

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

ШЕВЧЕНКО СВІТЛАНА МИХАЙЛІВНА

УДК 621.9

**ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ
МАШИН МЕТОДАМИ ХІМІКО-ТЕРМІЧНОЇ ТА АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОЇ
ОБРОБОК**

05.02.08 – технологія машинобудування

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі «Матеріалознавство» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Степанов Михайло Сергійович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
професор кафедри технології
машинобудування і металорізальних верстатів.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Ларшин Василій Петрович
Одеський Національний політехнічний
університет, професор кафедри технології
машинобудування;

доктор технічних наук, професор
Роп'як Любомир Ярославович
Івано-Франківський Національний технічний
університет нафти і газу, професор кафедри
комп'ютеризованого машинобудування.

Захист відбудеться « 12 » травня 2021 року о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.12 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розісланий «09» квітня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Ніна ЗУБКОВА

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Підвищення надійності елементів машин і механізмів є сьогодні основним завданням збільшення їх ресурсу. Одним із головних способів його вирішення є використання досягнень в області зміцнення поверхні, яке забезпечується новітніми енергозберігаючими та екологічно безпечними технологіями, що допомагають вирішувати питання модифікації поверхні на етапах створення, експлуатації та ремонту конструкційних елементів обладнання.

Послідовність виконання операцій механічної, термічної, хіміко-термічної обробки істотно впливає на експлуатаційні характеристики. Практика показує, що комбінування (синтез) різних технологічних методів сприяє підвищенню експлуатаційних властивостей поверхонь і довговічності деталей. Технології комплексного іонного азотування (КІА) та електро-ерозійного алмазного шліфування (ЕАШ) відносяться до таких комбінованих методів.

При іонному азотуванні дифузійне насичення поверхні азотом відбувається з використанням низькотемпературної плазми. Спосіб дифузійного насичення поверхні азотом з використанням низькотемпературної плазми якісно відрізняється від класичних схем хіміко-термічної обробки значно вищою швидкістю дифузії, відсутністю викривлення поверхні, можливістю значного зниження температури процесу і екологічною чистотою.

Вивчення взаємозв'язку між технологією процесу, а також структурою, яка утворюється, і властивостями дозволяє, шляхом удосконалення процесу, прискорити перехід до більш прогресивних технологій для підвищення якісних характеристик виробів і збільшення ресурсу їх роботи. КІА, яка складається з процесу азотування та наступної термічної обробки, є ресурсозберігаючою технологією.

Технологічний процес механічної обробки ЕАШ вигідно відрізняється від нині існуючих оздоблювальних методів своєю технологічністю і ресурсоекономічністю. ЕАШ можна розглядати не тільки, як спосіб отримання тіл певних геометричних розмірів та форми, але і як цілеспрямований спосіб зміни структури і властивостей металу. У зоні контакту шліфувальний круг–деталь виникають умови, характерні для імпульсних зміцнюючих технологій, метою яких є отримання на обробленій поверхні наноструктурного мартенситу – структури «білого шару» (БШ), званого також гарденітом.

Беручи до уваги відсутність системних досліджень поверхневих і приповерхневих шарів деталей, працюючих в різних умовах, отриманих при обробці методами КІА та ЕАШ, дослідження впливу різних режимів КІА та ЕАШ на параметри якості поверхневого шару (ПШ) деталей – є актуальним для теорії і практики металообробки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано згідно Закону України № 2519-IV від 09.10.2010 р. «Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки», за пріоритетним напрямком розвитку науки і техніки «Новітні та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі».

Роботу виконано на кафедрі «Матеріалознавство» Національного технічного

університету «Харківський політехнічний інститут» згідно плану НДР МОН України.

Окремі дослідження за темою дисертаційної роботи виконано відповідно до тематики держбюджетних тем: «Розробка наукових основ структурної інженерії вакуумно-плазмових багатошарових надтвердих захисних покриттів» (ДР № 0116 U 000853); «Розробка матеріалознавчих основ використання високопродуктивних іонно-плазмових технологій для трьохрівневої інженерії поверхні» (ДР № 0118 U 002044); госпдоговірної роботи «Дослідження кілець підшипників у частині визначення відсотка залишкового аустеніту рентгеноструктурним методом» (Договір №20616).

Мета дослідження: підвищення зносостійкості деталей машин шляхом обробки комплексним іонним азотуванням (КІА) та зміцнюючим електро-ерозійним алмазним шліфуванням (ЕАШ).

Для досягнення визначеної мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Проаналізувати сучасні тенденції застосування зміцнюючих технологій обробки деталей машин й інструментів для визначення перспектив використання КІА та ЕАШ.

2. Провести моделювання дифузійного перерозподілу азоту в сталевих деталях при їх ізотермічному нагріві після операції іонного азотування в рамках комплексної технології та визначити залежність енергетичного впливу на формування зміцнюючого шару для абразивного та електро-ерозійного алмазного шліфування.

3. Встановити вплив послідовності технологічних операцій КІА на структуру та властивості поверхневих і приповерхневих шарів сталевих заготовок та проаналізувати можливість застосування КІА для деталей машин й інструментів різних за призначенням.

4. Вивчити вплив режимів ЕАШ на параметри якості ПШ сталевих заготовок, виявити особливості сформованих в результаті шліфування структури БШ та визначити раціональні режимні параметри зміцнюючого ЕАШ ПШ деталей зі сталей, що відрізняються за хімічним складом.

5. Оцінити зносостійкість поверхні після ЕАШ в порівнянні з алмазним шліфуванням (АШ) і ЕАШ з включенням етапу виходження.

6. На основі отриманих результатів дати технологічні рекомендації та намітити шляхи їх впровадження у виробничу практику по застосуванню методів КІА та ЕАШ для підвищення ресурсу деталей й інструментів.

Об'єкт дослідження: технологічні процеси комплексного іонного азотування (КІА) та електро-ерозійного алмазного шліфування (АШ та ЕАШ) сталевих заготовок.

Предмет дослідження: вплив параметрів технологічних процесів КІА, АШ та ЕАШ на геометричні та фізико-механічні характеристики ПШ сталевих заготовок.

Методи досліджень. Дослідження базується на теоретичних основах технології машинобудування і теорії різання. Моделювання перерозподілу азоту в сталевих деталях проводили в програмному середовищі COMSOL Multiphysics 5.5. Визначення структурних перетворень і мікротвердості ПШ проводили за допомо-

гою металографічних і дюрOMETPічних досліджень з використанням оптичної і растрової електронної мікроскопії. Для вивчення фазового складу ПШ використовували метод рентгенівського структурного аналізу. Оцінку залишкового напруженого стану здійснювали з використанням $\sin^2\psi$ -методу. Оцінювання характеристик субструктури ПШ: величини мікродеформації (мікронапруг) і розмір областей когерентного розсіювання (ОКР) рентгенівських променів проводили при рентгенодифракційному дослідженні. Вивчення поверхні деталей, а також розрахунок площі зони ерозії (лунок) здійснювали за допомогою макроскопічного аналізу. Характеристики шорсткості досліджували за допомогою приладу Surtronic 3+. Оцінку вмісту вуглецю по глибині ПШ проводили за допомогою растрової електронної мікроскопії (РЕМ).

Наукова новизна отриманих результатів полягає в підтвердженні можливості створення оптимальних технологічних умов зміцнення поверхні деталей і інструментів на етапах технологічного процесу обробки комплексним іонним азотуванням за рахунок глибинного легування азотом та електро-ерозійним алмазним шліфуванням за рахунок формування безструктурного мартенситу – гарденіту. При цьому *вперше*:

- для шліфування отримані залежності, які визначають характер енергетичного впливу, що сприяє утворенню зміцненого БШ, і враховують деформаційний фактор в зоні різання;

- запропоновано раціональну структуру технологічного процесу КІА, що забезпечує зміцнення деталей й інструментів, які працюють в умовах зносу і ударних навантажень, що дає змогу збільшити ресурс деталей;

- визначено вплив вихідного структурного стану, концентрації вуглецю і його розподіл по глибині БШ при зміцнюючому ЕАШ на мікротвердість, ступінь зміцнення, характеристики субструктури і розміри поверхневих ерозійних дефектів, що дало змогу керувати процесом зміцнення ПШ деталей;

отримав подальший розвиток:

- аналіз закономірностей формування структури ПШ, факторів її стабільності і визначаючих виникаючого після КІА дефектного шару, який усувається методами механічної обробки.

Практичне значення отриманих результатів.

Експериментально вивчено вплив послідовності технологічних операцій КІА на морфологію структури і рівні твердості сталевих виробів, що стало основою запропонованого технологічного процесу з визначеними в дослідженні режимами і припусками. Отримано патент на корисну модель «Спосіб хіміко-термічної обробки сталевих виробів» (№ 117008 Україна, МПКС23С 14/32, С21D 1/06). Експериментально доведено можливість використання методу ЕАШ для забезпечення високої твердості і зносостійкості ПШ з одночасним формуванням в деталях необхідної геометричної форми, розмірів і шорсткості. Розроблено практичні рекомендації щодо оптимізації структури в процесі ЕАШ для доевтектоїдних і заевтектоїдних сталей. Розроблено технологічну схему зміцнення для прогнозування характеристик БШ (твердості, глибини) для сталей, що відрізняються вмістом вуглецю шляхом варіювання параметрами ЕАШ. Рекомендована оптимальна об-

ласть застосування методу електро-ерозійного алмазного зміцнення: для прецизійних деталей, що працюють на тертя при відсутності динамічних навантажень.

Розробки, які виконані в дисертації, використовуються в навчальному процесі для студентів бакалаврів і магістрів зі спеціальності 131 «Прикладна механіка», 132 «Матеріалознавство» та 142 «Енергетичне машинобудування».

Основні практичні результати роботи впроваджені:

– на ТОВ «ГА Проект»: при зміцненні комплексним ХТО заготовок пуансонів та матриць; –на приватному акціонерному товаристві “ХАРКІВПРОДМАШ”: при виробництві матриць та кріплення з різними за діаметром отворами застосовують пуансони, заготовки яких пройшли зміцнення комплексною ХТО.

Особистий внесок здобувача. Теоретичні та експериментальні результати досліджень, що винесені на захист, отримані автором самостійно. Серед них: експериментальне дослідження мікроструктури та властивостей заготовок зі сталей різних марок після КІА за різними технологічними режимами; експериментальні дослідження впливу режимів АШ і ЕАШ та попереднього стану сталевих заготовок на ефективність їх зміцнення та вибір оптимального режиму ЕАШ для зміцнення; експериментальне дослідження впливу хімічного складу сталевих заготовок на ефективність зміцнення при ЕАШ; експериментальні дослідження фазових та структурних перетворень в ПШ сталевих заготовок при обробці АШ і ЕАШ; розробка технології КІА та технологічної схеми ЕАШ для оптимального зміцнення; дослідження параметрів якості поверхні після зміцнення ЕАШ.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати роботи доповідалися на Всеукраїнських та Міжнародних науково-практичних конференціях: “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я” (Харків, 2015-2020), “Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки” (Київ, 2017).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 16 наукових публікаціях, з них: 5 статей у наукових фахових виданнях України (2 – у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз); 3 – у закордонних періодичних фахових виданнях; 1 патент України на корисну модель; 7 – у матеріалах конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із анотацій двома мовами, вступу, п’яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 153 сторінки, 52 сторінки з рисунками і таблицями – на окремих аркушах; всього дисертація містить 110 рисунків, 37 таблиць, список використаних джерел з 286 найменувань, 7 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету, задачі, об’єкт, предмет і методи дослідження, наведено наукову новізну і практичне значення результатів дисертації, подано дані про апробацію роботи, публікації і особистий внесок здобувача в ході виконання досліджень.

У першому розділі зв’язку з відсутністю системних розробок зміцнених ПШ, отриманих методами КІА і ЕАШ, проведено аналіз і дана класифікація су-

часних обробно-зміцнюючих методів обробки сталевих деталей. Показано, що не існує універсального методу зміцнення деталей, здатного посилити ту чи іншу експлуатаційну властивість.

Питанням розробки різних методів зміцнення, вивчення властивостей і фізичної природи виникнення наноструктури БШ присвятили свої праці Б.М. Аскіназі, Ю.І. Бабей, В.П. Багмут, А.Ф. Головін, Г.П. Іванов, І.М. Кідін, Б.І. Костецький, О.В. Кудряков, В.Г. Куранов, Л.С. Палатник, О.Л.Плотніков, Є.І. Тескер та ін.

Дослідження технологій азотування виконували: Ю.М. Лахтін, Б.Н. Арзюма-сов, Я.Д. Коган, В.М. Зінченко, А.А. Андрєєв, О.В. Соболев та інші. Останнім часом розроблені процеси азотування у вакуумі в тліючому та у вакуумно-дуговому газовому розрядах (А.О. Андрєєв, В.О. Александров, В.О. Столбовий).

Великий обсяг досліджень що визначають вплив параметрів шліфування на фізико-механічний стан ПШ в процесі абразивного і алмазного шліфування виконали С.Г. Редько, Є.М. Маслов, А.В. Усов, В.П. Ларшин, А.В. Якимов, Н.К. Беззубенко та ін. Грунтуючись на ці дослідження, а також праці професора Беззубенко Н.К., який розробив ЕАШ, проаналізовано особливості даного методу і перспективи його застосування для зміцнення ПШ деталей. Проведений аналіз підтвердив положення про те, що конкретні умови експлуатації деталей понукають застосування різних зміцнюючих методів і технологій, а також соорієнтував сформулювати основні задачі дисертаційного дослідження.

У другому розділі сформульовано теоретичні передумови технологій зміцнення КІА та ЕАШ.

Запропоновано оцінювати можливість формування зміцненого шару, що отримується при виконанні технологічного процесу з урахуванням енергетичного впливу на заготовку, який визначено залежністю

$$E_i = \sum_{i=1}^n N_i \cdot t_i, \quad (1)$$

де N_i і t_i – потужність і час, що витрачається на i -ту операцію технологічного процесу.

Для цього виконано аналіз технологічного маршруту обробки шпинделя зубшліфувального верстату з побудовою діаграм температурного (рис. 1, а) і силового впливу (рис. 1, б) з урахуванням тимчасового чинника.

З метою визначення параметрів зміцненого шару проводили моделювання процесу дифузії азоту в деталях з легованої сталі. Модель дифузії описано законом Фіка

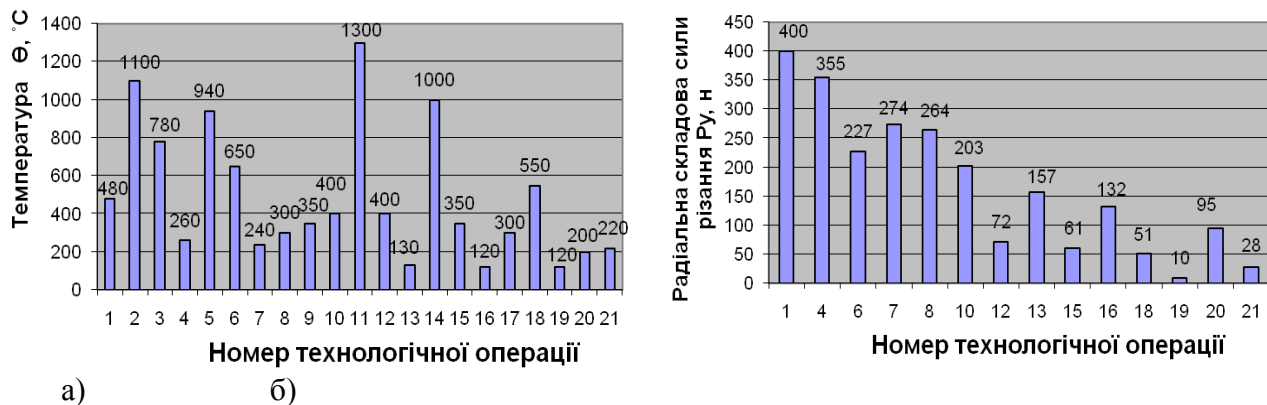
$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right), \quad (2)$$

де C – концентрація компонента в точці с координатами x, y, z в момент часу t , D – коефіцієнт дифузії.

Для твердих розчинів проникнення швидкість дифузії контролюється її коефіцієнтом D , який описується законом Арреніуса

$$D = D_0 \cdot \exp \left(-\frac{Q}{RT} \right), \quad (3)$$

де D_0 – коефіцієнт дифузії, D_0 – предекспоненціальна множина, Q – енергія активації, R – універсальна газова постійна, T – абсолютна температура.

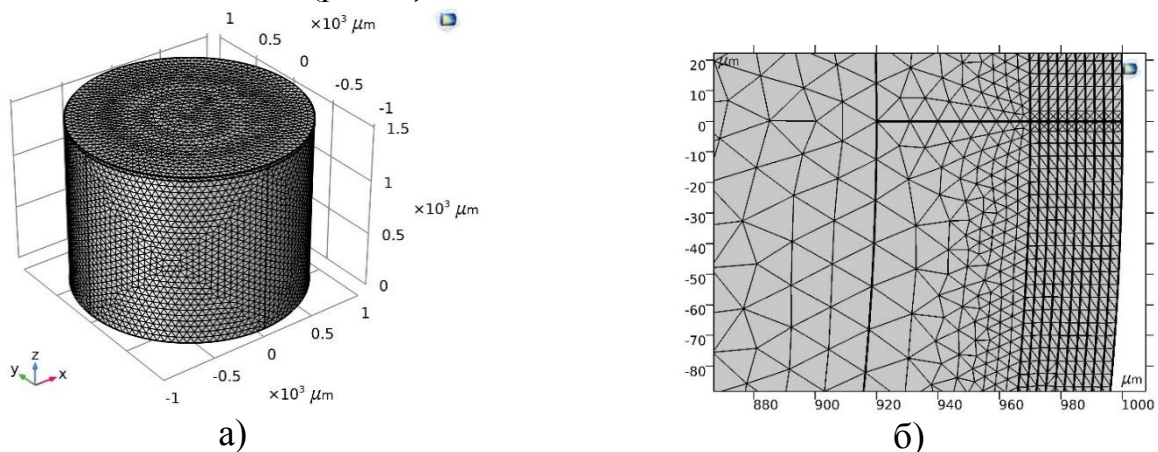


а)

б)

Рисунок 1 – Діаграма зміни температури впливу та радіальної складової сили різання, що діє на заготовку протягом технологічного процесу

Моделювання проводили в програмному середовищі COMSOL Multiphysics 5.5 у модулі конвекція-дифузія класичних диференціальних рівнянь із складанням кінцево-елементної моделі (рис. 2)



а)

б)

Рисунок 2– Геометрична кінцево-елементна а) 3D-модель; б) 2D-модель

Азотований шар на поверхні деталі (пуансону) за товщиною 80 мкм зовні містив ε -нітриди (до 30 мкм) та глибше – композицію з $\varepsilon + \gamma' + \alpha$ -фаз. Під час витримання від десятків секунд до кількох хвилин, коли не потрібно урахувувати фазові перетворення, закономірно зростає глибина проникнення азоту та спадає його вміст на поверхні. При цьому в зоні окружності завжди спостерігався підвищений вміст азоту. За загальним вмістом азоту в деталі його концентрація у нітридному шарі розрахунково становила 8,7 % ваг. (27 % ат.), що відповідає даним діаграми Fe-N при азотуванні в інтервалі температур доєвтектоїдного перетворення (560°C).

У результаті моделювання отримали значення глибини проникнення азоту в ПШ з урахуванням часу витримки заготовки в печі при температурі гартування ($t_{\text{H}} = 860^\circ\text{C}$): контурні графіки (рис. 3). Оцінки свідчать, що на глибині до 25 % від загальної досягнутої товщини дифузійного насичування, є не менш півтора кратне перевищення вмісту азоту в порівнянні з його значеннями на тих же глибинах, але

вдалині. Таке відносне перевищення концентрації азоту зберігається і при більшому часі витримування (рис. 3): як свідчать контури, на окружності торця, вміст атомів N впав до 18 %, а на зовнішніх повернях на деякій відстані від поверхні – до 13 % (ат.). Взагалі, при такому часі витримування потрібно враховувати розчинювання нітриду. Наведене свідчить на користь того, що в зонах перетину поверхонь зовнішніх ребер мається геометричний ефект підвищеного вмісту азоту при його перерозподілі, що повинно враховуватися фінішною механічною обробкою.

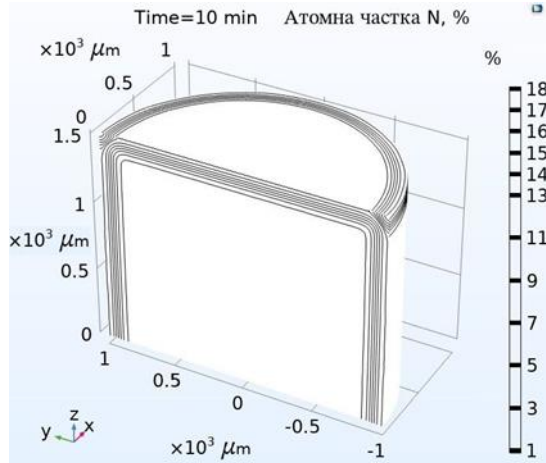


Рисунок 3– 3D-модельовання розподілу концентрації азоту через 10 хвилин витримування при температурі гартування

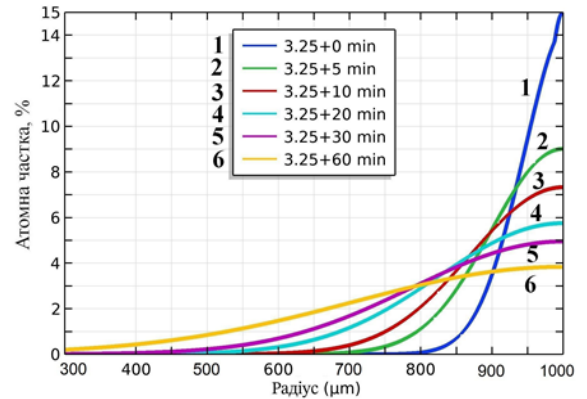


Рисунок 4– Радіальний розподіл (поверхнева концентрація) азоту з моменту фазового перетворення (дифузійна довжина, мкм) при різному часі витримування ($t_n = 860^\circ\text{C}$) на кінцевому етапі моделювання

Двовимірне моделювання перерозподілу азоту з урахуванням фазового перетворення ε -нітриду в азотистий аустеніт (рис. 4) показало, що при зазначених припущеннях, перетворення при температурі 860°C відбувається за 3,25 хв. Нітридний шар, незважаючи на своє поступове розчинення, зменшує середнє значення концентраційного профілю азоту в аустеніті. Але при цьому глибину дифузійного насичення суттєво не знижує. За даними моделювання, для дифузії азоту на глибину до 750 мкм потрібно майже часове витримування при температурі гартування (рис. 4, лінія 6).

На основі дослідження Ю.І. Бабія отримані формули енергетичного коефіцієнту, який обумовлює виникнення БШ при електро-ерозійному алмазному (4) і абразивному (5) шліфуванні:

$$K_e = K_{EASH} \cdot \left(\frac{a}{\pi}\right)^{0,5} \cdot \frac{t^{0,67} \cdot V_{np}^{1,6} \cdot V_z^{1,09} \cdot (D_k + d_z)}{D_k \cdot d_z \cdot H_k \cdot \lambda \cdot M}; \quad (4)$$

$$K_e = K_a \cdot \left(\frac{a}{\pi}\right)^{0,5} \cdot \frac{\sigma_m^{0,645} \cdot H^{0,301} \cdot V_{non}^{1,503} \cdot (D_k + d_z)}{z_3^{0,085} \cdot V_z^{0,595} \cdot S_{np}^{0,073} \cdot t_{np}^{0,096} \cdot H_k^{1,5} \cdot \lambda \cdot M}, \quad (5)$$

де K_{EASH} та K_a – емпіричні коефіцієнти ЕАШ та АШ; a , λ – коефіцієнти температуро- і теплопровідності матеріалу, що оброблюється; H_k – твердість круга (звуковий індекс кола за приладом «Звук 202»; z_3 – номер зернистості шліфувального круга за ГОСТом; σ_m – межа міцності сталі при високих температурах, $(\text{кг}/\text{мм}^2)$; S_{np} і t_{np} – швидкість продовжнього переміщення алмазу і глибина при правці, $(\text{мм}/\text{хв.})$ і (мм) ; V_z – швидкість заготовки $(\text{м}/\text{хв})$; параметр M залежить від схеми

обробки, від співвідношення V_3 – швидкості переміщення теплового джерела (заготовки) і V_{np} – швидкості поздовжнього переміщення круга.

З урахуванням енергетичного коефіцієнту, отримано формулу для визначення глибини зміцненого шару

$$h_T = \frac{K_E \cdot \lambda \cdot H_k^2 \cdot L \cdot c \cdot T_3}{K_x \cdot P_z \cdot P_y}, \quad (6)$$

де K_x – коефіцієнт, що враховує співвідношення між швидкістю шліфувального круга і швидкістю заготовки. Для $V_k = 50$ м/с, $K_x = 60$; для $V_k = 30$ м/с, $K_x = 30$.

Ця залежність враховує температурний, силовий і тимчасовий фактори в зоні різання.

Запропоновано після зміцненого шліфування при виникненні тріщин проводити остаточну обробку за проходами з урахуванням глибини тріщин, які утворилися після кожного проходу. При цьому загальний припуск визначали за формулою

$$Z = l_{TyA} + l_{T1} + l_{T2} + \dots + l_{Tn}, \quad (7)$$

де l_{TyA} – глибина тріщини, що виникає в результаті зміцнюючого ЕАШ; l_{T1} , l_{T2} , l_{Tn} – глибина тріщини, що виникає після 1-го, 2-го і n-го проходу.

З метою визначення параметрів шліфування при виходженні для усунення дефектів, що виникають після ЕАШ, отримана залежність:

$$l_\lambda = \frac{2\pi \cdot R_{зпоч.} \cdot H_{ш}}{k_p \cdot j_\Sigma} \cdot (V_{закін.} - 0,25\mu_k \cdot n), \quad (8)$$

де j_Σ – жорсткість технологічної системи; μ_k – лімітуюче значення круглості; n – частота обертання деталі; $H_{ш}$ – ширина шліфування; dQ – ріжуча здатність круга (фактична швидкість знімання на різних за кількістю оборотів); k_p – коефіцієнт ріжучої здатності шліфувального круга; $R_{зпоч.}$ – початковий радіус заготовки після остаточного шліфування (в момент вимикання приводу подач шліфувального круга); $R_{зкін.}$ – кінцевий радіус заготовки після виходження; фактична швидкість знімання металу під час виходження змінюється від швидкості $V_{закін.}$ попередньої виходженню до кінцевої швидкості $V_{кін.}$ (у кінці етапу виходження); l_λ – максимальна глибина лунки.

Формула (8) дає можливість визначити тривалість виходження в залежності від розмірів дефекта (глибини лунки), що утворюються після ЕАШ.

У **третьому розділі** викладено методику проведення експериментальних досліджень.

При КІА досліджували пуансони та мітчики діаметром 3-10 мм і висотою 70-120 мм зі сталей 9ХС і Р6М5. Азотування в газовій плазмі двоступеневого розряду проводилося в установці «БУЛАТ-6» (рис. 5). Деталі розташовувалися вертикально на підложкотримачі. Тиск у вакуумній камері $p = 1,3 \cdot 10^{-3}$ Па, потенціал на вакуумно-дуговому випарнику: 100 В; тиск: 0,05-0,5 Па; потенціал на підложці: -700 ... - 1300 В. У робочому об'ємі камери виникав газовий розряд; за рахунок бомбардування іонами азотупідложкотримача з деталями відбувався нагрів до температури азотування 520-570 °С; тривалість процесу – 1 година. Потім розряд вимикали, розгерметизовували камеру, виймали деталі і далі їх термічно обробляли

(гартували з охолодженням у мастило або нормалізували) у гартівній пічі, після гартування проводили низький відпуск протягом 1,5 години. Технологічний процес виконували у визначеній послідовності (табл. 1).

Для дослідження технології ЕАШ використовували заготовки зі сталей 45, У7, У12, 40Х. Шліфування проводилося на круглошліфувальному верстаті 3Е110

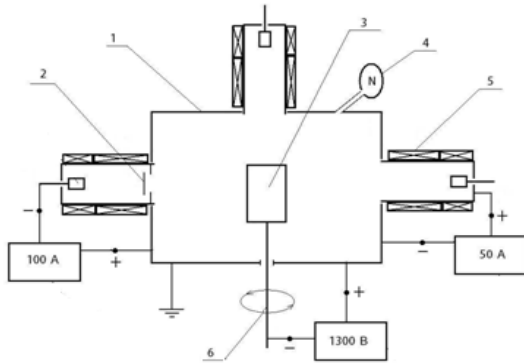


Рисунок 5 – Принципова схема вакуумно-дугової установки «БУЛАТ-6» для іонного азотування: 1 – вакуумна камера; 2 – щільний екран; 3 – азотована деталь (підложкотримач); 4 – натикатель азоту; 5 – фокусуючий соленоїд-анод; 6 – поворотний пристрій

з джерелом випрямленого струму (рис. 6), за режимами, згідно табл. 2. Алмазний круг А1300×25×6АС6 125/100 М1-01.4, СОЖ – 3 % розчин Na_2NO_3 .

Для визначення мікроструктури, мікротвердості, залишкових макро- і мікронапруг, фазового аналізу, шорсткості, зносу, використовували стандартні методики і спеціальне обладнання.

У четвертому розділі наведено результати експериментальних досліджень фізичних процесів, що відбуваються в ПШ металу при КІА та ЕАШ.

Дослідження пуансонів $d = 2$ мм, оброблених за ПТО № 1, 2 (табл. 1), показали глибинне легування азотом, про що свідчить значний приріст твердості в порівнянні з твердістю без азоту з класичною термічною обробкою (гартування та низький відпуск): після ПТО №1, з нормалізацією – 25% ($H = 8130$ МПа), після ПТО №2, з гартуванням – 35% (середня твердість по перетину – 8720 МПа).

Таблиця 1 – Зміст і послідовність операцій технологічного процесу комплексної обробки деталей (ПТО)

№	Зміст і послідовність технологічних операцій
1	Азотування (*А) ($T = 520-570$ °C) + нормалізація ($T = 840$ °C)
2	А ($T = 520-570$ °C) + гартування ($T = 840$ °C) + низький відпуск ($T = 180$ °C)
3	А ($T = 700$ °C)
4	А + гартування + низький відпуск ($T = 260$ °C) (без механічної обробки)
5	А + гартування + низький відпуск ($T = 260$ °C) + механічна обробка
6	А + гартування + середній відпуск ($T = 450$ °C) + механічна обробка
7	А + СВЧ-гартування ($T = 840$ °C) + низький відпуск ($T = 260$ °C, $\tau = 90$ хв.)
8	А + гартування СВЧ ($T = 840$ °C) + А + СВЧ-гартування ($T = 840$ °C) + низький відпуск ($T = 260$ °C, $\tau = 90$ хв.)
9	А + пічне гартування ($T = 840$ °C) + низький відпуск ($T = 260$ °C, $\tau = 90$ хв.)
10	А ($T = 550$ °C)
11	А + гартування ($T = 1230$ °C, масло)
12	А + гартування ($T = 1230$ °C, масло) + А + гартування ($T = 1230$ °C)
13	А + гартування ($T = 1230$ °C, масло) + А + нормалізація ($T = 1230$ °C)
14	А + гартування ($T = 1230$ °C) + А + гартування ($T = 1230$ °C) + відпуск ($T = 320$ °C)

*А – азотування.

Легування азотом вплинуло на положення критичних точок сталі та збільшення інкубаційної стійкості аустеніту. Тому в результаті нормалізації отримано ефект гартування на заготовках діаметром до 2 мм поперечного перетину, про що свідчить не тільки зростання твердості, але і однотипність морфологічної будови структури цих зразків. За результатами рентгенівської дифрактоскопії заготовки $d = 2$ мм зі сталі 9ХС після азотування і гартування з відпуском (ПТО № 2) в ПШ виявлено тільки ферит Fe- α з параметром решітки $a = 2,8646 \text{ \AA}$.

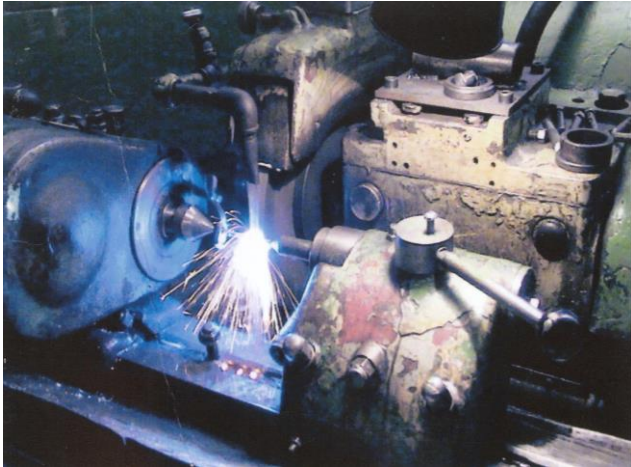


Рисунок 6 – Експериментальна установка для дослідження змичуючого шліфування на базі верстата 3Э110

Зняття шару товщиною 100 мкм шліфуванням також показала тільки ферит Fe- α зі збільшенням параметру решітки, яке пов'язане з розчиненням азоту в матриці, $a = 2,8655 \text{ \AA}$. На глибині 120 мкм виявлено 2 фази: Fe- α і Fe- γ . Ваговий вміст Fe- α в зразку – 89,8% wt, параметр решітки дорівнює $a = 2,8760 \text{ \AA}$. Як видно, параметр решітки різко збільшився у порівнянні з попередніми зразками, що свідчить про значне збільшення концентрації розчиненого азоту в α -фазі. Також у зразку присутній аустенит з ваговим вмістом 10,2% wt і параметром решітки $a = 3,595 \text{ \AA}$.

Таблиця 2 – Режими шліфування сталевих заготовок

№	Назва операцій	$V_{кр}$, м/сек	$S_{пр}$, мм/хв	t , мм;	V_z , м/хв	Z , мм	U , В	I , А
1	ЕАШ №1	35	1600	0,07	10	0,2-0,5	36	80-100
2	ЕАШ №2		1300	0,035	20			20-40
3	АШ №1		1600	0,07	10		—	—
4	АШ №2		1300	0,035	20		—	—
5	ЕАШ №1 з виходженням		1600	0,07	10		36	80-100
6	ЕАШ №2 з виходженням		1300	0,035	20		36	20-40
				—			—	—

У заготовках з більшим діаметром ($d = 4$ мм), загальна концентрація азоту, за глибиною значно менше, тому нормалізація не відповідає результату гартування. Застосування гартування (ПТО №2) збільшило твердість на 21%, тому для деталей більшого, ніж 2 мм діаметра, для забезпечення високої твердості, зносостійкості після іонного азотування, необхідно проводити тільки гартування з низьким відпуском. Чисте іонне азотування (ПТО №3) заготовки $d = 2$ мм забезпечило суцільне азотування з рівномірною голчатою структурою, яка складається з $\epsilon + \gamma$ – фаз з середньою твердістю за перетином 8720 МПа; ця структура – крихка і не може бути альтернативою ПТО №2.

КІА заготовок $d=6$ мм, оброблених за ПТО № 5 з низьким відпуском (260 C^0), дало зростання твердості ПШ відносно твердості серцевини на 10-15% ($H_{\text{ПШ}} = 6180\text{--}6650$ МПа на глибині до 1130 мкм). Структура ПШ складається з двофазної композиції: α -твердого розчину та зерен нижчого нітриду Fe_4N (залишок азотаваного шару), структура – дрібнодисперсна з розміром областей когерентного розсіювання близько 10 нм. На більшій глибині (100-400 мкм від поверхні), де твердість становить приблизно 6650 МПа, формується пересичений атомами азоту твердий розчин $\alpha\text{-Fe}$. Про пересичення свідчить збільшений період решітки: від 2,353 до 2,914 Å. Обробка за ПТО №6 з середнім відпуском дала інформацію про теплостійкість ПШ: твердість знизилася на 17% ($H_{\text{ПШ}} = 5300$ МПа).

Для аналізу та порівняння впливу ПТО № 7 і № 8 за рівнем зміцнення ПШ заготовок $d = 10$ мм, відносно твердості після класичної термічної обробки без азоту, прораховували всі значення приросту твердості за перерізом та отримали середнє значення приросту. ПТО № 7 показує дуже низький приріст – лише 190 МПа. Максимальне значення твердості – 7390 МПа. Подвійний цикл КІА, ПТО № 8 показує стабільний приріст твердості (на 30 %) з глибини 440 мкм; середнє значення приросту – 2200 МПа, середнє значення твердості – 9406 МПа. ПТО №9 з пічним нагрівом під гартування формує стабільний характер збільшення твердості ($\sim 34\%$) за перерізом, приріст становить 2430 МПа, а середня мікротвердість – 9630 МПа. Азот сприяє підвищенню твердості та збільшенню глибини зміцнення відносно встановленого рівня твердості 7200 МПа, який відповідає максимально-му значенню твердості заготовок зі сталі 9ХС після гартування та низького відпуску без азотування.

Глибинне іонне азотування не може бути альтернативою комплексному іонному азотуванню зі застосуванням гартування з відпуском, внаслідок високої твердості (крихкості) при ударних навантаженнях. Застосування гартування з низьким відпуском після азотування формує високу стійкість до зношування в умовах ударних навантажень деталей пуансонів.

Результати дослідження впливу КІА за ПТО № 10-14 заготовок $d = 5$ мм із сталі Р6М5 (табл. 3) показали, що режим іонного азотування (ПТО №10), збільшив твердість ПШ на 6300 МПа, з глибиною 85 мкм. ПШ з твердістю 13000 МПа – твердий, але крихкий. Для збільшення глибини та рівня зміцнення пропонуємо застосовувати КІА. ПТО №11: одинарне азотування та гартування дало зміцнення на 860 МПа вище, в порівнянні з твердістю серцевини, глибиною близько 320 мкм. Максимальний рівень зміцнення відносно твердості серцевини отримано в результаті обробки за ПТО № 12 (подвійне азотування та гартування), а саме: на 5760 МПа, з глибиною розповсюдження до 150 мкм. Але цей режим не є оптимальним, оскільки серцевина має дуже низьку мікротвердість (завдяки наявності великої кількості аустеніту залишкового та крупнозернистої структури матриці – 127,5 мкм). ПТО № 13: подвійне азотування з наступним гартуванням та нормалізацією дало зміцнення до 9232 МПа, що розповсюджується до 1800 мкм. Ця комплексна технологія має високі показники міцності по всій глибині деталі і є оптимальною. Технологія комплексної обробки ПТО № 14 з подвійним азотуванням наступним гартуванням та кінцевим відпуском показала добрий ре-

зультат: зона зміцнення глибиною 320 мкм має твердість 7560 МПа.

Таким чином, для збільшення глибини проникнення азоту в структуру сталевих заготовок діаметром більше 4 мм у результаті комплексної обробки, для деталей, що працюють в умовах стискаючого навантаження та високого зносу, рекомендовано технологію подвійного азотування з наступним гартуванням та нормалізацією, яка дозволяє отримати шар внутрішнього азотування за периметром майже всієї деталі. Структура зміцненого шару – високодисперсний, високо азотистий легований мартенсит відпуску та карбонітри.

Таблиця 3 – Результати дослідження впливу послідовності технологічних операцій при комплексній обробці на глибину і мікротвердість заготовок зі сталі Р6М5

ПТО №	Глибина поверхневого шару, h, мкм	Твердість поверхневого шару, МПа	Глибина зони зміцнення, h мкм	Твердість зони зміцнення, МПа	Твердість серцевини, МПа
10	85	13000	85	12920	6700
11	180-200	5644-8142	320	9620	8763
12	103-118	4100	130-150	11160	5400
13	180-230	2840-4135	1800	9514-8950	8954
14	180	4110-7436	320	7560	7148

Після комплексної обробки загальним явищем є утворення поверхневого дефектного шару, який підлягає механічній обробці за встановленими в дослідженні припускам, для отримання необхідної шорсткості, чистоти поверхні та забезпечення зміцненої структури з експлуатаційними властивостями на поверхні деталі. Глибина припуску на кінцеву механічну обробку становить 250 мкм. Оскільки зміцнений шар має достатнє розповсюдження, після експлуатації деталі, у випадку необхідності, можна відновлювати робочі властивості пуансонів (гостроту кромки) за рахунок видалення відпрацьованої частини ПШ (за одну доводку (заточку), знімається шар 10-15 мкм).

Методами металографічного аналізу та виміру мікротвердості досліджено структуру і твердість ПШ заготовок зі сталей 45, У7 і У12 після ЕАШ та АШ. Сталі розглядалися в початковому стані після гартування і низького відпуску. Встановлено (табл. 4), що після ЕАШ структура ПШ має три зони. Твердість і глибина БШ залежить від вмісту вуглецю в сталях: чим більше вміст вуглецю, тим твердіше шари утворюються. При режимі ЕАШ №1 в ПШ заготовок з доевтектонічних сталей 45 і У7 формуються якісні БШ: тверді, однорідні, корозійностійкі. У ПШ заготовки зі сталі У12 режим ЕАШ №2 формує якісний БШ; цей режим є оптимальним для заевтектонічних сталей. При АШ структури БШ не утворюються. Методом рентгеновського фазового аналізу встановлено, що структура зміцненого ПШ заготовок із сталі У7 після режиму ЕАШ №1 складається з α -твердого розчину. Фазовий, мікроструктурний аналіз і мікротвердість вказує на те, що це – безструктурний мартенсит БШ (гарденіт).

Дослідження макронапружень (рис. 7), які сформувалися на поверхні деталей в процесі ЕАШ, в порівнянні з АШ показали відмінності у величинах і знаках, що обумовлені різним впливом силового і теплового факторів у даних процесах. З

точки зору металу у формуванні залишкового напруженого стану ПШ вирішальну роль відіграє хімічний склад сталей, що визначає теплопровідність і структурні особливості досліджуваних сталей (карбіди цементиту в заевтектоїдній сталі У12 є адіабатичними межами (перепорою) для вільного просування тепла вглибину металу).

Таблиця 4 – Результати дослідження впливу ЕАШ на параметри зміцнення ПШ вуглецевих сталей

№ Сталь	Твердість БШ, МПа		Глибина БШ, мкм		Глибина зони зміцнення, мкм		Твер- дість серцеві- ни МПа	Ступень зміцнен- ня, $\Delta H, \%$ $\Delta H = \left(\frac{H_{\text{БШ}} - H_{\text{СЕРЦ.}}}{H_{\text{СЕРЦ.}}} \right) \times 100\%$	
	ЕАШ №1	ЕАШ №2	ЕАШ №1	ЕАШ №2	ЕАШ №1	ЕАШ №2		ЕАШ №1	ЕАШ №2
45	6750	6300	60	75	175	125	6150	10	3
У7	12060	8400	80	70	60	50	8200	47	2
У12	14800	13700	до 100	65	300	130	9000	64	52

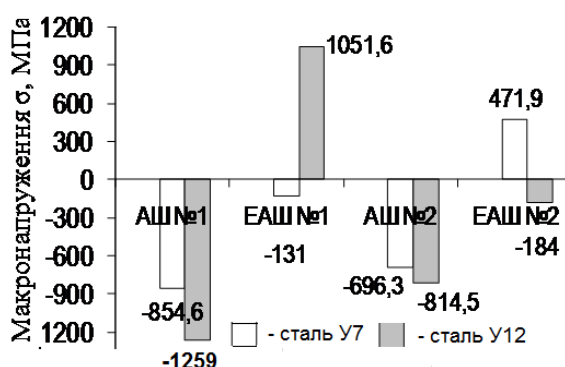


Рисунок 7 – Вплив ЕАШ і АШ на макронапруження ПШ заготовок зі сталей У7 і У12

Оцінено розміри областей когерентного розсіювання (ОКР) ($L, \text{\AA}$) і рівень мікрореформації ($\epsilon, \%$) вуглецевих сталей У7 і У12. Встановлено, що АШ за режимами АШ №1 і АШ №2 зменшує розміри ОКР сталі У7 до $276 \text{\AA}$ і $270 \text{\AA}$, у порівнянні з вихідним станом, після гартування і низького відпуску ($L_{\text{вих}} = 295 \text{\AA}$). У сталі У12 режими АШ збільшують ОКР до $196 \text{\AA}$ і $183 \text{\AA}$ ($L_{\text{вих}} = 160 \text{\AA}$). АШ не змінює рівень мікрореформації сталі У7 ($\epsilon_{\text{АШ №1}} = 0,4\%$), у сталі У12 збільшує рівень мікрореформації до $0,5\%$ ($\epsilon_{\text{вих}} = 0,3\%$). ЕАШ №1 і ЕАШ №2 зменшують розміри

ОКР ПШ досліджуваних сталей (сталь У7: $L_{\text{вих}} = 295 \text{\AA}$, $L_{\text{ЕАШ №1}} = 110 \text{\AA}$, $L_{\text{ЕАШ №2}} = 430 \text{\AA}$; сталь У12: $L_{\text{вих}} = 160 \text{\AA}$, $L_{\text{ЕАШ №1}} = 90 \text{\AA}$, $L_{\text{ЕАШ №2}} = 100 \text{\AA}$) і збільшують рівень мікрореформації в порівнянні з вихідним станом до $0,6\%$ (сталь У7: $\epsilon_{\text{вих}} = 0,4\%$, сталь У12: $\epsilon_{\text{вих}} = 0,3\%$). Зменшення розмірів ОКР та збільшення рівня мікрореформації в результаті ЕАШ свідчить про процеси зміцнення ПШ досліджуваних сталей. Найбільше зміцнення: найменший розмір ОКР, найбільшу мікрореформацію і найбільшу дисперсність створює режим ЕАШ №1.

У рамках макроскопічного аналізу для ПШ заготовок з вуглецевих сталей 45, У7 і У12 у вихідному стані після гартування і низького відпуску, оброблених ЕАШ, була порахована площа зони ерозії, сформованої на поверхні електричними розрядами і оцінено вплив вмісту вуглецю на розмір ерозії (лунок), рис. 8. Розрахунок площі лунок (рис. 9), показав, що величина площі лунок або розмір елект-

роерозії залежить не тільки від технологічних параметрів обробки, але і від вмісту вуглецю в сталі, що, в свою чергу, визначає величину теплопроводності. Чим вище теплопровідність сталі, тим менше розмір електроерозії поверхні. Сталь У7 при температурі 900 °С має найбільшу теплопровідність ($\lambda = 29 \text{ (Вт / м}^0\text{С)}$) з досліджуваних вуглецевих сталей і найменшу величину електроерозії. Найбільша електроерозія сталі У12 пояснюється найменшим коефіцієнтом теплопроводності і наявністю карбідів цементиту в структурі, які погіршують тепловідвід.

Досліджено шорсткості поверхні заготовок зі сталі У7 після шліфування за режимом ЕАШ №1 в порівнянні з режимом АШ №1 і ЕАШ №1 + виходження. Шліфування за режимами ЕАШ №1 і ЕАШ №2 показало, що середнє відхилення профілю R_a і середнє значення нерівностей R_z більше у заготовках, що прошліфовано за режимом ЕАШ №1 (рис. 10). Режим ЕАШ №1 показав значення $R_a = 4,2 \text{ мкм}$ і $R_z = 21,2 \text{ мкм}$. В порівнянні з режимом ЕАШ №1, режим ЕАШ №2 зменшив значення середнього відхилення профілю R_a на 8%, і зменшив середню величину нерівностей R_z на 38%. Режим ЕАШ №2 + виходження знизив значення середнього відхилення профілю R_a на 19%. При цьому, після шліфування ЕАШ №1 з наступним виходженням показало: значення $R_a = 1,68 \text{ мкм}$ і $R_z = 8,6 \text{ мкм}$. Режим ЕАШ №2 + виходження зменшив R_z на 5%.

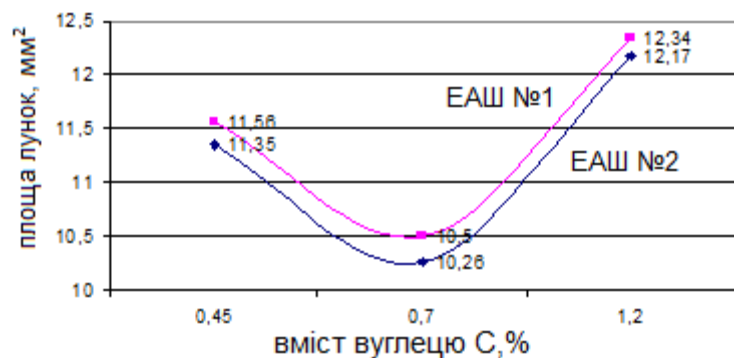
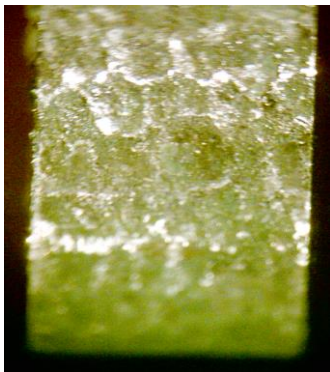


Рисунок 8 – Макроструктура поверхні сталі У7 після ЕАШ №1

Рисунок 9 – Площа зони ерозії (лунк) вуглецевих сталей 45, У7 і У12 після ЕАШ

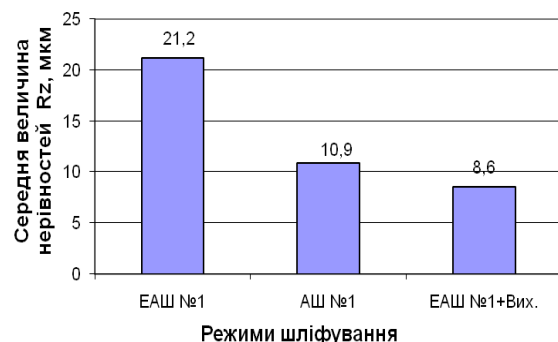


Рисунок 10 – Вплив шліфування на шорсткість поверхні сталі У7

Проведено дослідження розподілу вмісту вуглецю за глибиною ПШ заготовок зі сталі У12 (сталь У12 – найбільш структурно-чутлива з досліджуваних сталей). У стані після гартування і низького відпуску і шліфування за режимом ЕАШ №2, даний режим був обраний на підставі дослідження мікроструктури (рис. 11 а,

б), мікротвердості і макронапруг як найбільш сприйнятливий режим для даної сталі. Структура і властивості ПШ вуглецевих сталей поділяється на три основні зони (рис. 11, а): 1) зона БШ високої твердості, що складається з безструктурного мартенситу; 2) зона темної, відпущеної структури тростіту зі зниженою твердістю; 3) зона структури тросто-мартенситу, перехідна зона до структури основного металу.

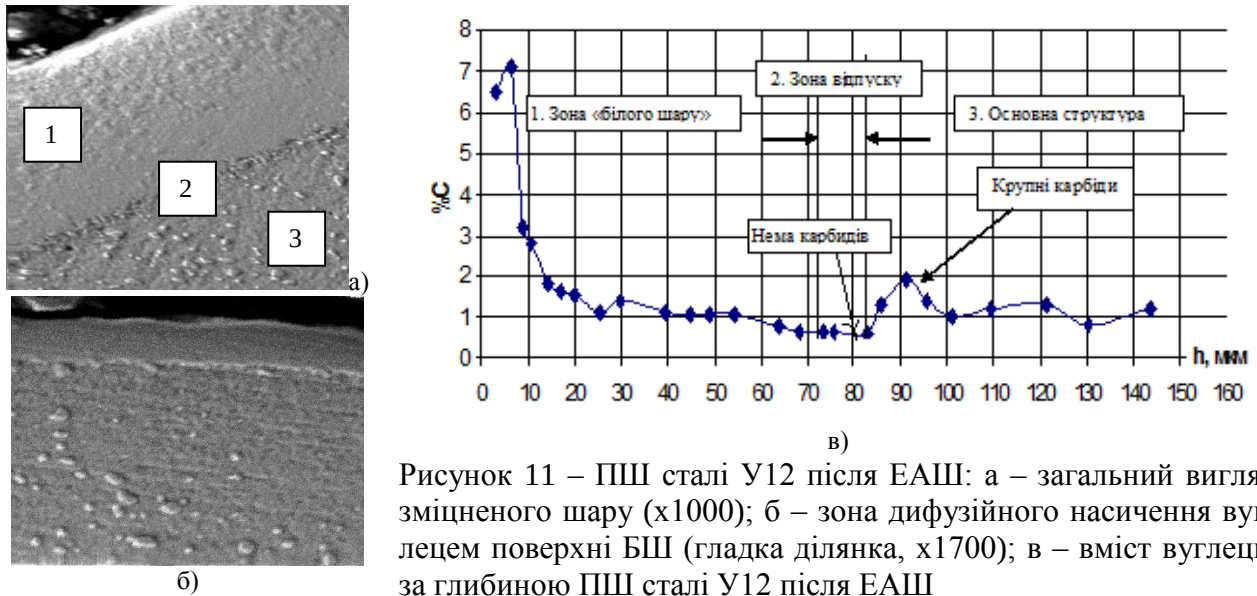


Рисунок 11 – ПШ сталі У12 після ЕАШ: а – загальний вигляд зміцненого шару (x1000); б – зона дифузійного насичення вуглецем поверхні БШ (гладка ділянка, x1700); в – вміст вуглецю за глибиною ПШ сталі У12 після ЕАШ

Концентрація вуглецю сталі У12 на глибині 110 мкм і далі, вглибину зразка, відповідає 1,2% вуглецю. Слід зазначити крайню нерівномірність концентрації вуглецю за глибиною ПШ. Глибина БШ в цьому зразку 65-70 мкм. ПШ значно перенасичений вуглецем на глибині до 20 мкм (рис. 11 в). Причиною такої високої концентрації є дифузія вуглецю з вуглецевовмістного середовища обробки; у нашому випадку, середовище – це алмазний круг. У результаті, відбувається дифузійне насичення ПШ. Твердість даного зразка на глибині 20 мкм становить 13700 МПа. За глибиною ПШ концентрація вуглецю знижується, а твердість залишається високою: 13700 МПа на глибині 40-65 мкм. Отже, тут діє інший механізм зміцнення. Високі значення твердості пояснюються, подрібненням зерна до «аморфного» стану і повного або часткового розчинення карбідів. На цій ділянці формується структура БШ, звана гарденітом. Другий стрибок підвищення концентрації вуглецю знаходиться під або нижче структури, яку визначено як структуру відпуску: тросто-мартенсит з твердістю 7000-7500 МПа. У цій ділянці спостерігається зменшення розмірів карбідів цементиту і їх кількості. Ця зона відповідає мінімальному вмісту вуглецю, який є донором для довколишніх ділянок. Дане явище ілюструє другий стрибок значення концентрації до 1,8%, про що свідчать великі карбіди цементиту на мікроструктурі. Розміри карбідів значно більше, ніж у вихідній структурі (серцевині). Отже, коагуляція карбідів відбувається за рахунок дифузії вуглецю з ділянки, що знаходиться вище (ділянка 2). Твердість зони з великими карбидами: 7500-7700 МПа. Далі значення твердості змінюється, поступово наближаючись до початкового значення – 9000 МПа. На графіку вмісту

вуглецю концентрація відповідає своєму початковому значенню – 1,2%. Таким чином, велике підвищення твердості на глибині до 10-15 мкм обумовлено дифузією вуглецю з алмазного круга. Високі значення твердості ПШ на глибині понад 15 мкм пояснюються іншими механізмами зміцнення, а саме: збільшенням мікродеформації і дисперсності структури, тобто збільшенням недосконалостей кристалічної будови, а також за рахунок дифузії з більш глибоких шарів зразка. Такі висновки можна поширити на всі досліджені сталі, що оброблено методом ЕАШ.

Для вивчення впливу вихідної структури ПШ заготовок із інструментальної вуглецевої сталі У7 і конструкційної легованої сталі 40Х на здатність сприймати зміцнення в процесі ЕАШ була проведена їх попередня термічна обробка: нормалізація, гартування + низький відпуск, гартування + середній відпуск (сталь У7), в сталі 40Х замість середнього відпуску проводився високий відпуск; сталі також досліджувалися у сирому стані. Зразки було прошліфровано за режимом ЕАШ №1. Утворення структури БШ залежить від розмірів і форми частинок карбідної фази у вихідній структурі. Заготовки у сирому стані не отримали зміцнення. Попередня нормалізація сталі У7 сприяє формуванню структури БШ, а сталі 40Х –ні. У структурах з пластинчастою формою карбідів при ЕАШ, перетворення відбуваються більш інтенсивно, ніж у структурах з карбідами округлої форми. Попереднє гартування полегшує сприйняття вторинного гартування в процесі ЕАШ, але одночасно відбувається супутній відпуск. Вихідний мартенсит відпуску отримав максимальне зміцнення. Зернисті структури після середнього і високого відпуску не встигають розчинитися в твердому розчині аустеніту в повній мірі, в результаті ЕАШ не формується пересичений, високодисперсний стан, крім того, вони менш схильні до супутнього (вторинного) відпуску в результаті ЕАШ-зміцнення.

Проведено дослідження зносостійкості на зразках пари тертя із сталей У7 – втулка (після гартування, низького відпуску і подальшого шліфування за режимами ЕАШ №1, АШ №1 і ЕАШ №1 і подальшого виходження до 4 разів) та ШХ15 – ролик (після гартування і низького відпуску), рис. 12.

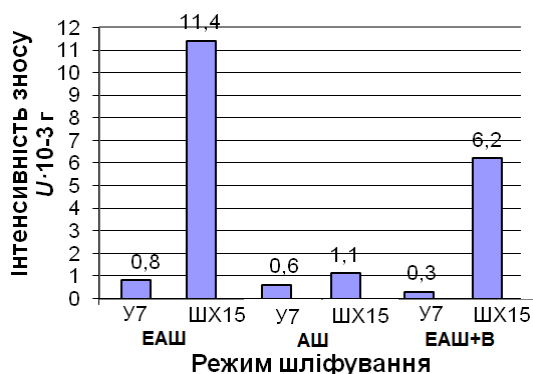


Рисунок 12 – Інтенсивність зносу ПШ заготовки зі сталі У7 та контр тіла із сталі ШХ15 ($U \cdot 10^{-3}$, г), в залежності від режиму шліфування (час випробування 7 годин)

Встановлено, що практично при однаковому коефіцієнті тертя $f = 0,15$ (при ЕАШ + вих., $f = 0,14$), інтенсивність зносу досліджених зразків, після різних режимів шліфування – відрізняються. Зразки після режиму шліфування ЕАШ №1+виходження показали найбільшу зносостійкість, що пояснюється високою твердістю гарденіту ПШ та зниженням показників шорсткості на 40% в порівнянні з ЕАШ.

У п'ятому розділі дано практичні рекомендації щодо використання технологій КІА та ЕАШ.

Іонне азотування з використанням двоступеневого вакуумно-дугового розряду в газовому середовищі дозволяє в єдиному технологічному процесі, що вклю-

чає в собі азотування з наступною високотемпературною термічною обробкою (гартування і відпуску), значно інтенсифікувати процес зміцнення ПШ виробу, отримати глибину азотованого шару, більш 250 мкм, і мікротвердістю 9000-12000 МПа, управляти структурно-фазовим складом, отже, і необхідними експлуатаційними характеристиками виробів, такими, як зносо- і корозійна стійкість.

Завдяки запропонованій технології одинарного і подвійного азотування (в залежності від поперечного розміру) для виробів, де не потрібна висока теплостійкість таких, як пуансони, штампи, штоки, плунжери і т.д., дорогі сталі можуть бути замінені на більш дешеві: сталь Р6М5 на Х12М, Х12М на 9ХС і т.д. Працездатність пуансонів зростає в 1,8-2,0 рази.

Проаналізовано технологічні особливості ЕАШ як комбінованого обробно-зміцнюючого методу. Важливою технологічною характеристикою імпульсного зміцнення в процесі ЕАШ наступне: глибина шліфування (t , мм), а вміст вуглецю близький до евтектоїду за складом є оптимальним для зміцнення: ПШ сталі У7 в процесі ЕАШ отримав максимальне зміцнення (47%) щодо твердості серцевини. Визначено область практичного застосування деталей, оброблених методом ЕАШ, – це прецизійні деталі, що працюють на тертя, в різних мастильних середовищах без динамічних та ударних навантажень, наприклад, деталі паливної та гідро-пневмоапаратури. Діаметральний зазор в залежності від розміру деталей і призначення прецизійної пари може бути від 2 мкм до 15-30 мкм. На відміну від раптового, некерованого формування вторинних структур при терті (експлуатації) запропонований метод ЕАШ дозволяє в повній мірі забезпечувати характеристики зносостійкості: поверхневу міцність і шорсткість за рахунок цілеспрямованої оптимізації структури і формування шорсткості ПШ.

Призначено схему (рис. 13) для вибору технологічних параметрів обробно-зміцнюючої технології.

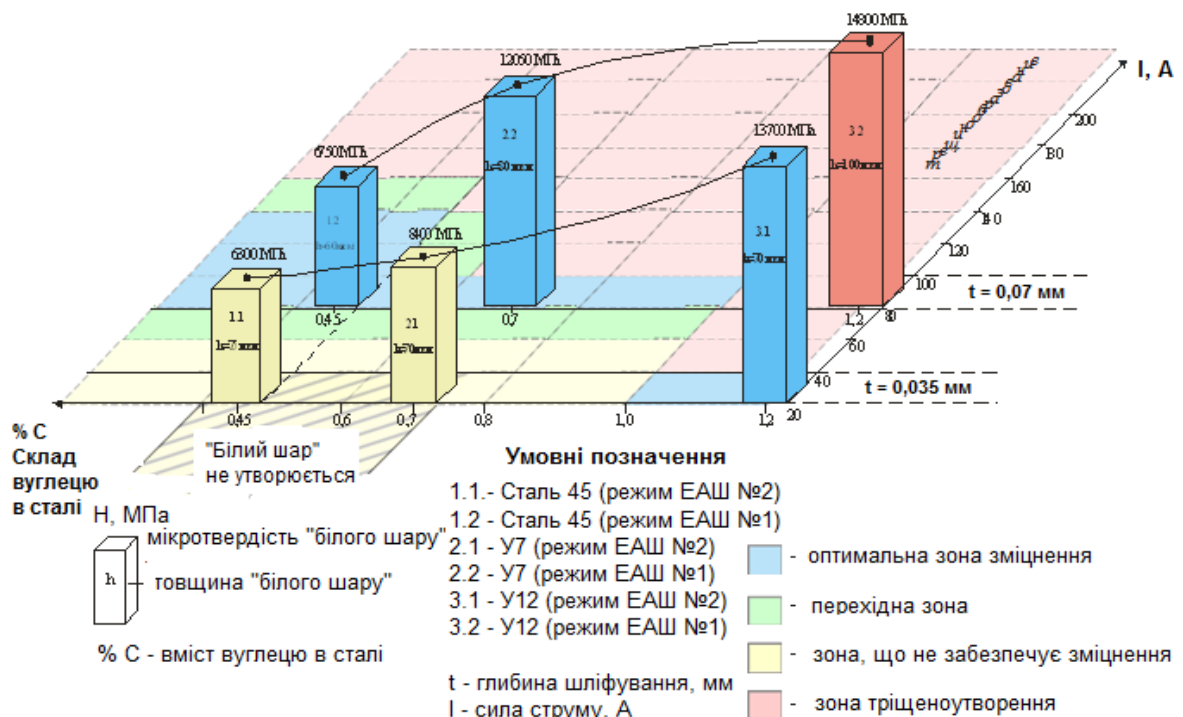


Рисунок 13 – Технологічна схема для вибору оптимальних технологічних параметрів ЕАШ

За наведеною схемою рекомендовано вибирати оптимальні параметри на стадії проектування технологічного процесу ЕАШ з урахуванням вмісту вуглецю в сталі, глибини шліфування і сили струму з метою формування заданих характеристик ПШ і оптимізації структури оброблюваних прецизійних деталей.

Для забезпечення заданих характеристик ПШ для сталей, що містять до 1% вуглецю, доцільно застосовувати глибину шліфування: t не менше 0,07 мм, що забезпечує силу струму: $I = 80-100$ А. Для заевтектоїдних сталей понад 1% вуглецю, рекомендовані параметри шліфування: $t = 0,035$ мм, $I = 20-40$ А. Зазначений діапазон параметрів забезпечує не тільки зміцнення за рахунок оптимізації структури, а й оптимальні характеристики твердості, напруженого стану ПШ оброблених прецизійних деталей. Дану технологічну схему і результати дослідження можна використовувати і для зміцнення низьколегованих сталей типу 40Х, 9Х, 65Г та ін.

Дані, які стосуються економічного обґрунтування та виробничого впровадження наведено у додатках.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена важлива науково-практична задача підвищення зносостійкості деталей машин шляхом обробки комплексним іонним азотуванням (КІА) та зміцнюючим електро-ерозійним алмазним шліфуванням (ЕАШ), що знайшло відображення у наступних основних наукових результатах.

1. В результаті аналізу сучасних тенденцій застосування зміцнюючих технологій встановлено, що КІА та ЕАШ може бути використано як перспективні зміцнюючі методи для підвищення ресурсу деталей, працюючих в умовах ударних навантажень та зносу.

2. У результаті моделювання дифузійного перерозподілу азоту встановлено, що при будь-якому часі витримки, у приповерхневих шарах глибиною до 25 % від досягнутої товщини дифузійного насичення, спостерігається не менш півтора кратне перевищення вмісту азоту в порівнянні з його значеннями в ПШ. При невеликому часі витримки при гартування – це небажаний ефект, який повинен ураховуватися фінішною механічною обробкою. За даними моделювання, для дифузії азоту на глибину до 750 мкм потрібно майже часове витримання при температурі гартування.

Визначена функціональна залежність енергетичного впливу (енергетичного коефіцієнту), який обумовлює виникнення БШ при електро-ерозійному алмазному абразивному шліфуванні з урахуванням технологічних параметрів обробки та властивостей матеріалу.

3. Технологічний процес КІА з послідовностями технологічних операцій: азотування з наступною нормалізацією та азотуванням, наступного гартування з низьким відпуском – показали майже однаковий результат за рівнем зміцнення на деталях малих діаметрів (пуансонів $d = 2$ мм). При збільшенні діаметру деталей до 4 мм різниця рівня зміцнення між нормалізацією і гартуванням з відпуском після іонного азотування значно зросла. Наявність у мікроструктурі ПШ заготовок зі сталі 9ХС після комплексного іонного азотування зі застосуванням гартування та відпуску γ – фази, разом зі значеннями твердості свідчить про глибинне азотуван-

ня з досить високою концентрацією азоту – до 1%, що є достатнім для високих експлуатаційних властивостей пуансонів, а саме: високу ударну в'язкість при достатньо високій твердості.

Встановлено, що найбільший ефект від застосування КІА спостерігається для деталей, якій працюють в умовах ударних навантажень (пуансонів).

4. Досліджено режими процесу ЕАШ, який можна використовувати для зміцнення ПШ. Встановлено умови, коли на поверхні заготовки утворюється структура БШ, що являє собою безструктурний мартенсит (гарденіт). ЕАШ забезпечує стабільність формування зміцненого зносостійкого шару; при цьому, твердість ПШ заготовок зі сталі У7 зростає до 47% щодо твердості серцевини. Твердість і глибина БШ залежить від вмісту вуглецю в сталях: чим більше вміст вуглецю, тим твердіше шари утворюються. Вміст вуглецю, близький до евтеїдного складу, (0,65-0,8 %) є оптимальним для ЕАШ-обробки.

Доведено, що режим ЕАШ №1 ($V_{кр} = 35 \text{ м/с}$; $S_{пр} = 1600 \text{ мм/хв}$; $t = 0,07 \text{ мм}$; $V_3 = 10 \text{ мм/хв}$; $z = 0,2-0,5 \text{ мм}$; $U = 36 \text{ В}$; $I = 80-100 \text{ А}$) забезпечує стискаючі залишкові напруги після ЕАШ і його можна рекомендувати як обробно-зміцнюючу технологію для заготовок з доевтектоїдних і евтектоїдних сталей. Для заготовок з заевтектоїдних сталей, що містять більше 1% вуглецю, рекомендовано режим ЕАШ №2 ($V_{кр} = 35 \text{ м/с}$; $S_{пр} = 1300 \text{ мм/хв}$; $t = 0,035 \text{ мм}$; $V_3 = 20 \text{ м/хв}$; $z = 0,2-0,5 \text{ мм}$; $U = 36 \text{ В}$; $I = 20-40 \text{ А}$), що забезпечує стискаючі напруги і високий рівень зміцнення.

Оцінено розміри областей когерентного розсіювання L і рівень мікродеформації ϵ . Встановлено, що ЕАШ за всіма дослідженими режимами зменшує розміри ОКР, в порівнянні з вихідним станом, після гартування і низького відпуску, і встановлено, що структура стає більш дисперсною. ЕАШ №1 ($V_{кр} = 35 \text{ м/с}$; $S_{пр} = 1600 \text{ мм/хв}$; $t = 0,07 \text{ мм}$; $V_3 = 10 \text{ м/хв}$; $z = 0,2-0,5 \text{ мм}$; $U = 36 \text{ В}$; $I = 80-100 \text{ А}$) забезпечує найменший розмір ОКР і найбільший рівень мікродеформації.

На підставі порівняння ступеня зміцнення різних вихідних структур заготовок зі сталей У7 і 40Х для ефективного ЕАШ-зміцнення рекомендується застосовувати наступні вихідні структури: для заготовок з середньовуглецевих і високовуглецевих доевтектоїдних сталей: мартенсит відпуску, тростит відпуску і сорбіт відпуску. Для заготовок зі сталей, близьких до евтектоїдних за будовою (У7, У8, 65Г та ін.), рекомендуються вихідні структури: мартенсит відпуску, тростит відпуску, сорбіт відпуску, структури після відпалу (нормалізації).

5. Оцінка зносостійкості поверхні після ЕАШ в порівнянні з алмазним шліфуванням показала, що включення в цикл обробки ЕАШ етапу виходження, значно покращує показники шорсткості (на 40%), отже, і зносостійкості. Виходження рекомендовано проводити з урахуванням глибини зміцненого БШ. Припуск на виходження: 20-30 мкм. Отримано залежності значення знімання при виходженні від глибини ерозійної лунки.

6. На основі отриманих результатів дані технологічні рекомендації для підвищення ресурсу деталей й інструментів в технології КІА, які базуються у необхідності враховування розмірів деталей. Для деталей з розміром поперечного перерізу більше ніж 2 мм рекомендовано КІА з гартуванням та низьким відпуском після азотування. Для пуансонів з розміром поперечного перерізу більше ніж 5 мм

для забезпечення високих експлуатаційних властивостей (зносостійкості, ударної в'язкості) рекомендовано технологію КІА за подвійним циклом.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Шевченко С.М. Математичне моделювання сили різання при шліфуванні в різних умовах / М.С. Степанов, С.М. Шевченко // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут. – Тематичний випуск «Математичне моделювання в техніці і технологіях» – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – № 2. – С. 212-218.

Здобувачем проаналізовано існуючі математичні залежності для визначення сили різання у різних умовах шліфування та здійснено математичне моделювання сили різання круглого зовнішнього шліфування периферією круга.

2. Shevchenko S. Results of approbation of the innovative method of ion nitriding for steels with low temperatures of tempering / A. Andreev, O. Sobol', S. Shevchenko, V. Aleksandrov, D. Kovteba, A. Terletsy, T. Protasenko // Eastern-European journal of enterprise technologies. – 2017. – Vol. 3. – № 5 (87). – P. 31-36.

Здобувачем досліджено вплив комплексної обробки яка включає іонне азотування і наступне загартування з низьким відпуском на мікроструктуру і твердість деталей зі сталей з низькою температурою відпуску.

3. Shevchenko S.M. A computer simulation of radiation-induced structural changes and properties of multiperiod ZrN_x/MoN_x system / O.V. Sobol', A.A. Meylekhov, T.V. Bochulia, V.A. Stolbovoy, V.F. Gorban', A.A. Postelnyk, S.M. Shevchenko, A.V. Yanchev // Journal of nano- and electronic physics. – 2017. – Vol. 9. – № 2. – P. 02031-1–02031-5.

Здобувачем досліджено вплив величини періоду багато періодних покриттів ZrN_x/MoN_x на твердість при різному негативному потенціалі, що подається при осадженні.

4. Шевченко С.М. Дослідження ефективності комплексного іонного азотування для модифікації сталі / О.В. Соболю, С.М. Шевченко, Т.О. Протасенко // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. – Харків: ХНАДУ, 2018. – Вип. 82. – С. 13-19.

Здобувачем досліджено вплив різних режимів КІА на мікроструктуру, твердість і глибину азотованих шарів сталевих деталей.

5. Комп'ютерне моделювання перерозподілу азоту в технологіях комплексного іонного азотування легованих сталей / С.М. Шевченко, О.С. Терлецький, О.П. Горова, О.В. Соболю, Т.О. Протасенко, О.М. Реброва // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. – Харків: ХНАДУ, 2020. – Вип. 91. – С. 58-69.

Здобувачем виконано моделювання глибини проникнення азоту в деталях з легованої сталі в результаті їх нагріву до температури гартування після операції іонного азотування.

6. Шевченко С.М. Изменения концентрации углерода в поверхностном слое стали в процессе алмазно-искрового шлифования // Вестник Саратовского государственного технического университета. – Саратов: СГТУ, 2011. – Вып. 2, № 2

(56). – С 182-186.

Здобувачем досліджено розподіл вуглецю в поверхневому шарі вуглецевої сталі після алмазно-іскрового шліфування та проаналізовано основні механізми зміцнення поверхневого “білого шару”.

7. Шевченко С.М. Моделирование толщины упрочненного слоя стали в процессе импульсных отделочных обработок / А.Л. Плотников, С.М. Шевченко, И.Н. Колупаев, С.А. Дитиненко // Известия Волгоградского государственного технического университета. – Сер. “Прогрессивные технологии в машиностроении”. – Вып. 7: межвузовский сборник научных статей. – Волгоград: ВолгГТУ, 2011. – № 13 (86). – С. 91-92.

Здобувачем виконано моделювання глибини “білого шару” в залежності від технологічних параметрів алмазно-іскрового шліфування та хімічного складу обробленої сталі.

8. Шевченко С.М. Стабильность структурообразования стали при алмазно-искровом шлифовании (АИШ) / А.Л. Плотников, С.М. Шевченко, И.Н. Колупаев, С.А. Дитиненко // Известия Волгоградского государственного технического университета. – Сер. “Прогрессивные технологии в машиностроении”. – Вып. 7: межвузовский сборник научных статей. – Волгоград: ВолгГТУ, 2011. – № 13 (86)//. – С. 92-94.

Здобувачем проведено аналіз впливу різних режимів круглого, зовнішнього алмазного шліфування на структурний стан і мікротвердість поверхневого шару вуглецевих сталей.

9. Пат. на корисну модель № 117008 Україна, МПК С 23 С 14/32, С 21 D 1/06. Спосіб хіміко-термічної обробки сталевих виробів / Андреев А.О., Александров В.А., Жиров О.С., Соболев О.В., Столбовий В.О., Шепель С.В., Шевченко С.М.; заявник та власник патенту Інститут фізики твердого тіла, матеріалознавства та технологій. – ННЦХФТІ, – № U2017 00038; заявл. 03.01.2017; опубл. 12.06.2017, Бюл. № 11.

Здобувачем досліджено вплив послідовності технологічних операцій комплексного іонного азотування за одинарним та подвійним циклом на мікроструктуру, твердість і глибину азотованих шарів сталевих деталей.

10. Шевченко С.М. Дослідження рівня зміцнення поверхневого шару сталі при алмазно-іскровому шліфуванні / С.М. Шевченко // Матеріали XXIII Міжнар. наук.-практ. конф. “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я”, 20-22 травня 2015 р., Харків / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ“ХПІ”, 2015. – С. 355.

Здобувачем досліджено мікроструктуру і мікротвердість поверхневих та приповерхневих шарів виробів зі сталей різного хімічного складу після алмазно-іскрового шліфування.

11. Шевченко С.М. Аналіз умов зміцнення поверхні сталевих виробів в процесі алмазно-іскрового шліфування / С.М. Шевченко, О.В. Руднев // Матеріали XXIV Міжнар. наук.-практ. конф. “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я”, 18-20 травня 2016 р., Харків / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ“ХПІ”, 2016. – С. 380.

Здобувачем проаналізовано умови зміцнення поверхневих шарів сталевих деталей в результаті алмазно-іскрового шліфування.

12. Шевченко С.М. Вплив вихідної структури сталі на рівень зміцнення при «вторинній» поверхневій обробці / С.М. Шевченко // Матеріали XXV Міжнар. наук.-практ. конф. “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я”, 17-19 травня 2017 р., Харків / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ“ХПІ”, 2017. – С. 68.

Здобувачем вивчено здатність зміцнюватися в результаті електроалмазного шліфування сталевим деталям з різною вихідною структурою.

13. Шевченко С.М. Трирівнева структурна інженерія іонно-плазмовими методами для підвищення експлуатаційних характеристик деталей військової техніки та бронезахисних елементів / О.В. Соболев, О.Є. Бармін, В.В. Білозеров, В.В. Субботіна, С.М. Шевченко // Тези доповідей V Міжнародної наук.-практ. конф. «Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки», 11-12 жовтня 2017 р., Київ. – Київ: ТОВ «Міжнародний виставковий центр», 2017. – С. 194-195.

Здобувачем проаналізовано перспективи застосування методу комплексного іонного азотування для зміцнення виробів різних за призначенням.

14. Шевченко С.М. Дослідження рівня електроерозії поверхневого шару сталі в процесі алмазно-іскрового шліфування / С.М. Шевченко // Матеріали XXVI Міжнар. наук.-практ. конф. “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я”, 16-18 травня 2018 р., Харків / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ“ХПІ”, 2018. – С. 309.

Здобувачем вивчено макроструктуру поверхневого шару заготовок зі сталей з різним вмістом вуглецю і пораховано площину зони ерозії в результаті алмазно-іскрового шліфування.

15. Шевченко С.М. Вплив алмазного і алмазно-іскрового шліфування на макронапруження поверхневого шару сталей / С.М. Шевченко // Матеріали XXVII Міжнар. наук.-практ. конф. “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я”, 15-17 травня 2019 р., Харків / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ“ХПІ”, 2019. – С. 329.

Здобувачем досліджено рівень макронапруг поверхневого шару сталевих деталей в результаті алмазно-іскрового шліфування в порівнянні з алмазним шліфуванням.

16. Шевченко С.М. Дослідження впливу швидкості охолодження на структуру і властивості сталі в технології комплексного іонного азотування / С.М. Шевченко, О.П. Горова, О.С. Терлецький // Матеріали XXVIII Міжнар. наук.-практ. конф. “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я”, 28-30 жовтня 2020 р., Харків / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ“ХПІ”, 2020. – С. 314.

Здобувачем проаналізовано вплив швидкості охолодження на рівень зміцнення пуансонів різного діаметру в технології комплексного іонного азотування зі застосуванням нормалізації або гартування з відпуском.

АНОТАЦІЇ

Шевченко С.М. Технологічне забезпечення зносостійкості деталей машин методами хіміко-термічної та алмазно-абразивної обробок. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування. – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2021 р.

Дисертацію присвячено вирішенню важливої науково-технічній задачі підвищення зносостійкості деталей машин шляхом обробки комплексним іонним азотуванням (КІА) та зміцнюючим електро-ерозійним алмазним шліфуванням (ЕАШ).

Запропоновано оцінювання формування зміцненого шару в ході технологічного процесу з урахуванням енергетичного впливу на заготовку. Проведено моделювання глибини проникнення азоту у поверхневому шарі з урахуванням часу витримки заготовки в печі при температурі гартування в технології комплексного іонного азотування. Отримано формулу для визначення глибини зміцненого шару з урахуванням енергетичного коефіцієнту. Запропоновано після зміцненого шліфування при виникненні тріщин проводити остаточну обробку за проходами з урахуванням глибини тріщин, які утворилися після кожного проходу. Досліджено фізичні процеси, що відбуваються в поверхневому шару металу при КІА, рекомендовано оптимальні послідовності технологічних операцій в залежності від розміру деталей. Вивчено параметри якості поверхневого шару при ЕАШ і запропоновані рекомендації щодо зміцнення поверхневого шару деталей. Для вибору технологічних параметрів обробно-зміцнюючої технології на стадії проектування з урахуванням вмісту вуглецю в сталі для формування заданих характеристик поверхневого шару в процесі ЕАШ призначено технологічну схему.

Ключові слова: технологія комплексного іонного азотування, технологія електро-ерозійного алмазного шліфування, параметри якості поверхні, параметри точності, припуск, структура, шорсткість, зміцнення, зносостійкість

Шевченко С.М. Технологическое обеспечение износостойкости деталей машин методами химико-термической и алмазно-абразивной обработки. На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.08 – технология машиностроения. – Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2021

Диссертация посвящена решению важной научно-технической задачи повышению износостойкости деталей машин путем обработки комплексным ионным азотированием (КИА) и упрочняющим электро-эрозионным алмазным шлифованием (ЕАШ).

Предложено оценивать формирование упрочненного слоя в ходе технологического процесса с учетом энергетического воздействия на заготовку. Проведено моделирование глубины проникновения азота в поверхностном слое с учетом времени выдержки заготовки в печи при температуре закалки в технологии ком-

плексного ионного азотирования. Получена формула для определения глубины упрочненного слоя с учетом энергетического коэффициента. Предложено после упрочненного шлифования при возникновении трещин, проводить окончательную обработку с учетом глубины трещин, образовавшихся после каждого прохода. Исследованы физические процессы, происходящие в поверхностном слое металла при КИА, рекомендованы оптимальные последовательности технологических операций в зависимости от размера деталей. Изучены параметры качества поверхностного слоя при ЕАШ и предложены рекомендации по упрочнению поверхностного слоя деталей. Для выбора технологических параметров отделочно-упрочняющей технологии на стадии проектирования с учетом содержания углерода в стали для формирования заданных характеристик поверхностного слоя в процессе ЕАШ назначена технологическая схема.

Ключевые слова: технология комплексного ионного азотирования, технология электро-эрозионного алмазного шлифования, параметры качества поверхности, параметры точности, припуск, структура, шероховатость, упрочнение, износостойкость

Shevchenko S.M. Technological support of wear resistance of machine parts by methods of chemical-thermal and diamond-abrasive processing. Manuscript.

Thesis for granting the Degree of Candidate of Technical sciences in speciality 05.02.08 – Manufacturing engineering. – National Technical University “Kharkiv Politechnical Institute”, 2021.

The thesis is devoted to solving an important scientific and technical problem of increasing the wear resistance of machine parts by processing by complex ionic nitriding (CIN) and hardening electro-erosion diamond grinding (EDG).

It is proposed to evaluate the formation of a hardened layer in the course of the technological process, taking into account the energy impact on the workpiece. The modeling of the penetration depth of nitrogen in the surface layer is carried out considering the holding time of the workpiece in the furnace at the hardening temperature in the technology of complex ion nitriding. A formula is obtained for determining the depth of the hardened layer taking into account the energy coefficient. It is proposed, after hardening grinding with the occurrence of cracks, to carry out the final processing considering the depth of the cracks formed after each pass. The physical processes occurring in the surface layer of the metal during CIN are investigated, the optimal sequences of technological operations are recommended, depending on the size of the parts. The parameters of the quality of the surface layer at EDG are studied and recommendations for strengthening the surface layer of parts are proposed. To select the technological parameters of the finishing and hardening technology at the design stage, considering the carbon content in steel for the formation of the specified characteristics of the surface layer in the EDG process, a technological scheme is assigned.

Key words: technology of complex ion nitriding, technology of electro-erosion diamond grinding, surface quality parameters, accuracy parameters, allowance, structure, roughness, hardening, wear resistance.

Підп. до друку 08.04.2021 р. Формат видання 134х215. Формат паперу 60х90/16. Папір офсет. Цифровий друк. Гарнітура TimesNewRoman.
Обсяг авт. арк. 0,9. Наклад 100 прим. Зам. № 19

Надруковано у копі-центрі «МОДЕЛІСТ»
(ФО-П Миронов М.В. Свідоцтво ВО №022953)
м. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1
Тел. 7-170-354
www.modelist.in.ua