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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Шевченко Світлана Михайлівна

УДК 621.9

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

05.02.08 – технологія машинобудування
131 – механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.
С.М. Шевченко

Науковий керівник:

Степанов Михайло Сергійович
доктор технічних наук, професор.

Харків – 2021

АНОТАЦІЯ

Шевченко С. М. Технологічне забезпечення зносостійкості деталей машин методами хіміко-термічної та алмазно-абразивної обробок. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування.

Об'єкт дослідження: технологічні процеси комплексного іонного азотування та електро-ерозійного алмазного шліфування сталевих заготовок.

Предмет дослідження: вплив параметрів технологічних процесів комплексного іонного азотування, алмазного шліфування (АШ) та електро-ерозійного алмазного шліфування на геометричні та фізико-механічні характеристики поверхневих шарів сталевих заготовок.

Метою дослідження є підвищення зносостійкості деталей машин шляхом обробки комплексним іонним азотуванням (КІА) та зміцнювальним електро-ерозійним алмазним шліфуванням (ЕАШ).

Для досягнення визначеної мети необхідно вирішити такі **задачі**:

1. Проаналізувати сучасні тенденції застосування зміцнювальних 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 зміцнювального 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 “білих шарів” (БШ) та визначити раціональні режимні параметри зміцнювального ЕАШ ПШ деталей зі сталей, що відрізняються за хімічним складом.

5. Оцінити зносостійкість поверхні після ЕАШ в порівнянні з 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.

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 виконано аналіз і дана класифікація сучасних обробно-зміцнювальних методів обробки сталевих деталей. Показано, що не існує універсального методу зміцнення деталей, здатного посилити ту чи іншу експлуатаційну властивість. Проведений аналіз підтвердив положення про те, що конкретні умови експлуатації деталей понукають застосуванню різніх зміцнювальних методів і технологій, а також зорієнтував 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; для цього виконано аналіз технологічного маршруту обробки шпинделя зубошліфувального верстату з побудовою діаграм температурного і силового впливу з урахуванням тимчасового чинника.

У результаті моделювання процесу дифузії азоту в деталях з легованої сталі, отримали значення глибини проникнення азоту в ПШ, з урахуванням часу

витримки заготовки в печі при температурі гартування. Отримані формули енергетичного коефіцієнту, який обумовлює виникнення БШ при ЕАШ і абразивному шліфуванні. З урахуванням енергетичного коефіцієнту, отримано формулу для визначення глибини зміцненого шару; 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; визначено загальний припуск на обробку; для усунення дефектів, що виникають після ЕАШ, отримана залежність, яка дає можливість визначити тривалість виходження в залежності від розмірів дефекта (глибини лунки), що утворюється після ЕАШ.

Третій розділ присвячений методиці експериментальних досліджень впливу технологій КІА та ЕАШ на структуру і властивості поверхонь сталевих заготовок. Було приведено параметри, зміст, послідовність технологічних операцій комплексного іонного азотування та режими електро-ерозійного алмазного шліфування. Наведено методики для вивчення мікро- і макроструктури, мікротвердості, залишкових макро- и мікронапруг, характеристик субструктури, фазового аналізу, шорсткості, зносу.

У четвертому розділі наведено результати експериментальних досліджень фізичних процесів, що відбуваються в ПШ металу при КІА та ЕАШ. Вивчено вплив послідовності технологічних операцій технології КІА на мікроструктуру, мікротвердість і фазовий склад сталевих заготовок. Вивчено вплив режимів АШ та ЕАШ на параметри якості поверхневого шару сталевих заготовок.

У п'ятому розділі дано практичні рекомендації щодо застосування технологій КІА та ЕАШ. Запропоновано використання КІА за одинарним і подвійним циклом для забезпечення експлуатаційних властивостей (зносостійкості) виробів в залежності від їх розмірів. Проаналізовано технологічні особливості ЕАШ як комбінованого обробно-зміцнювального методу. Визначено область практичного застосування деталей, оброблених методом ЕАШ.

Призначено схему для вибору технологічних параметрів обробно-зміцнювальної технології ЕАШ. Приведено дані, що стосуються економічного обґрунтування та виробничого впровадження.

Відповідно до поставленої мети та задач у дисертаційній роботі вирішена важлива науково-практична задача: підвищення зносостійкості деталей машин шляхом обробки комплексним іонним азотуванням (КІА) та зміцнювальним електро-ерозійним алмазним шліфуванням (ЕАШ), що знайшло відображення у наступних основних наукових **результатах:**

1. У результаті аналізу сучасних тенденцій застосування зміцнювальних технологій встановлено, що КІА та ЕАШ можуть бути використані як перспективні зміцнювальні методи для підвищення ресурсу деталей, що працюють в умовах ударних навантажень і 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 під гартування маємо небажаний ефект, який повинен ураховуватися фінішною механічною обробкою. За даними моделювання, для дифузії азоту на глибину до 750 мкм потрібно майже часове витримування при температурі гартування.

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

3. Технологічний процес КІА з послідовністю 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 азотування 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, які працюють в умовах ударних навантажень (пуансонів).

4. Досліджено режими процесу ЕАШ, що 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 заготівок зі сталі У7 зростає до 47% щодо твердості серцевини. Твердість і глибина БШ залежать 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 *м/с*; $S_{пр}$ = 1600 *мм/хв*; *t* = 0,07 *мм*; $V_з$ =10 *м/хв*; z = 0,2-0,5 *мм*; *U* = 36 *В*; *I* = 80-100 *А*) забезпечує стискаючі залишкові напруги після ЕАШ і його можна рекомендувати як обробно-зміцнювальну технологію для заготівок із доевтектоїдних і евтектоїдних сталей. Для заготовок із заевтектоїдних сталей, що містять більше 1% вуглецю, рекомендовано режим ЕАШ №2 ($V_{кр}$ = 35 *м/с*; $S_{пр}$ = 1300 *мм/хв*; *t* = 0,035 *мм*; $V_з$ =20 *м/хв*; z = 0,2-0,5 *мм*; *U* = 36 *В*; *I* = 20-40 *А*), що забезпечує стискаючі напруги і високий рівень зміцнення.

Оцінено розміри областей когерентного розсіювання (ОКР) *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 *м/с*; $S_{пр}$ = 1600 *мм/хв*; *t* = 0,07 *мм*; $V_з$ =10 *м/хв*; z = 0,2-0,5 *мм*; *U* = 36 *В*; *I*

= 80-100 *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 у 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 пропоновано технологічні рекомендації для підвищення ресурсу деталей та інструментів в технології КІА, що базуються у необхідності враховувати розміри деталей. Для деталей з розміром поперечного перерізу більше ніж 2 мм рекомендовано КІА з гартуванням і 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.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в підтвердженні можливості створення оптимальних технологічних умов зміцнення поверхні деталей та 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 та 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 зміцнювальному 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. Рекомендовано оптимальна область застосування методу електро-ерозійного алмазного зміцнення: для прецизійних деталей, що працюють на тертя при відсутності динамічних навантажень.

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

Список публікацій здобувача

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.

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. Terletsky, T. Protasenko // Eastern-European journal of enterprise technologies. – 2017. – Vol. 3. – № 5 (87). – P. 31-36.

3. Shevchenko S.M. A computer simulation of radiation-induced structural changes and properties of multiperiodZrNx/MoNx 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.

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

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

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.

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.

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.

9. Пат. на корисну модель № 117008 Україна, МПК С 23 С 14/32, С 21 D 1/06. Спосіб хіміко-термічної обробки сталевих виробів / Андреєв А.О., Александров В.А., Жиров О.С., Соболь 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.

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 2015р., Харків / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2015. – С. 355.

11. Шевченко С.М. Аналіз умов зміцнення поверхні сталевих виробів в процесі алмазно-іскрового шліфування /С.М. Шевченко, О.В. Руднєв // Матеріали

XXIV Міжнар. наук.-практ. конф. “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я”, 18-20 травня 2016р., Харків / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2016. – С. 380.

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 2017р., Харків / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2017. – С. 68.

13. Шевченко С.М. Трирівнева структурна інженерія іонно-плазмовими методами для підвищення експлуатаційних характеристик деталей військової техніки та бронезахисних елементів / О.В. Соболь, 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.

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.

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.

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.

ANNOTATION

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.

Object of research: technological processes of complex ionic nitriding and electro-erosion diamond grinding of steel blanks.

Subject of research: the influence of the parameters of technological processes complex ionic nitriding, diamond grinding and electro-erosion diamond grinding on the geometric and physicomechanical characteristics of the surface layers of steel blanks.

The **aim** of the study is to increase the wear resistance of machine parts by processing by complex ionic nitriding (CIN) and strengthening electro-erosion diamond grinding (EDG).

To achieve this goal, it is necessary to solve the following **tasks**:

1. Analyze current trends in the use of strengthening technologies for processing machine parts and tools to determine the prospects for using CIN and EDG.

2. Simulate the diffusion redistribution of nitrogen in steel parts during isothermal heating after the operation of ion nitriding within the framework of a complex technology and determine the dependence of the energy effect on the formation of a hardened layer for abrasive and electro-erosion diamond grinding.

3. To establish the influence of the sequence of CIN technological operations on the structure and properties of the surface and near-surface layers of steel billets and to analyze the possibility of using CIN for machine parts and tools of various purposes.

4. To study the influence of the EDG modes on the quality parameters of the surface layer of steel workpieces, to reveal the features of the "white layers" structure formed as a result of grinding and to determine the rational operating parameters of the strengthening EDG of the surface layer of parts made of steels that differ in chemical composition.

5. Evaluate the wear resistance of the surface after EDG in comparison with

diamond grinding (DG) and EDG with the inclusion of the stage of aging.

6. On the basis of the results obtained, give technological recommendations and outline the ways of their introduction into industrial practice for the application of CIN and EDG methods to increase the resource of parts and tools.

The **introduction** substantiates the relevance of the topic, formulates the goal, objectives, object, subject and methods of research, provides the scientific novelty and practical significance of the dissertation results, presents data on the approbation of the work, publications and the personal contribution of the applicant in the course of research.

The **first chapter** analyzes and gives a classification of modern finishing and hardening methods of processing steel parts. It is shown that there is no universal method of parts hardening capable of enhancing one or another operational property. The analysis confirmed the position that the specific operating conditions of the parts induce the use of different strengthening methods and technologies, and made it possible to formulate the goal and main objectives of the dissertation research.

In the **second chapter**, the theoretical prerequisites for strengthening technologies CIN and EDG are formulated.

It is proposed to evaluate the possibility of forming a hardened layer obtained during the execution of the technological process, taking into account the energy effect on the workpiece; for this, an analysis of the technological route of processing the spindle of a gear grinding machine is carried out with the construction of diagrams of the temperature and force effects taking into account the time factor.

As a result of modeling the process of nitrogen diffusion in alloy steel parts, the value of the penetration depth of nitrogen into the surface layer was obtained, taking into account the holding time of the workpiece in the furnace at the hardening temperature. The formulas of the energy coefficient are obtained, which determines the appearance of "white layers" (WL) during EDG and abrasive grinding. Taking into account the energy coefficient, a formula was obtained to determine the depth of the hardened layer; this dependence considers the temperature, power and time factors in

the cutting zone. It is proposed, after hardened grinding, when cracks occur, to carry out final processing with passes taking into account the depth of cracks formed after each pass; the total machining allowance has been determined; To eliminate defects arising after the EDG, a dependence was obtained, which makes it possible to determine the duration of nursing depending on the size of the defect (the depth of the hole) formed after the EDG.

The **third chapter** is devoted to the methodology of experimental studies of the influence of the CIN and EDG technologies on the structure and properties of the surfaces of steel blanks. The parameters, content, sequence of technological operations of the CIN and EDG modes were given. Methods for studying the micro- and macrostructure, microhardness, residual macro- and microstresses, characteristics of the substructure, phase analysis, roughness, wear are presented.

The **fourth chapter** presents the results of experimental studies of the physical processes occurring in the surface layers of the metal during CIN and EDG. The influence of the sequence of technological operations of the CIN technology on the microstructure, microhardness and phase composition of steel billets has been studied. The influence of the DG and EDG modes on the quality parameters of the surface layer of steel billets has been studied.

In the **fifth chapter**, practical recommendations are given on the use of CIN and EDG technologies. The use of CIN for single and double cycles is proposed to ensure the operational properties (wear resistance) of products, depending on their dimensions. The technological features of EDG as a combined finishing and hardening method are analyzed. The area of practical application of parts processed by the EDG method is determined. A scheme for the selection of technological parameters of the finishing and hardening technology EDG has been assigned. Provides data related to the business case and production application.

According to the set goal and objectives, an important scientific and practical task was solved in the dissertation work: increasing the wear resistance of machine parts by processing by complex ion nitriding (CIN) and hardening electro-erosion diamond

grinding (EDG), which is reflected in the following main scientific **results**:

1. As a result of the analysis of modern trends in the use of hardening technologies, it was found that CIN and EDG can be used as promising hardening methods to increase the resource of parts operating under shock loads and wear.

2. As a result of modeling the diffusion redistribution of nitrogen, it was found that for any holding time in the near-surface layers with a depth of up to 25% of the achieved thickness of diffusion saturation, at least one and a half times excess of the nitrogen content is observed in comparison with its values in the surface layer. With a short holding time for hardening, we have an undesirable effect that must be taken into account by finishing machining. According to the simulation data, for the diffusion of nitrogen to a depth of 750 microns at the hardening temperature, exposure is required for almost an hour.

The functional dependence of the energy impact (energy coefficient), which causes the appearance of a white layer during EDG and abrasive grinding, taking into account the technological processing parameters and material properties, has been determined.

3. The technological process of CIN with a sequence of technological operations: nitriding followed by normalization and nitriding followed by quenching and low tempering – showed almost the same result in terms of the level of hardening on parts of small diameters (punches d = 2 mm).

With an increase in the diameter of the parts to 4 mm, the difference in the level of hardening between normalization and quenching with tempering after ion nitriding increased significantly. The presence in the microstructure of the surface layer of blanks made of 9XC steel after CIN using quenching and tempering of the γ-phase, together with the hardness values, indicates deep nitriding with a high nitrogen concentration – up to 1%, which ensures high operational properties of punches, namely: high toughness at a sufficiently high hardness.

It was found that the greatest effect from the use of CIN is observed for parts operating under shock loads (punches).

4. The modes of the process of EDG have been investigated, which can be used to harden the surface layer. The conditions have been established when the structure of a WL, which is a structureless martensite (gardenite), is formed on the surface of the workpiece. EDG ensures the stability of the formation of a hardened wear-resistant layer; at the same time: the hardness of the surface layer of workpieces made of У7 steel increases to 47% in comparison with the hardness of the core. The hardness and depth of the WL depends on the carbon content in steels: the higher the carbon content, the harder the layers are formed. The carbon content close to the eutectoid composition (0.65-0.8%) is optimal for EDG treatment.

It is proved that the EDG mode № 1 ($V_{gr.wh.}$ = 35 *m/s*; $S_{l.f.}$ = 1600 *mm/min*; *t* = 0.07 *mm*; V_w = 10 *m/min*; *z* = 0.2-0.5 *mm*; *U* = 36 *V*; *I* = 80-100 *A*) provides compressive residual stresses after EDG and it can be recommended as a finishing and hardening technology for workpieces made of hypoeutectoid and eutectoid steels. For workpieces made of hypereutectoid steels containing more than 1% carbon, the EDG mode № 2 is recommended ($V_{gr.wh.}$ = 35 *m/s*; $S_{l.f.}$ = 1300 *mm/min*; *t* = 0.035 *mm*; V_w = 20 *m/min*; *z* = 0.2-0.5 *mm*; *U* = 36 *V*; *I* = 20-40 *A*), which provides compressive stresses and a high level of hardening.

The sizes of the coherent scattering regions (CSR) *L* and the level of microstrain ε are estimated. It was found that the EDG in all studied modes reduces the size of the CSR, in comparison with the initial state, after quenching and low tempering, and it was found that a more dispersed structure is formed. EDG mode № 1 ($V_{gr.wh.}$ = 35 *m/s*; $S_{l.f.}$ = 1600 *mm/min*; *t* = 0.07 *mm*; V_w = 10 *m/min*; *z* = 0.2-0.5 *mm*; *U* = 36 *V*; *I* = 80-100 *A*) provides the smallest CSR size and the greatest level of microstrain.

Based on a comparison of the degree of hardening of various initial structures of billets made of У7 and 40Х steels, it is recommended to use the following initial structures for effective EDG-hardening: for billets from medium-carbon and high-carbon hypoeutectoid steels: tempering martensite, tempering trostite and tempering sorbitol. For blanks made of steels close in structure to eutectoid (У7, У8, 65Г, etc.), the initial structures are recommended: tempering martensite, tempering reeds, tempering

sorbite, structures after annealing (normalization).

5. Evaluation of the wear resistance of the surface after the EDG in comparison with diamond grinding showed that the inclusion of the aging stage in the EDG processing cycle significantly improves the roughness (by 40%), and hence the wear resistance. Nursing is recommended to be carried out taking into account the depth of the hardened white layer. The allowance for nursing is 20-30 microns. The dependences of the removal value during nursing on the depth of the erosion hole were obtained.

6. On the basis of the results obtained, technological recommendations are proposed for increasing the resource of parts and tools in the technology of CIN, based on the need to take into account the dimensions of the parts. For parts with a cross-sectional size of more than 2 mm, CIN with hardening and low tempering after nitriding is recommended. For punches with a cross-sectional size of more than 5 mm, to ensure high performance properties (wear resistance, impact toughness), a double-cycle CIN technology is recommended.

The **scientific novelty** of the results obtained consists in confirming the possibility of creating optimal technological conditions for hardening the surface of parts and tools at the stages of the technological process of processing by CIN due to deep alloying with nitrogen and EDG due to the formation of structureless martensite – gardenite. In this case, for the first time:

– for grinding, dependencies were obtained that determine the nature of the energy impact that promotes the formation of a hardened WL, and which take into account the deformation factor in the cutting zone;

– a rational structure of the technological process of CIN has been proposed, which ensures the strengthening of parts and tools operating under wear and shock loads, which makes it possible to increase the resource of parts;

– the influence of the initial structural state, carbon concentration and its distribution over the depth of the white layer with the strengthening EDG on the microhardness, the degree of hardening, the characteristics of the substructure and the size of surface erosion defects was determined, which made it possible to control the

hardening process of the surface layer of parts;

was further developed:

– analysis of the regularities of the formation of the structure of surface layers, the factors of its stability and determining the appearance of a defect layer after CIN, which is eliminated by the methods of mechanical treatment.

The **practical significance** of the results obtained: the influence of the sequence of technological operations of CIN on the morphology of the structure and the level of hardness of steel products was experimentally studied, which became the basis of the proposed technological process with the modes and allowances defined in the study. A patent for a useful model “Method for chemical-thermal treatment of steel products” was received (No. 117008 Ukraine, MPKS23S 14/32, C21D 1/06). The possibility of using the EDG method to ensure high hardness and wear resistance of the surface layer with the simultaneous formation of the required geometric shape, dimensions and roughness in the details has been experimentally proved. Practical recommendations have been developed for optimizing the structure in the EDG process for hypoeutectoid and hypereutectoid steels. A technological hardening scheme has been developed to predict the characteristics of the WL (hardness, depth) for steels differing in carbon content by varying the EDG parameters. Recommended optimal area of application of the method of electro-erosion diamond hardening: for precision parts operating in friction in the absence of dynamic loads.

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

REFERENCES

1. Shevchenko S.M. Mathematical modeling of cutting force during grinding in different conditions / M.S. Stepanov, S.M. Shevchenko // Bulletin of the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”. – Thematic issue "Mathematical modeling in engineering and technology" – Kharkiv: NTU "KhPI", 2012. – № 2. – P. 212-218.

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

3. Shevchenko S.M. A computer simulation of radiation-induced structural changes and properties of multiperiod ZrNx/MoNx 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.

4. Shevchenko S.M. Research of efficiency of complex ionic nitriding for steel modification / O.V. Sobol', S.M. Shevchenko, T.O. Protasenko // Bulletin of Kharkiv National Automobile and Road University. – Kharkiv: KhNADU, 2018. – Issue. 82. – P. 13-19.

5. Shevchenko S.M. Computer modeling of nitrogen redistribution in technologies of complex ionic nitriding of alloy steels / S.M. Shevchenko, O.S. Terletsky, O.P. Gorova, O.V. Sobol', T.O. Protasenko, O.M. Rebrova // Bulletin of Kharkiv National Automobile and Road University. – Kharkiv: KhNADU, 2020. – Issue. 91. – P. 58-69.

6. Shevchenko S.M. Changes in carbon concentration in the surface layer of steel in the process of diamond-spark grinding // Bulletin of the Saratov State Technical University. – Saratov: SSTU, 2011. – Issue. 2, no. 2 (56). – P. 182-186.

7. Shevchenko S.M. Modeling of the thickness of the hardened layer of steel in

the process of impulse finishing treatments / A.L. Plotnikov, S.M. Shevchenko, I.N. Kolupaev, S.A. Ditinenko // Bulletin of the Volgograd State Technical University. – Ser. "Progressive technologies in mechanical engineering". – Issue. 7: Interuniversity collection of scientific articles. – Volgograd: VolgGTU, 2011. – No. 13 (86). – P. 91-92.

8. Shevchenko S.M. Stability of structure formation of steel during diamond-spark grinding (DSG) / A.L. Plotnikov, S.M. Shevchenko, I.N. Kolupaev, S.A. Ditinenko // Bulletin of the Volgograd State Technical University. – Ser. "Progressive technologies in mechanical engineering". – Issue. 7: Interuniversity collection of scientific articles. – Volgograd: VolgGTU, 2011. – No. 13 (86). – P. 92-94.

9. Pat. on the utility model № 117008 Ukraine, IPC C 23 C 14/32, C 21 D 1/06. Andreev A.O., Alexandrov V.A., Zhirov O.S., Sobol O.V., Stolbovy V.O., Shepel S.V., Shevchenko S.M.; Applicant and patent holder Institute of Solid State Physics, Materials Science and Technology. – NSC KIPT, – № U2017 00038; declared 03.01.2017; publ. 12.06.2017, Bull. № 11.

10. Shevchenko S.M. Investigation of the level of hardening of the surface layer of steel during diamond-spark grinding / S.M. Shevchenko // Materials of the XXIII International. Scientific-practical conf. "Information technologies: Science, Technology, Technology, Education, Health ", May 20-22, 2015, Kharkiv / ed. prof. Sokol E.I. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – P. 355.

11. Shevchenko S.M. Analysis of conditions for strengthening the surface of steel products in the process of diamond-spark grinding / S.M. Shevchenko, O.V. Rudnev // Materials of the XXIV International. Scientific-practical conf. "Information Technology: Science, Technology, Technology, Education, Health", May 18-20, 2016, Kharkiv / ed. prof. Sokol EI – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – P. 380.

12. Shevchenko S.M. Influence of the initial structure of steel on the level of hardening during "secondary" surface treatment / S.M. Shevchenko // Materials of the XXV International. Scientific-practical conf. "Information technologies: Science, Technology, Technology, Education, Health ", May 17-19, 2017, Kharkiv / ed. prof.

Sokol E.I. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – P. 68.

13. Shevchenko S.M. Three-level structural engineering by ion-plasma methods to increase the performance characteristics of parts of military equipment and armor elements / O.V. Sobol, O.E. Barmin, V.V. Bilozerov, V.V. Subbotina, S.M. Shevchenko // Abstracts of the V International scientific-practical. conf. "Problems of coordination of military-technical and defense-industrial policy in Ukraine. Prospects for the development of armaments and military equipment ", October 11-12, 2017, Kyiv. – Kyiv: International Exhibition Center LLC, 2017.– P. 194-195.

14. Shevchenko S.M. Investigation of the level of electroerosion of the surface layer of steel in the process of diamond-spark grinding / S.M. Shevchenko // Materials of the XXVI International. Scientific-practical conf. "Information technology: Science, Technology, Technology, Education, Health ", May 16-18, 2018, Kharkiv / ed. prof. Sokol E.I. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018. – P. 309.

15. Shevchenko S.M. Influence of diamond and diamond-spark grinding on the macrostress of the surface layer of steels / S.M. Shevchenko // Materials of the XXVII International. Scientific-practical conf. "Information technologies: Science, Technology, Technology, Education, Health", May 15-17, 2019, Kharkiv / ed. prof. Sokol E.I. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019. – P. 329.

16. Shevchenko S.M. Investigation of the influence of cooling rate on the structure and properties of steel in the technology of complex ionic nitriding / S.M. Shevchenko, O.P. Gorova, O.S. Terletsky // Materials of the XXVIII International. Scientific-practical conf. "Information technologies: Science, Technology, Technology, Education, Health", October 28-30, 2020, Kharkiv / ed. prof. Sokol E.I. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020. – P. 314.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень 6

ВСТУП 7

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕНДЕНЦІЙ ВИКОРИСТАННЯ ЗМІЦНЮВАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙ 13

1.1. Аналіз сучасних зміцнювальних методів обробки сталевих деталей 13

1.2 Способи і комбіновані технології збільшення глибини азотування і твердості, зносостійкості деталей 27

1.3 Аналіз причин виникнення специфічних структур поверхневих шарів (ПШ) сталевих заготовок у процесі механічної обробки 30

1.4 Умови і механізм формування структури «білих шарів» (БШ) 37

1.5 Перспектива застосування методу електро-ерозійного алмазного шліфування (ЕАШ) як зміцнювального методу 39

1.6 Висновки до розділу 1 46

РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ І ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕМПЕРАТУРНО-СИЛОВИХ УМОВ ЗМІЦНЕННЯ ПРИ ЕЛЕКТРО-ЕРОЗІЙНОМУ АЛМАЗНОМУ ШЛІФУВАННІ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ГЛИБИНИ ПРОНИКНЕННЯ АЗОТУ В РЕЗУЛЬТАТІ КОМПЛЕКСНОГО ІОННОГО АЗОТУВАННЯ… 47

2.1 Подання технологічного маршруту заготовки з урахуванням енергетичного впливу 47

2.2 Моделювання глибини азотування в технології комплексного іонного азотування (КІА) 55

2.3 Критеріальна оцінка отримання зміцнювального шару при шліфуванні 64

2.4 Визначення глибини зміцненого шару 68

2.5 Визначення припуску при зміцнювальному шліфуванні 71

2.6 Визначення параметрів обробки при виходженні після електро-абразивного алмазного шліфування (ЕАШ)….....73

2.7 Визначення температури в зоні обробки при шліфуванні по заданій глибині зміцненого шару.....75

2.8 Висновки до розділу 2… 77

РОЗДІЛ 3 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ, ЩО ВІДБУВАЮТЬСЯ В СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЯХ У РЕЗУЛЬТАТІ КОМПЛЕКСНОГО ІОННОГО АЗОТУВАННЯ ТА ЕЛЕКТРО-ЕРОЗІЙНОГО АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ. 78

3.1 Методика дослідження технологічного процесу комплексного іонного азотування… 78

3.2 Методика дослідження зміцнювального електро-ерозійного алмазного шліфування… 81

3.3 Висновок до роділу 3 95

РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ 96

4.1 Дослідження фізичних процесів, що відбуваються в поверхневому шарі сталевих деталей у результаті комплексного іонного азотування 96

4.1.1 Дослідження впливу нормалізації після іонного азотування на мікроструктуру та мікротвердість поверхневого шару деталей зі сталі 9ХС 97

4.1.2 Дослідження впливу гартування з низьким відпуском після іонного азотування на мікроструктуру та мікротвердість поверхневого шару деталей зі сталі 9ХС 100

4.1.3 Дослідження рівня зміцнення при використанні технологічного процесу комплексного іонного азотування зі застосуванням нормалізації та гартування в залежності від розміру поперечного перетину деталі 103

4.1.4 Дослідження впливу іонного азотування на мікроструктуру та мікротвердість поверхневого шару деталі зі сталі 9ХС… 107

4.1.5 Дослідження впливу послідовності операцій технологічного процесу комплексної обробки: азотування з наступним гартуванням і різним відпуском на

мікроструктуру і мікротвердість поверхневого шару деталей зі сталі 9ХС…..... 109

4.1.6 Дослідження впливу послідовності технологічних операцій комплексного іонного азотування з СВЧ гартуванням на мікроструктуру і мікротвердість деталей зі сталі 9ХС… 116

4.1.7 Дослідження впливу послідовності технологічних операцій при комплексній обробці на мікроструктуру і мікротвердість деталей зі сталі Р6М5 124

4.1.7.1 Дослідження впливу іонного азотування на мікроструктуру і мікротвердість поверхневого шару деталей зі сталі Р6М5 125

4.1.7.2 Дослідження впливу гартування після іонного азотування на мікроструктуру і мікротвердість поверхневого шару деталей зі сталі Р6М5 127

4.1.7.3 Дослідження впливу подвійної технології азотування та гартування на мікроструктуру і мікротвердість поверхневого шару деталей зі сталі Р6М5 127

4.1.7.4 Дослідження впливу подвійної технології азотування з наступним гартуванням і нормалізацією на мікроструктуру і мікротвердість поверхневого шару деталей зі сталі Р6М5 130

4.1.7.5 Дослідження впливу подвійної технології азотування з наступним гартуванням і кінцевим відпуском на мікроструктуру і мікротвердість поверхневого шару деталей зі сталі Р6М5..... 132

4.1.8 Результати дослідження впливу послідовності технологічних операцій при комплексній обробці на мікроструктуру і мікротвердість деталей зі сталі Р6М5 132

4.2 Дослідження фізичних процесів, що відбуваються в поверхневому шарі сталевих заготовок у процесі електро-ерозійного алмазного шліфування..... 137

4.2.1 Результати дослідження впливу шліфування на мікроструктуру і мікротвердість поверхневого шару заготовок з вуглецевих сталей 137

4.2.2 Дослідження впливу ЕАШ на фазовий склад заготовок зі сталі У7..148

4.2.3 Дослідження впливу ЕАШ і алмазного шліфування (АШ) на залишкові макро- і мікронапруги поверхневого шару заготовок із вуглецевих сталей.....150

4.2.4 Дослідження впливу режимів шліфування на стан поверхні заготовок із вуглецевих сталей.....157

4.2.5 Дослідження впливу шліфування на зміну вмісту вуглецю в поверхневому шарі заготовок із вуглецевої сталі.....163

4.2.6 Дослідження впливу вихідного структурного стану заготовок зі сталей У7 і 40Х на їх зміцнення в процесі ЕАШ… 166

4.2.7 Дослідження впливу шліфування на зносостійкість поверхневого шару сталевих заготовок 177

4.3 Висновки до розділу 4… 181

РОЗДІЛ 5 ЗАГАЛЬНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ КОМПЛЕКСНОГО ІОННОГО АЗОТУВАННЯ ТА ЕЛЕКТРО-ЕРОЗІЙНОГО АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ НА ПРАКТИЦІ….....182

5.1 Загальні рекомендації та техніко-економічна ефективність застосування комплексного іонного азотування….....182

5.2 Оцінка ефективності методу електро-ерозійного алмазного шліфування і розробка рекомендацій щодо його використання.....187

5.3. Визначення технологічних кордонів реалізації процесу ЕАШ..... 195

5.4 Методика оцінювання економічної ефективності зміцнювального шліфування 199

5.5 Висновки до розділу 5… 202

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 203

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 206

ДОДАТКИ.....236