

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Лесик Дмитро Анатолійович



УДК 621.9.048.7:621.9.048.6

**ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ  
ДЕТАЛЕЙ КОМБІНОВАНОЮ ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОЮ ОБРОБКОЮ**

Спеціальність 05.03.07 – Процеси фізико-технічної обробки

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі лазерної техніки та фізико-технічних технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, м. Київ.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, професор  
**Джемелінський Віталій Васильович**,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»,  
професор кафедри лазерної техніки та фізико-технічних  
технологій

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Посвятенко Едуард Карпович**,  
Національний транспортний університет,  
професор кафедри виробництва, ремонту та матеріалознавства

кандидат технічних наук,  
**Бернацький Артемій Володимирович**,  
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,  
науковий співробітник відділу № 77 Спеціалізована  
високовольтна техніка та лазерне зварювання

Захист дисертації відбудеться «13» червня 2016 р. о 15<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.002.15 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут», за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги 37, корп. 19, ауд. № 435.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розіслано «27» квітня 2016 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д26.002.15,  
доктор технічних наук, професор



Р.М. Рижов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** В сучасних умовах якість виготовленої продукції з використанням перспективних технологічних процесів, які забезпечують скорочення енергоресурсів та отримання високих експлуатаційних властивостей є важливим критерієм виходу вітчизняних товаровиробників на світовий ринок.

Застосування традиційних методів поверхневої обробки в повній мірі не дозволяють отримати необхідні якісні показники поверхневого шару, а використання високоміцних матеріалів не завжди задовольняють експлуатаційні властивості виробів та економічно не вигідні.

Для підвищення якості і продуктивності виробництва деталей, які працюють в умовах дії абразивних і агресивних середовищ, циклічно змінних температурах, високих швидкостях руху, перспективними є гібридні та комбіновані термодформаційні процеси поверхневої зміцнювальної та оздоблювальної обробки з використанням енергії лазерного променя та ультразвукових коливань.

Комбінований технологічний процес лазерного термічного зміцнення (ЛО) та наступного ультразвукового деформаційного зміцнення (УЗО) сприяє диспергуванню структурних складових, підвищенню твердості та переходу нестабільного структурного стану поверхневого шару в термостійкий із більшими залишковими напруженнями стиску, а також поліпшенню мікрорельєфу поверхні. Проте широке застосування комбінованого лазерно-ультразвукового зміцнення і оздоблювання (ЛО+УЗО) металевих поверхонь стримується нестачею систематичних досліджень впливу режимів обробки, зокрема при дії лазерного променя з використанням сканування та багатобойкових ударних інструментів на зміну мікрорельєфу і фізико-механічних властивостей поверхневого шару.

Тому підвищення якості поверхневого шару сталевих деталей комбінованою ЛО+УЗО є актуальною науковою проблемою і має велике практичне значення.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконувалася на кафедрі лазерної техніки та фізико-технічних технологій НТУУ «КПІ» в рамках Державних науково-технічних програм «Високоєфективні технологічні процеси в машинобудуванні», «Нові наукомісткі технології на основі досягнень мікроелектроніки, напівпровідників і оптики» (тема №2545п, ДР №0112U000589, тема №2725, ДР №0114U003431).

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є поліпшення мікрорельєфу та підвищення фізико-механічних властивостей поверхневого шару сталевих зразків комбінованою лазерно-ультразвуковою обробкою.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Розробити спосіб ЛО з підтриманням постійної температури нагрівання в зоні дії послідовного переміщення лазерного променя сканатором та наступної УЗО багатобойковими наконечниками.

2. Провести теоретичні та експериментальні дослідження для визначення взаємозв'язку вхідних технологічних режимів дії лазерного променя і ультразвукового інструменту з вихідними параметрами якості поверхневого шару.

3. Дослідити особливості змін мікрорельєфу і фізико-механічних властивостей поверхневого шару, а також визначити зносо- та корозійну стійкість поверхонь

сталевих зразків (сталі 45 та X12МФ) за умов комбінованої дії високошвидкісним нагріванням і охолодженням лазерним променем та наступним інтенсивним ультразвуковим ударним деформуванням.

4. Розробити пристрої та рекомендації (алгоритм) для практичного використання технологічних процесів комбінованої лазерно-ультразвукової зміцнювально-оздоблювальної обробки сталевих деталей та керуючі програми для формування на поверхні топографії з регулярним мікрорельєфом.

*Об'єкт дослідження* – комбінований процес лазерної та ультразвукової зміцнювальної та оздоблювальної обробки.

*Предмет дослідження* – закономірності формування мікрорельєфу та фізико-механічних властивостей поверхневого шару сталевих деталей в умовах комбінованої дії лазерного променя та ультразвукового інструменту.

**Методи дослідження.** Теоретичні дослідження, висновки та аргументації базуються на основних положеннях теорії теплової взаємодії лазерного променя з металами, теплопровідності, пружно-пластичного деформування поверхневої зміцнювальної обробки, методів математичної статистики експериментальних досліджень. Експерименти проводилися на спеціальному лазерному технологічному комплексі із забезпеченням можливості встановлювати і здійснювати контроль температури нагрівання в зоні дії лазерного променя, швидкості і ширини сканування лазерного променя та на ультразвуковій технологічній установці з використанням обертальної контактної-зсувної схеми високочастотного ударного навантаження багатобойкових наконечників, а також сучасних методів та обладнання для аналізу мікрорельєфу поверхні і мікроструктури поверхневих шарів, що включав оптичну профілометрію, металографічний, мікродюрOMETричний і рентгенівський структурно-фазовий аналіз, оптичну та трансмісійну електронну мікроскопію, рентгенівський аналіз напруженого стану.

#### **Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Поліпшення параметрів мікрорельєфу та фізико-механічних властивостей поверхневого шару забезпечуються розробленим способом ЛО з підтриманням постійної температури нагрівання в зоні дії послідовного переміщення лазерного променя сканатором та наступної УЗО багатобойковими наконечниками.

2. Уникнення небажаного перегріву і оплавлення складних за конструкцією поверхонь та їх вихідних частин, зменшуючи витрачену потужність джерела живлення, забезпечуються термокінетичною моделлю ЛО з використанням способу підтримання постійної температури нагрівання в зоні дії послідовного переміщення лазерного променя сканатором та програмним забезпеченням, а також динамічною моделлю УЗО з визначенням параметрів деформації й величини енергії ударної та обертової дії одно- та багатобойкових деформуючих наконечників.

3. Підвищення величини твердості, залишкових напружень стиску та поліпшення параметрів мікрорельєфу поверхневого шару гарантуються вперше встановленими оптимальними технологічними режимами комбінованої ЛО+УЗО сталей 45 та X12МФ, а отримання рівномірних значень глибини та мікротвердості зміцненої зони забезпечуються величиною коефіцієнту перекриття доріжок 20...25% при повторній дії лазерного променя, що сканується.

4. Підвищення продуктивності процесів обробки великогабаритних деталей і зменшення більше чим в 2 рази величини зношування поверхні сталі Х12МФ, а поверхні сталі 45 – в 4 рази, а також підвищення корозійної стійкості оброблених поверхонь забезпечуються визначеними оптимальними режимами та розробленими пристроями для комбінованої ЛО+УЗО.

5. Вперше визначено, що найбільший внесок у підвищення границі плинності при комбінованій ЛО+УЗО сталі Х12МФ на оптимальних режимах забезпечується зернограничним, твердородзчинним та дисперсійним механізмами зміцнення.

**Практичне значення отриманих результатів.** Розширено технологічні можливості лазерного термозміцнення наступним інтенсивним ультразвуковим ударним зміцненням та оздоблюванням поверхневого шару, яка сприяє значному зростанню твердості, зносо- та корозійної стійкості.

Науково обґрунтовано технологічні схеми та пристрої, які мають практичну цінність для промислового застосування. Серед них способи отримання рівномірних значень ширини і глибини зміцненої зони лазерним променем та формування на поверхні топографії з регулярним мікрорельєфом.

Розроблено конструкцію пристрою та керуючі програми для комбінованої ЛО+УЗО та методику визначення технологічних параметрів УЗО багатобойковими наконечниками, що сприяє підвищенню продуктивності обробки з отриманням рівномірного профілю мікрорельєфу та ультрадисперсної структури.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень апробовано в технологічних процесах зміцнювально-оздоблювальної обробки на підприємстві ПАТ «Полонський гірничий комбінат» (м. Полонне, Хмельницька область), а також використовуються у навчальному процесі НТУУ «КПІ» при підготовці бакалаврів та магістрів механічних спеціальностей.

**Особистий внесок здобувача.** Автором обґрунтовані мета та задачі дослідження, що вирішуються в дисертаційній роботі. Виконання робіт на всіх етапах теоретичних та експериментальних досліджень, зокрема аналіз літературних джерел по термічному та деформаційному зміцненню сталевих деталей, розробка способу комбінованої лазерно-ультразвукової зміцнювально-оздоблювальної обробки металів, встановлення функціональних залежностей і обмежень вихідних параметрів ЛО та УЗО належать автору. Також автором запропоновано математичні моделі і методики, розроблено пристрої та керуючі програми, проведено експериментальні дослідження, виконано розрахунки, аналіз та узагальнення отриманих результатів, оформлено результати наукових і експериментальних досліджень у вигляді патентів на корисну модель, публікацій та доповідей на конференціях, а також впровадження результатів досліджень.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на наукових конференціях. Серед яких основними є: V, VI міжнародні науково-технічні конференції «Лазерні технології в зварюванні і обробці матеріалів» (с. Кацівелі, Крим, травень 2011, 2013); XII, XIV міжнародні науково-технічні конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (м. Севастополь, червень 2011, 2013); міжнародна науково-технічна конференція «Перспективні

напрями розвитку технології машинобудування і металообробки» (м. Ростов-на-Дону, Росія, лютий 2013); 31 міжнародна науково-технічна конференція «Перспективні напрями розвитку технології машинобудування та металообробки» (м. Мінськ, Білорусь, квітень 2015); Міжнародна науково-практична конференція «Структурна релаксація у твердих тілах» (м. Вінниця, травень 2015); міжнародна науково-технічна конференція «Лазерні технології. Лазери та їх застосування» (м. Трускавець, червень 2015); VII міжнародна науково-технічна конференція «Лазерні технології в зварюванні і обробці матеріалів» (м. Одеса, вересень 2015).

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 22 наукових праць, у тому числі 7 статей у наукових фахових виданнях, з них – 3 статті у виданнях, які включені до міжнародних науково-метричних баз даних та 1 стаття в іноземному виданні, 5 патентів України на корисну модель та 10 тез і доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, переліку використаних джерел та додатків. Робота викладена на 156 сторінках машинописного тексту, містить 62 рисунків, 14 таблиць, 4 додатки та 161 найменувань використаних літературних джерел на 17 сторінках. Загальний об'єм роботи складає 188 сторінок.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та задачі дослідження, показано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, відображено особистий внесок автора, наведено відомості про апробацію роботи.

**У першому розділі** зроблено короткий огляд даних щодо впливу лазерного та ультразвукового зміцнення на зміну якості поверхневого шару сталевих деталей. Зазначено, що лазерне термозміцнення сталей за аналогією з іншими видами загартування полягає у перетворенні аустенітної структури, отриманої на етапі нагрівання в мартенсит на етапі охолодження, які здійснюються з високими швидкостями, а зміна фізичних властивостей кристалічних матеріалів при ультразвуковому (УЗ) деформаційному зміцненні є результатом розмноження, перерозподілу та нелінійної поведінки точкових та лінійних дефектів. Проведено аналіз особливостей використання термічного зміцнення лазерним променем, що сканується та ефективність зміцнення сталевих поверхонь великогабаритних деталей за допомогою динамічного навантаження багатобойковими наконечниками.

Встановлено, що комбіноване лазерно-ультразвукове зміцнення та оздоблювання є одним із ефективних способів підвищення якості поверхневого шару. Однак подальший розвиток та впровадження комбінованої технології ЛО+УЗО стримується відсутністю системних досліджень впливу режимів обробки на зміну мікрорельєфу і фізико-механічних властивостей поверхневого шару.

Згідно з наведеними експериментальними даними та теоретичним описом процесів лазерного та ультразвукового термодформаційного зміцнення та оздоблювання, невирішеними залишаються важливі питання, серед яких: уникнення небажаного перегріву й оплавлення складних за конструкцією та крайових зон оброблюваної деталі при дії послідовного переміщення лазерного променя

сканатором; встановлення оптимальних параметрів при перекритті лазерних доріжок для отримання рівномірних значень зміщеної зони.

Проведений аналіз дозволяє вважати обрану тему дисертаційної роботи актуальною, виконання якої буде сприяти розвитку як науки, так і промисловості України.

У другому розділі висвітлені питання теоретичного дослідження процесу термодформаційного зміцнення та оздоблювання деталей комбінованою ЛО+УЗО, яка може бути здійснена за як суміщеною, так і роздільною схемами обробки (рис. 1). В даній роботі використано роздільну схему (рис. 1 б). Для розробки математичних моделей визначено функціональні залежності та обмеження вихідних параметрів ЛО та УЗО.

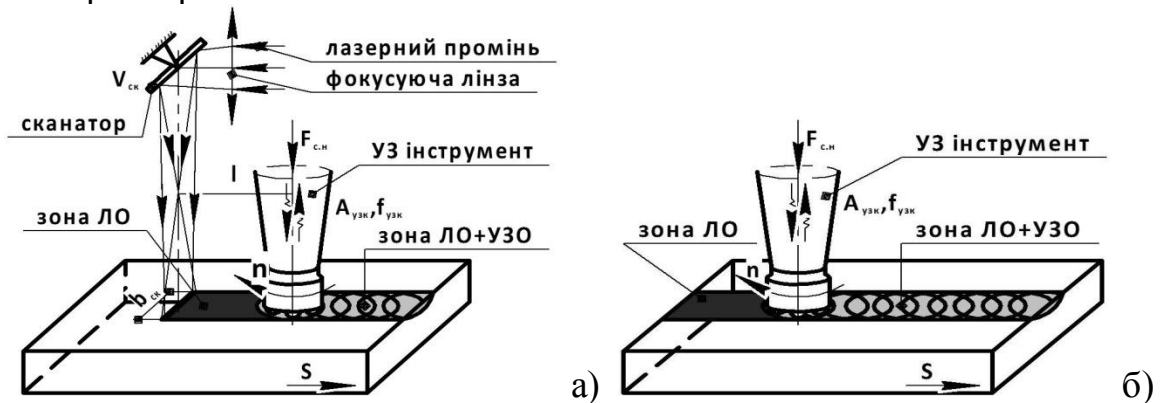


Рис. 1. Схеми комбінованої ЛО+УЗО: а) суміщена; б) роздільна

Відомо, що лазерне поверхневе термозміцнення може бути реалізовано за способом підтримання постійної потужності лазера або способом підтримання постійної температури поверхні в зоні дії лазерного променя (рис. 2).

Для підвищення ефективності процесу обробки запропоновано спосіб лазерного поверхневого термозміцнення з використанням волоконного лазера і сканатора та розроблено програмне забезпечення для підтримання постійної температури нагрівання в зоні дії лазерного променя (рис. 2 в), що дозволяє уникнути небажаного перегріву або оплавлення складних за конструкцією та крайових зон оброблюваної деталі за рахунок автоматизованої системи контролю температури нагрівання пірометром, пропорційно-інтегральним контролером та спеціальної плати збору та обробки даних.

Пропорційно-інтегральний контролер дозволяє регулювати різницю між виміряною температурою нагрівання  $T_e$  в зоні дії лазерного променя і заданою температурою  $T_3$  ( $e(t_i) = T_3 - T_e(x(t_i), t_i)$ ), змінюючи потужність лазера:

$$P(t_{i+1}) = k_p e(t_i) + k_i \int_{t_0}^{t_i} e(t) dt, \quad (1)$$

де  $P$  – потужність лазера,  $k_p$  – коефіцієнт пропорційності,  $k_i$  – константа інтегрування,  $e(t)$  – різниця між сигналом зворотного зв'язку і заданим.

Під час ЛО (з метою підтримання постійної температури в зоні обробки) виміряні пірометром значення температури поверхні передавалися (через пропорційно-інтегральний контролер) на спеціальну плату збору та обробки даних (перетворювала цифрові сигнали в аналогові і навпаки), з якої аналогові сигнали

(пропорційні потужності лазерного випромінювання) поступали до системи керування лазера.

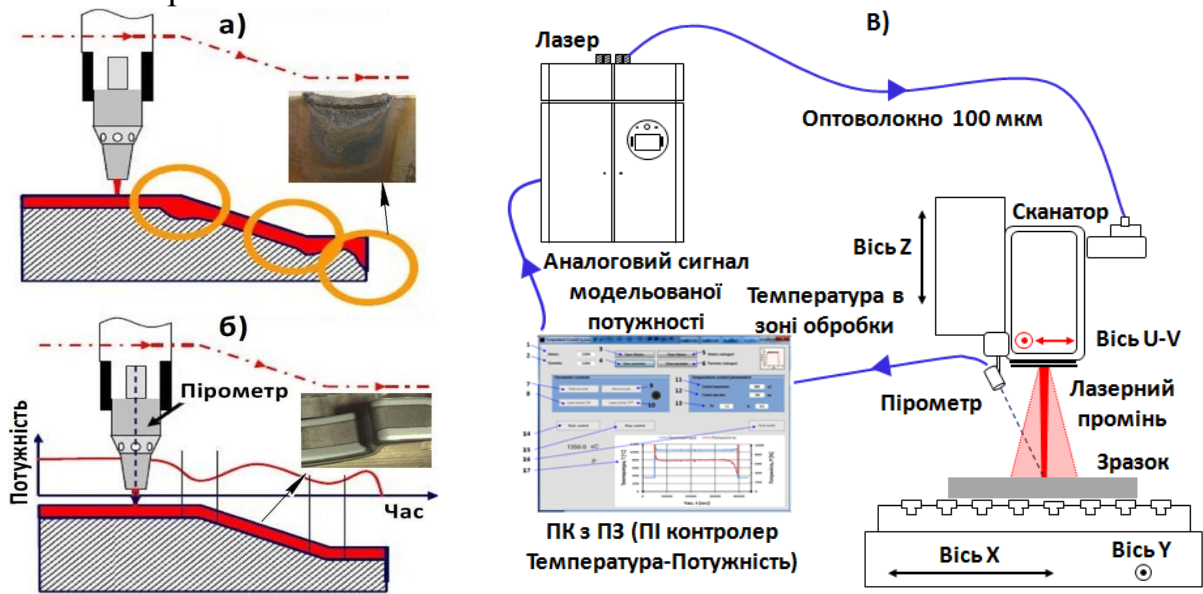


Рис. 2. Схеми лазерного термозміцнення за способом підтримання постійної потужності лазера (а), за способом підтримання постійної температури (б) та з використанням волоконного лазера і сканатора (в)

Враховуючи, що термокінетичний процес лазерної термообробки складається з циклів нагрівання та охолодження, а кінцеві властивості матеріалу пов'язані зі структурно-фазовими перетвореннями, які є функцією температури, часу і термофізичних властивостей матеріалу, для прогнозування діапазону температури повної аустенізації, використано термокінетичну модель:

$$\begin{aligned}
 A_{C1} &= 723 - 7.08Mn - 37.7Si - 18.1Cr + 44.2Mo + \dots - 28V^2, \\
 A_{C3} &= 910 - 370C - 27.4Mn - 27.3Si - 6.35Cr - 32.7Ni + \dots - 60.2V^2, \\
 A_{Cm} &= 244.4 + 992.4C - 465.1C^2 + 46.7Cr + 19CCr - \dots + 16.7SiMn, \\
 A_{r1} &= P_n - 305.4C - 118.2Mn, \quad P_n = A_{C1} - 10.7Mn + 29Si + 16.9Cr, \\
 A_{r3} &= 910 - 310C - 80Mn - 20Cu - 15Cr - 55Ni - 80Mo + 0.35(h - 8), \\
 M_n &= 561 + 474C - 33Mn - 17.7Ni - 12.1Cr - \dots - 705Si \quad \text{та} \quad M_k = M_n - 215.
 \end{aligned} \tag{2}$$

де  $A_{C1}$ ,  $A_{C3}$ , ...,  $M_n$ ,  $M_k$  – критичні точки температур структурно-фазових перетворень сталей [°C],  $C$ ,  $Mn$ , ...,  $Mo$  – хімічний склад матеріалу [%],  $h$  – товщина зразка [мм].

А прогнозування мікротвердості зміцненого шару лазерним променем оцінювали згідно правила адитивності змішування часток фаз та їх мікротвердості:

$$HV = X_M HV_M + X_B HV_B + X_{F+P} HV_{F+P}, \tag{3}$$

де  $X_M$ ,  $X_B$ ,  $X_{F+P}$  – об'ємні частки мартенситу, бейніту та суміші фериту і перліту [%], відповідно,  $HV_M$ ,  $HV_B$ ,  $HV_{F+P}$  – мікротвердість мартенситу, бейніту та суміші фериту і перліту [кг·с/мм<sup>2</sup>].

В тепловій задачі при загартуванні лазерним променем, що сканується для отримання рівномірної і бездефектної поверхні необхідно врахувати не тільки просторову, а й часову структуру теплового джерела. Для цього поверхню зразка опромінювали лазерним променем прямокутної форми з високою густиною потужності при відносному переміщенні зразка (рис. 3 а).

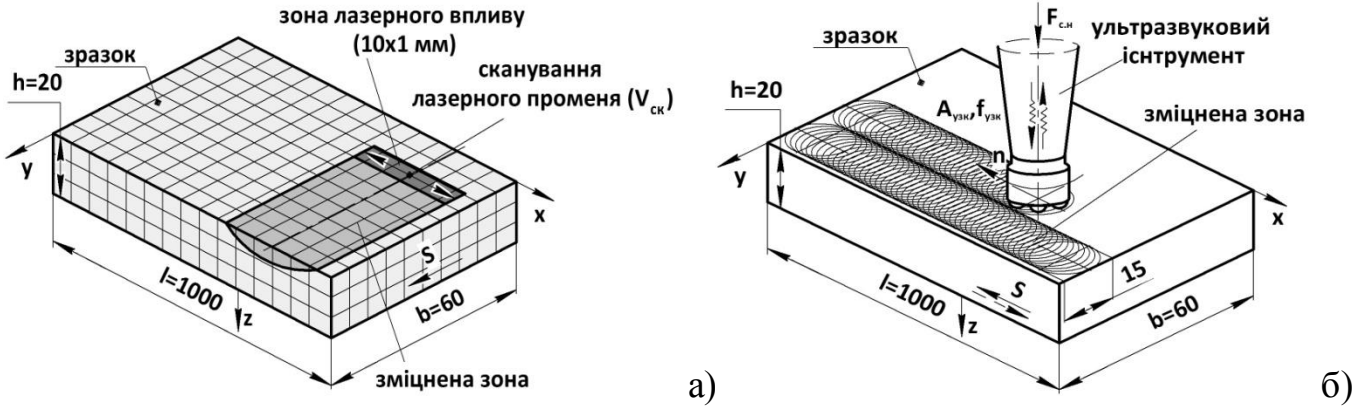


Рис. 3. Моделювання лазерного термічного та ультразвукового деформаційного зміцнення: а) розрахункова схема ЛО; б) розрахункова схема УЗО

Розподіл температури в однорідному та ізотропному матеріалі в прямокутній системі координат описували рівнянням з граничними умовами на поверхні оброблюваного зразка в зоні дії ( $\lambda[\partial T(x, y, 0, t) / \partial z] + W_{mn}(x, y, t) = 0$ ) та поза зоною дії лазерного променя ( $\lambda[\partial T(x, y, 0, t) / \partial z] + \alpha(T_3^0 - T(x, y, 0, t)) = 0$ ):

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (4)$$

де  $T$  – температура поверхні матеріалу зразка в точці з координатами  $(x, y, z)$  в момент часу  $t \in [0, T_k]$ ,  $\rho$  – густина матеріалу зразка  $[\text{кг}/\text{м}^3]$ ,  $c(T)$  – коефіцієнт теплоємності матеріалу зразка  $[\text{Дж}/\text{кг}^\circ\text{C}]$ ,  $\lambda(T)$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу зразка  $[\text{Вт}/\text{м}^\circ\text{C}]$ ,  $l, b, h$  – довжина, ширина та висота зразка  $[\text{см}]$ .

Розрахована густина потужності  $W_{mn}$  знаходилася в діапазоні від  $10^3 \dots 10^4 \text{ Вт}/\text{см}^2$  при тривалості лазерного впливу  $0.42 \dots 1.5 \text{ с}$ , що забезпечувало поверхневе термічне зміцнення без оплавлення поверхні на глибині  $0.14 \dots 0.44 \text{ мм}$ . А отримані величини затраченої енергії при ЛО склали  $25 \dots 105 \text{ кДж}/\text{см}^2$ .

Згідно рівнянь (2), розраховані критичні точки температур структурно-фазових перетворень сталей, зокрема для сталі 45 ( $A_{C1} = 712^\circ\text{C}$ ,  $A_{C3} = 784^\circ\text{C}$ ,  $A_{r1} = 603^\circ\text{C}$ ,  $A_{r3} = 710^\circ\text{C}$ ,  $P_n = 693^\circ\text{C}$ ,  $B_n = 546^\circ\text{C}$ ,  $M_n = 358^\circ\text{C}$ ,  $M_k = 243^\circ\text{C}$ ) дозволяють визначити діапазон температури повної аустенізації та утворення мартенситу лазерним променем (рис. 4). Розрахована величина мікротвердості поверхневого шару сталі 45 добре корелює з отриманими експериментальними даними.

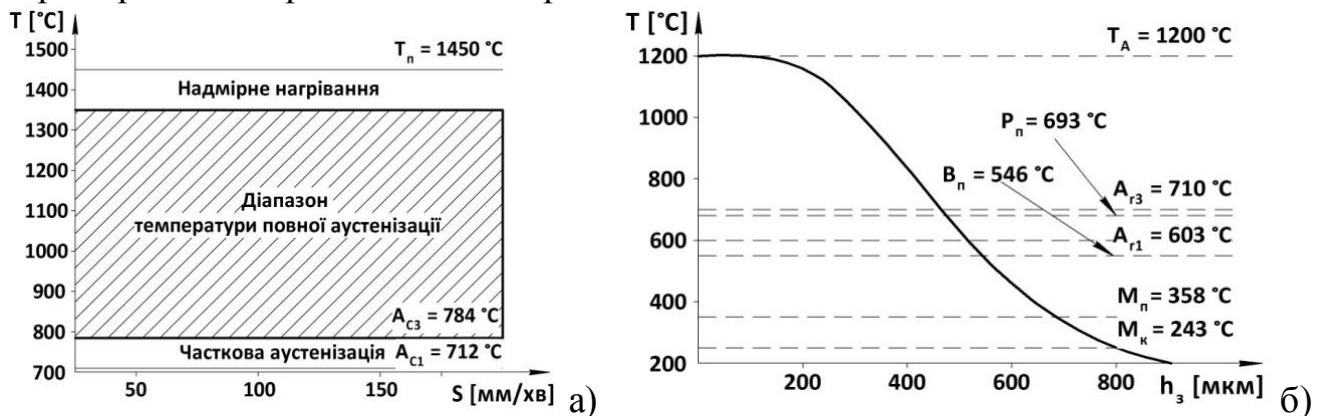


Рис. 4. Температурний діапазон зміни критичних точок сталі 45: а) утворення аустеніту; б) утворення мартенситу по глибині зразка

Таким чином, розраховані критичні точки температур структурно-фазових перетворень та результати розподілу температури по глибині сталі 45, з використанням запропонованого способу підтримання постійної температури в зоні дії лазерного променя, що сканувався та встановлених обмежень вихідних параметрів процесу нагрівання ( $T_{AC3} < T_{max} < T_{nl}$ ), дозволили попередньо визначити діапазон температури повної аустенізації, а також прогнозувати отримання необхідних параметрів поверхневого шару сталевих деталей.

Враховуючи, що взаємодія інструменту з обробленою поверхнею при багаторазовій ударній дії з використанням УЗ коливань нелінійна, швидкість загальної деформації оброблюваної поверхні від часу при УЗ ударному навантаженні змінюється по гармонічному закону (рис. 3 б):

$$\dot{\varepsilon} = A \cos \omega t H(\sin \omega t), \quad (5)$$

де  $A$  – константа, яка визначається амплітудою УЗ коливань і товщиною зразка,  $H(\sin \omega t)$  – функція Хевісайда,  $\omega$  – частота УЗ коливань,  $t$  – тривалість обробки.

З урахуванням, що при УЗ навантаженні поверхня деформується як пружно, так і пластично основне рівняння динамічної моделі для УЗО має вигляд:

$$A \cos \omega t H(\sin \omega t) = \frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt} + \xi b \nu \frac{\rho_m}{M} \exp \left[ -\frac{U - V(\sigma - \sigma_p)}{kT} \right], \quad (6)$$

де  $E$  – модуль Юнга,  $\rho_m$  – густина рухомих дислокацій,  $b$  – вектор Бюргерса,  $\nu$  – константа матеріалу,  $M$  – орієнтаційний фактор Тейлора,  $U$  – енергія активації руху дислокацій,  $k$  – постійна Больцмана,  $T$  – абсолютна температура,  $V$  – активаційний об'єм,  $\xi$  – відстань, яку проходить дислокація при подоланні потенціального бар'єру,  $\sigma_p$  – внутрішнє напруження, яке обумовлене дислокаціями.

У рівнянні (6) перший доданок правої частини рівняння описує швидкість пружної деформації, яка визначається у відповідності із законом Гука, а другий доданок – швидкість пластичної деформації від напруження згідно термоактиваційної моделі пластичної деформації металів по механізму Пайєрлса. Для розв'язання основного рівняння моделі (6) використовували безрозмірні параметри та числові методи розв'язання диференціальних рівнянь за допомогою програми TurboPascal 7.1.

Розрахункові залежності показують, що при вихідних параметрах сталі 45 ( $\varepsilon_0 = 10^{-4}$ ,  $E = 205$  ГПа,  $V = 2 \cdot 10^{-25}$  м<sup>3</sup>,  $T = 300$  К), збільшення тривалості УЗО веде до зростання накопиченої пластичної деформації та зменшення швидкості пластичної деформації.

Для визначення теплових потоків для пари підшипникова сталь-вуглецева сталь використовували наступні теплофізичні характеристики (при  $T = 20$  °С):  $\lambda_{yzi} = 40$  Вт/м°С,  $\lambda_3 = 50$  Вт/м°С,  $\alpha_{yzi} = 1.172 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с,  $\alpha_3 = 2.3 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с,  $\rho_{yzi}$ ,  $\rho_3 = 7800$  кг/м<sup>3</sup> при діаметрі зони контакту 15 мм та тривалості УЗО 1.5 с.

Розрахункові величини теплових потоків дорівнювали для інструменту  $W_{yzi} = 171.88$  Вт/м<sup>2</sup> та зразка  $W_3 = 6.54$  Вт/м<sup>2</sup> з урахуванням коефіцієнту тертя  $\mu_m \sim 0.65$ , статичного навантаження УЗ інструменту  $F_c = 50$  Н, швидкостей нормального  $v_{\perp}$  та поперечного руху  $v_{\parallel}$  бойків УЗ інструменту  $v_{yzi} = (v_{\perp} + v_{\parallel}) = 5.5$  м/с та швидкості руху зразка  $v_3 = 0.01$  м/с.

Розподіл деформаційного розігріву  $\Delta T(z)$  поверхні на глибині  $z$  оцінювали:

$$\Delta T(z) = 1 / Pe^+ \left\{ f(y) + (Pe^- T_{yzi}^0 + 2(1 - K_0) \sqrt{Pe_3 T_3^0}) \cdot \operatorname{erfc} \left( z / 2 \sqrt{\tau_{y3}} \right) \right\} + T_{yzi}^0,$$

$$f(y) = 2 \sqrt{\pi / \tau_{y3}} \exp(-z^2 / 4\tau_{y3}) - z \cdot \operatorname{erfc} \left( z / 2 \sqrt{\tau_{y3}} \right), Pe^\pm = K_0 \sqrt{Pe_{yzi}} \pm (1 - K_0) \sqrt{Pe_3}, \quad (7)$$

$$K_0 = (\lambda_{yzi} / (\lambda_{yzi} + \lambda_3)), Pe_{yzi} = 2d_n \rho_3 / \alpha_{yzi}, Pe_3 = 2d_n \rho_{yzi} / \alpha_3,$$

де  $Pe_{yzi}$ ,  $Pe_3$  – критерії Пекле для УЗ інструменту та зразка,  $T_{yzi}^0$  та  $T_3^0$  – початкова температура бойків та зразка [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $\rho_{yzi}$  та  $\rho_3$  – густина матеріалу бойків та зразка [ $\text{кг}/\text{м}^3$ ],  $d_n$  – діаметр зони контакту [ $\text{м}$ ],  $\tau_{y3}$  – тривалість УЗО [ $\text{с}$ ].

Результати розрахунку, згідно формул (7), дозволили визначити зміну температури нагрівання по глибині зразка та визначити температуру деформаційного розігріву на оброблюваній поверхні сталі 45, яка складала  $40^{\circ}\text{C}$ .

**У третьому розділі** описано властивості досліджених матеріалів, обладнання та методики виконання експериментальних досліджень. Для проведення систематичних досліджень вибрали сталі 45 та Х12МФ, виходячи із широкого використання їх в машинобудуванні та які працюють в екстремальних умовах.

Експериментальні дослідження ЛО проводили на кафедрі лазерної техніки та фізико-технічних технологій, а також в Університеті Країни Басків (Іспанія) з використанням технологічного лазерного комплексу, який містить волоконний лазер Rofin Sinar FL010 з максимальною вихідною потужністю 1 кВт, установку з числовим програмним керуванням (ЧПК), 2D оптичну систему Scanlab Hurryscan25, оптоволокну діаметром 100 мкм, лазерний двоколірний пірометр Impac Igar 12LO та спеціальну плату збору та обробки даних з програмним забезпеченням. ЛО зразків здійснювали при швидкості сканування 1000 мм/с та ширині сканування 10 мм лазерного променя, температурі нагрівання  $900 \dots 1340^{\circ}\text{C}$  та швидкості переміщення зразка  $40 \dots 140$  мм/хв.

Проведення експериментальних досліджень УЗО здійснювали в Інституті металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАНУ на технологічній УЗ установці з ЧПК, що включала ультразвуковий генератор УЗГ250 (частотою 21.6 кГц і потужністю 0.3 кВт) та ультразвукову коливальну систему (УЗКС) з п'єзокерамічним перетворювачем, ступінчастим концентратором та багатобойковим наконечником із сімома циліндричними бойками. УЗО зразків здійснювали при статичному навантаженні УЗКС 50 Н, частоті обертання наконечника  $76 \text{ об}^{-1}$ , амплітуді УЗ коливань концентратора  $15 \dots 18$  мкм та тривалості обробки  $60 \dots 240$  с.

При дослідженні мікрорельєфу поверхні та мікроструктури поверхневих шарів використовували: оптичний профілометр Leica DCM3D, дифрактометри ДРОН-3М та Rigaku Ultima IV, оптичний мікроскоп Nikon Optiphot-100, електронний мікроскоп JEM-CX100 JEOL, цифрові мікротвердомір FM800 та твердомір Computest SC.

Параметри профілю мікрорельєфу визначали у відповідності з міжнародним стандартом ISO4287, а параметри топографії мікрорельєфу – ISO25178.

Рентгенівські дослідження проводили методом « $\Theta-2\Theta$ » з графітовим монохроматором у випромінюванні  $\text{CuK}\alpha$ . Величину макронапружень поверхневих шарів оцінювали по зміні міжплощинних відстаней, а величину мікронапружень

решітки та розмірів областей когерентного розсіювання (ОКР) – по розширенню дифракційних максимумів методом Вільямсона-Холла та рівняння Шерера.

Зразки для електронної мікроскопії готували після механічної обробки подальшим одностороннім поліруванням в хлоро-металевому електроліті за методом Болмана для отримання інформації про структуру приповерхневих шарів товщиною близько 15...20 мкм.

Теоретичну оцінку внеску різних механізмів зміцнення на сумарний приріст границі плинності проводили згідно теорій Пайєрлса-Набарро, Холла-Петча та інш., що дозволяє прогнозувати властивості зміцнених поверхонь та коригувати режими технологічних процесів з урахуванням необхідних структурно-фазових параметрів. Внесок різних механізмів зміцнення на границю плинності оцінювали:

$$\sigma_T = \sigma_0 + \Delta\sigma_z + \Delta\sigma_c + \Delta\sigma_{mp} + \Delta\sigma_d + \Delta\sigma_{dc}, \quad (8)$$

де  $\sigma_0$  – напруження тертя решітки  $\alpha$ -заліза [МПа],  $\Delta\sigma_z$ ,  $\Delta\sigma_c$ ,  $\Delta\sigma_{mp}$ ,  $\Delta\sigma_d$ ,  $\Delta\sigma_{dc}$  – зернограничне, субструктурне, твердорозчинне, дислокаційне та дисперсійне зміцнення [МПа].

Експериментальні дослідження зміцнених поверхонь на зношування проводили на автоматизованому трибологічному комплексі в Інституті проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича НАНУ за умов квазістатичних та динамічних режимів навантаження. Випробування зразків протягом 15 та 45 хв проводили зворотно-поступальним ковзанням індентора (з нітриду кремнію, діаметром 8 мм, твердістю 1550 ГПа) з частотою 1 Гц та швидкістю ковзання 0.013 м/с вздовж доріжки 4 мм по поверхні плоских зразків в інертному середовищі при статичному навантаженні  $F_c = 30$  Н (квазістатичний режим навантаження). А динамічну складову сили нормального навантаження (динамічний режим навантаження) при середньому значенні статичного навантаження  $F_c \sim 30$  Н задавали у вигляді механічних коливань, які прикладалися одночасно з статичною силою. Величина амплітуди динамічної складової  $\Delta F_c$  складала 10% від статичного навантаження ( $\Delta F_c = 3$  Н), а частота динамічної складової – 25 Гц. Силу тертя  $F_m$  оцінювали за допомогою тензометричних вимірювань зміщення пружного елемента, який жорстко з'єднаний з випробуваним зразком. Величину зношування визначали за профілем і топографією доріжок тертя з використанням профілографа Калібр К-201 та оптичного профілометра Leica DCM3D. Опір до зношування оброблених поверхонь визначали згідно кривої Аббота-Файєрстоуна, а також з використанням рівняння Арчарда та комплексних параметрів.

Випробування поверхонь зразків із сталі 45 на корозійну стійкість проводили при витримці у 3% розчині NaCl за кімнатної температури, з використанням мікроскопу Bresser Biolux LCD, в Інституті хімії поверхні ім. О.О.Чуйка НАНУ.

Планування експериментів проводили згідно багатофакторного експерименту окремо як для ЛО, так і для УЗО, а статистичну обробку отриманих результатів – за допомогою програмного пакету «Design-Expert».

**У четвертому розділі** наведено результати впливу технологічних режимів ЛО та УЗО на зміну геометричних розмірів зони зміцнення, мікроструктури, твердості, залишкових напружень та параметрів мікрорельєфу поверхневого шару, а також випробування зразків на зносо- та корозійну стійкість.

Отримані результати експериментальних досліджень, з використанням методу математичного планування експерименту, дозволили звузити область технологічних режимів окремо як для ЛО, так і УЗО, виходячи з максимальної глибини/ширини зміцнення і твердості/мікротвердості при ЛО та мінімальних параметрів мікрорельєфу і максимальної твердості поверхні при УЗО (рис. 5).

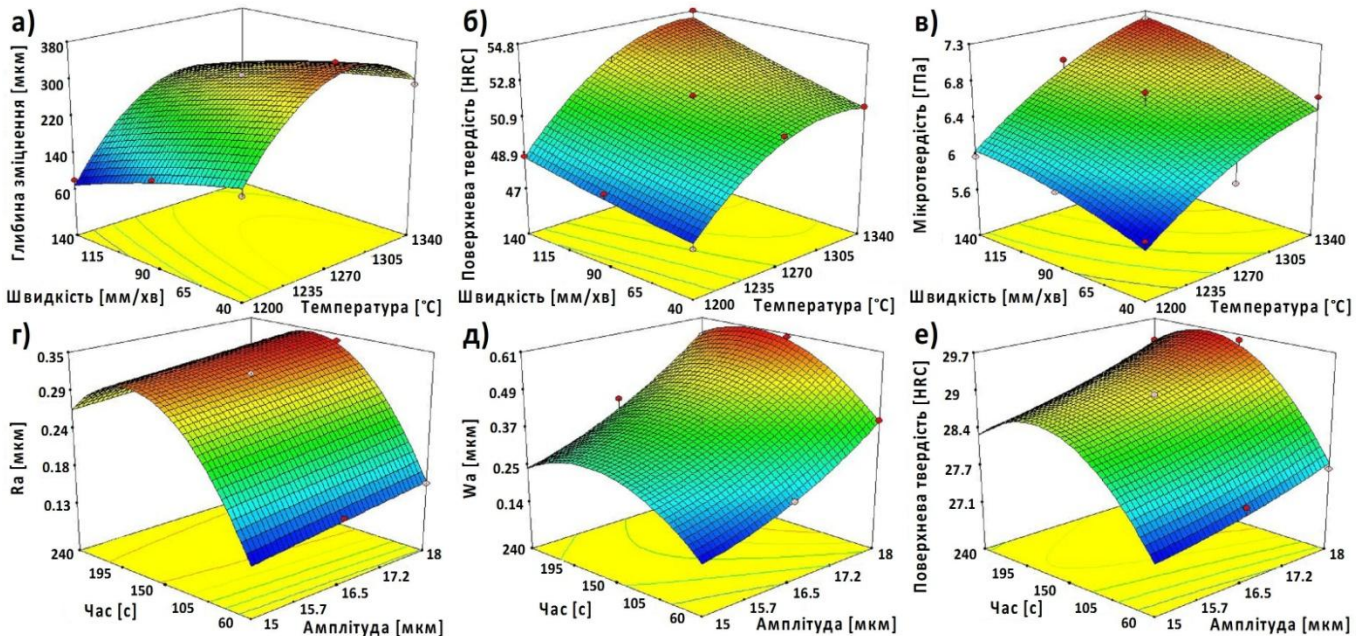


Рис. 5. Вплив температури нагрівання і швидкості ЛО на: а) глибину зміцнення; б) поверхневу твердість; в) мікротвердість та амплітуди УЗ коливань і тривалості УЗО на: г) шорсткість; д) хвилястість; е) поверхневу твердість сталі Х12МФ

Для сталі 45 діапазон температури нагрівання складає 1200...1300 °С, а для сталі Х12МФ – 1270...1340 °С, швидкість переміщення зразка 90 мм/хв при швидкості сканування лазерного променя 1000 мм/с та ширині сканування лазерного променя 10 мм, а амплітуда УЗ коливань концентратора 18 мкм та тривалість УЗО 60 с для сталі 45 та 120 с для сталі Х12МФ при статичному навантаженні УЗКС 50 Н та частоті обертання наконечника 76 об<sup>-1</sup>.

Крім того, виявлено, що при ЛО спостерігається зменшення глибини зміцнення та збільшення мікротвердості поверхневого шару зі збільшенням швидкості. Для отримання рівномірних величин глибини зміцнення та мікротвердості термічно зміцнених доріжок, використано повторну дію лазерним променем та встановлено оптимальний коефіцієнт перекриття 20...25% незалежно від типу сталі. А при УЗО спостерігається зменшення твердості поверхні зі збільшенням тривалості обробки за рахунок індукованого перенаклепу, що ініціює формування деформованого шару з утворенням виривів, локальних пор та відшаровувань поверхневого шару.

Встановлено, що комбінована ЛО+УЗО, при оптимальних режимах, формує регулярний мікрорельєф із незначною хвилястістю в порівнянні з окремою УЗО завдяки значно більшій твердості поверхні зразка після ЛО, що сприяє руйнуванню мікронерівностей та видаленню продуктів зношування, а також фрагментації та видаленню оксидної плівки після термічної дії, за рахунок одночасної примусової обертальної та багаторазової ударної дії бойків, яка супроводжується інтенсивним тертям з проковзуванням бойків на оброблюваній поверхні (рис. 6 а).

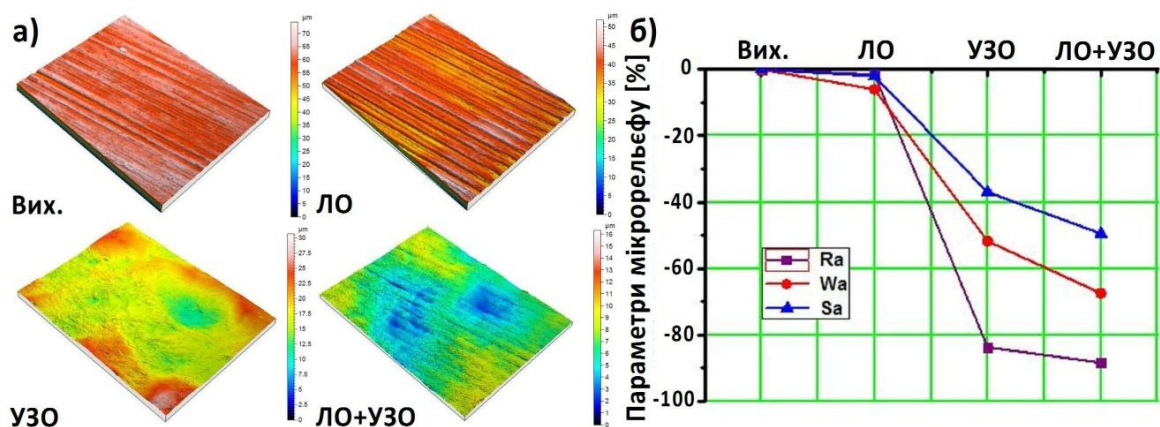


Рис. 6. Топографія (а) та параметри (б) мікрорельєфу поверхні сталі Х12МФ

У порівнянні з вихідним станом комбінована обробка, зокрема сталі Х12МФ, зменшила параметр шорсткості  $R_a$  в 6...8 разів, а також забезпечила сприятливі умови для утворення необхідної маслоємності поверхонь деталей за рахунок формування хвилястого регулярного мікрорельєфу з низькими параметрами шорсткості та хвилястості, що сприяє менш інтенсивному зношуванню (рис. 6 б).

Рентгеноструктурним аналізом підтверджено, що УЗО після ЛО сприяє руйнуванню і майже повністю видаленню з поверхні оксидів заліза, а також формуванню гарантованих залишкових напружень стиску (-409 МПа), що на дифрактограмах проявляється в зменшенні інтенсивності дифракційних максимумів та зміщенні дифракційного максимуму (310)  $\alpha$ -фази в бік менших кутів дифракції в порівнянні з вихідним станом (рис. 7).

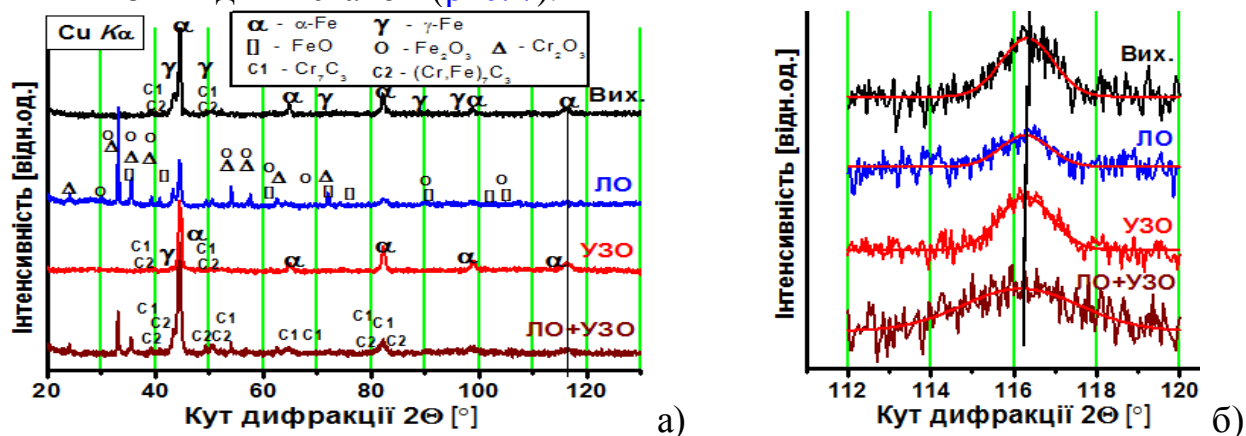


Рис. 7. Дифрактограми (а) та дифракційні максимуми (310)  $\alpha$ -фази (б) сталі Х12МФ у вихідному стані, після ЛО, УЗО та комбінованої ЛО+УЗО

Крім того, найширше розширення дифракційних максимумів спостерігається після комбінованої лазерно-ультразвукової обробки сталі Х12МФ, що свідчить про суттєвий внесок подрібнення ОКР при значно більших величинах мікронапружень решітки ( $\sim 0.47\%$ ). Найбільше розширення максимуму  $\alpha$ -фази спостерігається при оптимальній швидкості лазерної термообробки (90 мм/хв). Також встановлено, що комбінована ЛО+УЗО формує більш складний розподіл залишкових напружень по глибині зміцненого шару та підвищує величину залишкових напружень стиску приповерхневого шару в 2 рази в порівнянні з окремою ЛО.

Визначені критичні глибини переходу залишкових напружень стиску в напруження розтягу добре узгоджуються із зоною термічного впливу (ЗТВ) та

зоною деформаційного впливу (ЗДВ) в поперечному перерізі та розподілом мікротвердості по глибині поверхневого шару (рис. 8). Виявлено, що товщина ЗДВ після комбінованої обробки є природно тоншою в порівнянні з окремою УЗО внаслідок високої твердості та низької пластичності поверхні після ЛО.

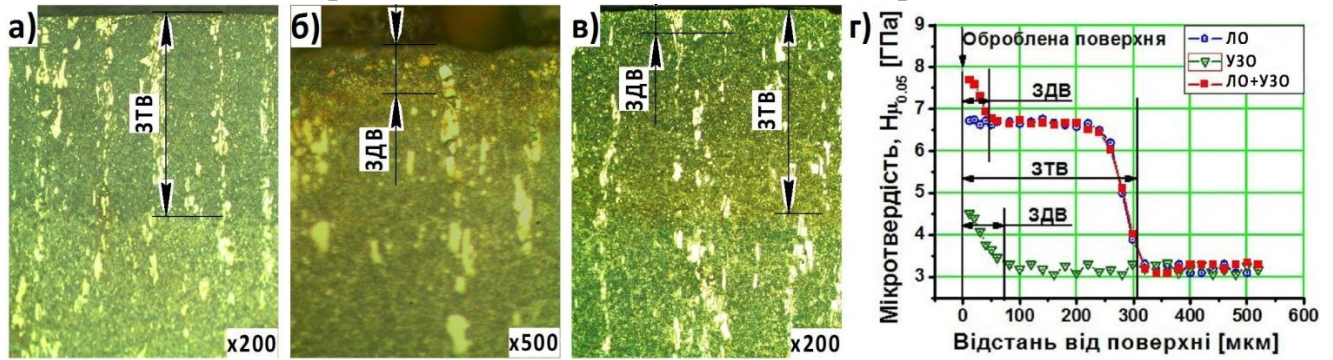


Рис. 8. Мікроструктура (ЛО (а); УЗО (б); комбінована ЛО+УЗО (в)) та розподіл мікротвердості (г) поверхневого шару сталі Х12МФ

УЗО після ЛО сталі Х12МФ призводить до підвищення мікротвердості поверхневого шару (рис. 8 г) та поверхневої твердості до 25% в порівнянні з окремою ЛО за рахунок подрібнення мартенситної структури і карбідів хрому та більш рівномірному їх розподілу, а також підвищенню густини дислокацій та зниженню залишкового аустеніту. В порівнянні з вихідним станом дана комбінована технологія підвищує твердість поверхні приблизно в 2.5 і більше разів.

Електронно-мікроскопічні дослідження підтверджують, що структура поверхневого шару сталі Х12МФ у вихідному стані (рис. 9 а) характеризується незначною густиною дефектів і містить велику кількість світлих областей значно меншої товщини, ніж товщина фольги, які утворюються в місцях витравлювання карбідів хрому. Розміри цих областей і наявних в полі зору карбідних частинок свідчать, що розмір первинних карбідів складає ~ 350 нм. УЗО веде до суттєвого зростання густини дислокацій та до деякого зменшення розмірів і кількості карбідів у мікроструктурі поверхневого шару товщиною 15...20 мкм. У субзернах легованого фериту видно щільні дислокаційні сітки (рис. 9 б). Після ЛО цієї сталі поверхневий шар містить два види структур: в деяких областях спостерігаються системи видовжених зерен мартенситної природи, а в інших – подрібнена зернова структура фериту з великою кількістю вторинних дисперсних карбідів та певною кількістю первинних карбідів по границям зерен/субзерен (рис. 9 в).

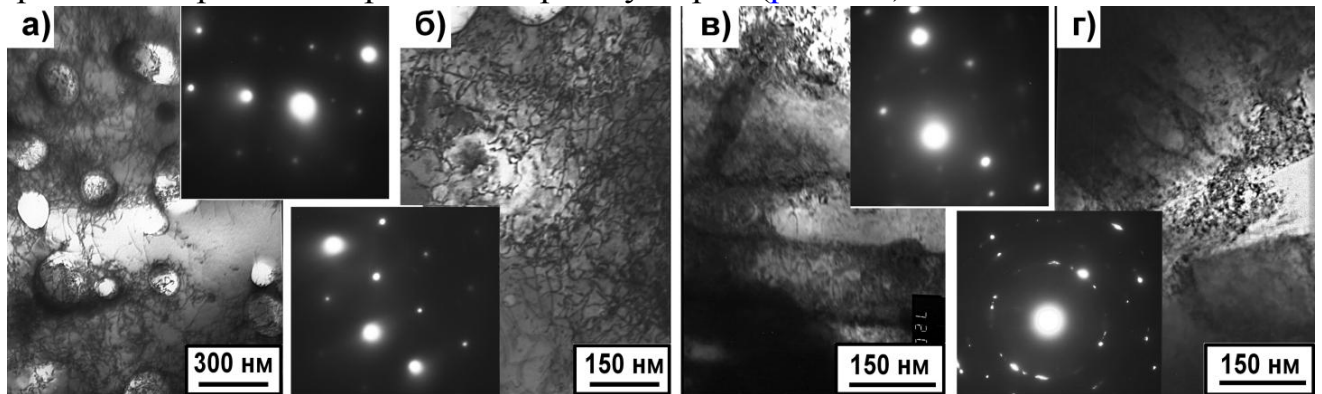


Рис. 9. Електронно-мікроскопічні зображення мікроструктури сталі Х12МФ: а) вихідний стан; б) УЗО; в) ЛО; г) комбінована ЛО+УЗО

А після комбінованої обробки формується ультрадисперсна зернова структура (~ 80 нм), границі якої заблоковані великою кількістю вторинних дисперсних карбідів (~ 20 нм). Про наявність великої кількості сильно розорієнтованих зерен в структурі поверхневого шару свідчить значне азимутальне розмиття рефлексів фериту на картині електронної дифракції (рис. 9 г).

Встановлено, що при ЛО та комбінованій ЛО+УЗО сталі Х12МФ величина границі плинності визначається зернограничним, твердорозчинним та дисперсним зміцненням, а при УЗО – дислокаційним, твердорозчинним та зернограничним (субструктурним) зміцненням. Внесок зернограничного зміцнення при ЛО та комбінованій ЛО+УЗО є основним і становить близько 47% та 51% відповідно. При УЗО основний внесок в зміцнення вносить дислокаційна складова (~ 34%). Отримані дані узгоджуються з мікроструктурними дослідженнями та добре корелюють з теоретичною оцінкою границі плинності сталі Х12МФ, що пов'язує її з експериментально визначеною величиною мікротвердості зміцненого шару.

Зміцнені поверхні комбінованою обробкою приводять до формування мікрорельєфу з мінімальними параметрами профілю, а утворена ультрадисперсна структура із заблокованими карбідами границями зерен здатна забезпечити високу твердість та зменшити величину зношування при квазістатичному навантаженні (СРН) приблизно в 2 рази, а при динамічному (ДРН) – в 4 рази (рис. 10).

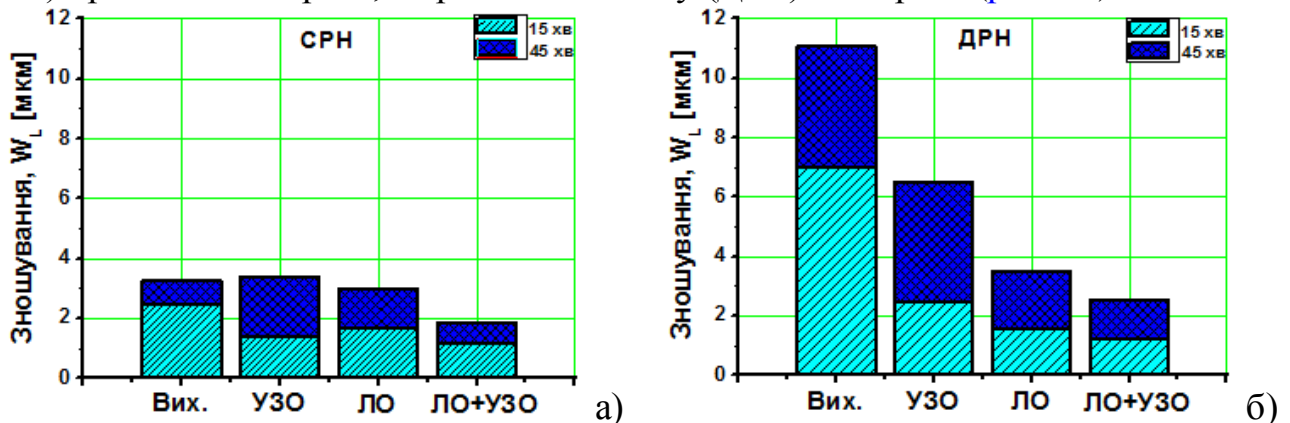


Рис. 10. Величини зношування доріжок тертя сталі Х12МФ:

а) статичний режим навантаження; б) динамічний режим навантаження

Результати експериментальних досліджень величини зношування поверхонь корелюють з теоретичними дослідженнями згідно оцінки профілю шорсткості за кривою Аббота-Файєрстоуна та формули Арчарда.

Крім того, результати експериментальних досліджень корозійної стійкості зміцнених поверхонь показують, що після комбінованої обробки не виявлено зон оксиду заліза на поверхні зразка із сталі 45, при витримці у соляному розчині натрій хлор протягом 6 днів, завдяки сформованого мікрорельєфу та підвищеним фізико-механічним властивостям поверхневого шару.

На основі результатів моделювання та експериментальних досліджень розроблено алгоритм (рис. 11), який передбачає при введенні вхідних параметрів (матеріалу, режимів ЛО та УЗО) визначення оптимальних технологічних режимів комбінованої лазерно-ультразвукової обробки, обмежуючи вихідні параметри зміцненого шару ( $H_{\mu} > 6.0$  ГПа,  $h_3 > 200$  мкм,  $R_a < 0.5$  мкм).

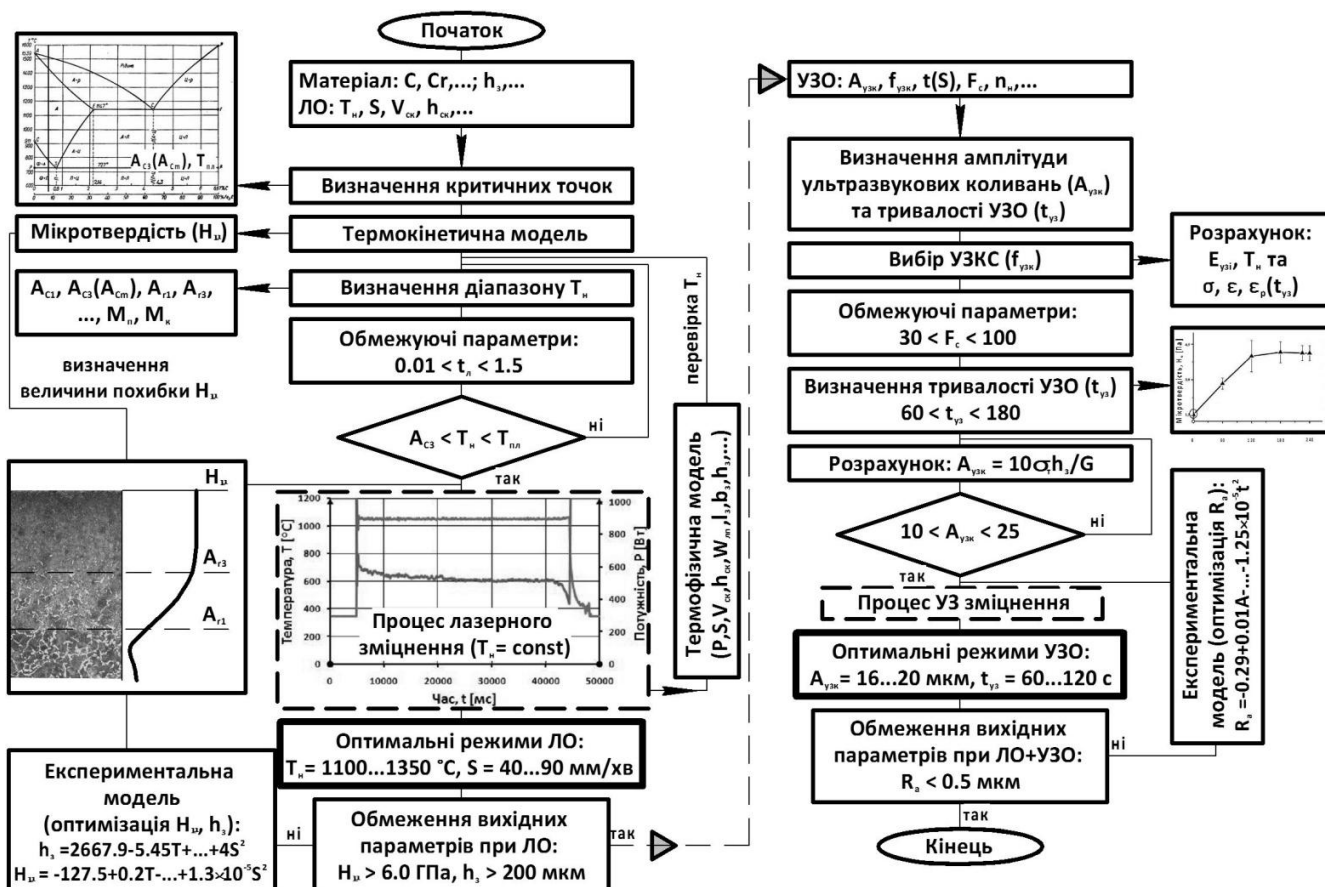


Рис. 11. Алгоритм визначення технологічних режимів комбінованої лазерно-ультразвукової обробки (роздільна схема) сталевих деталей

У п'ятому розділі приведені рекомендації для проектування та практичної реалізації комбінованої ЛО+УЗО, зокрема розроблено кінематичні схеми УЗО з використанням одnobойкових або багатобойкових наконечників для обробки малогабаритних та великогабаритних зовнішніх поверхонь, а також розраховано енергетичні показники ультразвукового інструменту для різних схем за формулою:

$$E_{узи} = f_y E_{ке} / m_{\sigma} = f_y / m_{\sigma} (E_{узк} + E_{дже}), \quad (9)$$

де  $f_y \approx 3 \pm 0.5$  кГц – частота ударного впливу бойків,  $m_{\sigma}$  – маса бойка,  $E_{ке}$  – кінетична енергія бойків,  $E_{дже}$  – додаткова кінетична енергія бойків.

У нашому випадку, при використанні багатобойкового наконечника (зі сімома бойками), механічна енергія УЗ інструменту складала ~ 160 кДж.

Крім того, розроблено конструкцію пристрою для поверхневої ультразвукової оздоблювально-зміцнювальної обробки металів, що сприяє інтенсифікації процесу зміцнення і оздоблювання та підвищенню якості поверхневого шару металевих поверхонь, а також керуючі програми для формування регульованого мікрорельєфу, що дозволяє утримувати мастильні матеріали на контактуючих поверхнях.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень апробовано в умовах підприємства «Полонський гірничий комбінат», якому передано технологічний регламент для реалізації комбінованої ЛО+УЗО, конструкції одно- та багатобойкових наконечників, а також керуючі програми для обробки коронки ковша екскаватора та ролика конвеєра, що дозволить підвищити продуктивність обробки та поліпшити якість поверхневого шару оброблених деталей.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Поліпшення параметрів мікрорельєфу та фізико-механічних властивостей поверхневого шару металевих деталей із отриманням рівномірної глибини зміцнення та уникненням небажаного перегріву і оплавлення складних за конструкцією поверхонь та їх вихідних частин забезпечуються розробленим способом комбінованої лазерно-ультразвукової зміцнювально-оздоблювальної обробки металів з підтриманням постійної температури в зоні дії послідовного переміщення лазерного променя сканатором і програмним забезпеченням за рахунок автоматизованої системи контролю температури в опроміненій зоні та наступним ультразвуковим деформаційним зміцненням багатобойковими наконечниками, а також встановленими функціональними залежностями.

2. Прогнозування діапазону температури нагрівання, структури та мікротвердості поверхневого шару сталей, на основі розрахованих критичних температур фазових перетворень та об'ємних часток структурних складових і їх мікротвердості, забезпечуються термокінетичною моделлю лазерного термозміцнення з підтриманням постійної температури нагрівання в зоні дії послідовного переміщення лазерного променя сканатором. А передбачення вхідних режимів УЗО для отримання якісних параметрів зміцненого шару комбінованою ЛО+УЗО визначаються динамічною моделлю ультразвукового деформаційного зміцнення з визначенням параметрів деформації, а також величини енергії ультразвукової ударної та обертової дії одно- та багатобойкових деформуючих наконечників.

3. Визначення змін мікрорельєфу та фізико-механічних властивостей поверхневого шару, а також випробування поверхонь на зношування за умов квазістатичних та динамічних режимів навантаження забезпечуються розробленими методиками експериментальних досліджень поверхневого шару, на основі сучасних методів і обладнання та математичного планування експерименту, з використанням спеціального лазерного комплексу та технологічної ультразвукової установки.

4. Отримання максимальної глибини зміцнення, твердості та залишкових напружень стиску, а також мінімальних параметрів мікрорельєфу поверхневого шару гарантуються встановленими оптимальними технологічними режимами комбінованої ЛО+УЗО сталей 45 та Х12МФ на основі проведених систематичних теоретичних та експериментальних досліджень, зокрема при швидкості сканування лазерного променя 1000 мм/с, ширині доріжки сканування 10 мм, температурі нагрівання 1300 °С для сталі 45 і 1340 °С для Х12МФ, швидкості переміщенні зразка 90 мм/хв, статичному навантаженні ультразвукової коливальної системи 50 Н, швидкості обертання наконечника 76 об<sup>-1</sup>, амплітуді УЗ коливань концентратора 18 мкм, тривалості УЗО 60 с для сталі 45 та 120 с для сталі Х12МФ.

5. Підвищення в 3...4 рази твердості з глибиною зміцнення поверхневого шару до 270...440 мкм та поліпшення в 2...4 рази параметру шорсткості  $R_a$  мікрорельєфу поверхні в порівнянні з вихідними параметрами, а також збільшення в 2 рази (сталь Х12МФ) залишкових напружень стиску в приповерхневому шарі у порівнянні з ЛО, зменшення більше чим в 2 рази величини зношування поверхні сталі Х12МФ,

а поверхні сталі 45 – в 4 рази, а також підвищення корозійної стійкості оброблених поверхонь забезпечуються розробленими пристроями для комбінованої ЛО+УЗО.

6. Отримання рівномірних значень глибини і ширини, мікротвердості термічно зміцнених доріжок та параметрів мікрорельєфу поверхні сталей 45 та Х12МФ гарантуються величиною коефіцієнту перекриття доріжок 20...25% при повторній дії лазерного променя, що сканується, з підтриманням постійної температури нагрівання. Автоматизація лазерного термозміцнення великогабаритних деталей з перекриттям лазерного променя реалізується розробленими керуючими програмами.

7. Розробка та реалізація процесів оздоблювання і зміцнення поверхневого шару сталевих деталей із визначенням технологічних режимів комбінованої дії лазерного променя (температура нагрівання, швидкість ЛО) та ультразвукової динамічної дії багатобойковими наконечниками (амплітуда ультразвукових коливань концентратора, тривалість УЗО), з урахуванням обмежень вихідних параметрів ( $H_{\mu} > 6.0$  ГПа,  $h_z > 200$  мкм,  $R_a < 0.5$  мкм) забезпечуються розробленим алгоритмом.

8. Підвищення в 3...4 рази продуктивності процесу обробки великогабаритних деталей забезпечуються розробленою конструкцією пристрою для ультразвукової оздоблювально-зміцнювальної обробки металів з використанням дискретної ультразвукової дії багатобойкових деформуючих наконечників та програмним методом формування поверхонь деталей з регульованим мікрорельєфом на верстатах з ЧПК. Поліпшення якості та підвищення зносостійкості поверхневого шару сталевих деталей реалізуються запропонованим технологічним регламентом комбінованої лазерно-ультразвукової зміцнювально-оздоблювальної обробки, конструкцію одно- та багатобойкових наконечників, а також керуючими програмами для обробки коронки ковша екскаватора та ролика конвеєра на ПАТ «Полонський гірничий комбінат».

## ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Lesyk D.A. Surface microrelief and hardness of laser hardened and ultrasonically peened AISI D2 tool steel / D.A. Lesyk, S. Martinez, V.V. Dzhemelinskyy, A. Lamikiz, B.N. Mordyuk, G.I. Prokopenko // Surface and Coating Technology. – 2015. – Vol. 278. – P. 108-120. Включено до міжнародної науково-дослідної бази ELSEVIER. (Здобувачем проведено експерименти лазерної обробки, вимірювання та аналіз параметрів мікрорельєфу і мікродюрометричних характеристик зон лазерної та ультразвукової обробки, підготовлено ілюстрації і текст).

2. Лесик Д.А. Особливості формування мікрорельєфу та мікротвердості термічно зміцнених зон сканувальним лазерним променем / Д.А. Лесик, В.В. Джемелінський // Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. – 2015. – №1(73). – С. 100-106. Включено до науково-метричних баз ВІНТІ, РІНЦ. (Дисертантом проведено експерименти, вимірювання та аналіз параметрів мікрорельєфу і мікродюрометричних характеристик зон впливу лазерним сканувальним променем).

3. 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(68). – С. 15-18. Включено до науково-метричних баз ВІНТІ, РІНЦ.

*(Здобувачем запропоновано методику визначення температурно-часового режиму термодеформаційного циклу пластичного деформування ультразвуковим наконечником).*

4. Джемелінський В.В. Перспективи використання лазерно-ультразвукового оздоблювання та зміцнення поверхонь деталей / В.В. Джемелінський, Г.В. Конашевич, Д.А. Лесик // Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. – 2012. – №64. – С. 184-189. Включено до науково-метричних баз ВІНТІ, РІНЦ. *(Здобувачем проведено опрацювання результатів експерименту).*

5. Джемелінський В.В. Комбіноване лазерно-ультразвукове поверхневе зміцнення деталей і можливості його використання при виробництві та ремонті обладнання / В.В. Джемелінський, Д.А. Лесик // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). ПолтНТУ. – 2014. – №3(42). – С. 61-69. *(Здобувачем запропоновано лазерну термообробку за способом підтримання постійної температури нагрівання, проведено експериментальні дослідження та опрацювання їх результатів).*

6. Джемелінський В.В. Вплив імпульсних лазерно-ультразвукових джерел енергії на формування поверхневого шару деталей / В.В. Джемелінський, Д.А. Лесик // Східноєвропейський журнал передових технологій. – 2013. – №2/5(62). – С. 26-30. *(Дисертантом проведено аналіз експериментальних результатів, вимірювання мікротвердості та визначення міцності поверхневого шару).*

7. Джемелінський В.В. Вплив комбінованої лазерної і ультразвукової імпульсної дії на зміну мікрорельєфу та мікротвердості металевої поверхні / В.В. Джемелінський, Д.А. Лесик, Я.М. Гніліцький // Вібрації в техніці та технологіях. – 2012. – №1(65). – С. 69-72. *(Здобувачем проведено дослідження параметрів та топографії мікрорельєфу поверхні).*

8. Патент на корисну модель 60662 України, МПК В24В 39/00. Спосіб лазерно-ультразвукової фінішної обробки / В.В. Джемелінський, Л.В. Джемелінська, Д.А. Лесик (Україна). – u2010 14395; заяв. 01.12.2010; опубл. 25.06.2011, бюл. №12. – 4 с. *(Здобувачем виконане експериментальне підтвердження комбінованої лазерно-ультразвукової обробки за роздільною схемою).*

9. Патент на корисну модель 93522 України, МПК В24В 39/00. Установа для комбінованої лазерно-ультразвукової оздоблювально-зміцнювальної обробки / В.В. Джемелінський, Д.А. Лесик, Л.В. Джемелінська (Україна). – u2014 02885; заяв. 21.03.2014; опубл. 10.10.2014, бюл. №19. – 3 с. *(Дисертантом запропоновано схему обладнання та розроблено програмне забезпечення для підтримання постійної температури в зоні дії лазерного сканувального променя).*

10. Патент на корисну модель 101708 України, МПК В24В 39/00, В06В 1/06. Установа для ультразвукової оздоблювально-зміцнювальної обробки / В.В. Джемелінський, Д.А. Лесик, О.О. Данилейко, С.С. Салій. – u2015 03250; заяв. 07.04.2015; опубл. 25.09.2015, бюл. №18. – 4 с. *(Здобувачем проведено аналіз літературних джерел, запропоновано схему обладнання та розроблено керуючі програми для проведення експериментального дослідження).*

11. Dzhemelinskyy V.V. Use of laser-ultrasonic technology for finishing strengthening processes / V.V. Dzhemelinskyy, G.I. Prokopenko, D.A. Lesyk // Proc. Materials of fifth Int. Conf. «Laser technologies in welding and materials processing». – Katsiveli, Crimea, 2011. – 59 p. *(Дисертантом запропоновано різні схеми комбінованої лазерно-ультразвукової обробки, розроблено методику проведення експериментальних досліджень).*

12. Dzhemelinskyy V.V. Combined laser and ultrasonic finishing and strengthening processing steel products / V.V. Dzhemelinskyy, D.A. Lesyk, O.P. Krasavin // Proc. Materials of sixth Int. Conf. «Laser technologies in welding and materials processing». – Katsiveli, Crimea, 2013. – 52 p. *(Здобувачем проведено аналіз наукових досліджень гібридних та комбінованих термодформаційних процесів, визначено переваги та недоліки різних методів).*

13. Джемелінський В.В. Визначення оптимальних параметрів лазерно-ультразвукового зміцнення та оздоблювання поверхонь виробів / В.В. Джемелінський, Д.А. Лесик // Тези доповідей XII міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта». – Севастополь, 2013. – 41 с. *(Здобувачем запропоновано методику визначення температурно-часового режиму термодформаційного циклу пластичного деформування ультразвуковим наконечником).*

14. Dzhemelinskyy V.V. Effects of laser and ultrasonic treatments on wear resistance and friction force of the surface layer of AISI D2 tool steel / V.V. Dzhemelinskyy, D.A. Lesyk, B.N. Mordyuk, G.I. Prokopenko, A. Lamikiz, S. Martinez, I.V. Tkachenko // Proc. Materials of thirtieth-first Int. Conf. «The promising directions of development of the mechanical engineering and metalworking». – Minsk, Belarus, 2015. – P. 80-81. *(Здобувачем проведено опрацювання результатів експерименту).*

15. Lesyk D.A. Effects of laser and ultrasonic treatments on microrelief and microhardness of the surface layer of AISI D2 tool steel / D.A. Lesyk, V.V. Dzhemelinskyy, B.N. Mordyuk, G.I. Prokopenko // Proc. Materials of Int. Conf. «Laser technologies. Lasers and their application», – Truskavets, 2015. – P. 68-70. *(Дисертанту належать описи проведених досліджень та аналіз одержаних результатів).*

16. Lesyk D.A. Surface hardening of the steel parts by laser and ultrasonic treatment / D.A. Lesyk, S. Martinez, V.V. Dzhemelinskyy, A. Lamikiz, B.N. Mordyuk, G.I. Prokopenko // Proc. Materials of sixth Int. Conf. «Laser technologies in welding and materials processing». – Odessa, 2015. – P. 31-32. *(Здобувачем розроблено методику експерименту, виконано експериментальні дослідження і аналіз закономірностей зміни поверхневого шару).*

## АНОТАЦІЯ

**Лесик Д.А. «Технологічне забезпечення якості поверхневого шару деталей комбінованою лазерно-ультразвуковою обробкою». – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.07 – процеси фізико-технічної обробки. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ, 2016 р.

В дисертаційній роботі запропоновано спосіб комбінованої лазерно-ультразвукової зміцнювально-оздоблювальної обробки металів та методики з підтриманням постійної температури в зоні дії лазерного променя, що дозволяють отримати рівномірну глибину зміцнення та уникнути небажаного перегріву і оплавлення складних за конструкцією та крайових зон оброблюваної поверхні, зменшуючи витрачену потужність джерела живлення за рахунок використання автоматизованої системи контролю температури в опроміненій зоні, а також ультразвукового деформаційного зміцнення багатобойковими наконечниками, що

дозволяє поліпшити якість поверхневого шару та підвищити продуктивність процесу термодформаційного зміцнення і оздоблювання великогабаритних деталей.

Встановлено вплив режимів комбінованої лазерної та наступної ультразвукової зміцнювально-оздоблювальної обробки на основні закономірності зміни мікрорельєфу, структури, твердості, величини і характеру розподілу залишкових напружень, а також зносо- та корозійної стійкості сталевих деталей. На основі результатів моделювання та експериментальних досліджень розроблено алгоритм визначення вхідних технологічних режимів комбінованої лазерно-ультразвукової обробки сталевих деталей за роздільною схемою.

**Ключові слова:** лазерне термозміцнення, ультразвукове деформаційне зміцнення, поверхневий шар, мікрорельєф, фізико-механічні властивості, зношування.

### АННОТАЦІЯ

**Лесик Д.А. «Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя деталей комбинированной лазерно-ультразвуковой обработкой». – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.07 – процессы физико-технической обработки. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, 2016.

В диссертационной работе предложен способ комбинированной лазерно-ультразвуковой упрочняющей и отделочной обработки металлов и методики с поддержанием постоянной температуры в зоне действия лазерного луча, позволяющие получить равномерную глубину упрочнения и избежать нежелательного перегрева и оплавления сложных по конструкции и краевых зон обрабатываемой поверхности, уменьшить затраченную мощность источника питания за счет использования автоматизированной системы контроля температуры в облученной зоне, а также ультразвукового деформационного упрочнения многобойковыми наконечниками, что позволяет улучшить качество поверхностного слоя и повысить производительность процесса термодформационного упрочнения и отделки крупногабаритных деталей.

Установлено влияние режимов комбинированной лазерной и последующей ультразвуковой упрочняющей и отделочной обработки на основные закономерности изменения микрорельефа, структуры, твердости, величины и характера распределения остаточных напряжений, а также износо- и коррозионной стойкости стальных деталей.

Показано, что комбинированная лазерно-ультразвуковая обработка формирует регулярный микрорельеф на поверхности с незначительной волнистостью по сравнению с отдельной ультразвуковой обработкой за счет предварительного лазерного термоупрочнения поверхностного слоя, что способствует разрушению микронеровностей и фрагментации с удалением оксидной пленки на поверхности за счет одновременно принудительного вращательного и многократного ударного действия бойками.

Кроме того, комбинированная обработка способствует формированию ультрадисперсной структуры, повышению величины остаточных напряжений сжатия в 2 раза и твердости приповерхностных слоев до 25% по сравнению с отдельной ЛО, что позволяет уменьшить величину износа для стали Х12МФ в 2 раза при квазистатической нагрузке и в 4 раза при динамической нагрузке по сравнению с исходным состоянием. Электронно-микроскопические исследования подтверждают, что после комбинированной обработки стали Х12МФ формируется ультрадисперсная зерновая структура, границы которой заблокированы большим количеством вторичных дисперсных карбидов.

На основе результатов моделирования и экспериментальных исследований разработаны алгоритм определения входных технологических режимов комбинированной лазерно-ультразвуковой обработки стальных деталей, технологический регламент для реализации комбинированного лазерно-ультразвукового упрочнения плоских или цилиндрических крупногабаритных стальных деталей, а также конструкция приспособления для отделочно-упрочняющей обработки металлов и управляющие программы для обработки коронки ковша экскаватора и ролика конвейера.

**Ключевые слова:** лазерное термоупрочнения, ультразвуковое деформационное упрочнение, поверхностный слой, микрорельеф, физико-механические свойства, износ.

## ABSTRACT

**Lesyk D.A. "Technological ensuring of the quality surface layer of parts by combined laser-ultrasonic treatment". – Manuscript.**

The candidate's thesis nominated for scientific degree of candidate of technical sciences on the specialty 05.03.07 – processes physical and technical treatment. – National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2016

In the thesis a method of the combined laser-ultrasonic hardening and finishing treatment of metals and techniques for maintaining a constant temperature in laser beam processing zone are suggested. It is possible to obtain a uniform depth of hardening and avoid undesirable overheating and melting of complex shapes and edges of the treated surface. Moreover, the consumed power source capacity was reduced by means of automated irradiated spot temperature control system. Technology of ultrasonic strain hardening using multi-pins heads that allows to improve the quality of the surface layer and increase the productivity of the thermo-deformation process hardening and finishing of large parts was suggested as well.

The effect of the processing regimes of the combined laser and subsequent ultrasonic hardening and finishing treatment on the basic laws of microrelief formation, structure, hardness, the magnitude and distribution of residual stresses as well as wear resistance and corrosion resistance of steel parts was established. Based on the simulation results and experimental research, the algorithm for definition of the processing regimes for the combined laser-ultrasonic treatment of steel parts is developed.

**Keywords:** laser thermal hardening, ultrasonic strain hardening, surface layer, microrelief, physical and mechanical properties, wear.