

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА

**Актуальність теми.** За останні десятиріччя різко зросла вартість різального інструменту не тільки в грошовому еквіваленті, але й у ціновому балансі всієї технологічної системи. Різальний інструмент буде ще вдосконалюватися доти, доки це комерційно припустимо з урахуванням потреби в ньому на ринку. У цей час провідне положення займають різальні інструменти з модифікованим поверхневим шаром (у 2005 році – 68% світового споживання різального інструменту). Однак модифікуються в основному інструменти зі швидкорізальних сталей і твердих сплавів, які мають більш якісні різальні властивості. У зв'язку з їхньою високою вартістю досить перспективним є шлях модифікації недорогих інструментальних матеріалів, вуглецевих і низьколегованих сталей, по суті, створення у поверхневому шарі інструментальної матриці нового композиційного матеріалу. У роботі досліджується процес формування такого модифікованого шару досить великої глибини на основі лазерних технологій, що істотно підвищує різальні властивості інструменту. Саме тому створення різального інструменту з модифікованим шаром, особливості його шліфування та пошук оптимальних умов його експлуатації є актуальним завданням.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Роботу виконано на кафедрі інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф. Семка НТУ "ХП", у рамках держбюджетної теми "Розробка теоретичних основ оптимізації швидкого формоутворення виробів на принципах генеративних технологій" (ДР №0105U000576, 2005- 2007 рр.). Частина експериментально-теоретичних робіт виконана в Мішкольцькому університеті у рамках договору з Науково-технологічним інститутом «ВАУАТІ» (Будапешт, Угорщина).

**Мета і задачі досліджень.** Метою дисертаційної роботи є підвищення працездатності вуглецевих і низьколегованих різальних інструментів шляхом створення приповерхневого модифікованого шару за допомогою технології лазерної твердотільної імплантації.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

– розробити рекомендації щодо технології легування інструментальних матеріалів (вуглецевих і низьколегованих) методом лазерної твердотільної імплантації;

– визначити за допомогою сучасних фізичних методів якості поверхні та стан легованого шару інструментальних матеріалів, фізичні закономірності процесу їх тертя і зносу;

– встановити фізичні особливості процесу шліфування легованого модифікованого шару вуглецевих і низьколегованих інструментальних сталей

та механізм зносу шліфувальних кругів при заточуванні різальних інструментів;

– встановити працездатність різців із модифікованих вуглецевих і низьколегованих інструментальних сталей при точінні сталевих заготовок.

*Об'єкт дослідження* – різальний інструмент із модифікованим шаром, що створений методом лазерної твердотільної імплантації.

*Предмет дослідження* – процес формування модифікованого шару різального інструменту, особливості шліфування та його працездатність.

*Методи дослідження* базуються на положеннях теорії різання, тертя й зношування, фізико-хімічної теорії контактної взаємодії поверхонь, теорії лазерної імплантації частинок.

Достовірність отриманих теоретичних результатів підтверджується численними експериментальними даними, отриманими на всіх стадіях дослідження.

Достовірність експериментальних результатів і висновків зумовлена застосуванням сучасних дослідницьких систем, у тому числі методів растрової скануючої мікроскопії, мікро- і рентгеноструктурного аналізу, п'єзодинамометрії, машини тертя, швидкісної відеозйомки, а також підтверджується статистичною оцінкою результатів. Робота виконувалася за допомогою сучасних засобів комп'ютерної техніки та програмного забезпечення.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Розроблено наукові принципи модифікації інструментальних матеріалів за допомогою лазерної твердотільної імплантації порошку металевого титану й карбиду вольфраму в матрицю вуглецевої та низьколегованої сталі, локально розплавленої лазерним променем. Поверхневий шар формується з композиційного матеріалу  $\text{Fe-W-Ti-C/TiC+Fe}_3\text{W}_3\text{C}$  товщиною близько 1 мм у початковій матриці Fe-C, що є достатнім. Різальний інструмент із модифікованим поверхневим шаром за своїми експлуатаційними властивостями зайняв проміжне місце між інструментом з низьколегованої та швидкорізальної сталей.

2. На базі фізико-хімічної теорії металів, вивчення термодинамічних явищ і проведення комплексу експериментальних досліджень дано обґрунтування технології лазерного легування, яке дозволяє одержати новий композиційний інструментальний сплав, що являє собою сталеву матрицю з розчиненим вольфрамом, дрібними частинками карбиду титану й фази  $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ . Рациональний вибір легуючих елементів здійснено за допомогою запропонованих коефіцієнтів якості й механізму проникнення частинок у поверхневий шар інструментальної матриці, яка розплавлена лазером у локальних об'ємах.

3. Встановлено механізм контактної взаємодії різального інструменту з модифікованим поверхневим шаром і оброблюваним матеріалом. Встановлено, що має місце збільшення на 8–20 % коефіцієнта тертя, зумовлене наявністю карбідів, які знижують ефект пристосування. В той же час відзначено значне (в 1,5-2,0 рази) збільшення зносостійкості модифікованих матеріалів.

4. Сформульовано положення про вплив на різальний рельєф і зношування шліфувального ельборового круга легуючих елементів модифікованого шару вуглецевих і низьколегованих сталей при їхній обробці. На основі аналізу мікрофотографій та електронно-дифракційного спектра поверхні круга доведено домінуючий вплив легуючого титану на зношування зерен, оскільки титан вступає в хімічну взаємодію із зернами нітрида бора. При цьому відбувається розкид щільності ймовірності розподілу висоти зерен на 30% і збільшується зношення ельборового круга в 2 рази. Висока твердість модифікованого шару (HV 900–1100) і наявність карбідів зумовлює збільшення силових і теплових навантажень на шліфувальний круг у процесі обробки.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в розробці процесу створення модифікованого поверхневого легovanого шару різальних інструментів із вуглецевих і низьколегованих сталей за допомогою лазерної твердотільної імплантації, що дозволяє підвищити зносостійкість інструментів у 1,5-2 рази.

Розроблено стенд для реалізації процесу лазерної твердотільної імплантації вуглецевих і низьколегованих сталей; визначені оптимальні умови створення модифікованого поверхневого шару, що має високу різальну здатність.

Запропоновано раціональні умови шліфування цих матеріалів для створення якісного різального інструменту та його ефективної експлуатації, здійснене економічне обґрунтування реалізації технологічних операцій з використанням нового інструмента.

Проведено промислові іспити модифікованих інструментів, що показали доцільність використання нової технології на операціях нарізання різьб. Експериментально-теоретичні положення, отримані в дисертаційній роботі, використовуються в навчальному процесі на кафедрі інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф. Семка НТУ „ХПІ”.

**Особистий внесок здобувача.** Усі положення дисертації, що винесені на захист, отримані здобувачем особисто. Результати наведених експериментальних досліджень отримані здобувачем самостійно. Постановка задач та аналіз окремих результатів виконані з науковим керівником і частково із співавторами публікацій.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертації доповідалися та одержали позитивну оцінку на: міжнародних конференціях MicroCAD (Мішкольц, Угорщина – 2002, 2003, 2004 рр.; Харків – 2003, 2004 рр.); міжнародній конференції НТС-2004 (Сан-Ремо, Італія, 2004 р.); міжнародній конференції Euroomat-2005 (Прага, Чехія, 2005 р.); міжнародних семінарах – НТУ „ХПІ” (2004, 2006 рр.), Мішкольцького університету (Угорщина) (2004, 2005 рр.), університету КІТ (Японія) (2003 р.), університету Квебека (Канада) (2005 р). У повному обсязі дисертація доповідалася на науковому семінарі кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф. Семка НТУ „ХПІ”.

**Публікації.** Основний зміст дисертації викладено у 10 публікаціях, з них 5 – у фахових виданнях ВАК України.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається із вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, 4 додатків. Повний обсяг дисертації складає 214 сторінок, 49 рисунків за текстом, 31 рисунок на 25 окремих сторінках, 18 таблиць за текстом, 1 таблицю на 3 окремих сторінках, список літератури з 141 найменувань на 14 сторінках, додатки на 15 сторінках.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**Вступ.** У вступній частині обґрунтовується актуальність теми дисертаційної роботи, представлено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів досліджень та їхній зв'язок з науковими програмами, подано інформацію про апробацію роботи.

**У першому розділі** викладено результати аналітичного огляду літературних джерел з досліджуваної проблеми. В Україні й за її межами проведені численні дослідження зі створення й розвитку технології нанесення покриття на різальний інструмент. Значним внеском у розвиток цієї прогресивної технології є праці Внукова Ю.М., Костюка Г.І., Мацевитого В.М., Якубова Ф.Я., Антонюка В.С., Верещака А.С., Trent Ed., Wright P., Komanduri R., Shaw M.C., Jawahir I.C., Klocke F., Tonshoff N.K. Запропоновано класифікацію технологій модифікації поверхневого шару, що поділяються на методи нанесення покриттів на поверхню й на методи, які змінюють фізичний і хімічний стан поверхневого шару.

Головною проблемою створення покриття на поверхні різального інструменту вважається ступінь адгезії між початковою матрицею й шаром покриття. Її рішення можливе при створенні модифікованого поверхневого шару інструмента шляхом застосування лазерних технологій.

Запропоновано модернізовану схему модифікації матеріалу під дією лазерного випромінювання, що базується на раніше розробленій класифікації Коваленка В.С. Лазерні технології представлені трьома групами. Перша –

характеризує зміну поверхневих властивостей матеріалу під впливом теплових факторів. До неї відносяться такі процеси, як лазерне відпалювання, лазерне термічне зміцнення, лазерне зміцнення з оплавленням поверхні, аморфізація поверхні. Друга група являє собою технології, результатом яких є утворення на поверхні металу нового композиційного шару з новою структурою. Третя група – це технології лазерного легування, які розподіляються на лазерне легування з утворенням сплавів у поверхневому шарі початкового матеріалу, лазерне легування з утворенням композита в поверхневому шарі й лазерне легування з виділенням нової фази, що отримала назву – лазерна твердотільна імплантація (ЛТІ).

Для підвищення зносостійкості лезових різальних інструментів найчастіше використовують технологічні процеси першої й третьої груп – лазерне зміцнення й лазерне легування. Лідером у цьому напрямку є наукова школа НТУУ "КПІ" під керівництвом Коваленка В.С., а також важливі роботи Добротворського С.С., Костюка Г.І., Головка Л.Ф., Vgeeling J.A., Schaefer R.J. Лазерна обробка різального інструменту призводить до підвищення його працездатності. Лазерні технології, що забезпечують внутрішню модифікацію поверхневого шару інструментального матеріалу, демонструють перспективність даних підходів, тому що в цих випадках вдається забезпечити адгезію легованого шару з основною матрицею інструментального матеріалу. Аналітичний огляд літератури показав, що одним з найбільш перспективних способів внутрішньої модифікації інструментальних сталей є метод лазерної твердотільної імплантації, який дозволяє модифікувати інструментальний матеріал на досить велику (до 1,0-1,5 мм) глибину з утворенням міцних хімічних зв'язків між вихідною матрицею й легуючими частками. Принципову схему процесу ЛТІ показано на рис. 1.

Сутність технології полягає у тому, що поверхневий шар нерухокої інструментальної пластини плавить промінь лазера, який переміщується; у цей же час тверді частинки легуючого порошку подаються через газове сопло в розплавлену лазером зону. В наслідок швидкого охолодження, що займає долі секунди, частинки заглиблюються у метал і утворюється шар нового композиційного матеріалу.

У літературі відсутні описи механізмів розглянутого процесу. Серед відомих публікацій немає досліджень, де викладено умови проникнення твердих частинок у розплавлену матрицю матеріалу, після заглиблення й розчинення яких утворюється новий легований поверхневий шар.

Рис. 1 - Основні елементи спеціальної установки для лазерної твердотільної імплантації ( 1–лазер, 2–газове сопло, через яке подаються тверді частинки, 3–різальна пластина-матриця, 4–мідна пластина, 5–робочий стіл, 6–водяна охолоджувальна система).

До цього часу не вирішене важливе питання, яке полягає в створенні якісного модифікованого легованого шару, а саме, розробка достовірної моделі взаємодії легуючих частинок з об'ємом матриці основного матеріалу, розплавленого променем лазера. Успішне вирішення цього завдання є основою створення технології легування інструментальних матеріалів методом лазерної твердотільної імплантації.

**У другому розділі** викладено методики дослідження технології процесу лазерної твердотільної імплантації вуглецевих інструментальних сталей марки У8А й низьколегованих сталей ХВГ та працездатності інструментів з модифікованих матеріалів.

Технологічний комплекс для проведення досліджень з лазерної твердотільної імплантації створено на базі використання технологічного лазера на CO<sub>2</sub> потужністю 5 кВт моделі Trumpf TLC 105 (Будапештський технологічний науково-дослідний інститут «BAYATI»), який оснащено спеціальною установкою для змішування легуючих частинок у середовищі інертного газу з наступною їхньою подачею через сопло в зону легування, а також системою керування CNC.

У роботі запропоновано моделювання динаміки проникнення твердої частинки в рідину; вивчалася змочуваність матеріалів методом „відпочиваючої” краплі, щільність розчинів, поверхневий натяг розчинів, проведені дослідження тертя й зношування на установці типу «CSEM instruments. High-temperature tribometer» (Швеція). Вивчення якості поверхневого шару здійснювалося за допомогою профілографа типу «Surtronic 3+ profilometer» компанії Taylor and Hobson Precision, мікроструктурний аналіз виконували на растровому електронному мікроскопі „MRAY 1810” і рентгено-дифракційній установці мод. „D8 Advance”, вимір

мікротвердості здійснювався на установці типу «Carl Zeiss, JENA, Mikrohafterprüfer n. Nanemann» (Швеція). Дослідження процесу шліфування легованих пластин провадили на базі заточувального верстата мод. 3Б642. Дослідження механіки процесу різання (усадка стружки, сила різання), працездатності легованих різальних інструментів (зношування й стійкість) здійснювали на токарних верстатах мод. 16K20, 16K20T1, оснащених необхідною апаратурою.

**Третій розділ** присвячено експериментально-теоретичному обґрунтуванню умов створення поверхневого легованого шару вуглецевих і низьколегованих сталей методом лазерної твердотільної імплантації. Сформульовано основні вимоги до модифікованого матеріалу: забезпечення максимальної когезії атомної структури шару; забезпечення максимальної теплостійкості й теплопровідності поверхні; забезпечення достатньої твердості шару. Якщо модифікований шар має гетерогенну структуру, тобто складається з різних за твердістю фаз, то розмір більш твердої фази не повинен перевищувати 10 мкм для забезпечення необхідного радіуса округлення різальних кромки ( $\rho \approx 10 \div 15$  мкм) при заточуванні інструмента. Вибір оптимального легуючого хімічного елемента для вихідної інструментальної матриці здійснювався на підставі отриманої залежності (1) за критерієм якості  $K_{1,i}$ :

$$K_{1,i} = \frac{T_{nl,i}}{T_{nl,Fe}} \cdot \frac{\lambda_i}{\lambda_{Fe}} \cdot \left( 1 - \left| 1 - \frac{a_i}{a_{Fe}} \right| \right), \quad (1)$$

де  $T_{nl, i}$  – температура плавлення  $i$ -того легуючого елемента, °К;  $T_{nl,Fe}$  – температура плавлення заліза, °К;  $\lambda_i$  – теплопровідність  $i$ -того легуючого елемента, Вт/мК;  $\lambda_{Fe}$  – теплопровідність заліза, Вт/мК;  $a_i$  – період ґратки  $i$ -того компонента, м;  $a_{Fe}$  – період ґратки заліза, м.

Чим вище значення  $K_{1,i}$ , тим ефективнішим буде вплив даного легуючого елемента на підвищення когезії, теплостійкості й теплопровідності початкової металевої матриці. В якості легуючого елемента нами обрано вольфрам, що має максимальний параметр  $K_{1,i} = 3,9$ . Вольфрам в 2 рази підвищує, з одного боку, когезію й теплостійкість залізної матриці (це зумовлено теплою плавлення), а з іншого боку, в 2 рази збільшує теплопровідність.

Тип карбіду дрібнодисперсних твердих частинок за критеріями  $K_{2,i}$  та  $K_{3,i}$  обирався на підставі залежності (2), а метал карбіду визначався на підставі залежності (3):

$$K_{2,i} = \frac{H_i \cdot T_{nl,i} \cdot W_i \cdot \lambda_i}{H_{Fe} \cdot T_{nl,Fe} \cdot W_{Fe} \cdot \lambda_{Fe}} \cdot \left( 1 - \left| 1 - \frac{\alpha_i}{\alpha_{Fe}} \right| \right), \quad (2)$$

$$K_{3,i} = \frac{H_i \cdot T_{i\bar{e},i} \cdot W_i \cdot \lambda_i}{H_{Fe} \cdot T_{i\bar{e},Fe} \cdot W_{Fe} \cdot \lambda_{Fe}} \cdot \left( 1 - \left| 1 - \frac{\alpha_i}{\alpha_{Fe}} \right| \right) \cdot \left( 1 + \frac{\Delta_{i\bar{a}o} H_{MC}}{\Delta_{i\bar{a}o} H_{WC}} \right), \quad (3)$$

де  $H_i$  – мікротвердість  $i$ -того елемента, ГПа;  $H_{Fe}$  – мікротвердість заліза, ГПа;  $W_i$  – адгезійна енергія  $i$ -того елемента, Дж/м<sup>2</sup>;  $W_{Fe}$  – адгезійна енергія заліза, Дж/м<sup>2</sup>;  $\alpha_i$  – лінійний коефіцієнт розширення  $i$ -того елемента, 1/К;  $\alpha_{Fe}$  – лінійний коефіцієнт розширення заліза, 1/К.

В якості оптимальної легуючої твердої фази обрано карбід TiC із розмірами частинок до 10 мкм. Експериментальне й теоретичне вивчення процесу проникнення легуючих частинок TiC у розплавлений лазером поверхневий шар інструментальної матриці показало, що дрібні частинки TiC залишалися на поверхні розплавленої сталі й не проникали в об'єм рідкої матриці. Знайдені аналітичні співвідношення між відносною щільністю, змочуваністю й числом Вебера дозволили встановити, що при заданих початкових умовах (обмеження по швидкості проникнення й розміру частинок) здійснити проникнення карбідних частинок TiC в інструментальні матриці не уявляється можливим.

Запропоновано і розроблено новий різновид лазерної твердотільної імплантації. Суть цієї технології полягає у тому, що при додаванні у розплавлену сталеву матрицю частинок титану й карбиду вольфраму після затвердіння утворюється композиційний шар внаслідок обмінної реакції в об'ємі розплаву.

Відповідно до термодинамічних розрахунків при додаванні порошкової суміші металевого титану (Ti) і карбиду вольфраму (WC) у мольних співвідношеннях 1:1 крім сталеві матриці утворюється дві фази: фаза на основі карбиду титану (з деякою кількістю розчиненого вольфраму), а також складний карбід Fe<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C.

На підставі проведених досліджень запропоновано технологічні параметри для лазерної твердотільної імплантації в інструментальні сталі: легуюча порошкова суміш (WC+Ti) у відношенні 1:1, максимальні розміри частинок порошку – до 100 мкм, швидкість газового потоку – до 10 м/с.

**У четвертому розділі** викладено особливості технології лазерної твердотільної імплантації, дослідження якості поверхневого шару модифікованих інструментальних сталей і деякі експлуатаційні властивості змінених різальних пластин. Запропоновано раціональні умови технології легування: потужність лазера на CO<sub>2</sub> у режимі безперервного випромінювання становить 3 кВт, подача – 400 мм/хв., діаметр плями контакту – 2,0 мм. В якості легуючої суміші використано порошок WC+Ti у відношенні 1:1. Розмір частинок був у інтервалі 45–70 мкм. Вихідна концентрація порошку WC+Ti, заглибленого в матрицю, становила 4, 6, 10



ваг.% (щодо ділянки розплавленої матриці). Легований шар підлягав термічній обробці.

Концентрація порошку 4 ваг.% і 10 ваг.% (WC + Ti) приводить до утворення пор і тріщин у легованому шарі. Гомогенну безпористу структуру має шар, утворений ЛТІ при концентрації застосованого порошку (WC+Ti), рівній 6 ваг.% (рис.2) з розмірами частинок у композиційному шарі 2–4 мкм.

Рис. 2 - Легована зона зразка ХВГ при концентрації частинок у газовому потоці, рівній 6 ваг.%

Рентгеноструктурний аналіз (рис. 3) свідчить, що в модифікованій зоні ХВГ і У8А утворюються карбідні фази  $Fe_3W_3C$  і  $TiC$ , що підтверджує утворення нового легованого матеріалу в поверхневому шарі початкової інструментальної матриці.

Рис. 3 – До рентгено-структурного аналізу зразків У8А и ХВГ після ЛТІ

Дослідження поверхневого шару легованих методом ЛТІ інструментальних матеріалів показало, що композиційний шар зразків ХВГ і У8А, отриманий при концентрації (WC+Ti) частинок у газовому потоці 6 ваг.%, має рівномірну структуру. На цій підставі даний технологічний процес ЛТІ визнано оптимальним з усіх раніше розглянутих.

З дослідів на машині тертя було встановлено механізм контактної взаємодії легованих пластин У8А и ХВГ із контртілом SiC при різних значеннях температури зони контакту відповідно 25°C, 150°C, 300°C. Отримано залежність коефіцієнта тертя й величини зношування від довжини шляху контакту, кінцева величина якого склала 1000 м. Підвищення температури у всіх експериментах призводить до збільшення коефіцієнта тертя й зношування. Установлено, що тертя легованих ЛТІ пластин призводить до незначного збільшення коефіцієнта тертя (на 8–20%) у порівнянні з похідною інструментальною матрицею, що пояснюється наявністю великих об'ємів карбідів титану й вольфраму в модифікованому шарі, які знижують ефект пристосування. У той же час виявлено збільшення зносостійкості легованих ЛТІ пластин (у середньому у 1,5-2,0 раза). Таким чином, незначне збільшення коефіцієнта тертя не здійснює однозначного впливу на величину зносу, де вирішальними факторами є збільшення мікротвердості й теплопровідності.

Дослідження мікротвердості легованих інструментальних пластин У8А і ХВГ показало високе й стабільне значення цього показника в діапазоні 800-1100 HV на глибині до 1,0-1,1 мм, що дає можливість використання модифікованих пластин в якості різального інструменту.

**П'ятий розділ.** У процесі лазерної твердотільної імплантації формується поверхня з низькими параметрами якості за характеристиками макро- і мікрогеометрії. Надання легованій поверхні необхідних характеристик за точністю форми й шорсткості можливо здійснити шляхом додаткової технологічної операції – шліфування. Саме тому, що отриманий легований шар на поверхні матриці інструментального матеріалу У8А і ХВГ не досліджений з погляду оброблюваності нового інструментального матеріалу, п'ятий розділ присвячено вивченню процесу шліфування легованих пластин з У8А й ХВГ.

У якості базових матеріалів, які шліфують, обрані леговані 6 ваг.% (WC+Ti) інструментальні пластини У8А і ХВГ. У порівняльних випробуваннях використані сталі У8А, ХВГ і швидкорізальна сталь Р6М5.

Використовувались чашкові шліфувальні круги 150x10x5x32 з ельбора Л010 (125/100) – 100% – Б1-58. Вибір даних характеристик шліфувального круга заснований та підтверджується численними дослідженнями, проведеними Узуняном М.Д., Сизим Ю.А., Грабченком А.І., Внуковим Ю.М., Залогой В.А, Захаренком І.П., Поповим С.О. на легованих інструментальних

сталях. Наявність складних карбідів вольфраму й титану зумовлює необхідність вивчення різального рельєфу шліфувального круга.

На рис. 4 представлено графік розподілу висоти зерен на поверхні круга при шліфуванні сталі ХВГ і модифікованої ХВГ. Основний вплив на формування висотного розподілу зерен здійснює вплив на їхні поверхні оброблюваного матеріалу. Руйнування зерен і зменшення їхньої різновисотності призводить до деформації кривої розподілу висоти зерен. Руйнування найбільш виступаючих зерен призводить до збільшення щільності вершин зерен в розміщених ближче до рівня зв'язки круга. Криві розподілу при шліфуванні сталі ХВГ і У8А приблизно однакові, що свідчить про ідентичність механізмів зношування круга. При більш інтенсивному зношуванні зерен, що спостерігається при шліфуванні легованих сталей У8А і ХВГ, крива закону щільності розподілу висоти зерен зміщується до рівня зв'язки, при цьому щільність розподілу збільшується до 0,2-0,21.

Досліджено показники працездатності кругів із ельбора при шліфуванні інструментальних сталей ( $V_{кр}$ ,  $S_{прод}$ ,  $S_{поп}$ ).

Рис. 4 – Щільність розподілу зерен за висотою при шліфуванні модифікованої сталі ХВГ (А) і ХВГ (Б)

У таблиці 1 наведено зіставлення показників відносної питомої витрати у процесі шліфування різних інструментальних сталей ельборовими кругами.

Таблиця 1 – Зіставлення показників питомої витрати ельборового круга при заточуванні

Марка інструментального матеріалу	Р6М5	У8А	ХВГ	У8А+6% (WC+Ti)	ХВГ+6% (WC+Ti)
Показники питомої витрати, мг/г	3,5	5,0	6,8	10,3	15,5
Умови обробки	$V_{кр} = 25$ м/с, $S_{прод} = 3$ м/хв., $S_{поп} = 0,01$ мм/ход				

Вивчення різального рельєфу поверхні й показників працездатності ельборових кругів виявило, що здатність до шліфування модифікованих ЛТІ матеріалів У8А і ХВГ є гіршою, ніж вуглецевих і низьколегованих сталей, що

пояснюється наявністю карбідів вольфраму й титану, а також їх високою мікротвердістю.

Отримані закономірності дозволяють рекомендувати такі режими шліфування модифікованих ЛТІ сталей У8А і ХВГ: швидкість різання 25 м/с, поздовжня подача до 2 м/хв, поперечна подача до 0,03 мм/хід. При рекомендованих режимах витрата шліфувальних кругів з ельбору становить 5-15 мг/г. Зниження поздовжньої й поперечної подачі призводить до зменшення питомої витрати ельборових абразивів круга.

Із використанням растрової електронної мікроскопії й електро-дифракційного методу дослідження поверхні визначена природа зношування ельборових кругів при шліфуванні модифікованих ЛТІ інструментальних матеріалів, який визначається динамічним фактором, що інтенсифікується за рахунок адгезійних дій, викликаних легуючими частинками титану, оскільки титан вступає в хімічну взаємодію з зернами надтвердого нітриду бора.

Шорсткість поверхні модифікованих ЛТІ пластин У8А після заточування становить  $Ra=0,23-0,34$  мкм, а ХВГ–  $Ra=0,17-0,23$  мкм. Шорсткість ріжучої кромки таких пластин коливається в межах  $Ra=1,3-1,5$  мкм, видимих відколів на кромці не спостерігається. Отримані результати показали можливість створення з модифікованих ЛТІ матеріалів У8А і ХВГ різальних інструментів.

**У шостому розділі** розглядаються сфери ефективного використання інструментів з вуглецевих і низьколегованих матеріалів, модифікованих ЛТІ, з'ясовані основні фізичні закономірності процесу різання сталі 45 різцями, виготовленими із практично нових інструментальних матеріалів.

Оцінку деформаційних процесів, що відбуваються у шарі матеріалу сталі 45, який зрізається при точінні, провадили, вивчаючи коефіцієнт усадки стружки.

У зоні середніх швидкостей різання (15-35 м/хв) утворюється переважно зливна стружка. На передній поверхні легованих ЛТІ інструментів присутній загальмований шар, у той час як на базових інструментальних матеріалах спостерігається нарiст. Коефіцієнт усадки стружки при точінні легованими ЛТІ інструментами трохи нижче, ніж для різців з У8А і ХВГ (відповідно  $K_1 = 2,5$  і  $K_1 = 3,0$ ). Це пов'язано з фазово-структурними змінами у зоні контакту оброблюваного та інструментального матеріалу. Збільшення коефіцієнта тертя між легованим ЛТІ інструментальним і оброблюваним матеріалами сприяє більш інтенсивному зростанню кута зсуву.

Вивчення складових сил різання свідчить, що матеріал різальної частини інструмента незначно впливає на сили, особливо при невеликих значеннях подачі й глибини різання, при цьому сила різання при обробці легованим ЛТІ інструментом трохи більше, ніж при обробці звичайними інструментальними матеріалами. Збільшення подачі ( $S_0 \geq 0,1$  мм/об) і глибини ( $t \geq 0,4$  мм)

призводить до зниження темпу росту складових сил при обробці легованими інструментами. Глибина різання найбільш впливає на складові сили різання.

Зношування ріжучої частини модифікованих ЛТІ інструментів відбувається переважно по задній поверхні через високу твердість передньої поверхні та наявність невеликого загальмованого шару. Експериментальні дослідження працездатності різців, легованих 6 ваг.% (WC+Ti), виявили її збільшення в середньому в 1,5-2,0 рази у порівнянні з інструментами з У8А і ХВГ. Крім того, процес різання здійснювався з більш високими швидкостями різання (в 1,3-1,5 рази), які є недосяжними при роботі базовими інструментами з вуглецевими і низьколегованими інструментальними сталями. Вивчено вплив на стійкість інструмента двох основних технологічних факторів – швидкості різання й умов імплантації. Максимальна стійкість досягається при легуванні ЛТІ різального інструмента 6 ваг.% (WC+Ti).

Отримано залежності для розрахунку стійкості легованих ЛТІ різців від швидкості різання й умов імплантації (табл. 2).

Таблиця 2 – Вплив швидкості різання й умов імплантації на стійкість інструмента.

Інструментальний матеріал	Стійкість інструмента $T$ , мин.	
	Швидкість інструмента $v$ , м/хв	Умови імплантації $x$ , ваг.%
Легований ЛТІ У8А	$T = 1320 \cdot 0,858^v$	$T = -2,291 \cdot x^2 + 27,92 \cdot x - 20$
Легований ЛТІ ХВГ	$T = 2279 \cdot 0,889^v$	$T = -8,125 \cdot x^2 + 106,3 \cdot x - 215$

Встановлено природу зношування легованих ЛТІ різців У8А і ХВГ із використанням методів РЕМ і спектрального аналізу (рис. 5). Основною причиною зношування легованих ЛТІ різців У8А і ХВГ є абразивне зношування. При цьому більш інтенсивному зношуванню піддається безпосередньо матриця інструментального матеріалу. Висока твердість вуглецевих і низьколегованих сталей зберігається до температури 220–250 °С. При більш високих температурах у сталях починають відбуватися структурні перетворення. Твердість різко знижується й інструменти піддаються абразивному впливу з боку оброблюваного матеріалу. Карбіди вольфраму й титану за рахунок більш інтенсивного зношування матриці виступають над зношеною поверхнею (на це вказує тінь від виступаючих карбідів), але продовжують здійснювати різальну дію на оброблювану заготовку.

а)

б)

в)

г)

Рис. 5 - Зношена поверхня легованого ХВГ різця (а, б, в) і електронно-дифракційний спектр чорно-білих включень (г).

Спектральний аналіз стружки й обробленої поверхні не виявив наявності  $Ti$  й  $W$ , що свідчить про відсутність адгезійного зношування.

Розрахунок економічної ефективності використання різців із ХВГ і У8А, легованих методом ЛТІ, на операції нарізування різьблення підтвердив економічну доцільність використання нової технології.

Представлено акт промислових випробувань наведених розробок.

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена рішенням науково-практичної задачі по створенню модифікованого поверхневого шару з композиційного матеріалу за допомогою технології лазерної твердотільної імплантації порошку металевого титану й карбіду вольфраму в матрицю вуглецевої та низьколегованої сталей, розплавлених лазерним променем. Поверхневий шар композиційного матеріалу має товщину близько 1 мм у початковій матриці. Аналіз мікроструктури й фізичних властивостей отриманого матеріалу свідчить про його придатність до використання у якості інструментального. Різальний інструмент із модифікованого інструментального матеріалу за своїми експлуатаційними властивостями займає проміжне положення між інструментом з низьколегованої й швидкорізальної сталей.

У процесі виконання отримані наступні висновки:

1. На основі фізико-хімічної теорії металів, вивчення термодинамічних явищ і проведення комплексу експериментальних досліджень автором науково обґрунтовано технологію лазерного легування, яка дає можливість одержати новий композиційний інструментальний сплав, що являє собою сталеву матрицю із розчиненим вольфрамом, дрібними частинками карбіду титану і фази  $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ , тобто  $\text{Fe-W-Ti-C/TiC+Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ . Раціональний вибір легуючих елементів здійснено за допомогою запропонованих коефіцієнтів якості й механізму проникнення частинок у розплавлений лазером поверхневий шар інструментальної матриці, розмір карбідної фази в якому становить 2-4 мкм. Мікротвердість легованого ЛТІ шару – 800-1100 HV.

2. Встановлено механізм контактної взаємодії оброблюваного матеріалу й модифікованого ЛТІ різального інструменту, який підтверджує, що кращий рівень таких характеристик поверхневого шару, як твердість і теплопровідність, забезпечує стабільне збільшення зносостійкості різального інструменту (в 1,5-2,0 рази), незважаючи на невелике збільшення коефіцієнта тертя у порівнянні з вихідною матрицею інструментального матеріалу.

3. Вивчення рельєфу ріжучої поверхні й працездатності ельборових кругів свідчить, що здатність до шліфування модифікованих ЛТІ матеріалів дещо гірша, ніж вуглецевих і низьколегованих сталей. Це пояснюється наявністю карбідів вольфраму й титану, а також високою мікротвердістю модифікованого шару. При цьому спостерігається розкид щільності розподілу висоти зерен на 30 % і збільшується витрата ельборового круга в 2 рази. Мікрофотографії й електронно-дифракційні спектри дозволили виявити вплив частинок карбіду титану на зношуваність зерен круга на підставі того, що титан вступає в хімічну взаємодію із зернами ельбору-BN.

4. Проведено комплексні дослідження процесу точіння сталі 45 інструментами з модифікованим ЛТІ поверхневим шаром. Експериментальні дослідження працездатності різців, легованих 6 ваг. % (WC+Ti), виявили її збільшення в середньому в 1,5-2,0 рази у порівнянні із базовими інструментами з У8А і ХВГ. Крім того, обробка проводилася з більш високими швидкостями різання, які не є досяжними при роботі базовими інструментами. Вивчення характеру стружкоутворення виявило формування зливної стружки й загальмованого шару на передній поверхні інструмента. Коефіцієнт усадки стружки є трохи нижчим при різанні легованими ЛТІ інструментами, ніж при обробці базовими інструментальними сталями. Розходження між складовими сили різання несуттєве. Основною причиною зношування легованих ЛТІ різців У8А і ХВГ є абразивний фактор.

## ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Везуб О.Н., Грабченко А.И., Борош П., Веро Б., Каптаи Д. Улучшение поверхностного слоя низколегированных инструментальных материалов с помощью лазерной твердотельной имплантации. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків: НТУ «ХПІ». – 2003. – №8, т.1. – С. 7-17.

Здобувачеві належить виявлення та опис оптимальних умов лазерної імплантації інструментів з низьколегованих інструментальних матеріалів і проведені дослідження якості поверхневого шару.

2. Везуб О.Н. Изучение механизма проникновения твердой частицы в жидкость с целью оптимизации технологии лазерной твердотельной имплантации // Высокие технологии в машиностроении. – Харьков: НТУ «ХПІ». – 2003. – Вып.. 2. – С. 11-17.

3. Везуб О.Н. Технологические особенности создания композиционного легированного слоя на режущей поверхности низколегированных стальных инструментов методом лазерной твердотельной имплантации // Резание и инструмент в технологических системах.– Харьков: НТУ «ХПІ». – 2004. – Вып.66. – С. 25-33.

4. Везуб О.Н. Особенности процесса шлифования режущих инструментов, легированных методом лазерной твердотельной имплантации // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем.–Краматорськ, Київ. – 2006. – Вип. 20. – С. 270-275.

5. Везуб О.Н. Работоспособность режущего инструмента из углеродистых и низколегированных сталей после лазерной твердотельной имплантации // Резание и инструмент в технологических системах:– Харьков: НТУ «ХПІ», 2006. – Вып. 71. – С. 14-19.

6. O. Verezub, Z. Kalazi, G. Buza, P. Boross, G. Kaptay. Surface Metal Matrix Composite Fe-Ti-C/TiC Layers Produced by Laser Melt Injection Technology // Int. J. Advanced Metallic Materials. – Slovak Academy of Sciences. – 2003, pp. 297-300.

Здобувачем проведено дослідження якості поверхні різальних інструментів, отриманих шляхом лазерної імплантації.

7. O. Verezub, P. Boross, A. Grabchenko, G. Kaptay. Possibilities to Obtain W–alloyed, TiC–reinforced Composite Surface Layers on Carbon Steels by Laser Melt Injection. A theoretical Analysis. // Proc. of MicroCAD 2003 Conference. Section M. – University of Miskolc, 2003, pp. 59-64.

Здобувачем проведено аналіз умов одержання легованого шару на інструментальних матеріалах за допомогою технології лазерної імплантації.

8. Везуб О.Н., Грабченко А.И., Матсушита Т. Экспериментально-теоретическое моделирование динамики проникновения легирующих частиц в матрицу инструментального материала // Наука і освіта. – НТУ «ХПІ», Харків: НТУ «ХПІ». – 2004. –С. 59-66.



Здобувачем проведена експериментальна обробка отриманих результатів дослідження.

9. O. Verezub, G. Kaptay, T. Matsushita, K. Mukai. Penetration of Solid Particles into Liquid Metals as a First Step of Production Metal Matrix Composites by LMI technology // Int. Conf. Higt Temperature Capillarity HTC-2004. – San-Remo, Italy, 2004, pp. 75-76.

Здобувачем проведені дослідження якості поверхневого шару різальних інструментів після лазерної імплантації та їх роботоспроможності.

10. O. Verezub, G. Kaptay, T. Matsushita, K. Mukai. Penetration dynamics of solid particles into liquids Higt-speed experimental results and modeling // Int. J. Materials Science Forum. – Switzerland. Trans. Tech. Publications. – 2005, vol. 473-474, pp. 429-434.

Здобувачем сформульована задача досліджень, виконані аналіз і узагальнення результатів.

### АНОТАЦІЇ

**Верезуб О.М. «Підвищення працездатності різального інструменту із вуглецевих та низьколегованих сталей шляхом лазерної твердотільної імплантації». – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти. – Національний технічний університет „Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2006.

Розроблено наукові принципи створення модифікованого поверхневого шару композиційного матеріалу за допомогою технології лазерної твердотільної імплантації порошку металевого титану й карбіду вольфраму в матрицю вуглецевої та низьколегованої сталей, розплавлених лазерним променем. Поверхневий композиційний шар має товщину близько 1 мм у вихідній матриці інструментального матеріалу. Різальний інструмент із модифікованого інструментального матеріалу за своїми експлуатаційними властивостями займає проміжне положення між інструментом з низьколегованої й швидкорізальної сталей.

На основі фізико-хімічної теорії металів, вивчення термодинамічних явищ і проведення комплексу експериментальних досліджень науково обґрунтовано технологію лазерного легування, що дає підстави одержати новий композиційний інструментальний сплав, що являє собою сталеву матрицю із розчиненим вольфрамом, дрібними частинками карбіду титану і фази  $Fe_3W_3C$ , тобто  $Fe-W-Ti-C/TiC+Fe_3W_3C$ .

Вивчення рельєфу ріжучої поверхні й працездатності ельборових кругів свідчить, що здатність до шліфування легованих ЛПІ матеріалів дещо гірша, ніж вуглецевих і низьколегованих сталей.

Мікрофотографії й електронно-дифракційні спектри дозволяють установити вплив частинок карбіду титану на зношуваність зерен круга, тому що титан вступає в хімічну взаємодію із зернами ельбору VN.

Проведено комплексні дослідження процесу точіння сталі 45 інструментами з модифікованим ЛТІ поверхневим шаром. Експериментальні дослідження працездатності різців, легованих 6 ваг. % (WC+Ti), виявили збільшення працездатності в середньому в 1,5-2,0 рази у порівнянні із базовими інструментами з У8А і ХВГ.

*Ключові слова:* різальний інструмент, лазерна твердотільна імплантація, роботоспроможність, шліфування, якість поверхневого шару.

**Верезуб О.Н. «Повышение работоспособности режущего инструмента из углеродистых и низколегированных сталей путем лазерной твердотельной имплантации». – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.01 – процессы механической обработки, станки и инструменты. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2006.

В диссертации представлены разработанные соискателем научные принципы создания модифицированного поверхностного слоя инструментального композиционного материала с помощью технологии лазерной твердотельной имплантации (ЛТИ) порошка металлического титана и карбида вольфрама в матрицу углеродистой и низколегированной сталей, расплавленных лазерным лучом. Поверхностный композиционный слой имеет толщину около 1 мм в исходной матрице Fe-C инструментального материала. Анализ микроструктуры и физических свойств полученного материала показал его пригодность к использованию в качестве инструментального. Режущий инструмент из модифицированного инструментального материала по своим эксплуатационным свойствам занимает промежуточное положение между инструментом из низколегированной и быстрорежущей сталей.

На основе физико-химической теории металлов, изучения термодинамических явлений и проведения комплекса экспериментальных исследований научно обоснована технология лазерного легирования, позволяющая получить новый композиционный инструментальный сплав, представляющий собой стальную матрицу с растворенным вольфрамом, мелкими частицами карбида титана и фазы  $Fe_3W_3C$ , то есть Fe-W-Ti-C/TiC+ $Fe_3W_3C$ . Рациональный выбор легирующих элементов осуществлен с помощью предложенных коэффициентов качества и механизма внедрения частиц в расплавленный лазером поверхностный слой исходной инструментальной матрицы, размер карбидной фазы в котором составляет 2-4 мкм. Микротвердость слоя – 800-1100 HV.

Изучение рельефа режущей поверхности и показателей работоспособности эльборовых кругов при заточке таких пластин показывает, что шлифуемость модифицированных ЛТИ материалов несколько хуже, чем углеродистых и низколегированных сталей. Это объясняется высокой микротвердостью модифицированного слоя, насыщением его карбидами вольфрама и титана. При этом происходит разброс плотности распределения высоты выступания зерен над связкой на 30 % и увеличивается расход эльборового круга в 2 раза. Микрофотографии и электронно-дифракционные спектры позволили установить влияние частиц карбида титана на износ зерен круга, так как титан вступает в химическое взаимодействие с зёрнами сверхтвёрдых нитридов бора BN.

Проведены комплексные исследования процесса точения стали 45 инструментами с модифицированным поверхностным слоем. Установлены особенности механизма контактного взаимодействия модифицированного ЛТИ режущего инструмента с обрабатываемым материалом. Изучение характера стружкообразования указывает на образование сливной стружки и наличие заторможенного слоя на передней поверхности инструмента. Коэффициент усадки стружки несколько ниже при резании модифицированными инструментами, чем при обработке базовыми инструментальными сталями. Составляющие силы резания мало различаются между собой.

Превалирующее влияние таких характеристик поверхностного слоя как твердость и теплопроводность обеспечивает стабильное увеличение износостойкости режущего инструмента несмотря на небольшое повышение коэффициента трения по сравнению с исходной матрицей инструментального материала – У8А и ХВГ.

Экспериментальные исследования работоспособности резцов, легированных 6 вес.% (WC+Ti), показали увеличение работоспособности в среднем в 1,5-2,0 раза, по сравнению с инструментами из У8А и ХВГ. Кроме того, обработка проводилась с более высокими скоростями резания, которые не достижимы при работе базовыми инструментальными сталями. Основной причиной износа легированных резцов У8А и ХВГ является абразивный износ. Расчет экономической эффективности использования резцов из У8А и ХВГ, легированных методом лазерной твердотельной имплантации, подтвердил экономическую целесообразность использования технологии в условиях мелкосерийного и серийного производства.

*Ключевые слова:* режущий инструмент, лазерная твердотельная имплантация, работоспособность, шлифование, качество поверхностного слоя.

**Verezub O.N. «Increase of cutting efficiency of cutting tools made of carbon and low-alloyed steels by laser melt injection technology». – Manuscript.**

Dissertation for PhD degree in technics, speciality 05.03.01 – machining processes, equipment and tool. National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2006.

This thesis presents the scientific principles for the development of a new, modified tool composite material based on the Laser Melt Injection (LMI) technology. During the new special LMI process the mixture of titanium and tungsten carbide powder is being blown into the surface of carbon and low-alloyed steels, melted by laser beam. The final thickness of the Fe-W-Ti-C/TiC+Fe<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C composite layer is approximately 1 mm. The performance characteristics of the cutting tool made of this modified tool material enable to place it in between the cutting tools made of low-alloyed steel and high-speed steel.

The rational selection of alloying elements was performed using three new quality indices. Additionally, the mechanism and criterion of particle incorporation into a laser melted tool matrix surface was studied and taken into account in this development. The final size of precipitated carbide phase appeared to be 2-4 μm. The microhardness of the alloyed layer is 800-1100 HV.

The investigation of the surface morphology and the ability of BN abrasive discs to grind the new material have shown that the machineability of the alloyed materials is slightly worse in comparison with carbon and low-alloyed steels. It is explained to be due to the presence of tungsten and titanium carbide particles as well as to the high microhardness of the modified surface. Microphotographs and EDS spectra allow to find out the influence of TiC particles on the abrasive wear due to the chemical interaction of titanium with BN grains.

The process of metal cutting has been investigated for steel 45 by the modified surface layer. The tool life of the new material alloyed with 6 w% (WC+Ti) has been found to be higher by 1,5-2 times on average compared to tools made of alloys U8A and HVG. The chip's shrinkage ratio appeared to be several times lower during the treatment by the new composite material compared to the traditional tool steels. On the other hand, the components of the cutting force have little difference when using composite and traditional cutting materials. Abrasive wear is the main reason of wear of alloys U8A and HVG.

*Keywords:* machining tool, laser melt injection, working capacity, grinding, surface layer condition.