

10. Трение, изнашивание и смазка [Текст] : справочник / В.В. Алисин, А.Я. Алябьев, А.М. Архаров и др. ; под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. – Т. 1. – М. : Машиностроение, 1978. – 400 с.
11. Трение, изнашивание и смазка [Текст] : справочник / В.В. Алисин, А.Я. Алябьев, А.М. Архаров и др. ; под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. – Т. 1. – М. : Машиностроение, 1979. – 358 с.
12. Дудукаленко, В.В. О пластических свойствах материала, содержащего пластинчатые включения [Текст] / В.В. Дудукаленко, Н.Н. Лысач // Изв. АН СССР. - Сер. МТТ. - №1. – 1980. - С. 103–109.
13. Дудукаленко, В.В., Шаповалов, С.П. [Текст] // Применение композиционных материалов на полимерной и металлической матрицах. - Пермь, 1985. - С. 23-24.
14. Волков, С.Д. Статистическая механика композитных материалов [Текст] : учеб. / С.Д. Волков, В.П. Ставров. – Мн. : Изд-во БГУ, 1978. – 207 с.
15. Дудукаленко, В.В. Оптимальное использование собственной прочности волокон в композитах с пластической матрицей [Текст] / В.В. Дудукаленко. – Сумы : СФ ХПИ, 1990. - С. 1–10.
16. Соколкин, Ю.В. Механика деформирования и разрушения структурно неоднородных тел [Текст] : учеб, пособие / Ю.В. Соколкин, А.А. Ташкинов. – М. : Изд-во «Наука», 1984. - 115 с.
17. Hashin, Z. Analysis of composite materials a survey [Текст] // Trans. ASME: J. Appl. Mech. - Vol. 50. 1983. - №3. - pp. 481-505.
18. Kerner, E.N. The electrical conductivity of composite materials [Текст] // Proc. Phys. Soc. - № 69B. – 1956. - pp. 802-807.
19. Дудукаленко, В.В., В.А. Минаев [Текст] // Изв. АН СССР. - Сер. ПММ. - Т.34. - Вып. 5. – 1970. - С. 942–944.
20. Ивлев, Д.Д. Механика пластических сред [Текст]. Т. 1. Теория идеальной пластичности : учеб, пособие / Д.Д. Ивлев. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 448 с. – ISBN 5-9221-0140-4.
21. Болотин, В.В. Некоторые вопросы механики композитных полимерных материалов [Текст] / В.В. Болотин // Механика полимеров, №1. - 1975. - №1. - С. 126 - 133.
22. Дудукаленко, В.В. О пластичности композиционного материала, содержащего сферические включения [Текст] / В.В. Дудукаленко, В.В. Мешков // Изв. АН СССР. - Сер. МТТ. - №5. – 1983. - С. 109–112.
23. Левин, В.М. [Текст] // Изв. АН СССР. - Сер. МТТ. - №6. – 1976. - С. 137–145.
24. Коттрел, А. Прочность материалов [Текст] / А. Коттрел // Механические свойства новых материалов. – М. : Мир, 1996. - С. 7–20.
25. А.с. 1635523 СССР, МКИ С08J5/16 ; С08L27/18 ; С08K13/00. Антифрикционный материал [Текст] / Г.А. Сиренко, А.Ф. Будник, Г.М. Сорокин, Л.М. Кириченко, В.И. Ящук. (Украина). - № 4607772 ; заявл. 26.09.88; зареестр. в Госреестре изобр. 15.11.90.
26. Сиренко, Г.А. Стратегия создания абразивостойкого композиционного материала, смоделированного сферическими и эллипсоидными частицами [Текст] / Г.А. Сиренко, А.Ф. Будник. // Сб. науч. трудов «Управление триботехническими и прочностными свойствами механических систем. - Киев, 1990. - С. 20–26.
27. А.с. 1467893 СССР, МКИ В32В3/12 ; D04C5/00 ; F16C33/12. Антифрикционный материал [Текст] / Г.А. Сиренко, Г.М. Сорокин, А.Ф. Будник, А.М. Сиренко (Украина). - № 4050632 ; заявл. 07.04.86 ; зареестр. в Госреестре изобр. 01.02.88. – Бюл. № 20.

**Запропоновано комбінований метод фінішної обробки деталей з використанням енергії ультразвукових коливань та лазерного випромінювання як з оплавленням та і без оплавлення поверхні. Визначено зміни рельєфу та мікротвердості поверхневого шару деталі із бронзи, в залежності від імпульсних лазерно-ультразвукових джерел енергії**

**Ключові слова:** поверхневий шар, лазерна обробка без оплавлення поверхні, лазерна обробка з оплавленням поверхні

**Предложен комбинированный метод финишной обработки деталей с использованием энергии ультразвуковых колебаний и лазерного излучения как с оплавлением так и без оплавления поверхности. Определены изменения рельефа и микротвердости поверхностного слоя детали из бронзы, в зависимости от импульсных лазерно-ультразвуковых источников энергии**

**Ключевые слова:** поверхностный слой, лазерная обработка без оплавления поверхности, лазерная обработка с оплавлением поверхности

УДК 621.373.826

## ВПЛИВ ІМПУЛЬСНИХ ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ НА ФОРМУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ДЕТАЛЕЙ

**В. В. Джемелінський**

Кандидат технічних наук, професор\*

E-mail: vitaly.dzhemelinsky@gmail.com

**Д. А. Лесик**

Аспірант\*

E-mail: lesyk\_d@ukr.net

\*Кафедра лазерної техніки та

фізико-технічних технологій

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут»

пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

## 1. Вступ

В сучасному виробництві для підвищення експлуатаційних характеристик деталей знайшли широке використання різні методи поверхневої обробки.

Аналіз вітчизняних та іноземних наукових досліджень показує, що створення та розвиток нових промислових технологій в машино - та приладобудівній, авіаційній, суднобудівній промисловості відбувається в напрямку комплексування відомих технологій в гібридні і комбіновані процеси. В основі даного підходу лежить ідея комплексного використання переваг і усунення недоліків різних методів при одночасному або послідовному проведенні різноманітних технологічних процесів.

## 2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Одним із прогресивних комплексних методів є поверхнева лазерна обробка (ЛО) [1, 2] і ультразвукова оздоблювально-зміцнювальна обробка (УЗОЗО) [3, 4, 5, 6], які змінюють як якісні характеристики поверхневого шару розмірів зміцнених зон, топографії розміщення зон, фазовий склад, структуру, твердість та її глибину, залишкові напруги, шорсткість та експлуатаційні характеристики: зносостійкість, втомлену міцність, корозійну стійкість, теплостійкість, залишкові деформації та інші.

Ультразвукова оздоблювально-зміцнювальна обробка є одним із ефективних методів, який широко застосовується в технологічних процесах обробки металевих виробів імпульсними динамічними джерелами енергії. При акустичному впливі розміри і форма оброблюваного виробу не змінюються, на відміну від відомих широко використовуваних деформаційних технологій. Це дозволяє використовувати УЗОЗО як універсальний технологічний і економічний метод поверхневої обробки металевих виробів.

Існуючі методи локального термічного зміцнення і оздоблювання поверхні металів та їх сплавів при атмосферних умовах різними концентрованими джерелами енергії (газопроменевими, світлопроменевими, електроіскровими, електродуговими, плазовими та іншими) мають певні недоліки, зокрема, значні зони термічного впливу, можливий вихід геометричних розмірів оброблених виробів за допуску, відсутність значного збільшення значення мікротвердості поверхні та інші.

Застосування лазерного променя як висококонцентрованого термічного джерела енергії для зміцнення та оздоблювання поверхні в значній мірі усуває вище перелічені недоліки, але не дозволяє усунути їх повністю. Але в процесі лазерної обробки утворюються значні залишкові термічні напруження розтягу[3].

Використання комбінованих технологій сприяє не тільки поліпшенню якісних характеристик поверхневого шару деталі, а й значного підвищення продуктивності, зниження собівартості виготовленої продукції, а також зниження енергоємності процесів обробки матеріалів [2, 7].

Комбінована лазерно-ультразвукова оздоблювально-зміцнювальна обробка (ЛУЗОЗО) залежить як від енергії імпульсного лазерного впливу  $E_{\text{лв}}$  та енергії ультразвукового впливу  $E_{\text{узв}}$ .

Енергія  $E_{\text{узв}}$  згідно [7-9] визначається:

$$E_{\text{узв}} = 2\pi^2 f^2 A^2 m_0, \quad (1)$$

де  $f$  та  $A$  є частота і амплітуда ультразвукових коливань,  $m_0$  - маса інструменту (бійка);

$A$  тривалість впливу  $\tau$ , діаметр плями  $d$  і пікова щільність потужності  $I_0$  визначаються:

$$I_0 = E / (S\tau), \quad (2)$$

де  $S$  - площа плями,  $S = \pi d^2 / 4$ ;  $E$  - енергія імпульсу;  $\tau$  - тривалість імпульсу.

Ударні навантаження лазерного та ультразвукового впливів  $P_{\text{лв}}, P_{\text{узв}}$  визначаються [10-12]:

$$P = (AZI_0)^{1/2}, \quad (3)$$

де  $I_0$  - пікова густина потужності,  $Z$  - ударний опір оброблюваного матеріалу,  $A$  - коефіцієнт ефективності для тієї частини енергії, яка сприяє генерації ударної хвилі. Приведена залежність характеризує ефективність дії ударної хвилі та їх внесок у збільшення ударного навантаження та зміну супутніх процесів. При ЛО коефіцієнти ефективності тієї частини, яка сприяє генерації ударної хвилі визначається [11-13]:

$$A = \frac{\alpha}{(2\alpha + 3)}, \quad (4)$$

де  $\alpha \approx 0.1$  є ефективність взаємодії між плазмою і матеріалом зразків, а  $I_{\text{лв}}^{\Sigma} = I_{\text{лв}} f_{\text{ліп}}$  сприяє підвищенню тиску.  $(1-\alpha)E$  використовується для генерації плазми [10-13]. При УЗОЗО частина кінетичної енергії пов'язана з виведенням інструменту за рахунок пружного відскоку, а коефіцієнт ефективності має вид:

$$A = \frac{m_3(1-\eta^2)}{[2(m_3 - m_0)]}, \quad (5)$$

де  $\eta$  - коефіцієнт відновлення,  $m_3$  - маса зразка,  $m_0$  - маса інструменту (бійка).

Частота повторень (частота лазерних імпульсів  $f_{\text{лв}}$  або ультразвукового впливу  $f_{\text{узв}}$ ) та загальна потужність лазерного впливу визначається:

$$I_{\text{лв}}^{\Sigma} = I_{\text{лв}} f_{\text{ліп}}, \quad (6)$$

де  $n = 4$ , кількість лазерних імпульсів на тому ж місці.

Загальна механічна енергія накопичена під час ультразвукового впливу визначається:

$$I_{\text{узв}}^{\Sigma} = I_{\text{узв}} f_{\text{узв}} t, \quad (7)$$

де  $t$  - час обробки.

Ефективність деформації  $e$  оцінюється по зміні розмірів зразка.

## 3. Мета і задачі дослідження

Метою статті є визначення впливу енергії імпульсного лазерного випромінювання на зміну мікротвердості і глибини її розповсюдження та

рельєфу поверхневого шару металевих виробів після попередньої ультразвукової обробки.

#### 4. Методика експерименту

Матеріалом для проведення експериментальних досліджень було використано бронзу БрАЖ9-4. Циліндричні зразки, діаметром 18 мм і висотою 10 мм після токарної роботи, були відпалені. Хімічний склад сплаву у ваг. %: 2...4 Fe, до 0.1 Si, до 0.5 Mn, до 0.01 P, 8...10 Al, 84...90 Cu, до 0.01 Pb, до 1 Zn, до 0.1 Sn.

УЗОЗО проводилася при кімнатній температурі з використанням ультразвукового генератора УЗГ250, який живить п'єзокерамічний випромінювач, що працює на частоті  $f = 21$  кГц. Випромінювач установлювався в штативі перпендикулярно до оброблюваної поверхні (рис. 1 а).

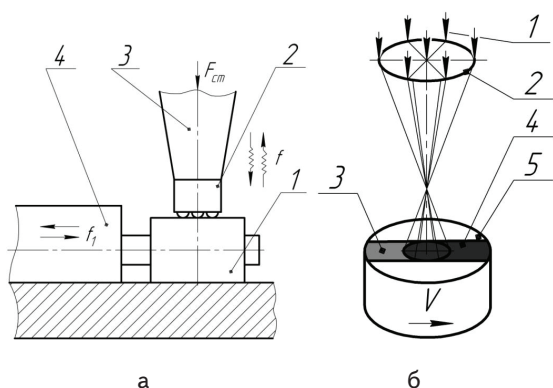


Рис. 1. Схеми комбінованої УЗОЗО (а): 1-оправа; 2-багатобійковий наконечник; 3-концентратор; 4-пристрій для низькочастотних коливань зразка; та ЛО (б): 1-лазерний промінь, 2-фокусуюча лінза, 3-зона ультразвукового впливу, 4-зона лазерного впливу, 5-експериментальний зразок

Ультразвукові коливання, які створювались п'єзокерамічним випромінювачем, підсилювались хвилеводом-концентратором 3. На ньому було закріплено спеціальну обойму (наконечник) 2 з бійками (інструментами) циліндричної форми діаметром 5 мм із сталі ШХ15. Під дією ультразвукових коливань за рахунок вимушених вібрацій, що відбувалися в проміжку між торцем концентратора та поверхнею зразка з частотою близько 1...2 кГц, він здійснював ударне навантаження поверхні зразка 1. За рахунок цього поверхня зразка піддавалася інтенсивній високочастотній динамічній деформації. Величина статичної сили навантаження ультразвукового інструменту дорівнювала 30 Н, тривалість обробки  $t = 60$  с, а амплітуда коливань концентратора  $A = 20$  мкм. Зразок здійснював також низькочастотні коливання з частотою  $f_1 = 5$  Гц за допомогою пристрою 4. Перед обробкою він змащувався рідиною з поверхнево-активними речовинами.

Для поверхневої лазерної обробки використовувався імпульсний твердотільний YAG: Nd-лазер марки «Квант 15» (рис. 1 б) з довжиною хвилі випромінювання  $\lambda = 1.06$  мкм. Лазерне випромінювання фокусувалося в пляму діаметром  $d = 2$  мм. Енергія в імпульсі  $E$  змінювалась від 3 до 11 Дж, що при тривалості імпульсу

$\tau = 4$  мс, що забезпечувало реалізацію режимів обробки як без оплавлення так із оплавленням поверхні. Швидкість переміщення лазерного променя  $V = 1$  мм/с. Лазерна обробка здійснювалася одиночними імпульсами з коефіцієнтом перекриття окремих пятен 0.5. Зразки після ультразвукової обробки змащувалися спиртовим розчином пікринової кислоти.

Для вимірювання мікро- та нанорельєфу поверхневого шару використовувався атомно-силовий мікроскоп «NT206V» з комп'ютерною системою керування. Мікротвердість вимірювалась на приладі ПМТ-3 при навантаженні 100 г.

#### 5. Експериментальні результати і їх обговорення

Результати експериментальних досліджень зміни величини мікротвердості та глибини її розповсюдження в поверхневому шару підтвердили, що комбінована лазерно-ультразвукового оздоблювально-зміцнювальна обробка сприяє формуванню більш твердіших та глибших поверхневих шарів в порівнянні з окремою ультразвуковою і лазерною обробкою (рис. 2а). При збільшенні енергії лазерного імпульсу мікротвердість підвищується, а потім зменшується.

Максимальне зростання мікротвердості ( $H_{0.1} = 4400$  МПа) отримано при енергії лазерного імпульсу до  $E = 7$  Дж (рис. 2б). Цей режим є оптимальним для комбінованої ЛУЗОЗО бронзи БрАЖ9-4 без оплавлення. Збільшення енергії лазерного імпульсу більше 7 Дж при призводить до зниження мікротвердості поверхні, тобто розпочинається оплавлення поверхні (рис. 2г).

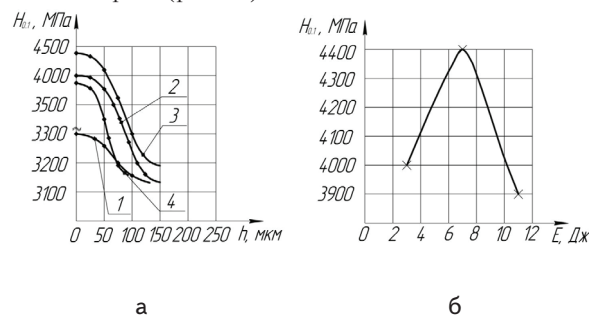


Рис. 2. Залежність мікротвердості  $H_{0.1}$  по глибині  $h$  (а) у випадку УЗО (1) та ЛУЗОЗО (2, 3, 4) при енергії лазерного імпульсу  $E = 3,7$  (обробка без оплавлення поверхні 2, 3) та  $E = 11$  Дж (обробка з оплавленням поверхні 4); залежність мікротвердості  $H_{0.1}$  від енергії лазерного імпульсу при тривалості імпульсу  $\tau = 4 \times 13$  мкс до і після комбінованої лазерно-ультразвукової обробки представлені на рис. 3

Топограми на рис. 4 відображають структуру зразка, де білим кольором позначені висоти, а чорним – низини. Аналіз наведених даних дозволяє стверджувати, що лазерна обробка після ультразвукової обробки дозволяє змінити структуру поверхневого шару.

Профілограма рельєфу поверхні (рис. 5) проводилася по діагоналі зразка (довжина діагоналі 18 мкм) та оцінювалася за такими показниками, як  $R_a$  (середньоарифметичний показник шорсткості по ви-

браній діагоналі),  $R_q$  (середньо-статистичний показник шорсткості по будь-яким 10 точкам вибраних програмою по всьому зразку, що дає більш точну інформацію про рельєф зразка),  $Z_{max}$  (максимальний розкид висот) та  $N=S_{ном}/S_{пов}$  ступінь розвинутих поверхні, де  $S_{ном}$  - номінальна площа поверхні,  $S_{ном}=13 \times 13 \text{ мкм}^2$ , а  $S_{пов}$  - повна площа поверхні зразка з врахуванням всіх нерівностей.

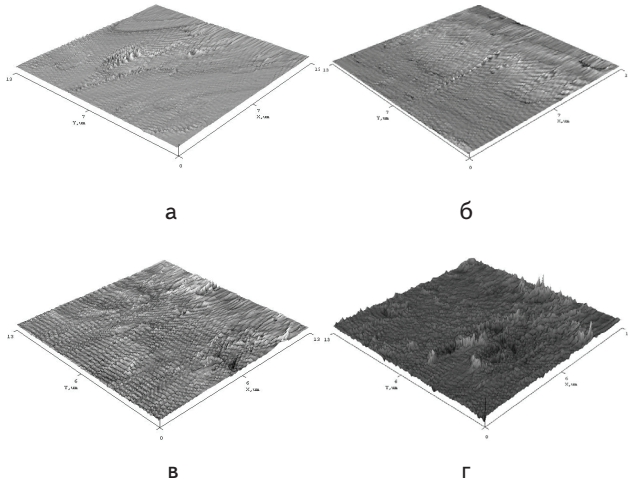


Рис. 3. Рельєф досліджуваних ділянок (13x13 мкм): а-вихідна поверхня; б-після УЗОЗО; в-після ЛУЗОЗО (E= 7 Дж-обробка без оплавлення поверхні); г-після ЛУЗОЗО (E= 11 Дж-обробка з оплавленням поверхні)

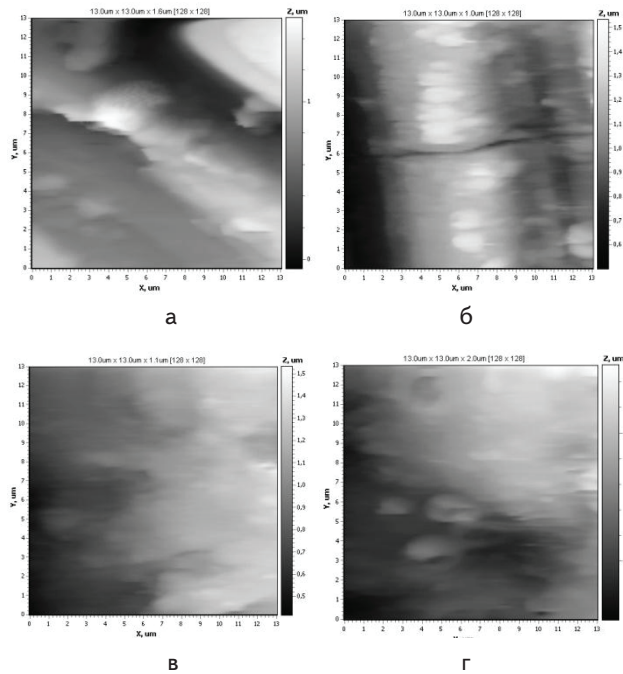
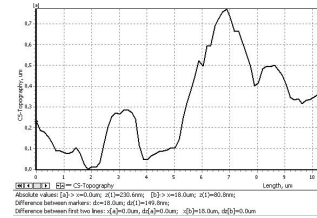
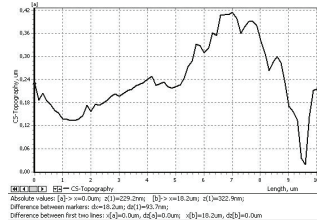


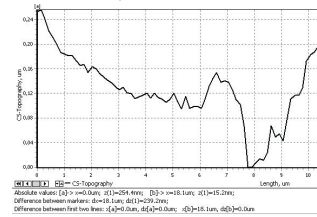
Рис. 4. Структура поверхні: а-вихідна поверхня; б-після УЗОЗО; в-після ЛО (E = 7 Дж-обробка без оплавлення поверхні); г-після ЛО (E = 11 Дж-обробка з оплавленням поверхні)



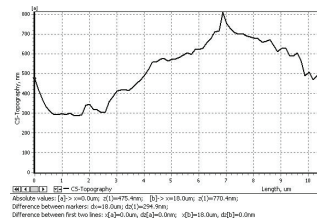
а ( $R_a = 264 \text{ нм}$ ,  $R_q = 335 \text{ нм}$ ,  $Z_{max} = 745 \text{ нм}$ )



б ( $R_a = 151 \text{ нм}$ ,  $R_q = 185 \text{ нм}$ ,  $Z_{max} = 1015 \text{ нм}$ )



в ( $R_a = 217 \text{ нм}$ ,  $R_q = 246 \text{ нм}$ ,  $Z_{max} = 990 \text{ нм}$ )



г ( $R_a = 402 \text{ нм}$ ,  $R_q = 460 \text{ нм}$ ,  $Z_{max} = 431 \text{ нм}$ )

Рис. 5. Профілограма шорсткості: а-вихідна поверхня; б-після УЗОЗО; в-після ЛО (E = 7 Дж-обробка без оплавлення поверхні); г-після ЛО (E = 11 Дж-обробка з оплавленням поверхні)

З наведених профілограм шорсткості поверхні (рис. 5) видно, що шорсткість після ультразвукової обробки (рис. 5 б) значно покращилась щодо вихідної поверхні (рис. 5 а), а після наступної лазерної обробки без оплавлення (рис. 5 в) та з оплавленням (рис. 5 г) шорсткість поверхні погіршується відносно попередньої ультразвукової обробки.

Найвищий ступінь розвитку поверхні  $N = 0.995$  спостерігається після комбінованої ЛУЗОЗО без оплавлення у порівнянні з вихідною поверхнею  $N = 0.921$  та УЗОЗО  $N = 0.979$ .

Комбінована лазерно-ультразвукова дія сприяла також змінні ступеню нагартування поверхневого шару (табл. 1).

Таблиця 1

Ступінь нагартування поверхневого шару

Ступінь нагартування, %	До обробки	УЗОЗО	ЛО	ЛУЗОЗО
$u_i$	-	6.45	12.25	41.9

## 6. Висновки

1. Запропоновано комбінований метод оздоблювально-зміцнювальної обробки з використанням імпульсних джерел енергії лазерного променя та ультразвукових коливань;
2. Визначено вплив імпульсних лазерно-ультра-звукових джерел енергії на зміну структури,

параметрів шорсткості, ступеня нагартування та мікротвердості поверхневого шару бронзи БрАЖ9-4;

3. Визначено оптимальну величину енергії лазерного імпульсу для зміцнювальної обробки деталей із бронзи БрАЖ9-4 після лазерної обробки.

## Література

1. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки [Текст] / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2006. – 664 с.
2. Головка, Л. Ф. Лазерні технології та комп'ютерне моделювання [Текст] / під ред. Л. Ф. Головка, С. О. Лук'яненко. – К.: Вістка, 2009. – 296 с.
3. Полевой, С. Н. Упрочнение машиностроительных материалов [Текст] : Справочник / С. Н. Полевой, В. Д. Евдокимов. – М. : Машиностроение, 1994. – 496 с.
4. Одинцов, Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием [Текст] / Л. Г. Одинцов. – М. : Машиностроение, 1997.
5. Вероман, В. Ю. Ультразвуковая обработка материалов. [Текст] / В. Ю. Вероман, А. Б. Аренков. – Л. : Машиностроение, 1971.
6. Киселёв, М. Г. Ультразвук в поверхностной обработке материалов [Текст] / М. Г. Киселёв, В. Т. Минченя, В. А. Ибрагимов. – Мин. : Тесей, 2001.
7. Спосіб лазерно-ультразвукової фінішної обробки [Текст] : пат. 60662 У України: МКП В 24 В 39/00, / Джемелінський В. В., Джемелінська Л. В., Лесик Д. А. – заявл. 01.12.10 ; опубл. 25.06.11, Бюл. №12. – 2 с.
8. Mordyuk, B., & Prokopenko, G. (2006). Mater. Sci. Eng., A Struct. Mater.: Prop. Microstruct. Process, 437, 396.
9. Mordyuk, B., Prokopenko, G., Vasylyev, M., & Lefimov. (2007). Mater. Sci. Eng., A Struct. Mater.: Prop. Microstruct. Process, 458, 253.
10. Mordyuk, B., & Prokopenko, G. (2007). J. Sound Vib, 308, 855.
11. Peyre, P., Fabbro, R., Merrien, P., & Lieurade, H. (1996). Mater. Sci. Eng., A Struct. Mater.: Prop. Microstruct. Process, 210, 102.
12. Devaux, D., Fabbro, R., Tollier, L., & Bartnicki, E. (1993). J. Appl. Phys, 74, 22-68.
13. Bugayev, A., Gupta, M., & Payne, R. (2006). Opt. Lasers Eng, 44, 102.

*У даній роботі показані результати поверхневого зміцнення деталей в умовах саморозповсюдженого високотемпературного синтезу, які використовуються для деталей ракетно-космічної техніки. Приведені фотографії зміцнених матеріалів, результати фазового аналізу та виміру мікротвердості*

*Ключові слова: саморозповсюджуваний високотемпературний синтез, дифузія, поверхневе зміцнення, мікроструктура, поверхневий шар, мікротвердість*

*В данной работе показаны результаты поверхностного упрочнения деталей в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, использующихся для деталей ракетно-космической техники. Приведены фотографии упрочненных материалов, результаты фазового анализа и измерения микротвердости*

*Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, диффузия, поверхностное упрочнение, микроструктура, поверхностный слой, микротвердость*

УДК 621.793.6:669.35

# ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ВЫСОКОУГЛЕ- РОДИСТЫХ МАТЕ- РИАЛОВ В УСЛОВИЯХ САМОРАСПРОСТРА- НЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕ- РАТУРНОГО СИНТЕЗА

**С. Н.Ткаченко**

Младший научный сотрудник  
Кафедра материаловедения и обработки металлов  
Запорожская государственная инженерная академия  
пр. Ленина, 22, г. Запорожье, Украина, 69006  
E-mail: space7770@rambler.ru