

## **КОМБІНОВАНЕ ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВЕ ПОВЕРХНЕВЕ ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ І МОЖЛИВОСТІ ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ТА РЕМОНТІ ОБЛАДНАННЯ**

*Наведено результати експериментальних досліджень зміни геометричних показників мікрорельєфу та твердості поверхневого шару після комбінованої лазерно-ультразвукової обробки, які може бути використано при виробництві та ремонті обладнання.*

***Ключові слова:** поверхневий шар, лазерний промінь, ультразвукові коливання, зміцнення, мікрорельєф, поверхнева твердість.*

**Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.** Проблема підвищення зносостійкості деталей машин, які працюють в екстремальних умовах, є однією з важливих у машинобудуванні. Такі умови характерні для деталей, що працюють при високих швидкостях руху, високих контактних питомих тисках, дії абразивних і агресивних середовищ, циклічно змінних температур. Використання високоміцних та зносостійких матеріалів, у тому числі й високолегованих сталей, для підвищення ресурсу роботи обладнання і виробництва будівельних матеріалів не повною мірою задовольняє експлуатаційні властивості та економічно не вигідні. Перспективними є розроблення й реалізація наукоємних технологічних процесів поверхневої оздоблювально-зміцнювальної обробки деталей машин для підвищення експлуатаційних показників поверхонь деталей технологічними методами.

**Аналіз останніх публікацій, у яких започатковане розв'язання цієї проблеми і на які спирається автор, виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** У літературі наведені способи поверхневого зміцнення з використанням різних видів енергії: методами фізичної дії концентрованою високою енергією, зокрема дією лазерного й електронного променя, плазмою. Серед них технології лазерної поверхневої обробки (формування зносостійких поверхонь методом лазерного наплавлення та термоциклювання, лазерне поверхневе зміцнення й ін.) [1, 2], а також методи традиційного зміцнення – нагартуванням (зі створенням плівки на поверхні деталі, зміною структури поверхневого шару, зміною шорсткості поверхні, зміною

хімічного складу та ін.). Одним з найбільш ефективних способів підвищення експлуатаційних властивостей деталей є їх поверхнєве зміцнення зміною структури поверхневого шару [3].

При використанні традиційного термічного зміцнення після припинення дії потоку теплової енергії нагріта ділянка поверхні вище критичної температури охолоджується з високою швидкістю. У процесі нагріву й охолодження відбуваються фазові перетворення, які сприяють підвищенню фізико-механічних властивостей деталей.

Проте використання традиційного термічного зміцнення вичерпує свої можливості для підвищення зносостійкості деталей машин, які працюють в екстремальних умовах.

При зміцненні з використанням поверхневого пластичного деформування (ППД) у металі відбуваються структурні зміни, пов'язані з підвищенням густини дислокацій, їх взаємодією, подрібненням блоків, виникненням макро- та мікронапружень. При використанні ППД пластична деформація може бути здійснена як статичними методами – обкаткою поверхні деталі роликком або кулькою, іншими інструментами, виготовленими з надтвердих матеріалів (алмазним, ельборовим, твердосплавним), і гідроабразивним та дробоструминним наклепом, так і динамічними методами, зокрема ультразвуковим інструментом [4, 5]. Але при використанні таких способів обробки не завжди досягаються високі значення твердості. Крім цього, при підвищенні температури в процесі експлуатації фізико-механічні властивості матеріалу поверхні деталі, які отримані при зміцненні, знижуються. Тому використання ППД є ефективним для вже зміцнених іншими методами деталей як фінішна обробка, яка в більшості випадків приводить до виникнення поверхневих стискувальних напружень, що сприяє підвищенню опору втомі. ППД також зменшує шорсткість поверхні й заліковує мікротріщини, внаслідок чого зменшується чутливість матеріалу до концентраторів напружень [3].

На основі виконаного аналізу існуючих методів зміцнення зміною структури поверхневого шару деталей для підвищення експлуатаційних властивостей виробів, які працюють в екстремальних умовах, доцільно використати комбіновані методи поверхневої обробки металів. До сьогодні накопичено певний досвід комбінованих методів подібного роду. Відомо, наприклад, про комбіновані методи лазерної термодформаційної обробки [1, 2] та ППД роликком або ультразвуковим інструментом [5].

У процесі використання процесів лазерного термодформаційного зміцнення лазерне випромінювання, сфокусоване в пляму круглої чи прямокутної форми, при відносному переміщенні нагріває поверхневий шар матеріалу деталі до температури аустенізації [1]. На визначеній відстані від місця дії теплового джерела нагрітий метал швидко остигає і Комбінований спосіб зміцнення сталей з використанням лазерного випромінювання характеризується високими швидкостями нагрівання

( $10^8$  град/с), охолодження ( $10^6 \dots 10^8$  град/с) і високою швидкістю деформації  $\varepsilon \sim 10^3$  1/с за рахунок динамічної дії ультразвукового наконечника. Рациональна взаємодія таких факторів дозволяє отримувати поверхневий шар оброблюваної деталі з підвищеними експлуатаційними характеристиками. Автори робіт [6, 7, 8] показали можливі варіанти комбінованого зміцнення: лазерна термообробка з наступним впливом ультразвукового інструменту при кімнатній температурі; суміщено-гібридне термодформаційне зміцнення лазерним променем і ультразвуковим інструментом.

Проте в літературі відсутні відомості про можливість використання волоконного лазера й 2D-сканатора з одночасним контролюванням температури та зміною розмірів плями лазерного променя в зоні опромінювання для зміцнення й оздоблювання поверхонь деталей. А також недостатньо даних для визначення оптимальних технологічних режимів і їх впливу на зміну геометричних показників мікрорельєфу поверхні та фізико-механічних властивостей поверхневого шару.

**Формулювання цілей статті (постановка завдання).** Метою роботи є визначення можливостей зміцнення поверхонь з використанням волоконного лазера для поліпшення геометричних показників мікрорельєфу та поверхневої твердості після комбінованої лазерно-ультраузвукової обробки.

Методами дослідження є виконання експериментальних досліджень комбінованої лазерно-ультраузвукової обробки з використанням сучасного обладнання (волоконного лазера, 2D-сканатора, пірометра, ультразвукової технологічної установки та 3D-конфокальної мікроскопії).

**Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів.** Лазерно-ультраузвукова обробка виконувалася за роздільною схемою дії волоконного лазера й ультразвукової установки. Для експериментальних досліджень використовувалися зразки зі сталі 45. Хімічний склад сплаву у відсотках матеріалу: до 0,42...0,5 C; до 0,17...0,37 Si; 0,5...0,8 Mn; до 0,3 Ni; до 0,04 S; до 0,035 P; до 0,25 Cr; до 0,3 Cu; до 0,08 As; решта Fe. Вихідна поверхня зразків перед обробкою піддавалася шліфуванню. Оптимальна температура поверхневого лазерного зміцнення визначалась згідно з діаграмою стану залізвуглецевого сплаву, а також температурно-часового циклу лазерного поверхневого термічного зміцнення без оплавлення [9]. Для контролю температури в зоні дії лазерного променя при проведенні експериментальних досліджень використовувався двоколірний пірометр марки «Impac Igar 12 LO», а для підтримання її сталості в зоні обробки – спеціальний пропорційний інтегральний контролер. Такий пірометр дозволяв виміряти реальну температуру поверхні в діапазоні 350...1350 °C.

Для підвищення продуктивності термодформаційного зміцнення та поліпшення якості поверхневого шару запропоновано спосіб комбінованої лазерно-ультразвукової оздоблювально-зміцнювальної обробки й розроблено установку [10, 11], яка може бути використана в різних галузях промисловості. До складу цієї установки входить лазерний технологічний комплекс із загальною робочою площею 500x300 мм, волоконний лазер з вихідною потужністю 1 кВт і довжиною хвилі випромінювання  $\lambda = 1,06$  мкм, 2D-сканатор зі швидкістю сканування  $V_{ск} = 1000$  мм/с, двоколірний пірометр, відеокамера, плати для контролю температури та сканування в зоні обробки, персональні комп'ютери (ПК) з програмним забезпеченням (ПЗ) [12] й ультразвукова технологічна установка (ультразвуковий генератор з потужністю 0,3 кВт та частотою коливання 21,6 кГц, п'єзокерамічний перетворювач, концентратор, наконечник із сімома циліндричними бойками діаметром 5 мм) [13, 14].

Розроблена установка дозволяє реалізувати роздільні й суміщені схеми, а саме з попередньою деформаційною дією та наступною тепловою дією і, навпаки, з попередньою тепловою дією та наступною деформаційною, а також синхронною термодформаційною дією.

Особливість лазерного технологічного комплексу полягає в тому, що під час лазерного поверхневого зміцнення відбувається одночасний цикл контролю температури й сканування променя в зоні опромінювання за допомогою спеціальних електронних плат та програмного забезпечення (рис. 1). Розроблене програмне забезпечення дозволяє з'єднати пірометр з лазером і сканатором через спеціальну електронну плату для постійної підтримки температури в зоні дії лазерного променя.

Основними параметрами лазерної та ультразвукової ударної обробки, які визначають якість поверхневого шару деталей і виробів, а отже, експлуатаційні властивості, є температура  $T$  (густина потужності  $W_p$  в зоні опромінювання), швидкість переміщення зразка  $S_z$ , швидкість сканування  $V_{ск}$ , діаметр  $d$  та ширина лазерного променя  $h$ , статичне навантаження  $F_{ст}$ , амплітуда  $A$  і частота коливань  $f$  ультразвукової коливальної системи, тривалість впливу  $t_{вз}$ , розмір та форма плями інструменту. Ці параметри визначають величину діючих навантажень, кількість робочих ходів лазерного нагріву й пластичного деформування поверхні.

Лазерна обробка виконувалася при температурі 1300 °С, швидкості переміщення зразка – 140 мм/хв, швидкості сканування – 1000 мм/с, а лазерне випромінювання фокусувалось у лінію шириною 10 мм. Зразки під час лазерного впливу охолоджувалися стисненим потоком повітря.

Ультразвукова обробка здійснювалася при статичному зусиллі навантаження ультразвукової системи 50 Н, амплітуді та частоті ультразвукових коливань відповідно 18 мкм та 21,7 кГц, часі впливу 1 хв.

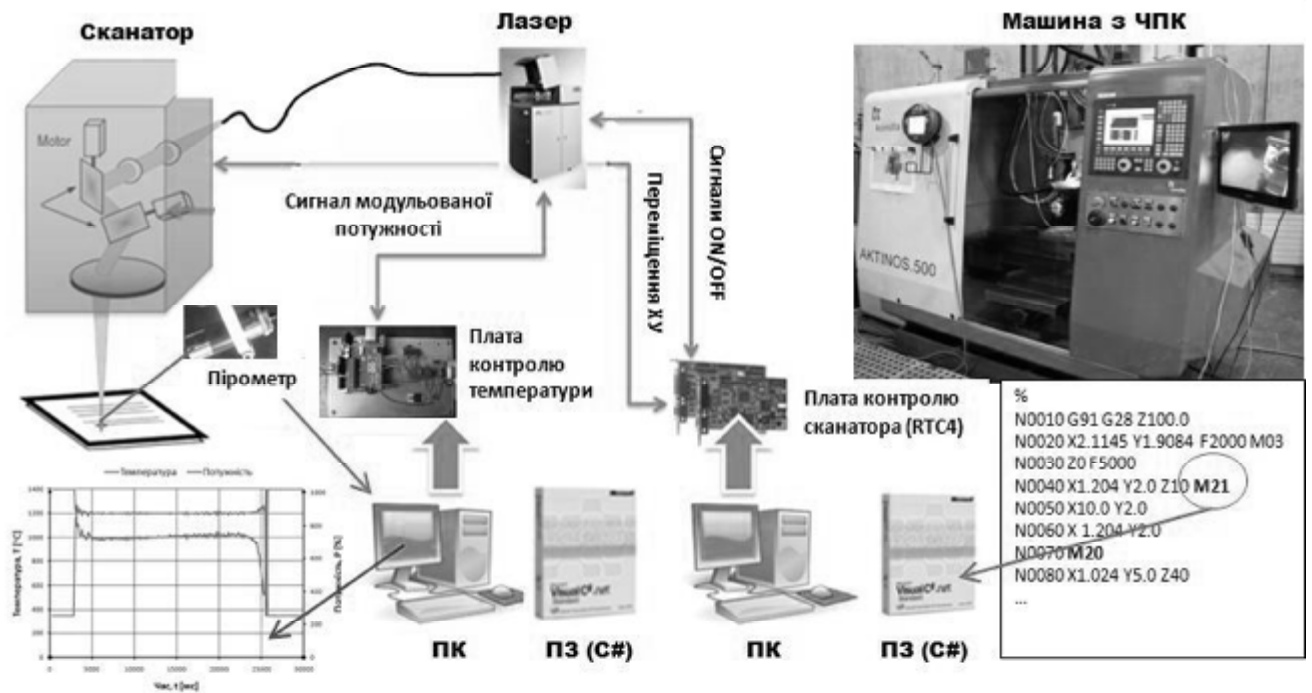


Рис. 1. Схема лазерного технологічного комплексу

Мікрорельєф поверхні досліджувався за допомогою мікроскопа «Leica DCM3D». Поверхнева твердість визначалася за допомогою тестера «Computest SC» при навантаженні індентора 10 Н.

Аналіз наведених на рис. 2 топограм і на рис. 3 профілограм профілю, шорсткості та хвилястості поверхні дозволяють стверджувати, що комбіноване лазерно-ультразвукове термодформаційне зміцнення сприяє зниженню середньоарифметичного відхилення мікронерівностей профілю шорсткості  $R_a$  на 43% при одночасному підвищенні висоти профілю  $S_a$  в 1,3 раза та середньоарифметичного відхилення мікронерівностей профілю хвилястості  $W_a$  в 11 разів порівняно з вихідною поверхнею. Цьому сприяла здатність бойків, крім динамічної дії, створювати в поверхневому шарі дотичні напруження за рахунок їх обертання.

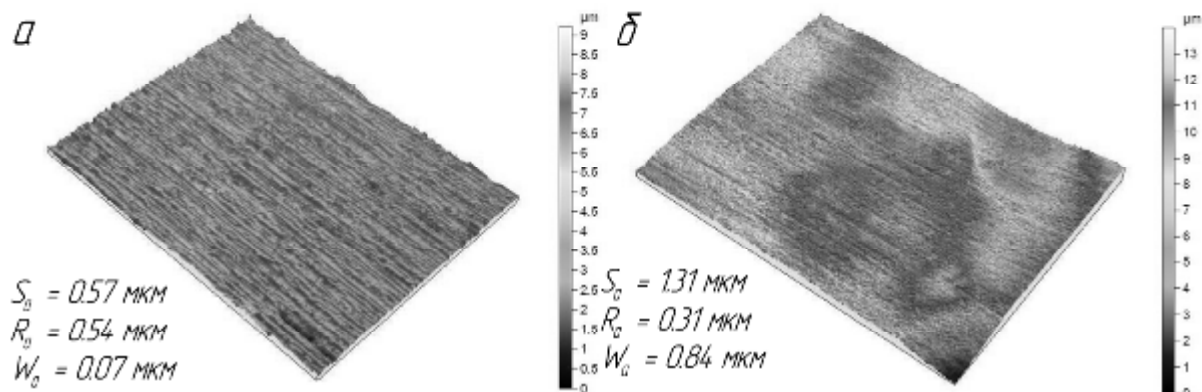


Рис. 2. Топограма поверхні (x20) до обробки (а) та після ЛО+УЗУО (б)

Отримані висотні й амплітудні параметри задовольняють сучасні вимоги мікрогеометрії поверхонь із забезпеченням сприятливих умов, з утворенням високої маслоємності поверхні, малих розмірів окремих плям контакту (при граничному терті) та достатньої контактної жорсткості (при фреттинг-корозії). Також отриманий мікрорельєф характеризується підвищеною зносостійкістю.

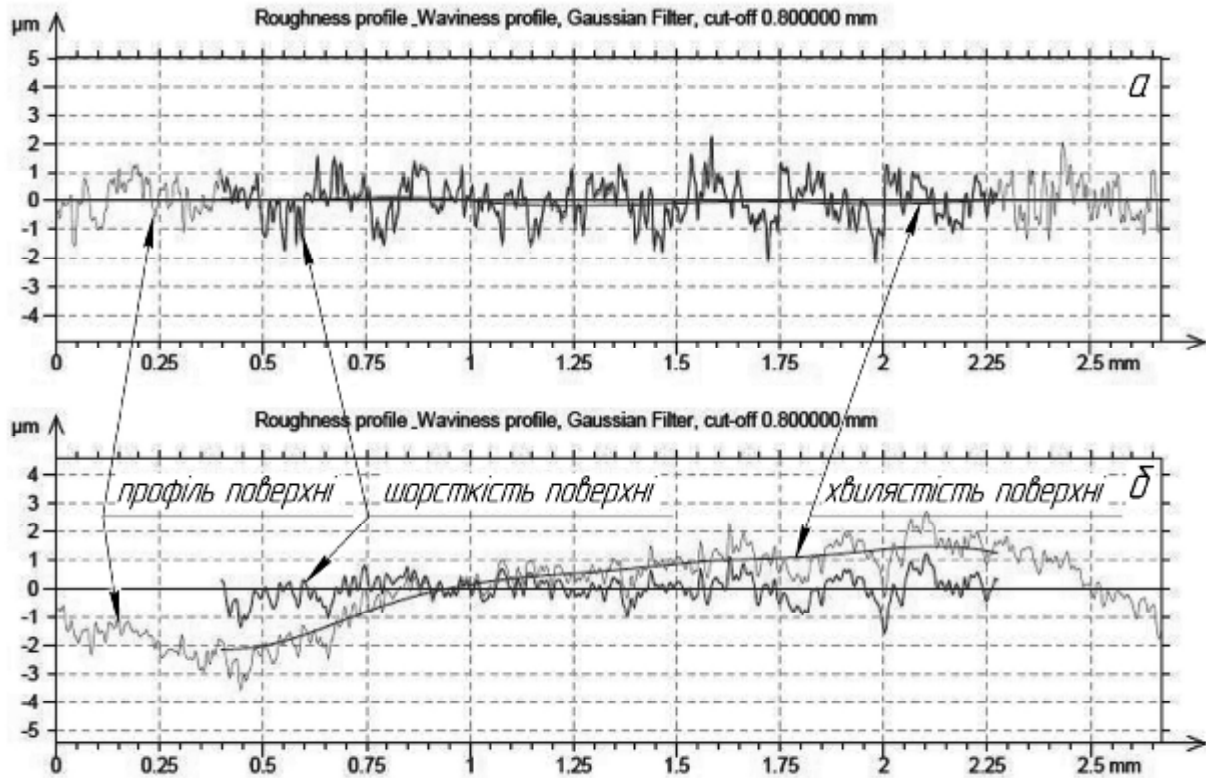


Рис. 3. Профілограма поверхні до обробки (а) та після ЛО+УЗУО (б)

Ступінь зміцнення після комбінованої лазерно-ультразвукової обробки поліпшився у 2,3 рази порівняно з необробленою поверхнею (рис. 4) за рахунок комбінованого термічного та наступного деформаційного впливів.

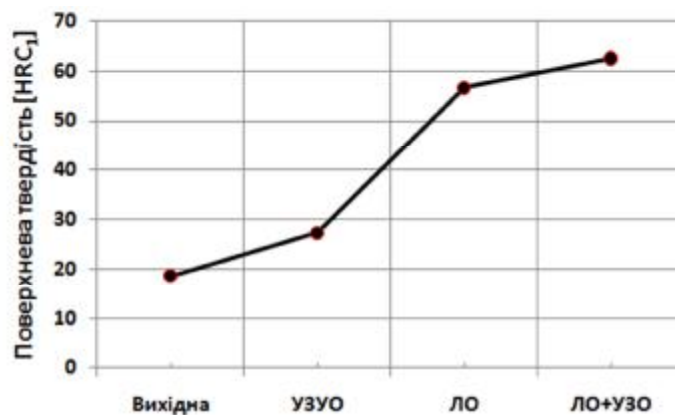


Рис. 4. Поверхнева твердість при різних схемах обробки

## **Висновки з дослідження і перспективи подальших розвідок у цьому напрямі:**

1. Визначено можливість використання волоконного лазера з 2D-сканатором і спеціальних пристроїв для комбінованого лазерно-ультразвукового поверхневого зміцнення.
2. Запропонована комбінована технологія дозволяє:
  - автоматизувати процес термодформаційного зміцнення;
  - створити мікрорельєф необхідної форми та геометричних параметрів;
  - поліпшити твердість у 2,3 раза порівняно з вихідною поверхнею;
  - підвищити фізико-механічні та експлуатаційних властивості сталевих деталей.

## *Література*

1. Головка Л.Ф. *Лазерні технології та комп'ютерне моделювання* / під ред. Л.Ф. Головка, С.О. Лук'яненка. – К.: Вістка, 2009. – 296 с.
2. Григорьянц А.Г. *Технологические процессы лазерной обработки* / Шиганов И.Н., Мисуров А.И. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.
3. Числове обґрунтування параметрів дискретного зміцнення високонавантажених деталей машин / Посвятенко Е.К., Дяченко С.С., Гончаров В.Г. та ін. // Вісник НТУУ «ХПІ». *Машинознавство та САПР*. – 2011. – №11(51) – С. 111 – 136.
4. Евдокимов В.Д. *Технология упрочнения машиностроительных материалов: Учебное пособие-справочник* / Евдокимов В.Д., Клименко Л.П., Евдокимова А.Н. / Под редакцией В.Д. Евдокимова. – Одесса, Николаев: Изд-во НГТУ им. Петра Могилы, 2005. – 352 с.
5. Поляк М.С. *Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения: в 2-х. Т. 2.* – М.: Л.В.М. - СКРИПТ, МАШИНОСТРОЕНИЕ, 1995. – 688 с.
6. Синдеев В.И. *Влияние упрочняюще-чистовой обработки лучом лазера и ультразвуковым инструментом на структуру стали* // Новые методы упрочнения и обработки металлов. – Новосибирск, – 1983. – С. 100 – 106.
7. Гуреев Г.Д., Гуреев Д.М. *Совмещение лазерного и ультразвукового воздействия для термообработки поверхности стали* / Исхакова Г.А. // *Электрофизические и электромеханические методы обработки*. – 2007. – № 1 (14). – С. 90 – 95.
8. *Структурное состояние поверхностных слоев стали Х12М после лазерно-акустической обработки* / Бровер А.В. // *Вестник машиностроения*. – 2008. – С. 67 – 69.
9. Джемелінський В.В. *Визначення оптимальних параметрів лазерно-ультразвукового зміцнення та оздоблювання поверхонь виробів* / Лесик Д.А. // Вісник НТУУ «ХПІ». *Серія: Машинобудування*. – 2013. – № 2 (68). – С. 15 – 18.

10. Пат. 60662 U України, МКП В24В 39/00. Спосіб лазерно-ультразвукової фінішної обробки / Джемелінський В.В., Джемелінська Л. В., Лесик Д.А.; заявл. 01.12.2010, опубл. 25.06.2011, Бюл. №12.

11. Пат. 93522 U України, МКП В24В 39/04. Установа для комбінованої лазерно-ультразвукової обробки / Джемелінський В.В., Лесик Д.А., Джемелінська Л.В.; заявл. 21.03.2014, опубл. 10.10.2014, Бюл. №19.

12. Silvia M. Laser hardening process with 2D scanning optics. Lamikiz A., Tabernero I, Ukar E. // *Physics Procedia*. – 2012. – № 39. – С. 309 – 317.

13. Пат. 9175 U України, МКП В24В 39/00. Ультразвуковий пристрій для зміцнення та наноструктуризації поверхні металів / Прокопенко Г.І., Васильєв М.О., Мордюк Б.М. та ін.; заявл. 09.02.2005, опубл. 15.09.2005, Бюл. №9.

14. Mordyuk B. Ultrasonic impact peening for the surface properties' management. Prokopenko G. // *Journal of Sound and Vibration*. – 2007. – № 308. – С. 855 – 866.

Надійшла до редакції 20.11.2014

© В.В. Джемелінський, Д.А. Лесик.

**УДК 621.373.826**

*В.В. Джемелінський, к.т.н., професор  
Д.А. Лесик, аспірант*

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»*

## **КОМБИНИРОВАННОЕ ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ И ВОЗМОЖНОСТИ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ И РЕМОНТЕ ОБОРУДОВАНИЯ**

*Приведены результаты экспериментального исследования изменения геометрических показателей микрорельефа и твердости поверхностного слоя после комбинированной лазерно-ультразвуковой обработки, которые могут быть использованы при производстве и ремонте оборудования.*

**Ключевые слова:** *поверхностный слой, лазерный луч, ультразвуковые колебания, укрепление, микрорельеф, поверхностная твердость.*



V.V. Dzhemelinsky, Ph.D., Professor  
D.A. Lesik, Post-graduate  
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

## **COMBINING LASER-ULTRASONIC SURFACE HARDENING OF DETAILS AND POSSIBILITIES OF ITS USE IN THE MANUFACTURE AND REPAIR OF EQUIPMENT**

*The results of an experimental study of changes in the geometric parameters of microrelief and surface hardness after the combined laser-ultrasonic treatment, which can be used in the manufacture and repair of equipment.*

**Keywords:** *surface layer, the laser beam, ultrasonic vibrations, strengthening, microrelief, surface hardness.*