

УДК 621.9.048.7:621.9.048.6

Лесик Д.А., Джемелінський В.В. к.т.н., проф.  
НТУУ «Київський політехнічний інститут» м. Київ, Україна

## ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ МІКРОРЕЛЬЄФУ ТА МІКРОТВЕРДОСТІ ТЕРМІЧНО ЗМІЦНЕНИХ ЗОН СКАНУВАЛЬНИМ ЛАЗЕРНИМ ПРОМЕНЕМ

Lesyk D., Dzhemelinskiy V.  
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine ( [lesyk\\_d@ukr.net](mailto:lesyk_d@ukr.net))

### FEATURES OF FORMATION MICRORELIEF AND MICROHARDNESS THERMALLY HARDENED ZONES BY SCANNING LASER BEAM

*Проведені теоретичні та експериментальні дослідження впливу сканованого лазерного випромінювання на зміну мікрорельєфу та мікротвердості, а також на ширину та глибину зони термічного впливу перекритих доріжок в поперечному перерізі поверхневого шару. Встановлено, що в результаті повторної дії сканованого лазерного випромінювання мікротвердість, ширина та глибина зміцненої зони зразків із сталі 45 змінюються в залежності від коефіцієнту перекриття. Проте незалежно від коефіцієнту перекриття присутня відпущена зона із зниженою мікротвердістю майже в два рази. Визначена оптимальна величина коефіцієнту перекриття для отримання рівномірних значень ширини, глибини зміцненої зони та мікрорельєфу поверхневого шару. Запропоновано метод отримання рівномірного розподілу мікротвердості у відпущеній зоні повторним лазерним низькотемпературним відпуском.*

*Ключові слова:* поверхневий шар; лазерна термообробка; сканування; зміцнення; зона перекриття, відпуск; мікротвердість, мікрорельєф.

#### Вступ

Для підвищення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей виробів використовуються різні методи поверхневого зміцнення. Одним із перспективних методів обробки, в тому числі великогабаритних деталей, які працюють в умовах циклічних та динамічних навантажень є методи поверхневого зміцнення з використанням висококонцентрованих джерел енергії.

Застосування лазерного променя для поверхневого термічного зміцнення сталей, має переваги порівняно з традиційними джерелами енергії, зокрема дозволяє нагрівати певні зони всього об'єму з великими швидкостями охолодження і малим терміном дії [1-4].

Зміцнення безперервними та імпульсними лазерами проводять у розбіжному пучку, які забезпечують високу якість зміцнення. Розміри плями підбирають зміною розфокусування. Підвищити рівномірність щільності потужності або отримати заданий її розподіл та при цьому збільшити геометричні розміри зони термічного впливу, а також збільшити відносну ширину зміцнених зон і зменшити долю зон відпуску на поверхні можна скануванням лазерного променя [3]. Відомо, що в результаті перекриття доріжок утворюється нерівномірна структура з неоднорідною та низькою твердістю, а також малою глибиною зміцнення [5], а із збільшенням ширини перекриття доріжок зростає мікротвердість легованих інструментальних сталей [6]. Застосування лазерної термообробки з оплавленням поверхні зони перекриття внаслідок підвищеної швидкості кристалізації дозволяє отримати більш глибокі та твердіші зони зміцнення [7].

#### Мета

Визначити особливості формування мікрорельєфу та мікротвердості термічно зміцнених зон, а також ширини та глибини зони термічного впливу перекритих доріжок в поперечному перерізі поверхневого шару сталі 45.

#### Дослідження

*Матеріал та методика проведення експерименту.* Матеріалом для проведення експериментальних досліджень обрано зразки розмірами 60x20x200 мм із сталі 45, яка застосовується для виготовлення різних деталей, що вимагають підвищеної твердості, міцності, зносостійкості та які працюють при незначних ударних навантаженнях.

Для проведення експериментальних досліджень лазерної термічної обробки (ЛТО) використали спеціальну лазерну технологічну установку з числовим програмним керуванням (ЧПК) Kondia Aktinos B500 загальною робочою площею 500x300 мм. В спеціальній установці розміщували 2D сканатор Scanlab Hirtyscan25 із загальною областю сканування у фокальній площині 120x120 мм. Лазерне випромінювання

транспортували оптичним волокном діаметром до сканувальної головки від волоконного лазера Rofin Sinar FLO10 з максимальною вихідною потужністю 1 кВт та довжиною хвилі випромінювання  $\lambda = 1.07 \text{ мкм} \pm 10 \text{ нм}$  (рис. 1) [8]. Використання даної лазерної технологічної установки дозволило здійснювати синхронізацію лазера з сканатором, контролюючи швидкість  $V_{ск}$  та ширину  $b$  сканування променя в зоні опромінювання за допомогою спеціальної електронної плати (RTC4), персонального комп'ютера та спеціальної прикладної програми.

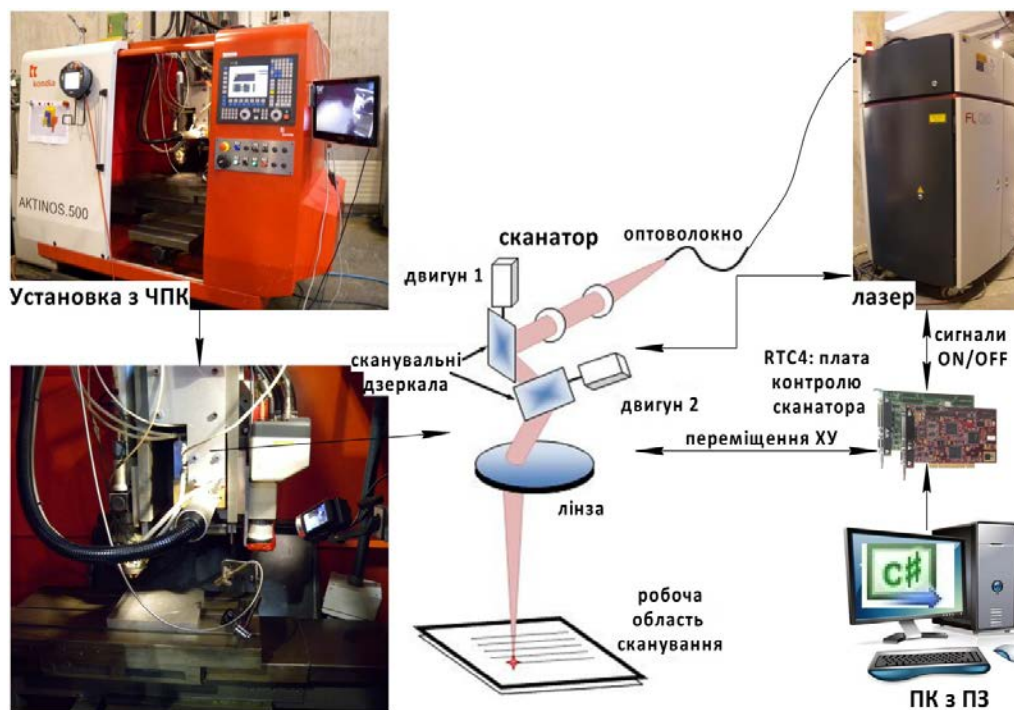


Рис. 1. Схема лазерної технологічної установки: ПК – персональний комп'ютер, ПЗ – програмне забезпечення

Для розширення технологічних можливостей процесу зміцнення великогабаритних деталей використали нову лазерну 2D оптичну систему високочастотного сканування променя, яка складається з двох обертових дзеркал, об'єктива (системи фокусувальних лінз) для фокусування лазерного променя в плоскій фокальній області. Дані оптичні сканувальні системи (сканатори) дозволяють розширити робочу площу на оброблюваній поверхні в двох осьових напрямках ( $x, y$ ) за допомогою високочастотних переміщень лазерного променя.

Експериментальні дослідження лазерного термозміцнення здійснювали за стратегією постійної потужності (потужність лазерного променя  $P = 690 \text{ Вт}$ , діаметр лазерного променя  $d = 1 \text{ мм}$ , швидкість переміщення зразка  $S = 90 \text{ мм/хв}$ ). Лазерний промінь сканували в ширину 10 мм з швидкістю сканування 1000 мм/с. Коефіцієнт перекриття дорівнював 10, 25 та 40 % перекриття першої доріжки. Необхідну температуру поверхневого лазерного зміцнення перед проведенням експериментів визначали за діаграмою відношення густини потужності до часу взаємодії лазерного променя з матеріалом, діаграмою стану Fe-C та методикою визначення оптимальних параметрів поверхневого зміцнення без оплавлення [9]. Вимірювання температури в зоні дії лазерного променя здійснювали двоколірним пірометром Impras Igar 12LO, яка дорівнювала  $1180 \text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 2 б).

Дослідження зони термічного впливу в поперечному перерізі та мікрорельєфу поверхні проводили на конфокальному мікроскопі Leica DCM3D, а мікротвердість вимірювали тестером FM800 при навантаженні індентора Віккерса 300 г на глибині 100 мкм від поверхні.

Для визначення оптимальних параметрів зони перекриття запропонована розрахункова схема (рис. 2 а) та розроблена керуюча програма для автоматизації процесу лазерного термозміцнення плоскої поверхні зразків.

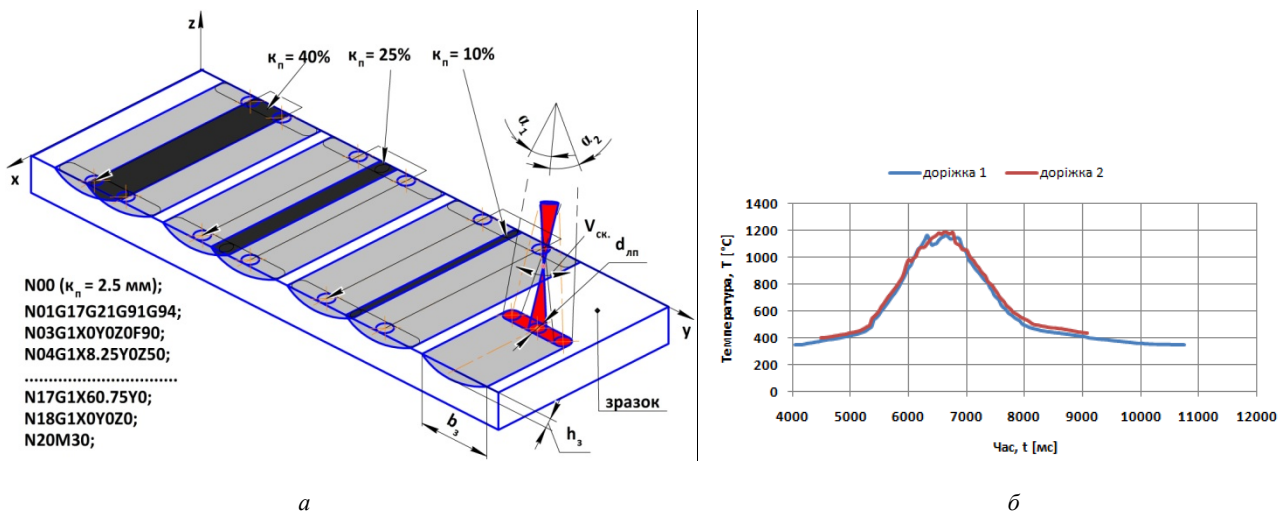
*Результати та їх обговорення.* Для прогнозування зміни твердості та глибини зміцнення в 2-х напрямках термічно зміцнених зон лазерним променем використана двовірсна кінетична модель зміцнення та відпуску [10-12], де розрахункова область розділена на елементи, які пов'язані з кожною фазою, а моделювання мікроструктури здійснюється за допомогою мікрофотографій. Мікротвердість складових області розраховується на основі масових часток мартенситу ( $f$ ) і фериту ( $1-f$ ):

$$H = fH_m + (1 - f)H_f, \quad (1)$$

$H_f$  – мікротвердість фериту, який вважається 1.50 ГПа, в той час як мікротвердість мартенситу розраховується за формулою:

$$H_m = 1667C - 926C^2 / f + 150, \tag{2}$$

де  $C$  – вміст вуглецю в сталі.



**Рис. 2.** Розрахункова схема процесу лазерного термозміцнення та керуюча програма для обробки плоскої поверхні з різними коефіцієнтами перекриття (а), а також зміна температури в реальному часі на оброблюваній поверхні (б) де  $\alpha_1, \alpha_2$  – кути сканування,  $V_{ск}$  – швидкість сканування,  $d_{лн}$  – діаметр лазерного променя,  $h_3$  – глибина зміцнення,  $b_3$  – ширина зміцнення

Частка мартенситу, яка перетворилася під час відпуску моделюється рівнянням [12]:

$$f = 1 - \exp(-\beta^n), \tag{3}$$

де,  $\beta = kt = k_0 t \exp(-Q / RT)$ , а  $Q$  – енергія активації, а  $n$  і  $k_0$  емпірично отримані константи. Рівняння для визначення  $\beta$  застосовується лише для ізотермічних умов, які не можуть бути використані при лазерному відпуску. Для процесу лазерного зміцнення значення величини  $\beta$  повинно бути визначено відповідно до зміни температури в часі:

$$\frac{d\beta}{dt} = k + t \frac{dk}{dT} \frac{dT}{dt} = k + \frac{Q}{RT^2} \beta \frac{dT}{dt}, \tag{4}$$

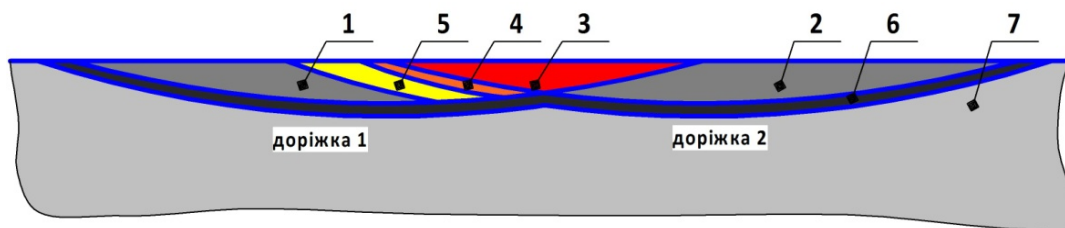
Рівняння (3) та (4) можуть бути застосовані для прогнозування твердості відпуску у перекритих доріжках при лазерному зміцненні, а твердості розраховується виходячи із середньозважених різних фазових часток, які можуть бути у відпущеній зоні (карбід ( $\epsilon$ ), ферит ( $\alpha$ ), цементит ( $c$ ) і мартенсит ( $m$ )). А наявність залишкового аустеніту не враховується через його малу масову частку, величина якої менше 0.1.

Мікротвердість матеріалу в кожній точці відпущеної зони розраховується згідно кінетичної моделі:

$$H = H_\epsilon f_\epsilon + H_\alpha f_\alpha + H_c f_c + H_m f_m \tag{5}$$

де, фазові частки карбідів  $f_\epsilon$ , фериту  $f_\alpha$ , цементиту  $f_c$  та мартенситу  $f_m$ , які розраховуються згідно методик [10, 12].

Відомо, що в результаті повторної дії лазерного випромінювання на попередньо загартовану поверхню утворюються різні зони з різними мікроструктурами (рис. 3), зокрема зміцнена зона в результаті першого проходу (1), зміцнена зона в результаті другого проходу (2), зміцнена (3) та частково зміцнена (4) зони протягом другого лазерного проходу, відпущена зона в результаті другого лазерного проходу (5), перехідна зона (6) та мікроструктура оброблюваного матеріалу (7).



**Рис. 3.** Мікроструктурні зміни термічно зміцнених зон з перекриттям

Геометричні розміри ширини та глибини зони термічного зміцнення, а також глибини між перекритими доріжками залежать від коефіцієнту перекриття (рис. 4). Мікротвердість зміцненої зони в результаті першого та другого проходу дорівнює в середньому 8 ГПа, а глибина зміцнення лазерних доріжок – 500...600 мкм. У всіх випадках біля зони перекриття в першому лазерному проході присутня відпущена мартенситна зона (рис. 4 а, в, д) в результаті термічного ефекту другого лазерного проходу, де мікротвердість зменшується вдвічі до 4 ГПа. Для поліпшення мікротвердості у відпущеній мартенситній зоні доцільно застосовувати повторний лазерний низькотемпературний відпуск після лазерного зміцнення, який дозволяє створити рівномірний розподіл твердості в поперечному перерізі з одночасним незначним її зниженням [13]. Значення поверхневої мікротвердості в зоні перекриття із підвищенням коефіцієнту перекриття зростає, а по глибині зменшується (рис. 4, б, г, е).

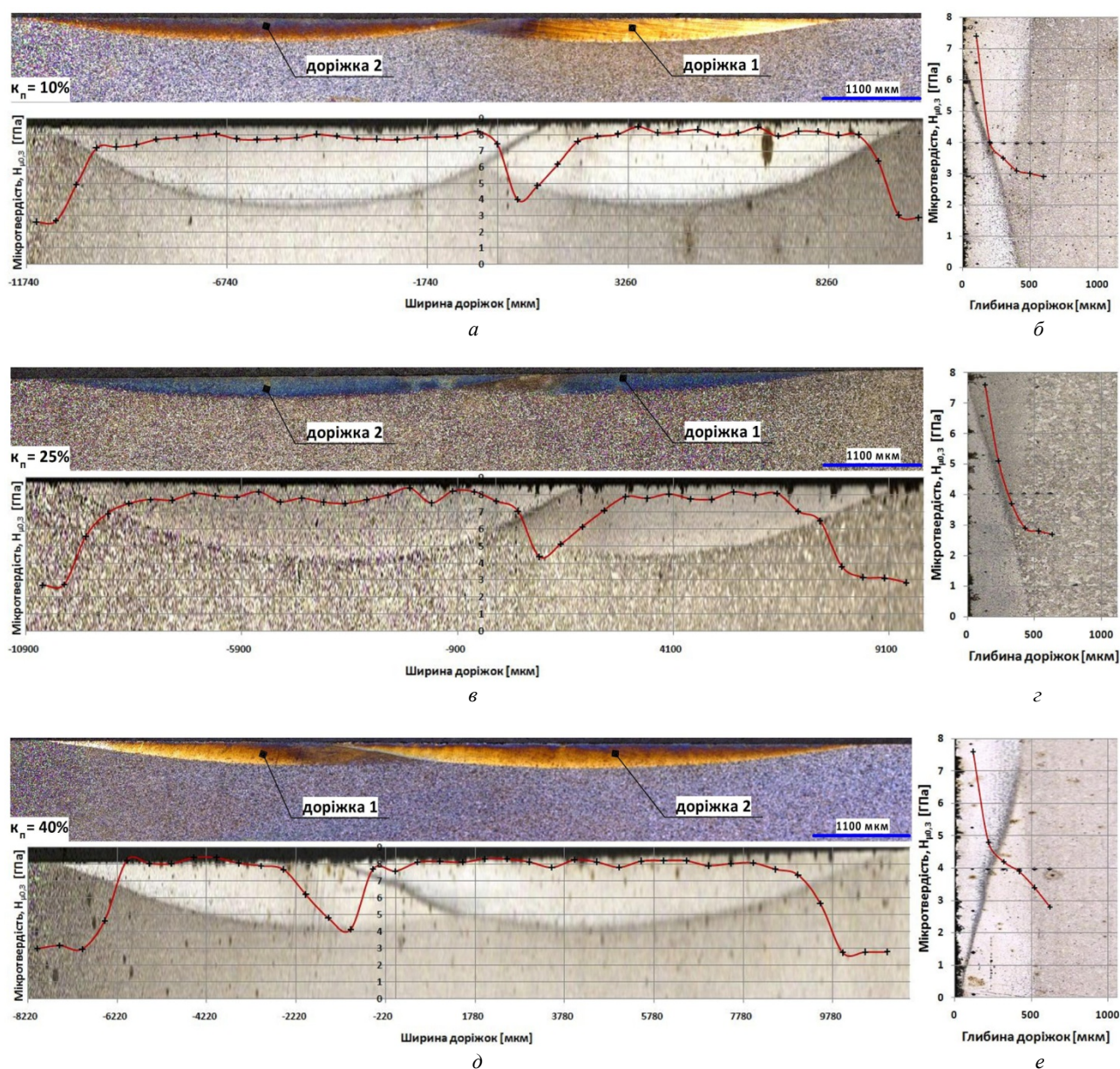


Рис. 4. Зона термічного впливу, розподіл мікротвердості вздовж (а, б, в) та по глибині (г, д, е) зон термічно зміцнених доріжок сталі 45 з коефіцієнтом перекриття доріжок 10% (а, б), 25% (в, г) та 40% (д, е)

Для отримання рівномірного розподілу мікротвердості в поперечному перерізі, як по ширині (рис. 5 а), так і по глибині (рис. 5 б) термічно зміцнених перекритих доріжок, доцільно використати повторну дію сканувальним лазерним променем з коефіцієнтом перекриття 25%.

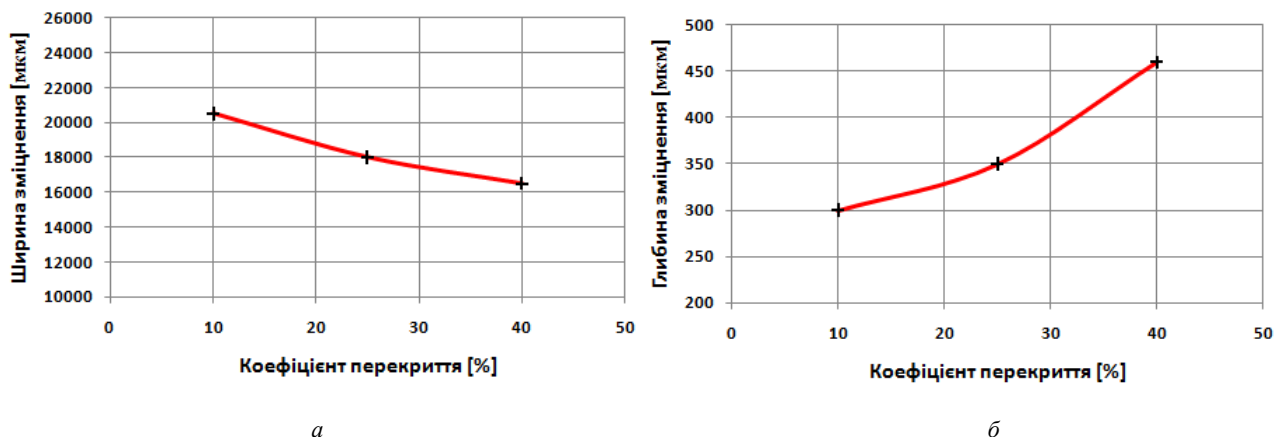


Рис. 5. Зміна ширини (а) та глибини (б) термічно зміцнених доріжок від коефіцієнту перекриття

Лазерне поверхнєве зміцнення з використанням сканувального лазерного променя сприяє також незначній зміні мікрорельєфу термічно зміцнених доріжок з перекриттям в залежності від стану вихідних параметрів оброблюваної поверхні (рис. 6).

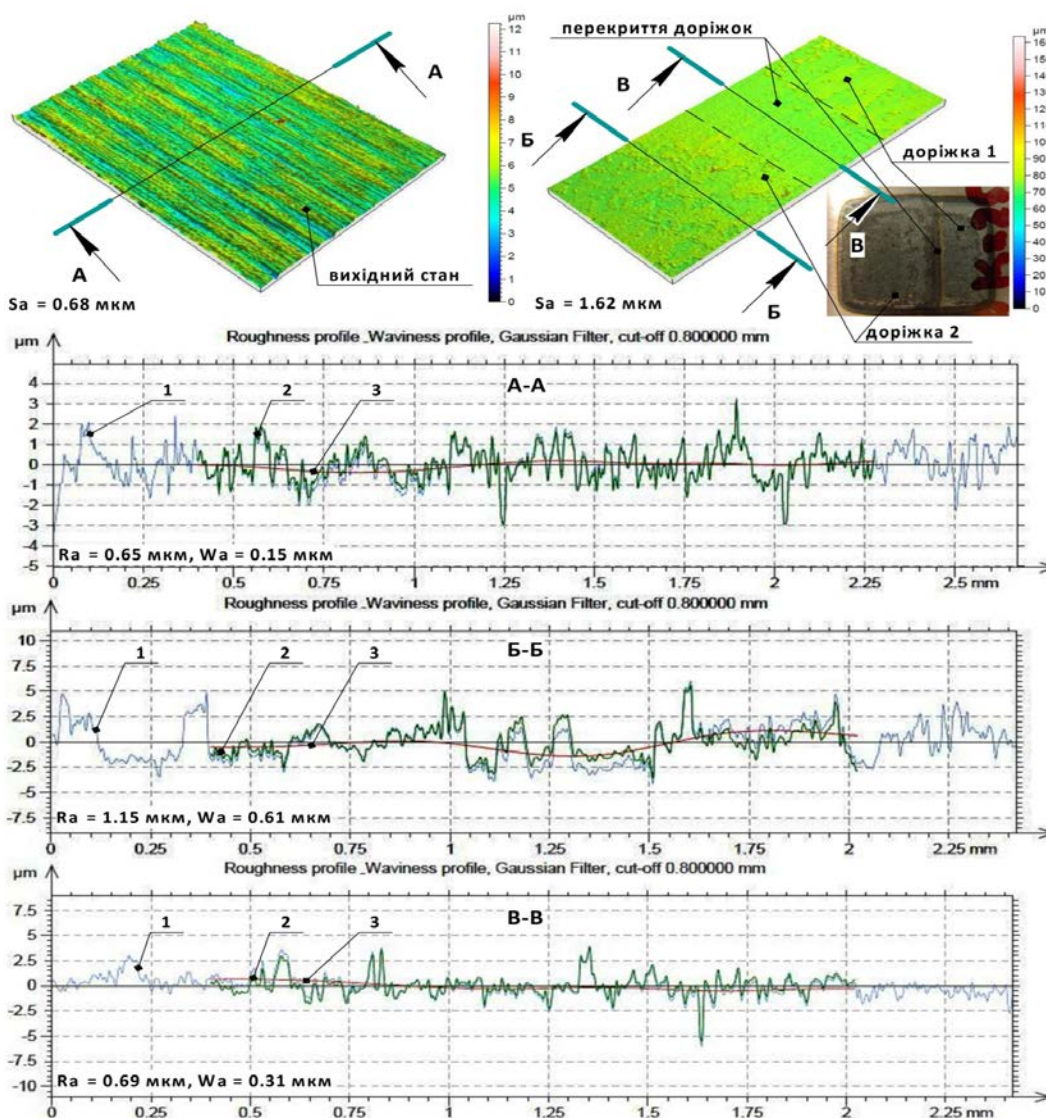


Рис. 6. Мікрорельєф поверхні термічно зміцнених доріжок з перекриттям (25%) сталі 45: Переріз А-А – вихідний стан, переріз Б-Б – зона ЛІТО (доріжка 2), переріз В-В – зона перекриття доріжок, 1 – профіль поверхні, 2 – профіль шорсткості, 3 – профіль хвилястості

Зокрема, параметри шорсткості  $Ra$ , хвилястості  $Wa$  та висоти мікронерівностей  $Sa$  (рис. 6, Б-Б) підвищуються у порівнянні з вихідною шліфованою поверхнею (рис. 6 А-А). Це можна пояснити тим, що технологічна дія лазерного променя приводить до процесів окислення поверхні та зміни фізико-хімічних параметрів. Параметри шорсткості  $Ra$  та хвилястості  $Wa$  в зоні перекриття лазерних доріжок (рис. 6 В-В) зменшилися майже в два рази в порівнянні із зміцненими не перекритими зонами.

### Висновки

1. Визначені термічно зміцнені зони та значення величин мікротвердості, ширини та глибини зміцнення, а також мікрорельєфу в залежності від коефіцієнта перекриття при повторній дії сканувального лазерного променя на зразках із сталі 45.

2. Встановлена оптимальна величина коефіцієнту перекриття (25 %) для отримання рівномірних значень ширини, глибини зміцненої зони та мікрорельєфу поверхневого шару.

3. Запропоновано метод повторного лазерного низькотемпературного відпуску для отримання рівномірного розподілу мікротвердості у відпущеній зоні.

4. Розроблено керуючу програму для автоматизації процесу поверхневого термічного зміцнення великогабаритно деталей сканувальним лазерним променем.

Автори статті вдячні проф. Ламікізу А., аспір. Мартінез С. (відділ машинобудування, Університет Країни Басків, м. Більбао, Іспанія) за надану можливість в проведенні експериментальних досліджень.

**Анотація.** Проведенные теоретические и экспериментальные исследования влияния сканируемого лазерного излучения на изменение микрорельефа и микротвердости, а также на ширину и глубину зоны термического влияния перекрытых дорожек в поперечном сечении поверхностного слоя. Установлено, что в результате повторного воздействия сканируемого лазерного излучения микротвердость, ширина и глубина упроченной зоны образцов из стали 45 меняются в зависимости от коэффициента перекрытия. Однако независимо от коэффициента перекрытия присутствует отпущенная зона с пониженной микротвердостью почти в два раза. Определена оптимальная величина коэффициента перекрытия для получения равномерных значений ширины, глубины упроченной зоны и микрорельефа поверхностного слоя. Предложен метод получения равномерного распределения микротвердости в отпущенной зоне повторным лазерным низкотемпературным отпуском.

**Ключевые слова:** поверхностный слой; лазерная термообработка; сканирования; упрочнение; зона перекрытия, отпуск; микротвердость, микрорельеф.

**Abstract.** Features of formation of microrelief and microhardness thermally hardened zones as well as width and depth of the heat affected zone overlapped tracks in the cross section of the surface layer of AISI 1045 steel are presented.

Based on theoretical and experimental studies, calculation scheme of laser heat hardening with overlapping tracks and procedure of experimental studies using of fiber laser with 2D scanner are proposed. It is established that as a result of repeated effect of scanning laser radiation microhardness, width and depth of a hardened zone of AISI 1045 steel specimens vary depending on the overlapping ratio. However, regardless of the overlapping ratio is present softening zone with reduced microhardness almost double. The values of surface microhardness in the overlapping zone with increasing overlapping ratio increases as well as decreases in the depth. The optimum values of the overlapping ratio (25%) for obtaining of uniform widths, depths hardened zone and microrelief of the surface layer are determined. A method of obtaining a uniform distribution of microhardness in the softening zone by repeated laser low temperature tempering is suggested. Parameters of roughness  $Ra$  and waviness  $Wa$  in overlapping zone of laser tracks decreased almost double in comparison with not hardening overlapping zones. Program of control for automation of the process of surface thermal hardening of large dimensional parts by scanning laser beam are developed.

The procedure and results of experimental studies of determination the optimal parameters of scanning laser beam can be used in the industrial conditions for surface thermal hardening of large dimensional parts are presented.

**Keywords:** surface layer; laser heat treatment; scanning; hardening; zone overlap, tempering, microhardness, microrelief.

### Бібліографічний список використаної літератури

1. Головка Л. Ф. Лазерні технології та комп'ютерне моделювання / Під ред. Л. Ф. Головка, С. О. Лук'яненко. – К. : Вістка, 2009. – 296 с.
2. Коваленко В. С. Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера / В. С. Коваленко, Л. Ф. Головка, В. С. Черненко. - К. : Техника, 1990. – 192 с.
3. Григорьянц А. Г., Сафонов А. Н. Методы поверхностной лазерной обработки / Под ред. А. Г. Григорьянц, А. Н. Сафонов – М. : Высшая школа, 1987. – 191 с.
4. Reinhart Poprawe. Tailored Light 2. Laser Application Technology. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2011. pp. 173-241.
5. Ritesh L., Yang J., Jana S., Tam S. C., The effects of overlapping runs in the laser transformation hardening of tool-steel specimens, Journal of Materials Processing Technology. 23 (1990) pp. 133-147.
6. Babic M., Balic J., Milfelner M., Belic I., Kokol P., Zorman M., Panjan P., Robot laser hardening and the problem of overlapping laser beam, Advances in Production Engineering and Management. 8 (2013) pp. 25–32.
7. Mordike B. L., Surface treatment with high power lasers, Laser in Engineering. 4 (1995) pp. 187-200.

8. *Silvia M., Lamikiz A., Taberero I, Ukar E., Laser hardening process with 2D scanning optics, Physics Procedia. 39 (2012) pp. 309-317.*
9. *Джемелінський В. В. Визначення оптимальних параметрів лазерно-ультразвукового зміцнення та оздоблювання поверхонь виробів / В. В. Джемелінський, Д. А. Лесик // Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. – 2013. - № 2. – С. 15-18.*
10. *Ritesh S. Lakhkar, Yung C. Shin, Matthew John M. Krane, Predictive modeling of multi-track laser hardening of AISI 4140 steel, Physics Procedia 480 (2008) pp. 209–217.*
11. *Skvarenina S., Shin Y. C., Predictive modeling and experimental results for laser hardening of AISI 1536 steel with complex geometric features by a high power diode laser, Surface and Coatings Technology. 201 (2006) pp. 2256–2269.*
12. *Zhang Z., Delagnes D., Bernhart G., Microstructure evolution of hot-work tool steels during tempering and definition of a kinetic law based on hardness measurements, Materials Science and Engineering A. 380 (2004) pp. 222–230.*
13. *Yao C., Xu B., Huang J., Zhang P., Wu Y., Study on the softening in overlapping zone by laser-overlapping scanning surface hardening for carbon and alloyed steel, Optics and Lasers in Engineering. 48 (2010) pp. 20–26.*

## References

1. *Grigor'janc A. G. Metody poverhnostnoj lazernoj obrabotki (Methods of surface laser processing). A. G. Grigor'janc, A. N. Safonov. Moscow: Vysshaja shkola, 1987. 191 p.*
2. *Kovalenko V. S. Uprochnenie i legirovanie detalej mashin luchom lazera (Hardening and alloying of machine parts with a laser beam). V. S. Kovalenko, L. F. Golovko, V. S. Chernenko. Kyiv: Tehnika, 1990. 192 p.*
3. *Golovko L. F. Lazerni tehnologii' ta komp'juterne modeljuvannja (Laser technology and computer modeling). Kyev: Vistka, 2009, 296 p.*
4. *Reinhart Poprawe. Tailored Light 2. Laser Application Technology. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2011. pp. 173-241.*
5. *Ritesh L., Yang J., Jana S., Tam S. C., The effects of overlapping runs in the laser transformation hardening of tool-steel specimens, Journal of Materials Processing Technology. 23 (1990) pp. 133-147.*
6. *Babic M., Balic J., Milfelner M., Belic I., Kokol P., Zorman M., Panjan P., Robot laser hardening and the problem of overlapping laser beam, Advances in Production Engineering and Management. 8 (2013) pp. 25–32.*
7. *Mordike B. L., Surface treatment with high power lasers, Laser in Engineering. 4 (1995) pp. 187-200.*
8. *Silvia M., Lamikiz A., Taberero I, Ukar E., Laser hardening process with 2D scanning optics, Physics Procedia. 39 (2012) pp. 309-317.*
9. *Dzhemelins'kyj V. V. Vyznachennja optymal'nyh parametriv lazerno-ul'trazvukovogo zmicnennja ta ozdobljuvannja poverhon' vyrobiv (Determining the optimal parameters of laser-ultrasonic hardening and finishing of the surface products). V. V. Dzhemelins'kyj, D. A. Lesyk. Visnyk NTUU «KPI». Serija mashynobuduvannja. 2013. No 2. pp. 15-18.*
10. *Ritesh S. Lakhkar, Yung C. Shin, Matthew John M. Krane, Predictive modeling of multi-track laser hardening of AISI 4140 steel, Physics Procedia 480 (2008) pp. 209–217.*
11. *Skvarenina S., Shin Y. C., Predictive modeling and experimental results for laser hardening of AISI 1536 steel with complex geometric features by a high power diode laser, Surface and Coatings Technology. 201 (2006) pp. 2256–2269.*
12. *Zhang Z., Delagnes D., Bernhart G., Microstructure evolution of hot-work tool steels during tempering and definition of a kinetic law based on hardness measurements, Materials Science and Engineering A. 380 (2004) pp. 222–230.*
13. *Yao C., Xu B., Huang J., Zhang P., Wu Y., Study on the softening in overlapping zone by laser-overlapping scanning surface hardening for carbon and alloyed steel, Optics and Lasers in Engineering. 48 (2010) pp. 20–26.*

Подана до редакції 04.15.2015