається та робить додаткові коливання щодо напрямку свого руху, можливо здійснювати такий вплив теплового потоку на поверхню заготівлі, що дозволяє рівномірно неї нагрівати по глибині до температури плавлення в межах деякої області, розміри якої перевищують розміри джерела нагрівання. При збільшенні амплітуди осциляцій джерела нагріву вище деякого значення або збільшенні кількості треків наплавлення, відбувається симетрична локалізація теплового потоку у двох граничних точках і нагрівання поверхні заготівлі в цільовій області стає нерівномірним.

**Ключові слова:** лазерне наплавлення, коливання, сканатор, структура, мікротвердість, особливості процесу.

**Постановка проблеми.** У теперішній час у лазерних технологіях обробки матеріалів найчастіше застосовується лазерне випромінювання з модовим складом близьким до TEM<sub>00</sub>, тому що при роботі на цій моді можливо досягнення дифракційної границі розбіжності лазерного променя [1]. Розподіл інтенсивності випромінювання по перерізу променя на виході з лазера у цьому випадку має вигляд кривої Гаусса, а у поперечному перерізі форму близький до кола [2].

До недоліків лазерної обробки круглою плямою варто віднести нерівномірність часу впливу в центрі й на периферії променя, що приводить до нерівномірності фізико-механічних властивостей по ширині зони лазерної обробки [3]. Для вирівнювання часу впливу лазерного променя й регулювання густини потужності на поверхні деталі необхідне застосування технологічних прийомів, до яких належить розгортання лазерного випромінювання за допомогою спеціалізованого устаткування, – сканаторів [4–6].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Прийом розгортання (сканування) випромінювання може бути реалізований кількома способами, наприклад за рахунок застосування так званих фокусаторів (багатосегментних дзеркал, які по різному фокусують окремі частки поперечного перетину випромінювання, формуючи на оброблюваному зразку пляму певної конфігурації), шляхом механічного переміщення фокусуєчої системи, безпосереднім коливанням з певною частотою фокусуєчого елемента, коливанням додаткового дзеркала, яке може бути розташованим після фокусуєчого елемента тощо [7–9].

У роботі [10] виконана розробка механічного сканатора, у якому розгортання лазерного випромінювання ведеться за рахунок відхилення лазерного променя фокусуєчою лінзою. Конструкція сканатору забезпечує розгортання лазерного випромінювання зі швидкістю до 10 м/с, амплітудою коливань до 10 мм та частотою коливань до 200 Гц. Як показано у роботах [1, 7, 9, 10], з метою збільшення ширини отриманого поверхневого шару металу, що обробляється, можна застосувати поперечні коливання лазерного

випромінювання, при цьому збільшиться ширина зони нагріву без зменшення густини потужності лазерного джерела нагріву.

Зазвичай сканатори мають рухливі оптичні елементи – дзеркала, що відхиляють лазерне випромінювання [1, 7, 10]. Сканатори розрізняються за законом сканування, типом й іншим ознакам. Найбільшого розповсюдження набули системи розгортання лазерного випромінювання на базі гальванометричних сканаторів, які застосовуються для ведення таких процесів, як прецизійне лазерне маркування різноманітної продукції в промисловому виробництві, декоративне лазерне гравірування в рекламно-сувенірному бізнесі та при виробництві ювелірних виробів.

В таких сканаторах застосовуються дзеркала, які не мають примусового охолодження. До появи високопотужних твердотільних, волоконних та діодних лазерів це унеможливило їх використання для ведення таких процесів як зварювання, легування, термообробка тощо. Оскільки для лазерного випромінювання 10,6 мкм, що генерували високопотужні СО<sub>2</sub>-лазери, необхідно було застосування дзеркал з примусовим охолодженням, що в свою чергу, значно ускладнювало конструкцію дзеркальних блоків та збільшувало їх масо-габаритні характеристики.

Променева стійкість сучасних дзеркал, дозволяє використовувати для віддзеркалення випромінювання високопотужних твердотільних, волоконних та діодних лазерів оптичні елементи без примусового водяного охолодження. Тому актуальними постають проблеми розробки технологічного обладнання для сканування лазерного випромінювання, та дослідження їх застосування розширення технологічних можливостей різноманітних процесів лазерної обробки (зварювання, наплавлення, легування тощо).

**Постановка завдання.** Метою роботи є розробка технологічного обладнання для сканування лазерного випромінювання, та вивчення особливостей його застосування для розширення технологічних можливостей процесу лазерного наплавлення.

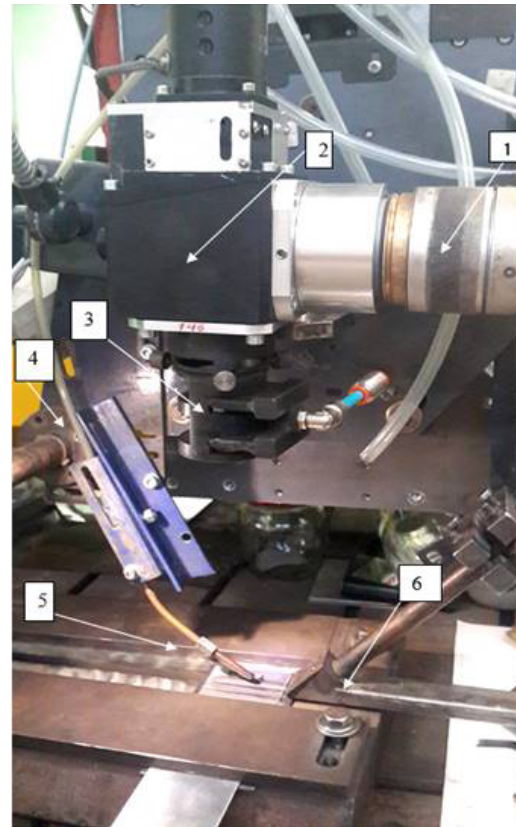
**Виклад основного матеріалу.** Лазерне наплавлення здійснювали на листові зразки зі сталі



12X21H5T товщиною 1,0 мм. Досліджували варіанти отримання треків різної ширини і висотою до 9 мм. Потужність лазерного випромінювання варіювалася в діапазоні 0,5...4,4 кВт; швидкість обробки 0,5...4 м/хв; величина розфокусування 0...+ 35 мм. Для наплавлення використовували наплавочні порошок фракцією "150 + 53" марки 16316 виробництва компанії "Castolin Eutectic" з наступним хімічним складом: Fe основа; 0,03% C; 17,5% Cr; 13% Ni; 2,7% Mo. Витрати газу, що транспортує порошок з дозатора в зону впливу лазерного випромінювання становили 2...7 л/хв. Витрати порошку при напавленні становили 0,5...2,0 кг/год.

Під час проведення експериментів з лазерного наплавлення, порошок безперервно подавався в зону впливу лазерного випромінювання. Діаметр плями лазерного випромінювання на деталі становив 0,6...4,0 мм, в залежності від значення величини розфокусування лазерного випромінювання (0...+ 35 мм). Витрати порошку і витрати газу, що транспортує порошок з дозатора в зону впливу лазерного випромінювання, підбирали таким чином, щоб забезпечити стабільне формування валика напавленого металу. Направлене формування струменя газу з наплавочним порошком в зону впливу лазерного випромінювання забезпечували за допомогою формуючого сопла з внутрішнім діаметром 2 мм, показаного на рис.1 (позиція 5). Формуюче сопло було закріплено разом з лазерною технологічною головкою на рухомий каретці маніпулятора. В ході процесу лазерного наплавлення, сопло розташовувалося під кутом 15-30° до горизонтальної площини і направляло струмінь газу з порошком безпосередньо в зону впливу лазерного випромінювання, назустріч руху лазерного випромінювання («проти ходу»), як показано на рис. 1.

При виконанні підбору режимів наплавлення, використовувався сканатор лазерного випромінювання, що представляє собою оптико-механічний пристрій, що складається з відхиляючого дзеркала і механізму переміщення (коливання) даного дзеркала. Лазерне випромінювання після фокуруючої лінзи потрапляло на дзеркало сканатора, розташоване (та здійснює коливання) під кутом 45° до осі поширення лазерного випромінювання. За рахунок коливань дзеркала, забезпечувалося відхилення лазерного випромінювання на задану відстань в площині розташованої перпендикулярно напрямку наплавлення (переміщення каретки). За рахунок застосування сканованого випромінювання забезпечувався



**Рис. 1. Стенд для лазерного наплавлення:**  
1 – лазерна головка; 2 – сканатор лазерного випромінювання; 3 – «cross jet» («повітряний ніж») – система захисту оптики; 4 – канал по якому транспортується порошок; 5 – сопло, що формує потік порошку; 6 – система газового захисту напавленого металу.

більш рівномірний прогрів матеріалу основи і збільшувалася продуктивність наплавлення. Крім того, нівелювався недолік застосування лазерного випромінювання з гаусовим розподілом інтенсивності потужності.

За допомогою оптичної мікроскопії та мікродюрметричного аналізу, були досліджені зразки, які відрізнялися параметрами технологічних режимів. Дослідження були проведені на різних ділянках кожного із зразків «напавлений метал → ЗТВ → основний метал». За допомогою оптичної мікроскопії виконано оцінку структури (включаючи структуру і межі зерен, морфологію і орієнтацію, домішки і включення). Виконано оцінки наявності тріщин, розшарувань, пустот.

Зразки для металографічних досліджень готували на високошвидкісних полірувальних колах з використанням алмазних паст різної дисперсності. Структуру металу наплавлення виявляли електролітичним травленням в 20% розчині хромової кислоти. Дослідження проводили на мікроскопі «Neophot 32», мікротвердість вимірювали

на мікротвердомірі фірми «Лесо» марки М400. Фотографії отримані за допомогою фотокамери «Olympus».

Нижче наведено порівняння структури зразків, одержаних на таких режимах:

№ 1207.1. Наплавлення сканатором з ексцентриком 0,1 мм, частота сканування променя 25 Гц, одна доріжка. Потужність лазерного випромінювання  $P = 3$  кВт, швидкість наплавлення  $V = 2$  м/хв, фокусна відстань лінзи  $F = 300$  мм, величина розфокусування  $\Delta F = +35$  мм.

№ 1207.2. Наплавлення сканатором з ексцентриком 0,1 мм, 25 Гц, 7 доріжок з кроком 2 мм;  $P = 3$  кВт,  $V = 2$  м/хв,  $F = 300$  мм,  $\Delta F = +35$  мм.

Наплавлення в зразку № 1207.1 має V-подібну форму з повним проплавленням основного металу (рис. 2). Проводилися вимірювання мікротвердості досліджуваного наплавлення по висоті і перпендикулярно осі наплавлення на 0,5 висоти, при навантаженні 100 г з кроком  $h = 250$  мкм.

Структура металу наплавлення в зразку № 1207.1 лита (рис. 3), мілкокомірчаста ( $d$  комірок от 5 до 12 мкм). Зустрічаються комірки рівновісної і витягнутої форми, подекуди зберігаються фрагменти дендритної структури (рис. 3). Структура наплавлення однорідна по висоті, спостерігається деяке укрупнення в корені наплавлення. Мікроструктура наплавлення – легований аустенит і  $\delta$ -ферит (4–8%). Твердість металу наплавлення HV1 3090–3220 МПа.

У лінії сплавляння, з боку наплавлення, в зразку № 1207.1 спостерігається світлотравна смужка (перехідна зона) шириною від 100 до 200 мкм. Твердість смужки HV1 2680–3060 МПа. Мікроструктура смужки складається з аустеніту і фериту (рис. 4).

Структура ЗТВ в зразку № 1207.1 складається з аустенітної матриці і виділень  $\delta$ -фериту, витягнутих уздовж напрямку прокату. На відстані при-

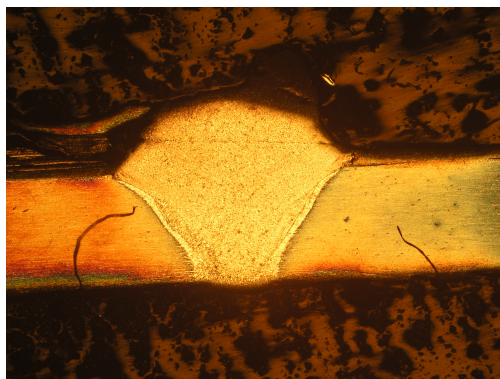


Рис. 2. Мікроструктура наплавленого зразка № 1207.1. Загальний вигляд  $\times 25$

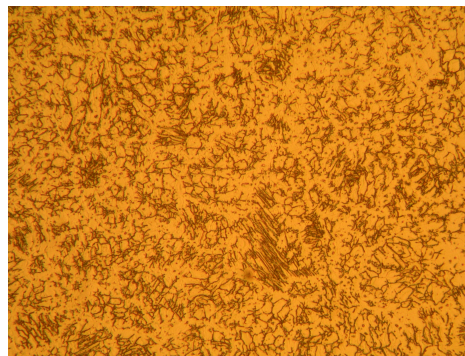


Рис. 3. Лита структура металу наплавлення в зразку № 1207.1  $\times 500$

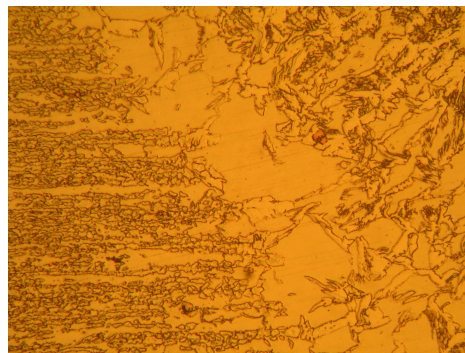


Рис. 4. Мікроструктура у лінії сплавляння в зразку № 1207.1  $\times 500$ .

близно 200 мкм від лінії сплавляння кількість аустеніту збільшується в порівнянні з основним металом. Твердість металу ЗТВ HV1 3090–3220 МПа. У наплавленому металі, на лінії сплавляння і в металі ЗТВ дефектів не виявлено.

Структура основного металу в зразку № 1207.1 складається з аустеніту і  $\delta$ -фериту (до 30%) з яскраво вираженою текстурою прокату. Твердість основного металу становить HV1 3090–3220 МПа.

Структура наплавлення дрібнокомірчаста з фрагментами дендритної структури, однорідна по висоті наплавлення. Зміна твердості по висоті і ширині наплавлення незначні. Деяке падіння твердості спостерігається в білій смужці у лінії сплавляння. Дефектів в металі наплавлення і ЗТВ в зразку № 1207.1 не виявлено.

У зразку № 1207.2, який має зовнішній вигляд нібито з «подвійною доріжкою» режим відрізнявся від зразка № 1207.1 кількістю треків наплавлення (проходів для збільшення висоти наплавлення). У зразку № 1207.2 було виконано 7 окремих треків з кроком по координаті Z у 2 мм.

У зразку № 1207.2 обидві сформовані «доріжки» мають V-подібну форму з повним проплавленням основного металу. На висоті  $\sim \frac{3}{4}$  «доріжки» перекриваються (рис. 5).



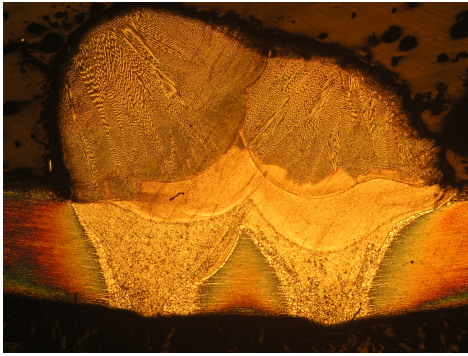


Рис. 5. Мікроструктура напавленого зразка № 1207.2. Загальний вигляд  $\times 25$

У зразку №1207.2 мілкокомірчаста структура (d комірок 5–15 мкм). Форма комірок рівновісна і витягнута. Зберігаються фрагменти дендритів 2-а і 3-я області мають структуру кристалітів різного розміру і орієнтації і відрізняються травимістю (рис. 5). Середня частина напавлення (2-а область) більше світлотравима. Мікроструктура металу напавлення є аустенитною матрицею і виділеннями  $\delta$ -фериту. Кількість  $\delta$ -фериту відрізняється по висоті напавлення: 1 область до 7%, 2 і 3 – до 1,5–2%.

Твердість шару, який зберіг елементи дендритної структури, трохи вище, ніж решти напавлення і становить HV1 3220–3090 МПа (1-а область). Твердість більш світлотравимої ділянки становить HV1 3220–2970 МПа (2-а область). Твердість ділянки з більш темнотравимою структурою становить HV1 2500–2850 МПа (3-я область).

У місці перекриття «доріжок» ділянка литої мілкокомірної структури невеликий (рис. 6). Основна частина напавлення в місці перекриття має структуру витягнутих кристалітів різного розміру з різною орієнтацією (рис. 7).

Твердість металу напавлення при перекритті «доріжок» змінюється по висоті від HV1 2940–3090 МПа в нижній частині (ділянка з мілкокомірчастою структурою, що зберегла фрагменти дендритів) до HV1 2740–2850 МПа у верхній частині (структура різноорієнтованих кристалітів). У місцях перетину шарів різних «доріжок» твердість становить HV1 2850–2930 МПа.

Уздовж лінії сплавлення спостерігається світла смужка (перехідна зона), структура якої складається з великих виділень аустеніту і фериту (рис. 8). Ширина смужки більше з зовнішньої сторони доріжки і в нижній її частині становить приблизно 60–120 мкм і набагато вужче в області накладення «доріжок» 30–50 мкм (рис. 6). Твердість металу світлої смужки становить HV1 2740–2800 МПа.

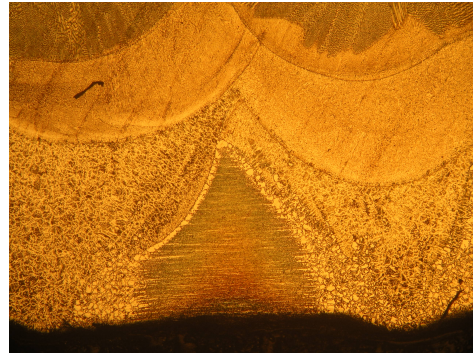


Рис. 6. Структура металу в зразку № 1207.2 в місці накладення «доріжок»  $\times 50$

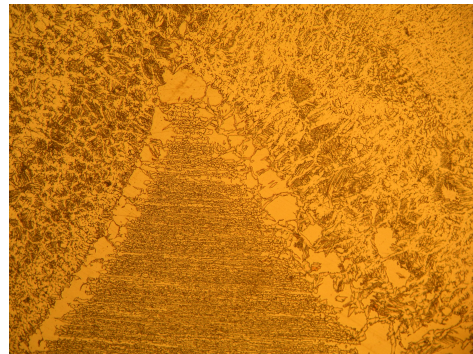


Рис. 7. Структура металу в зразку № 1207.2 у лінії сплавлення  $\times 200$

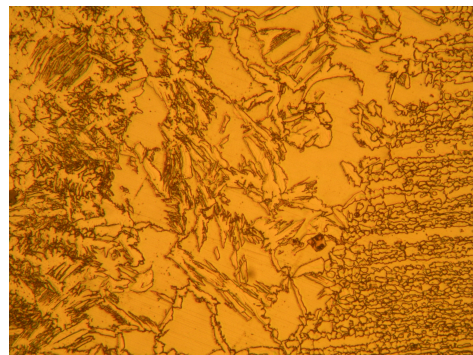


Рис. 7. Структура металу в зразку № 1207.2 у лінії сплавлення  $\times 200$

Зона термічного впливу складається з аустенитної матриці і  $\delta$ -фериту, витягнутого уздовж напрямку прокату. На відстані до 200 мкм від лінії сплавлення кількість аустеніту в структурі ЗТВ збільшено в порівнянні з основним металом (рис. 7), як із зовнішнього боку, так і в області між двома «доріжками». Твердість металу ЗТВ HV1 3050–3090 МПа.

У металі напавлень на лінії сплавлення і в ЗТВ дослідженого зразка № 1207.2 дефектів не виявлено.

В результаті дослідження зразка № 1207.2, можна сказати наступне. Структура напавлення

складається з 2 типів: мілкокомірчаста з фрагментами дендритної структури в корені наплавлення і кристалітна з різним орієнтуванням кристалітів. Різниця в структурі пов'язана з різною швидкістю охолодження по висоті наплавлень. Другий тип структури складається з ділянок з різним травленням, що може бути результатом зміни хімічного складу по висоті наплавлень. Мікротвердість в корені наплавлення вище, ніж в ділянках з кристалітною структурою. У білій смужці, що йде уздовж лінії сплаву, твердість нижче, ніж в наплавленні і ЗТВ.

**Висновки.** Встановлено, що при використанні концентрованого джерела нагрівання, що рухається

та робить додаткові коливання щодо напрямку свого руху, можливо здійснювати такий вплив теплового потоку на поверхню заготовлі, що дозволяє рівномірно неї нагрівати по глибині до температури плавлення в межах деякої області, розміри якої перевищують розміри джерела нагрівання.

При збільшенні амплітуди осциляцій джерела нагріву вище деякого значення або збільшенні кількості проходів наплавлення (треків), відбувається симетрична локалізація теплового потоку у двох граничних точках і нагрівання поверхні заготовлі в цільовій області стає нерівномірним. Це призводить до зміни геометрії та структури одержаних треків наплавлення.

### Список літератури:

1. Хаскин, В. Ю., Шелягин, В. Д., Бернацкий, А. В. Современное состояние и перспективы развития технологий лазерной и гибридной наплавки (Обзор). Автоматическая сварка. 2015. № 5–6. С. 30–33.
2. Bernatskyi, A., Khaskin, V. The history of the creation of lasers and analysis of the impact of their application in the material processing on the development of certain industries. History of Science and Technology. 2021. Т. 11. № 1. С. 125–149.
3. Шелягин, В. Д., Кривцун, И. В., Борисов, Ю. С., Хаскин, В. Ю., Набок, Т. Н., Сиора, А. В., Бернацкий, А. В., Войнарович, С. Г., Кислица, А. Н. Недей, Т. Н. Лазерно-дуговые и лазерно-плазменные технологии сварки и нанесения покрытий. Автоматическая сварка. № 8. С. 49–54.
4. Shi, R., Khairallah, S. A., Roehling, T. T., Heo, T. W., McKeown, J. T., Matthews, M. J. Microstructural control in metal laser powder bed fusion additive manufacturing using laser beam shaping strategy. Acta Materialia. 2020. Т. 184. С. 284–305.
5. Gusarov, A. V., Grigoriev, S. N., Volosova, M. A., Melnik, Y. A., Laskin, A., Kotoban, D. V., Okunkova, A. A. On productivity of laser additive manufacturing. Journal of materials processing technology. 2018. Т. 261. С. 213–232.
6. Jia, H., Sun, H., Wang, H., Wu, Y., Wang, H. Scanning strategy in selective laser melting (SLM): a review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. Т. 113(9). С. 2413–2435.
7. Haskin, V. Y., Bernatsky, A. V., Siora, O. V., Nikulin, O. T. Study of influence of conditions of process of laser superficial processing of the loaded steel articles on structure and properties of obtained layers. Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. 2011. Т. 33. С. 561–567.
8. Бернацкий, А. В., Соколовський, М. В., Сиора, О. В., Лукашенко, В. А., Шамсутдінова, Н. О., Данилейко, О. О., Бондарева, В. І. Лазерне наплавлення з використанням ручного інструменту в напів-автоматичному режимі роботи. Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. 2022. № 2. С. 19–25.
9. Bernatsky, A. V. Laser surface alloying of steel items. The Paton Welding Journal. 2013. № 12. С. 2–8.
10. Кравченко, Ю. К., Макортецький, В. М., Бернацкий, А. В. Розробка сканатора лазерного випромінювання. Матеріали V всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології», (Київ, 27–29 травня 2009 р.): тези доповіді. ІЕЗ ім. Є. О. Патона. 2009. С. 96.

### **Bernatskyi A.V., Siora O.V., Sokolovskyi M.V., Lukashenko V.A., Danyleiko O.O., Nabok T.M., Bondarieva V.I., Shamsutdinova N.O. SPECIFICS OF THE LASER CLADDING PROCESS USING A LASER SCANNING DEVICE**

*The defects of laser treatment with a round spot include the uneven exposure time in the center and on the periphery of the beam, which leads to the uneven physical and mechanical properties across the width of the treatment zone. In order to equalize the time of the effective laser emission and adjust the laser power density on the surface of the working part, it is necessary to use technological methods, that use laser radiation via a specialized installation – laser scanning devices. The radiation resistance of modern mirrors allows for reflection the radiation of high-power solid-state, fiber and diode lasers using optical elements without*



*forced water cooling. Therefore, the problems of development of technological equipment for scanning laser radiation, as well as research of their application to expand the technological capabilities of various laser processing processes (welding, surfacing, alloying, etc.) are becoming urgent. During the course of the study, a laser scanning device was created in the form of an optico-mechanical device consisting of a deflective mirror as well as a mechanism for oscillating the mirror. Laser radiation is then passed through the focusing lens to the scanning mirror, located (the one that radiated) at a 45° angle to the laser radiation axis. Due to the mirror oscillation, laser radiation was deflected by a set distance in a plane, perpendicular to the direction of surfacing. Due to the use of scanning modes of laser radiation, more uniform heating of the base of the material was ensured with an increase in the productivity of the surfacing process. During the course of the study, it was established that usage of a moving concentrated heating source that provides additional heating in the direction of its movement makes it possible to ensure a uniform heat flow on the surface of the workpiece that allows for creation of an in-depth area with a melting temperature, the dimensions of which exceed the dimensions of the heating source. During this, an increase of the heating source oscillation amplitude to a greater value (or a greater number of surfacing tracks) symmetrically localizes the heat flow at two extreme points, leading to an uneven distribution of heating on the workpiece surface target area.*

**Key words:** *laser cladding, oscillations, laser scanning device, structure, microhardness, processing features.*