

УДК 621.9.048.7:621.373.826:631.31

Ю.О. Ковальчук, канд. техн. наук, В.В. Дідур, канд. техн. наук,  
В.В. Кравченко, канд. техн. наук

*Уманський національний університет садівництва*

## Застосування лазерного зміцнення сталі 65Г для підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних знарядь

Проаналізовано, який тип сталі використовується в Україні виробниками робочих органів ґрунтообробних машин. Досліджено властивості цієї сталі після лазерного зміцнення та можливість застосування різних додаткових заходів для ще більшого підвищення зносостійкості відповідних знарядь з метою забезпечення успішного впровадження у виробництво методу поверхневої лазерної обробки. **метод поверхневої лазерної обробки, лазерне зміцнення, гартування, наплавлення, зносостійкі твердосплавні порошки, сталь 65Г, робочі органи ґрунтообробних знарядь**

**Постановка проблеми.** Нині питання збільшення ресурсу виробітку робочих органів ґрунтообробної техніки не втрачає своєї актуальності. Однією із першочергових задач, що стоять перед виробниками ґрунтообробних машин, є забезпечення вищої міцності тих зон робочих органів, які найбільше піддаються зносу. Внаслідок абразивного зношування робочих поверхонь відбувається втрата первинної форми різальних елементів, що призводить до збільшення тягового опору ґрунтообробних машин та витрат паливно-мастильних матеріалів. Виникає потреба в заточуванні або заміні зіпсованих деталей.

Одним із методів зміцнення виробів із сталі є метод поверхневої лазерної обробки, що може успішно застосовуватися також і для зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин. Необхідно проаналізувати, який тип сталі використовується в Україні відповідними виробниками для виготовлення таких робочих органів, як лемешів плугів, дисків борін, лап культиваторів тощо та чи застосовується при цьому лазерне зміцнення. Необхідно дослідити, чи може метод поверхневої лазерної обробки на практиці успішно застосовуватися для підвищення зносостійкості сталі, з якої зараз виготовляють робочі органи відповідної ґрунтообробної техніки.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Дослідження впливу лазерного випромінювання на властивості сталей та сплавів було темою публікацій останніх років у працях таких вчених та науковців, як О.Г. Григор'янц, В.П. Вейко, І.М. Шиганов, В.С. Черненко, О.І. Дудка, М.В. Кіндрачук та інших, які займалися питаннями, пов'язаними із впливом лазерного випромінювання на поверхню різних матеріалів [7-10]. За останні роки публікацій на тему застосування методу поверхневої лазерної обробки для зміцнення деталей сільськогосподарської техніки не так багато [1-6]. Ще менше серед них сучасних публікацій стосовно лазерного зміцнення робочих органів ґрунтообробних знарядь, серед яких можна виділити наукові праці В.М. Бобрицького, В.П. Бірюкова, І.Ф. Буханової, В.В. Дивинського, В.М. Журавля та інших [1-4].

**Мета досліджень** – проаналізувати, який тип сталі використовується в Україні виробниками робочих органів ґрунтообробних машин, дослідити властивості цієї сталі після лазерного зміцнення та можливість успішного застосування на виробництві

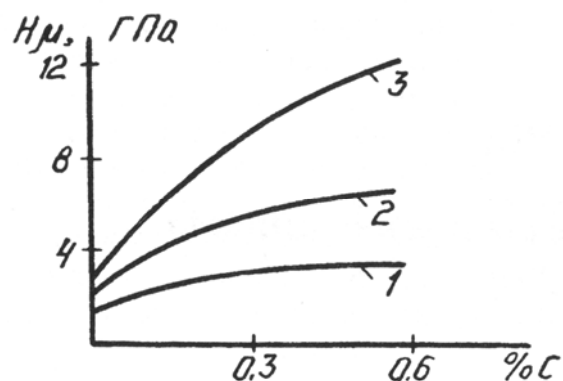
методу поверхневої лазерної обробки для підвищення зносостійкості робочих органів відповідних знарядь.

**Основний матеріал досліджень.** Необхідно відмітити, що в нашій країні, на жаль, метод лазерного зміцнення ще не знайшов свого застосування під час виробництва робочих органів ґрунтообробних машин.

Метод поверхневої лазерної обробки не використовується на виробництві основними вітчизняними виробниками робочих органів ґрунтообробних машин, такими як ВАТ «Червона зірка» (м. Кіровоград), ТОВ НВП «БілоцерківМАЗ» (м. Біла Церква), ВАТ «Сімферопольський ремонтно-механічний завод», ПАТ «Уманьферммаш» (м. Умань), ТОВ НВФ «Дозатор» (Луганська обл., смт. Слов'яносербськ), ПП ВКФ «Велес-Агро» (м. Одеса), що випускають лемеші плугів, диски борін, лапи культиваторів тощо. Деякі з цих підприємств на виробництві застосовують для зміцнення робочих органів ґрунтообробної техніки замість об'ємного гартування методи індукційного чи плазмового наплавлення спеціальних зносостійких тврдосплавних порошків, що також забезпечує збільшення ресурсу виробітку відповідних робочих органів.

Опитування даних виробників показали, що для виготовлення робочих органів ґрунтообробних машин ними в абсолютній більшості випадків використовується сталь 65Г. Тому актуальним є дослідження властивостей цієї сталі після лазерного зміцнення з метою визначення можливості успішного застосування на виробництві даного методу поверхневої лазерної обробки.

Як відомо, лазерне зміцнення сталі забезпечить тим вищу твердість матеріалу, чим більший вміст у сталі вуглецю (рис. 1) [9].



1 – без зміцнення; 2 – звичайне гартування; 3 – лазерне гартування

Рисунок 1 – Вплив вуглецю на твердість сталей

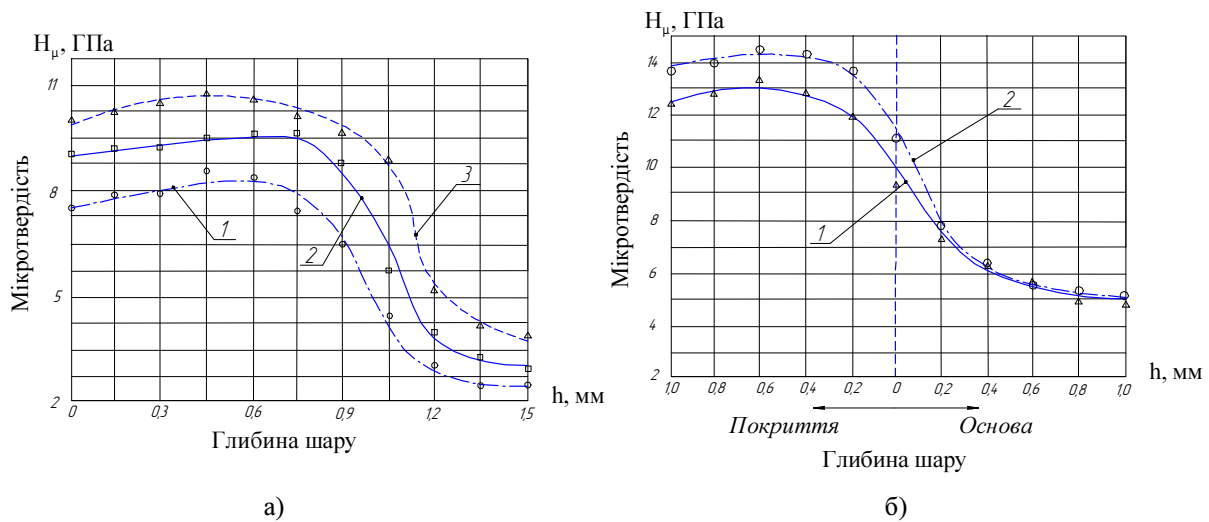
З цих позицій застосування лазерного зміцнення сталі 65Г є більш ефективним, ніж інших сталей з меншим вмістом вуглецю, таких як 45 чи Л53.

Застосування методу поверхневої лазерної обробки робочих органів ґрунтообробної техніки, виготовлених із сталі 65Г, зустрічається в наукових дослідженнях в рамках виконання дисертаційної роботи одним із вітчизняних авторів в Кіровоградському національному технічному університеті [1]. В даній роботі здійснювались дослідження, в яких обґрунтовано раціональні режими лазерної обробки для отримання потрібних властивостей і оптимальної товщини зміцненого шару з метою створення умов самозагострювання та проведено комплекс досліджень властивостей зміцнених поверхневих шарів зразків деталей робочих органів ґрунтообробних машин.

Доцільність застосування технологій лазерного зміцнення різальних елементів при виготовленні деталей робочих органів ґрунтообробних машин показали стендові та експлуатаційні дослідження, які виявили підвищення їх зносостійкості, реалізацію ефекту самозагострювання і подовження ресурсу.

Відомо, що у процесі зношування поверхонь робочих органів та для реалізації умов самозагострювання під час їх зміцнення важливим фактором є глибина зміцненого шару, на яку впливають параметри поверхневої лазерної обробки.

В результаті застосування лазерного зміцнення таких сталей, як 45, Л53 та 65Г видно, що найбільшу мікротвердість по глибині зміцненого шару серед них має сталь 65Г (рис. 2а) [1], так як в ній найбільше міститься вуглецю, що підтверджує наведену вище закономірність (див. рис. 1). У випадку лазерного наплавлення на сталь 65Г покриття зі сплаву ПС-14-60 досягається збільшення мікротвердості у наплавленому шарі, а додавання карбиду бора у даний сплав (ПС-14-60 + 6%B<sub>4</sub>C) дозволяє отримати ще більше підвищення мікротвердості поверхні зміцненого матеріалу (рис. 2б) [1].



а) – розподіл мікротвердості в сталях після лазерного зміцнення ( $q = 8 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>;  $\tau = 0,3$  с):

1 – сталь 45, 2 – сталь Л53, 3 – сталь 65Г;

б) – розподіл мікротвердості в покриттях після лазерного наплавлення на сталь 65Г сплаву ПС-14-60 (крива 1) та сплаву ПС-14-60 + 6%B<sub>4</sub>C (крива 2)

Рисунок 2 – Розподіл мікротвердості по глибині зміцненого шару

Дослідження специфічного впливу лазерного випромінювання на властивості зразків і деталей робочих органів ґрунтообробних машин, проведені в даній роботі [1], показують утворення дрібнодисперсної мартенситної структури, рівномірний розподіл карбідів і боридів в матриці поверхневого шару, перерозподіл атомів легуючих елементів і домішок у зонах лазерного впливу, зменшення піку сполуки Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> після лазерної обробки у порівнянні з об'ємною термообробкою, зменшення (до 5%) пористості шарів при лазерному наплавленні у порівнянні з наплавленням СВЧ; плавний перехід мікротвердості зміцненого шару до мікротвердості основи (максимальна мікротвердість при лазерній термообробці складає 8–12 ГПа, а при лазерному наплавленні – 12–14 ГПа); підвищення міцності зчеплення шару наплавлених покриттів з основою.

Найменший лінійний знос та інтенсивність масового зносу за результатами стендових досліджень спостерігаються для дослідних зразків робочих органів зі сталі 65Г, зміцнених методом поверхневої лазерної обробки.

У порівнянні з об'ємним гартуванням лазерна термообробка дозволяє в 1,3–1,4 рази зменшити знос відповідних поверхонь робочих органів ґрунтообробних машин, а в порівнянні з базовою технологією індукційного наплавлення застосування лазерного

наплавлення сплаву ПС-14-60 + 6%B<sub>4</sub>C дозволяє зменшити знос у 1,7–1,8 рази. Застосування технології лазерного наплавлення з додаванням карбиду бора дозволяє тривалий час зберігати вихідну геометричну форму деталі. Застосування технологій лазерного зміцнення стримує підвищення тягового опору в процесі обробки ґрунту робочими органами ґрунтообробних машин, що позитивно впливає на економію паливно-мастильних матеріалів.

Для створення зносостійких шарів на різальних елементах робочих органів ґрунтообробних машин та забезпечення реалізації ефекту самозагострювання існують розроблені технологічні схеми зміцнення з використанням методу поверхневої лазерної обробки. За рахунок зменшення енергетичних витрат при зміцненні та підвищення ресурсу робочих органів очікуваний загальний економічний ефект від впровадження технології лазерного наплавлення у виробництво стрілочастих лап культиваторів при річній програмі 70 тис. шт. складе 69591,61 грн.

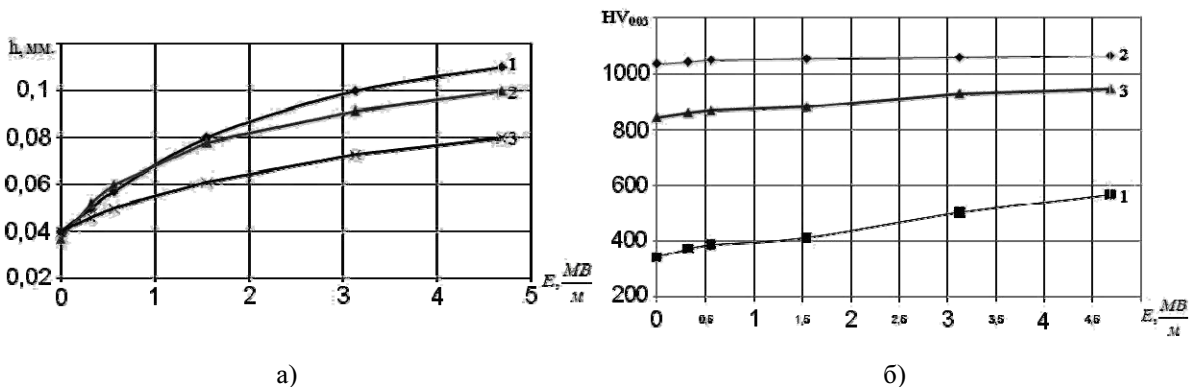
Також застосування методу поверхневої лазерної обробки щодо зміцнення сталі 65Г зустрічається в наукових дослідженнях в рамках виконання дисертаційної роботи одним із російських авторів в Камській державній інженерно-економічній академії [10]. В даній роботі пропонується додатково керувати процесом лазерного термозміцнення металів шляхом використання електростатичного поля. Автором розроблено методику розрахунку параметрів технологічних процесів термозміцнення, що застосовується на етапі технологічної підготовки виробництва, яка визначає умови досягнення заданої глибини термозміцнення металів під впливом лазерного випромінювання в електростатичному полі.

Наявність двох зон у поверхні металу показують результати мікроструктурного аналізу загартування сталі 65Г без оплавлення при впливі енергії накачування активного елемента лазера  $W = 3,8$  КДж. Перша зона має структуру мартенситу, її мікротвердість становить 841 HV<sub>0.05</sub>. Друга зона являє собою мартенсит і троостит, її мікротвердість складає величину 494 HV<sub>0.05</sub>. Глибина зони термічного впливу становить 0,04 мм.

Під впливом електростатичного поля під час лазерного загартування твердість першої зони зростає до 946 HV<sub>0.05</sub>, а твердість другої зони майже не змінюється й становить 501 HV<sub>0.05</sub>. При цьому глибина зони термічного впливу зростає до 0,08 мм.

На цих дослідних зразках спостерігається різка границя переходу від зміцненої зони до матриці, зона термічного впливу виявляється чітко.

Певне збільшення мікротвердості й значне збільшення глибини зміцненої зони до 2-х разів у порівнянні зі звичайною обробкою спостерігається в результаті мікроструктурного аналізу сталей при обробці лазерним випромінюванням у режимах, близьких до температури плавлення й під впливом електростатичного поля напруженістю 5 МВ/м (рис. 3) [10].



а) – залежність глибини  $h$ ; б) – залежність твердості HV<sub>0.05</sub>

1 – Сталь 10,  $W = 3$  кДж; 2 – Сталь 65Г,  $W = 4,5$  кДж; 3 – Сталь 65Г,  $W = 3,8$  кДж

Рисунок 3 – Залежність глибини  $h$  та твердості HV<sub>0.05</sub> зміцненої зони від напруженості електростатичного поля E

Аналіз отриманих даних показує, що чим більше вміст вуглецю й легуючих елементів в металі, тим менший вплив на твердість металу при імпульсному лазерному випромінюванні надає електростатичне поле.

Процес лазерного загартування відбувається в поверхневому шарі металу на глибину  $h$ . Для забезпечення впливу лазерного випромінювання на задану глибину з потрібною точністю необхідно забезпечити наявність прецизійної системи позиціонування оптики довгофокусного лазерного технологічного комплексу. Використовуючи високоточний фотоелектричний датчик кутового позиціонування оптичної системи можна забезпечити точне положення фокусу лазерного променя на поверхні деталі. До точності датчика пред'являються високі вимоги, що вимірюються десятками кутових секунд, що відповідає відхиленню плями на поверхні металу на десятки долі міліметра.

В інших дослідженнях впливу методу поверхневої лазерної обробки на показники зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин, здійснених автором в Інституті машинознавства ім. Л.А. Благонравова РАН (м. Москва) [2, 4], проведено дослідницьку роботу з лазерного наплавлення матеріалів на ґрунтообробні знаряддя зі сталі 65Г, при цьому для просторового керування лазерним променем використовувався сканер. На поверхню дослідних зразків наносилася обмазка на водяній основі оксиетилцелюлози з порошком ФБХ6-2. Середня твердість матеріалу основи дослідних зразків становила 2200 МПа.

В результаті впливу на поверхню зразка № 1 лазерного променя потужністю 1400 Вт з частотою сканування 200–225 Гц був отриманий видозмінений шар, геометричні параметри якого визначаються зоною термічного впливу шириною 7 мм при глибині 1,1 мм, шириною легованого шару 4,5 мм. Глибина зони загартування із твердого стану становила 0,6 мм, а легованого шару – 0,3 мм. Також при цьому присутній невеликий шар наплавленого порошку товщиною 0,2–0,3 мм.

Для зразка № 2 геометричні параметри зони термічного впливу склали: ширина зони – 8,1 мм, ширина легованого шару – 5 мм, загальна глибина зон загартування, легування й наплавлення – 1,35 мм, у тому числі легованого шару – 0,5 мм і наплавленого шару 0,3–0,35 мм.

Результати дослідження їхньої мікротвердості наведені на рис. 4 [4]. У зразку № 2 мав місце більш глибокий перепад, тому швидкість охолодження матеріалу була нижча, що вплинуло на зменшення мікротвердості. У результаті обробки за першим режимом (зразок № 1) спостерігалась незначна зміна геометричних розмірів. Це важливо для практичної обробки деталей, оскільки при наплавленні ріжучої кромки ґрунтообробних знарядь геометрія робочої поверхні не повинна змінюватися.

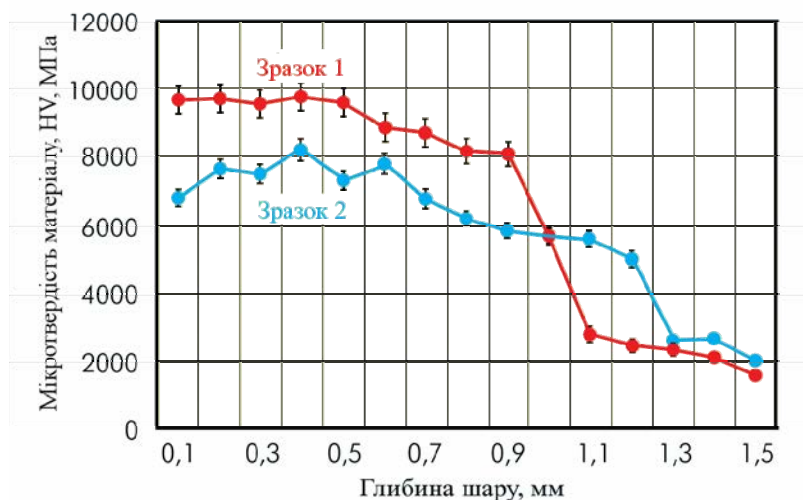


Рисунок 4 – Залежність мікротвердості сталі від глибини зони лазерного впливу

Товщини шарів (наплавленого, легованого і загартованого), отриманих методом поверхневої лазерної обробки, достатні для зниження корозійного й абразивного зношування поверхні інструментів. У порівнянні із загартуванням зразків струмами високої частоти ці результати вищі в 3–5 разів, а в порівнянні з індукційним наплавленням такого ж порошку – вищі в 3–4 рази.

Крім цього, автором розроблено технологію зміцнення дисків для борін зі сталі 65Г [2], що включає в себе лазерне зміцнення та наплавлення. Відбувалось зміцнення зони шириною 15–16 мм, а ширина наплавленої зони становила 16–18 мм.

Випробування дослідних дисків разом із серійними відбувались в польових умовах. Величина лінійного зносу за висотою для дослідних дисків борін, зміцнених лазерним випромінюванням, зменшилась на 82% порівняно із серійними дисками, а для дисків, зміцнених лазерним наплавленням, зменшилась на 70%. Дослідні диски у порівнянні із серійними мали менший знос за масою на 31%.

На твердість сталі, що різними авторами у своїх дослідженнях піддавалась лазерному зміцненню, також додатково впливають такі фактори, як тип лазерного технологічного комплексу, частота та час дії зміцнюючого лазерного випромінювання тощо.

Іншим автором із Кіровоградського національного технічного університету запропоновано за один прохід у декілька разів збільшити ширину лазерної доріжки зміцнення при незмінній потужності лазера шляхом відмови від традиційної круглої форми фокальної плями і переходу до плями у формі вузької смужки, переміщеної перпендикулярно своїй довгій стороні [5]. Зміна форми фокальної плями призводить до зміни термічного циклу нагрівання і охолодження оброблюваного матеріалу. У випадку забезпечення рівності інтенсивностей і швидкостей переміщення джерел нагрівання по поверхні оброблюваної деталі час нагрівання і теплонасичення для джерела смужкової форми менші, а градієнт температури і швидкість охолодження вищі, ніж для джерела круглої форми і такої ж площі.

Використання динамічного фокусатора дозволяє у випадку обробки деталей, розміри яких більше довжини лазерної смужки, сформувати смужковий пучок із спеціальним неоднорідним розподілом інтенсивності за довжиною смужки, при якому інтенсивність до кінців смужки збільшується за певним законом. У цьому випадку обробка поверхні деталі повинна проводитись смугами впритул, без накладання.

У випадку застосування смужкового лазерного пучка у порівнянні з обробкою пучком круглої форми тієї ж потужності забезпечується при цілком достатній для практики глибині зміцненого шару 0,5–0,7 мм збільшення у 2–4 рази площі оброблюваної поверхні за одиницю часу (залежно від режиму обробки).

Застосовування динамічних фокусаторів смужкового випромінювання розширяє можливості використання методу лазерного зміцнення також і для робочих органів ґрунтообробних машин, підвищуючи його продуктивність та конкурентоспроможність.

На ефективність процесу лазерного зміцнення також суттєво впливає вибір типу лазера. У випадку використання волоконних лазерів ефективність процесу зміцнення з урахуванням потужності випромінювання лазера, глибини гартування та швидкості руху виробу порівняно із ефективністю CO<sub>2</sub>-лазера може збільшуватися у 12 раз [11], що також підвищує конкурентоспроможність даного методу.

**Висновки.** Отже, сталь 65Г, що використовується вітчизняними виробниками робочих органів ґрунтообробних машин, може успішно піддаватись лазерному зміцненню та наплавленню, що забезпечить значне підвищення зносостійкості цих знарядь. Такі заходи, як додавання карбиду бора у сплави для наплавлення на сталь, додаткове застосування під час лазерного зміцнення електростатичного поля, використання волоконних лазерів та лазерного пучка смужкової форми дозволять ще

більше підвищити рівень зносостійкості робочих органів відповідних машин та забезпечити ефективне впровадження методу поверхневої лазерної обробки у виробництво.

## Список літератури

1. Бобрицький В.М. Підвищення зносостійкості різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.02.04 «Тертя та зношування в машинах» / В.М. Бобрицький. – К., 2007. – 20 с.
2. Бирюков В.П. Повышение износостойкости деталей сельскохозяйственной техники и почвообрабатывающих орудий лазерным упрочнением и наплавкой / В.П. Бирюков // Лазерные технологии в сельском хозяйстве : Тематический сборник. – М.: Техносфера, 2008. – С. 256–264.
3. Буханова И.Ф. Применение лазерного излучения для упрочнения и восстановления деталей сельскохозяйственного машиностроения / И.Ф. Буханова, В.В. Дивинский, В.М. Журавель // Лазерные технологии в сельском хозяйстве : Тематический сборник. – М.: Техносфера, 2008. – С. 264–270.
4. Бирюков В.П. Восстановление и упрочнение поверхностей лазерным излучением / Бирюков В.П. // Фотоника. – 2009. – № 3. – С. 14–16.
5. Мажейка О.Й. Модифікування технології лазерної обробки деталей сільськогосподарської техніки / Мажейка О.Й // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – вип. 21. – Кіровоград: КНТУ, 2008. – С. 164–167.
6. Разработка технологии восстановления с использованием лазерного луча / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, А.В. Сайчук, В.Л. Манило // Научный вестник Луганского национального аграрного университета. Серия «Технические науки». – 2011. – № 30. – С. 257–265.
7. Вейко В.П. Опорный конспект лекций по курсу «Лазерные технологии». Введение в лазерные технологии. / В.П. Вейко, А.А. Петров. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 143 с.
8. Григорьянц А.Г. Технологические процессы лазерной обработки : Учеб. пособие для вузов / Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюрлов А.И. ; под ред. А.Г. Григорьянца. – 2-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 664 с.
9. Черненко В.С. Променеві методи обробки : Навч. посібник / Черненко В.С., Кіндрачук М.В., Дудка О.І. – К.: Кондор, 2008. – 166 с.
10. Башмаков Д.А. Управление процессом лазерного термоупрочнения металлов в электростатическом поле : автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук : спец. 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (машиностроение)», 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления» / Д.А. Башмаков. – Набережные Челны, 2010. – 19 с.
11. Попов В.О. Лазерное упрочнение сталей: сравнение волоконных и СО2-лазеров / Попов В.О. // Фотоника. – 2009. – № 4. – С. 18-21.

*Ю. Ковальчук, В. Дидур, В. Кравченко*

### **Применение лазерного упрочнения стали 65Г для повышения износостойкости рабочих органов почвообрабатывающих орудий**

Проанализировано, какой тип стали используется в Украине производителями рабочих органов почвообрабатывающих машин. Исследовано свойства этой стали после лазерного упрочнения и возможность применения разных дополнительных мер для ещё большего повышения износостойкости соответствующих орудий с целью обеспечения успешного внедрения в производство метода поверхностной лазерной обработки.

*Y. Kovalchuk, V. Didur, V. Kravchenko*

### **Application of the laser strengthening of steel of 65G is for the increase of wearproofness of workings organs of soil-cultivating instruments**

It is analysed, what type of steel is used in Ukraine by the producers of working organs of soil-cultivating machines. Properties of this steel after the laser strengthening and possibility of application of different additional measures are investigational for the yet greater increase of wearproofness of corresponding instruments with the purpose of providing of the successful applying in industry of method of superficial laser treatment.

Одержано 28.03.12