

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**



БЕЗУМОВА ОЛЬГА ОЛЕКСІЇВНА

УДК 621.791.927.55

**ПЛАЗМОВЕ СУБМІКРО- І НАНОСТРУКТУРУВАННЯ
РІЗЬБОНАРИЗНОГО ІНСТРУМЕНТУ**

спеціальність 05.03.07 – Процеси фізико-технічної обробки

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ 2021

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі «Наноінженерія в галузевому машинобудуванні» ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Самотугін Сергій Савелійович,
ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», зав. кафедри «Наноінженерія в галузевому машинобудуванні».

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Головко Леонід Федорович,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», професор кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій.

кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
Шатрава Олександр Павлович,
Фізико-технологічний інститут металів і сплавів НАН України, старший науковий співробітник відділу концентрованих енергетичних впливів.

Захист відбудеться «11» травня 2021 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої ради Д26.002.15 Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 02000, Київ, вул. Дашавська, 6/2, корпус 23, ауд. 216.

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

Автореферат розісланий «6» квітня 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої ради



Пащенко В.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним з найбільш перспективних напрямів розвитку зміцнюючих технологій в інструментальному виробництві є поверхневе модифікування різальних кромek при нагріві висококонцентрованими джерелами енергії (ВКДЕ) - лазерним променем, електронним променем, плазмовим струменем. Завданням такої обробки є цілеспрямоване формування в поверхневому модифікованому шарі заданого структурного стану інструментального матеріалу, що викликає значне (у ряді випадків - кардинальне) підвищення експлуатаційних властивостей. Характерною особливістю поверхневого модифікування ВКДЕ в порівнянні з нанесенням покриттів (найбільш поширеним методом підвищення працездатності різального інструменту) є збільшення товщини модифікованого шару на декілька порядків, що значно розширює номенклатуру і технологічні можливості використання зміцненого інструменту, передусім за рахунок можливості виконання переточувань без повторного поверхневого зміцнення.

Численними дослідженнями встановлено, що найбільш високий рівень властивостей матеріалів (у тому числі інструментальних) при обробці ВКДЕ досягається у разі формування в модифікованому шарі субмікрокристалічної або нанокристалічної структури (середній розмір структурних параметрів - часток мартенсіту і карбідів ≈ 100 нм). Такий варіант обробки називають поверхневим наноструктуруванням. Проте, стосовно інструментальних матеріалів - швидкорізальних сталей і твердих сплавів - він залишається практично невивченим. Особливо актуальна розробка новітніх технологій зміцнення для різьбонарізного інструменту, який відрізняється широкою номенклатурою, великими об'ємами використання і особливими умовами навантаження. Стосовно різьбонарізного інструменту відомості про можливість реалізації поверхневого наноструктурування при нагріві ВКДЕ в літературі відсутні.

З методів поверхневого модифікування ВКДЕ ряд техніко-економічних переваг має плазмова обробка. Встановлена висока ефективність використання плазмового модифікування для сталевого і твердосплавного інструменту. В той же час залишаються невивченими механізми фазових і структурних перетворень в модифікованій зоні на різьбонарізному інструменті при плазмовому субмікро- і наноструктуруванні. Відсутні теоретичні моделі і розрахункові методики вибору режимів плазмового наноструктурування при обробці без оплавлення поверхні. Немає відомостей про принципи системного аналізу нових технологій поверхневого модифікування в сукупності з процесом різьбонарізання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі "Наноінженерія в галузевому машинобудуванні" ДВНЗ "Приазовський державний технічний університет" у рамках виконання науково-дослідних робіт: "Розробка наукових основ системного аналізу властивостей та надійності металообробного інструменту з поверхневим шаром з модифікованою ультра- та нанодисперсною структурою" (номер державної реєстрації 0116U004514), "Створення фізико - технічних основ критичних техно-

логії плазмового модифікування виробів з високовуглецевих сплавів" (номер державної реєстрації 0119U100375). Вказані науково-дослідні роботи, відповідальним виконавцем яких був претендент, стали базовими для підготовки і представлення цієї дисертації.

Мета і задачі дослідження. *Метою дисертаційної роботи є розробка теоретичних положень і технологічних рекомендацій для поверхневого субмікро- і наноструктурування сталевого і твердосплавного різьбонарізного інструменту при обробці висококонцентрованим плазмовим струменем.*

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні основні завдання:

1. Вивчити механізми зношування і методи підвищення експлуатаційних властивостей різьбонарізного інструменту.

2. Розробити математичну модель оптимального управління процесом плазмового субмікро- і наноструктурування різьбонарізного інструменту і інженерну методику розрахунку оптимальних режимів обробки.

3. Дослідити механізми фазових і структурних перетворень при плазмовому поверхневому субмікро- і наноструктуруванні різьбонарізного інструменту зі швидкорізальних сталей і твердих сплавів.

4. Розробити методику стійкісних випробувань і дослідити зносостійкість різьбонарізного інструменту з поверхневим модифікованим шаром.

5. Виконати системний аналіз технологічних процесів різьбонарізання інструментом, що пройшов плазмову модифікування.

Об'єкт досліджень - процеси плазмового поверхневого субмікро- і наноструктурування різьбонарізного інструменту зі швидкорізальних сталей і твердих сплавів.

Предмет досліджень - структура, фазовий склад, параметри кристалічної будови і експлуатаційні властивості модифікованих шарів з субмікро- і нанокристалічною структурою на різальному клині різьбонарізного інструменту.

Методи досліджень: математичне моделювання і розрахунки на ПЕОМ; металографічні дослідження структури методами оптичної і електронної мікроскопії; рентгеноструктурний аналіз фазового складу, параметрів кристалічної будови і внутрішньої напруги; стійкісні випробування інструменту.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертаційній роботі проведені комплексні теоретичні і експериментальні дослідження процесу субмікро- і наноструктурування різьбонарізного інструменту при поверхневому нагріві висококонцентрованим плазмовим струменем.

1. Вперше на основі кінцево-елементного рішення диференціального рівняння теплопровідності в нелінійній постановці розроблені алгоритми і інженерні методи розрахунку оптимальних режимів плазмового модифікування різьбонарізного інструменту зі швидкорізальних сталей і твердих сплавів, що забезпечують утворення в модифікованій зоні субмікро- і нанокристалічної структури з підвищеним рівнем експлуатаційних властивостей.

2. На підставі металографічних і рентгеноструктурних досліджень вперше встановлені закономірності наноструктурування різальних кромки

різьбонарізного інструменту при плазмовому модифікуванні без оплавлення поверхні. Встановлено, що при наноструктуруванні сталевго інструменту набуття найбільш високих значень дисперсності структури (середній розмір часток наномартенситу і карбідів ≈ 100 нм), твердості HV 1025 і теплостійкості $K^4_{p_{58}} = 690^\circ\text{C}$ обумовлене збільшенням швидкості охолодження, розчиненням вихідних карбідів і виділенням нанодисперсних вторинних карбідів. Для твердосплавного інструменту максимальний ефект зміцнення (HV 1750) обумовлений подрібненням вихідних карбідів і насиченням зв'язки нанодисперсними вторинними карбідами ($d_k \approx 100$ нм) при надшвидкісному охолодженні.

3. Вдосконалена методика стійкостних випробувань різьбонарізного інструменту після плазмового наноструктурування з урахуванням неоднорідності структури і твердості модифікованої зони і можливості виконання переготувань без повторного модифікування. Встановлено підвищення стійкості різьбових різців з модифікованою зоною в 2,15-2,75 рази (відповідно за критеріями рівного і оптимального зносу).

4. Вперше розроблений науково-методологічний комплекс управління наноструктуруванням поверхні різьбонарізного інструменту при плазмовому модифікуванні. З використанням положень структурної теорії міцності і закономірностей дислокаційної теорії встановлено, що найбільш високі дисперсність структури і експлуатаційні властивості модифікованої зони досягаються за рахунок реалізації дислокаційного і дисперсійного механізмів зміцнення для сталевго інструменту і твердорозчинного, дисперсійного і зернограничного - для твердосплавного інструменту.

5. Отримали подальший розвиток методи системного аналізу технологічних процесів різьбонарізання і плазмового модифікування. Вперше розроблений комплексний підхід на основі розгляду єдиної технологічної системи, в яку в якості взаємозв'язаних складових входять підсистеми "Плазмове модифікування" і "Різьбонарізання". Новий підхід є основою для створення інтегрованих технологій механічної і фізико-технічної обробки і їх програмного управління.

Практичне значення одержаних результатів. Результати досліджень, які отримані при виконанні дисертаційної роботи, послужили підґрунтям для розробки технологічних основ плазмового наноструктурування різьбонарізного інструменту зі швидкорізальних сталей і твердих сплавів, які включають математичну модель і інженерну методику вибору оптимальних режимів і технологічних схем плазмової обробки інструменту різних типів, методику стійкостних випробувань, методику вибору оптимальної технології і режимів різьбонарізання модифікованим інструментом.

Наукові і практичні результати роботи отримали дослідно-промислове випробування у виробничих умовах ВАТ "Сервісний центр Тяжпромонтаж" і ТОВ "Азовський судноремонтний завод".

Результати досліджень використовуються в учбовому процесі ДВНЗ "Приазовський державний технічний університет" при підготовці магістрів за

спеціальностями "Нанотехнології в машинобудуванні", "Обробка металів за спецтехнологіями", "Інструментальне виробництво".

Особистий внесок здобувача. У дисертаційній роботі вклад автора складається з самостійного вибору підходів опису дії плазмового струменя на різьбонарізний інструмент, розробки математичної моделі, обчислювальних алгоритмів. Претендентом проведені металографічні дослідження і випробування модифікованого інструменту, виконаний аналіз отриманих результатів, сформульовані висновки і положення, що виносяться на захист.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи докладалися і обговорювалися на міжнародних і всеукраїнських науково-технічних конференціях: XIII міжнародна науково практична інтернет-конференція «Сучасні виклики і актуальні проблеми науки, освіти та виробництва: міжгалузеві диспути» (м. Київ, Україна, 2021 р.), XXII, XXIII Міжнародних науково-практичних конференціях: "Фізичні і комп'ютерні технології" (м. Харків, Україна, 2016, 2017 рр.); Міжнародних науково-технічних конференціях "Нові і нетрадиційні технології в ресурсо- і енергозбереженні" (м. Одеса, Україна, 2017, 2019 рр.); Міжнародній науково-технічній конференції "Університетська наука - 2018" (м. Маріуполь, Україна, 2018 р.)

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 19 наукових праць, у тому числі 14 статей у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття у періодичних наукових виданнях, які входять Scopus), 5 статей у науково фахових виданнях категорії «А», 5 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з введення, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний об'єм дисертації 153 сторінок машинописного тексту, 45 малюнків, 8 таблиць, 161 джерел їх найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, подано загальну характеристику роботи, сформульована її мета, основні завдання та наукова новизна досліджень. Представлена практична цінність отриманих результатів, представлено інформацію про особистий внесок здобувача та апробацію роботи.

У першому розділі був проведений аналіз сучасного стану і тенденцій розвитку різьбонарізного інструменту, який показав, що найбільш перспективним напрямком є створення матеріалів нового типу з субмікро- і наноструктурою і поверхневе модифікування. Нові технології отримання матеріалів розглянуті в роботах вітчизняних і закордонних вчених Андрієвського Р.А., Munzer Н.-J., Ковнеристого Ю.А., Лебедева А.А., Валієва Р.З., Яковлева С.П., Токарева В.Н. та ін. У свою чергу, поверхневе модифікування сталевого та твердосплавного інструменту також розвивається в двох напрямках - нанесення покриттів методами насичення або осадження і обробка висококонцентрованими джерелами нагріву (ВКДН).

Питанням розробки нових типів покриттів для сталевого та твердосплавного інструменту і технологій їх нанесення присвячені роботи Верещаки О.С., Ляшенка Б.А., Табакова М.Ш., Горленко А.О., Волосова М.А. та ін. Поверхнева обробка при нагріві ВКДЕ дозволяє наносити на робочу поверхню різьбонарізного інструменту модифікований шар з ультрадисперсної структурою значно більшої товщини в порівнянні з покриттями. Нові технології лазерної обробки розглянуті в роботах Коваленка В.С., Головка Л.Ф., Анякіна М.І., Ліхощви В.П., Буракова В.А., Григорьянца О.Г., Бекренева А.М., Подураєва В.Н., Ярьська С.І.

З методів обробки ВКДН певні техніко-економічні переваги має плазмова обробка: низька вартість і доступність обладнання, великі розміри модифікованої зони. Питанням розробки та досліджень плазмової обробки присвячені роботи Кривцуна І.В., Петрова С.В., Балановського А.Е., Самотугіна С.С., Лецінського Л.К., Домбровського Ю.М., Тополянського П.А., Короткова В.А.

Разом з тим, в літературі в даний час відсутні науково-обґрунтовані принципи розробки новітніх технологій плазмового модифікування з субмікро- і наноструктурою сталевого та твердосплавного різьбонарізного інструменту, відсутні результати і методики досліджень та моделювання структурних перетворень, фізико-механічних властивостей і оптимальних режимів обробки.

На підставі викладеного була сформульована мета і завдання роботи.

Другий розділ присвячений розробці методик дослідження структури, теплових процесів і експлуатаційних властивостей твердосплавних різців та різьбонарізної гребінки зі швидкорізальної сталі після плазмового модифікування. Дослідження виконувалась з використанням плазмового технологічного комплексу (рис. 1, 2).



Рис. 1. – Плазмовий технологічний комплекс

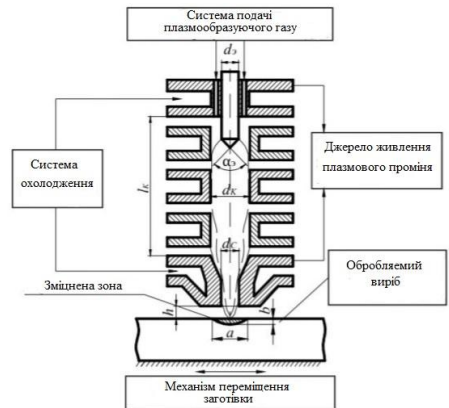


Рис. 2. – Схема плазмового технологічного комплексу

Для вивчення розподілу температурних полів і визначення швидкостей нагріву і охолодження використано кінцево-елементне моделювання із застосу-

ванням прикладного пакета MSC.Nastran. При виконанні розрахунків послідовність дії наступна: визначається необхідний алгоритм для вирішення завдання; визначаються і транслуються параметри режиму, які задані для виконання завдання; вибирається відповідна схема або набір навантажень (Load Cases); вибираються змінні, необхідні для виведення після рішення задачі; надсилаються дані завдання для чисельного аналізу в програму - обчислювальну систему (в нашому випадку - MSC.Nastran), використовувану в даний момент рішення задачі; зчитуються кількісні результати з файлів результатів, створених програмою-обчислювачем (в нашому випадку - MSC.Nastran). Алгоритм розв'язання математичної задачі наведено на рис. 3.

Для визначення температурного поля в об'ємі матеріалу, що нагрівається безперервним тепловим джерелом, що рухається по поверхні з певною швидкістю, необхідно вирішити нелінійне диференційне рівняння теплопровідності за допомогою підходу Лагранжа.

У кожній елементарній одиниці об'єму середовища баланс потоку тепла визначається співвідношенням (1):

$$c_p \cdot \bar{p} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + c_p \cdot \bar{p} \cdot (\nabla_j \cdot T) V_j - \lambda \cdot \nabla_j \nabla_j T = \omega, \quad (1)$$

при початковій умові

$$T(x^j, 0) = \hat{T}(x^j), \quad (2)$$

Після створення математичної моделі створюється модель твердого тіла, відповідно до параметрів різьбонарізного різця, яка є геометричною моделлю з розбивкою її на кінцеві елементи (рис. 4).

Значення коефіцієнта теплопровідності представляється у вигляді функції $\lambda_{RM} = \lambda(T_{RM})$, де T_{RM} є температурою випробування матеріалу. Температура представлена у вигляді функції $F(T)$. Поточне значення коефіцієнта теплопровідності представляється виразом (3):

$$\lambda(T) = \lambda_{RM} \cdot F(T) \approx \lambda_{RM} \cdot$$

$$\left\{ F(T_{(k)}) + \frac{T - T_{(k)}}{T_{(k+1)} - T_{(k)}} \left[F(T_{(k+1)}) - F(T_{(k)}) \right] \right\}, \quad (3)$$

де k – номер точки на графіку $F(T)$.

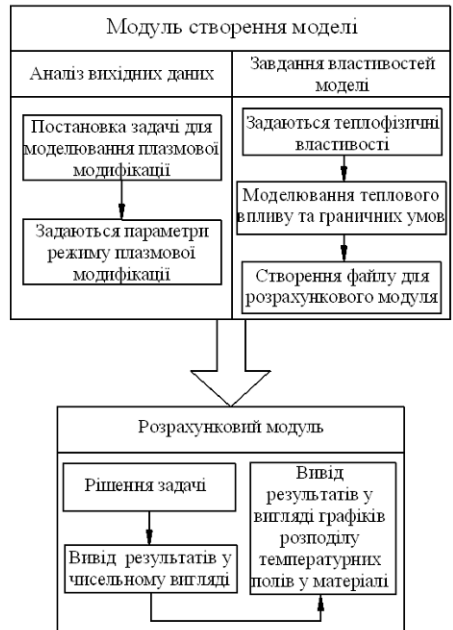


Рис. 3. Алгоритм моделювання процесу плазмового модифікування пластин з твердих сплавів за допомогою системи MSC.Patran-Nastran

Розроблена модель дозволяє вирішувати як пряму задачу - обчислення T_{max} и W при заданих умовах обробки, так і зворотну задачу - обчислення необхідних (оптимальних) режимів обробки, що забезпечують досягнення заданих значень T_{max} на заданій відстані від поверхні (заданої глибини зміцненої зони).

Стосовно випадку нагріву різьбонарізної гребінки характер поширення тепла ускладниться із-за нахилу нижньої грані під кутом α (рис.5)

Важлива для практичних цілей характеристика - максимальна температура нагріву T_{max} в точці А - визначається з рівнянням:

$$T_S = \frac{q}{2VCgpa\sqrt{t(t_0+t)}} \cdot e^{-\left(\frac{z_0^2}{4at} + \frac{y_0^2}{4a(t_0+t)}\right)} + e^{-\left(\frac{(ex\text{tga}+ex\text{sina}-z_0)^2}{4at} + \frac{(ex\text{tga}\times\text{sina}+y_0)^2}{4a(t_0+t)}\right)} \quad (4)$$

Для вирішення поставленого завдання - розробки математичної моделі плазмового поверхневого модифікування різьбонарізної гребінки зі швидкорізальної сталі в нелінійній постановці розроблений алгоритм вирішення рівняння (4) з використанням методу кінцевих елементів, аналогічний приведену на рис. 3.

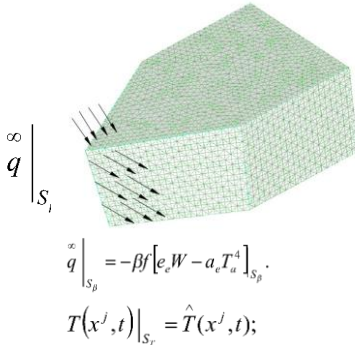


Рис. 4. Звичайно-елементна модель оброблюваного різьбонарізного різця з граничними умовами

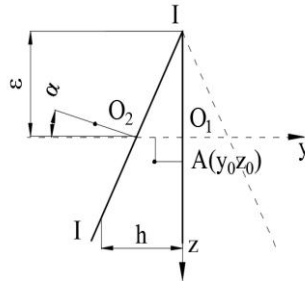


Рис.5. Схема до розрахунку температурного поля при плазмовій обробці гребінки на прикладі однієї кромки

Розроблена методика металографічних досліджень, яка дозволяє дослідити мікроструктуру швидкорізальних сталей та твердих сплавів у модифікованому та вихідному станах. З використанням загальновідомих методів рентгеноструктурного аналізу визначались параметри: період решітки кобальтової фази a , мікронапруження σ , розмір блоків мозаїки (областей когерентного розсіювання) D .

Також була розроблена методика стійкісних випробувань різьбонарізного інструмента після плазмового модифікування. При випробуваннях інструменту з модифікованою зоною будуються криві зносу, які виражають функціональну залежність зносу задньої і передньої поверхні леза від тривалості τ різання або від довжини L шляху у напрямі результуючого руху різання.

У **третьому розділі** за розробленою методикою виконано моделювання процесу поширення тепла при плазмовому нагріві різьбонарізної гребінки зі швидкорізальної сталі. Математична модель, яка дозволяє відобразити характер розподілу температури в модифікованій зоні в процесі плазмової обробки в режимі реального часу (рис. 6).

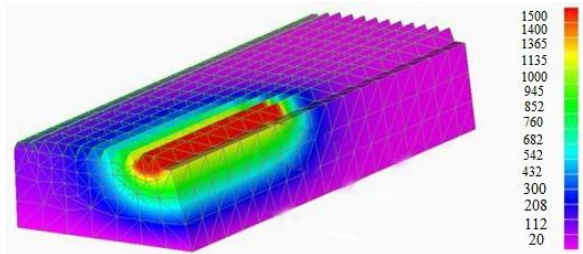


Рис 6. Розподіл температури плазмового нагріву по глибині зміщеної зони

Стосовно оптимізації технології комплексного об'ємно-плазмового зміцнення різьбонарізного інструменту зі швидкорізальних сталей виконувалася плазмова обробка

призматичних гребінок для нарізування метричного різьблення з кроком $P = 4,0$ мм, із сталі Р6М5, які пройшли на стадії виготовлення стандартну об'ємну термообробку - загартування від 1220°C + триразова відпустка при 560°C (витримка 1 годину). Плазмова обробка гребінки виконувалася уздовж задньої поверхні. Оптимальні режими плазмового нагріву також вибиралися згідно прийнятих рекомендацій. Були досліджені два варіанти комплексної технології:

- А - плазмове модифікування після стандартної об'ємної термообробки;
- Б - те ж з подальшою триразовою стандартною об'ємною відпусткою;

На рис. 7 показані точки досліджень.

Встановлено, що при висококонцентрованому плазмовому нагріві поверхні гребінки температура в поверхневих об'ємах металу розподіляється нерівномірно - найшвидше нагріваються і також найшвидше охолоджуються вершини і западини зубчиків на калібруючій частині. Ці ж місця являються і найуразливішими при різьбонарізанні, що визначають точність і якість поверхні різьблення. Після нагріву поверхні гребінки висококонцентрованим плазмовим струменем (варіант А) твердість і теплостійкість сталі Р6М5 підвищуються. У зоні плазмової дії відбувається розчинення первинних карбідів, що збереглися, і частини вторинних карбідів.

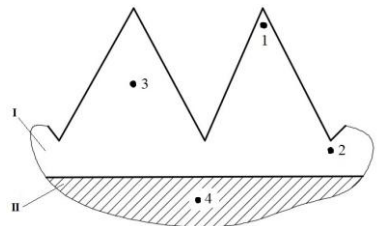


Рис. 7. Точки досліджень на поперечних шліфах різьбонарізних гребінок із сталі Р6М5 після плазмового модифікування; I - модифікована зона; II - початковий метал

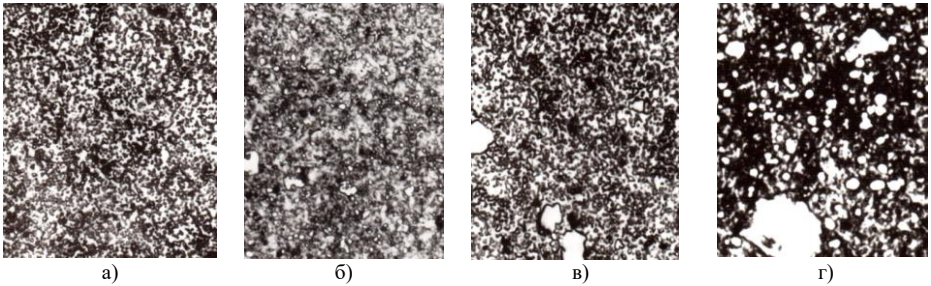


Рис. 8. Мікроструктура металу модифікованої зони на гребінках із сталі Р6М5 після обробки по варіанту Б (а-г) в точках досліджень: а - точка 1; б - точка 2; в - точка 3; г - точка 4; $\times 2500$

Як і значення твердості, найбільш висока ступінь дисперсності структури модифікованої зони досягається у вершин зубчиків і западинах. При видаленні углиб модифікованої зони дисперсність структури і твердість дещо знижуються, але залишаються значно вище, ніж в початковому металі. Дослідження показали, що підвищення твердості і теплостійкості різальних кромок гребінок із сталі Р6М5 при плазмовому модифікуванні по варіанту А обумовлено дією субструктурного, дислокаційного і твердорастворного механізмів зміцнення.

По варіанту обробки Б, одночасно відбуваються два процеси - розпад залишкового аустеніту (збільшується зміст мартенситної фази) і дисперсійне твердіння металу модифікованої зони. Вторинні карбіди, що виділяються, мають надзвичайно високу міру дисперсності, особливо у кромок (рис. 8, а), і рівномірно розподілені в мартенситній матриці. Важливу роль при дисперсійному твердненні металу модифікованої зони грає і висока щільність дислокацій. При відпустці дія твердорозчинного і субструктурного механізмів зміцнення послабляється - зменшується період кристалічної решітки мартенситу і збільшується розмір блоків, проте значно ефективніше діє дислокаційний і, особливо, дисперсійний механізми зміцнення. Досягаються значення твердості і теплостійкості різальних кромок, що перевищують рівень плазмового модифікування без оплавлення поверхні для масивного інструменту зі швидкорізальної сталі і що відповідають випадку плазмової обробки з мікро - і наноструктуруванням.

Таким чином дослідженнями встановлено, що у вершин зубчиків (точка 1) утворюється високодисперсна мартенситно-карбідна структура з середнім розміром пластинів мартенситу і часток карбідів близько 100 нм в точках 1 і 2 у різальній кромці при обробці по варіанту Б (рис. 8, а). У даному випадку утворення такої структури не пов'язане з процесом швидкісної кристалізації розплаву, а обумовлено фазовими і структурними перетвореннями в твердій фазі при збільшенні швидкості охолодження об'ємів металу, прилеглих до різальної кромки зубчастої форми.

Електронно-мікроскопічні дослідження при великому збільшенні показали, що в процесі плазмового модифікування у різальній кромки відбувається розчинення дрібних і середніх карбідних часток і значне оплавлення круглих карбідів. Великі і дрібні карбіди, що залишилися, мають строго правильну форму сфери або еліпсоїда (рис. 9, а), що свідчить про рівномірне розплавлення їх периферійних об'ємів і розчинення в матриці. Відпуск після плазмового модифікування сприяє виділенню ультрадисперсних вторинних карбідів, що мають переважно неправильну форму (рис. 9, б).

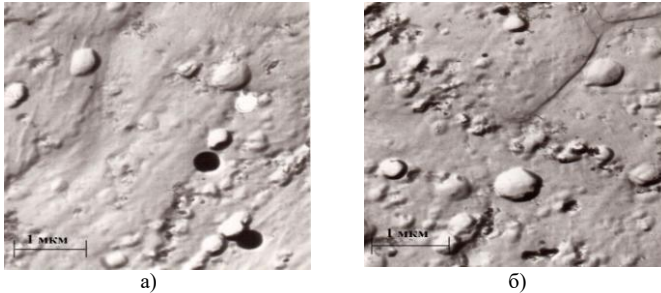


Рис. 9. Тонка структура металу модифікованої зони у різальній кромки (точка 1) при обробці по варіанту А (а) і Б (б). $\times 9000$

Тип структури, що утворюється в модифікованій зоні в результаті комплексного об'ємно-поверхневого зміцнення гребінок із сталі Р6М5, займає проміжне положення між нанокристалічною (до 100 нм) і субмікрокристалічною (100-1000 нм або 0,1-1,0 мкм).

У четвертому розділі з використанням розробленої математичної моделі виконані розрахунки параметрів термічного циклу процесу плазмового модифікування твёрдосплавних різбових різців і визначені оптимальні значення технологічних параметрів обробки (рис. 10).

Розрахунками встановлено, що найбільш високі значення температури нагріву і швидкості охолодження досягаються в точках, близьких до вершини різця і бічних різальних кромок.

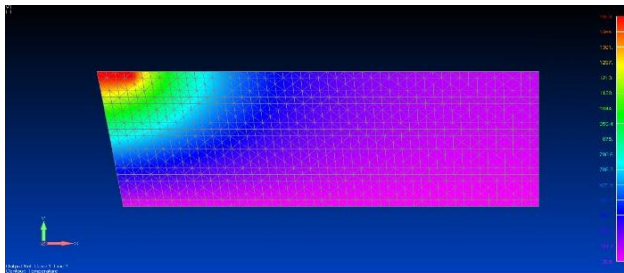


Рис. 10. - Характер зміни температури в головній січній площині різця з пластиною із сплаву ВК4 при плазмовому модифікуванні

В таблиці 1 наведені значення T_{max} і W в окремих точках модифікованої зони, а в таблиці 2 - оптимальні значення параметрів режиму плазмової обробки різців з твердосплавними пластинами.

Металографічними і рентгеноструктурними дослідженнями встановлено, що при плазмовому модифікуванні на оптимальних режимах в модифікованій зоні утворюється субмікрокристалічна структура із середнім розміром карбідних частиць $d_k \approx 100$ нм, з підвищеним рівнем твердості і більш сприятливим розподілом залишкових напружень. Найбільш високі експлуатаційні властивості і найбільш дисперсна структура реалізуються при плазмовій обробці твердих сплавів без опалення, але з фазовими перетвореннями в карбідах і зв'язці. Основним процесом, що визначає структуру і властивості модифікованої зони, є контактне плавлення міжфазних меж карбід-зв'язка. Воно залежить від двох чинників - змочуваності карбідів рідкою єднальною фазою і розчинності карбідів в зв'язці.

При видаленні від вершини, як уздовж передньої поверхні, так і в глибину, максимальна температура нагріву знижується. У таких умовах в різних ділянках модифікованої зони можуть проходити фазові і структурні перетворення, що відрізняються між собою.

Висновки, зроблені за результатами металографічних досліджень, підтвердилися результатами рентгенографічних дослідженнях. Встановлено, що плазмове модифікування сплавів ВК4 і ВК8 і Т5К10 призводить значного збільшення періоду решітки кобальту. Оскільки методика досліджень виключала вплив мікронапруг на період решітки Со - фази, таке значне його збільшення логічно пояснити тільки підвищенням концентрації вольфраму і вуглецю (в сплавах ВК4 і ВК8), а також титану (в сплаві Т5К10) в кобальтовому твердому розчині заміщення-впровадження. Це пов'язано з контактним плавленням міжфазних меж карбід-зв'язка. При подальшому швидкісному охолодженні відбувається дисперсійне твердіння пересиченої легуючими елементами зв'язки з виділенням ультрадисперсних частинок карбідів (середній розмір карбідних зерен у ріжучої кромки $d_k \approx 0,01$ мкм). Відбувається подрібнення не тільки

Зміна максимальної температури нагріву T_{max} і швидкості охолодження W в точках модифікованої зони при плазмовій обробці різців з пластинами із сплаву ВК4

| Відстань від поверхні z, мм | T, °C | W, 10 ⁶ °C/c |
|-----------------------------|-------|-------------------------|
| 0,2 | 1590 | 3,18 |
| 0,4 | 1540 | 2,73 |
| 0,6 | 1495 | 2,12 |
| 0,8 | 1430 | 1,64 |
| 1,0 | 1460 | 1,48 |
| 1,2 | 1380 | 1,34 |
| 1,4 | 1370 | 1,19 |
| 1,6 | 1360 | 1,02 |

Таблиця 2

Оптимальні значення параметрів режиму плазмової обробки різців з твердосплавними пластинами

| Марка сплаву | Товщина пластини | Ток, I, А | V, м/год |
|--------------|------------------|-----------|----------|
| ВК4 | 3 | 315 | 20 |
| | 5 | 380 | 18 |
| Т15К6 | 3 | 340 | 23 |
| | 5 | 400 | 21 |

мікроструктури, але і параметра субструктури - розмір блоків мозаїки D зменшується для сплавів ВК4 і ВК8 більш, ніж в 5 разів, а для сплаву Т5К10 - майже в 3,5 рази.

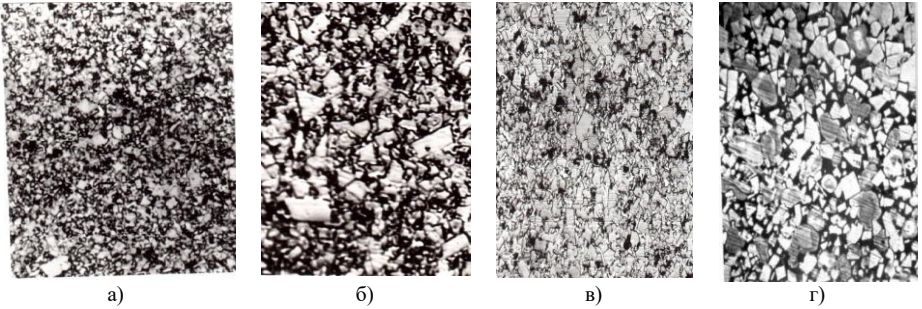


Рис. 11. Мікроструктура окремих ділянок модифікованої зони на різцях з пластинами із сплаву ВК8(а,в) і Т15К6(б,г): а і в – у вершині різця; б і г – вихідний стан, $\times 2000$

У п'ятому розділі на підставі комплексу виконаних досліджень теплових процесів, структури, фазового складу, параметрів кристалічної будови модифікації сталевого та тврдосплавного різьбонарізного інструменту розроблено структурну схему науково методологічного комплексу управління наноструктуруванням різьбонарізного інструменту (рис. 12).

Розроблений методологічний підхід дозволяє вибирати оптимальні технологічні процеси плазмового модифікування різьбонарізного інструменту в залежності від типу і складу інструментального матеріалу. При цьому, найбільший ефект зміцнення може бути досягнутий при реалізації максимально можливого числа зміцнюючих механізмів в єдиному технологічному процесі.

Для практичної реалізації процесу плазмового модифікування і використання модифікованого інструменту розроблені принципи системного підходу, які дозволяють в залежності від поставленого завдання, вибирати оптимальні параметри плазмової обробки для конкретного типу різьбонарізного інструменту і конкретних умов різьбонарізання або вибирати оптимальні параметри процесу різьбонарізання (наприклад, режим різання) для конкретного типу інструменту після плазмового модифікування.

Як приклад практичного використання розробленого системного підходу були розглянуті особливості вибору оптимальних режимів різання різьбонарізними профільними різцями з напаяними тврдосплавними пластинами з модифікованою зоною після переточувань.

Якщо відновлення ріжучих властивостей інструменту відбувається за допомогою повторних переточувань, та нормою зносу інструменту є нормована товщина сточуемого шару H . Тоді:

$$H = (h_{3\max} + \Delta h_3) \cdot \sin \alpha \quad , \quad (5)$$

Встановивши величину H по нормативним вимогам $h_{3\max}$ для заданого типу твердого сплаву, умов і режиму різання, і знаючи характер зміни твердості модифікованої зони, можна прогнозувати як величину твердості ріжучої кромки, так і в залежності від неї - величину стійкості різців з модифікованою зоною після переточувань.

В умовах ВАТ «Сервисный центр ТЯЖПРОМ-МОНТАЖ» проведено дослідно-промислове впровадження розробленої технології зміцнення різьбонарізного інструменту з твердих сплавів.

Результати проведення за методикою стійкісних випробувань, показали, що плазмове поверхневе модифікування профільних різьбових різців з пластинами, що напаяли, із сплаву ВК4 призводить до значного підвищення їх зносостійкості - як безпосередньо після плазмової обробки, так і після подальших переточувань. Міру підвищення працездатності різців можна виразити залежністю:

$$K_{CT} = \tau_M / \tau_H, \quad (6)$$

де τ_M і τ_H - відповідно, час обробки різцями після модифікування і початковими для досягнення заданої величини зносу по задній поверхні h_3 , визначуваної за критерієм рівного зносу (рис. 14 - лінія I для сплаву ВК4: $h_3 = 1,4$ мм) або за критерієм оптимального зносу (рис. 14 - лінія II).

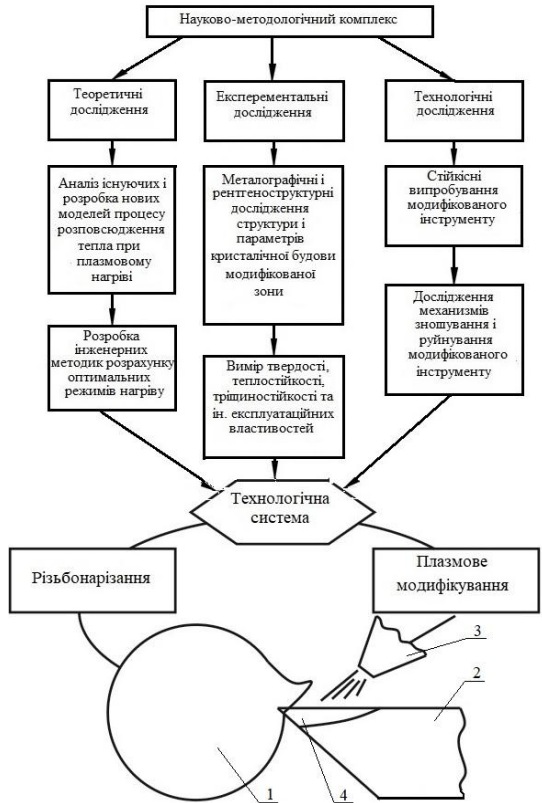


Рис. 12. Структурна схема науково-методологічного комплексу: 1- деталь; 2- інструмент; 3 – плазматрон; 4 – зона обробки

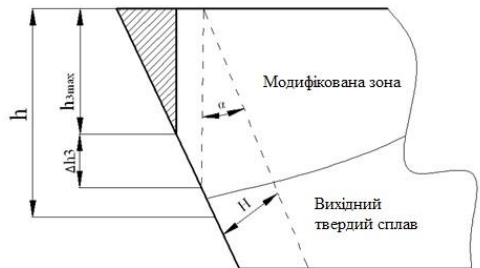


Рис. 13. Схема визначення норми зносу профільних різців з модифікованою зоною

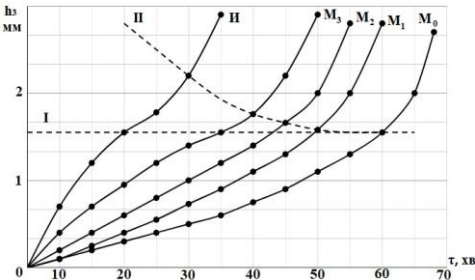


Рис. 14. Залежність величини зносу h_3 від часу роботи профільних різбових різців з пластинами із сплаву ВК4 : I - різець в початковому стані; M0- різець після плазмового модифікування; M1, M2, M3 - різці після плазмового модифікування і відповідних переточувань (індекси 1, 2, 3 - кількість переточувань); I - лінія рівного зносу; II - лінія оптимального зносу

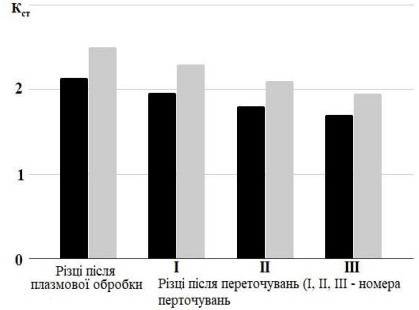


Рис. 15. Зміна міри підвищення стійкості різців з модифікованою зоною після переточувань; ■ - за критерієм оптимального зносу; ■ - за критерієм рівного зносу

Зміна міри підвищення стійкості $K_{ст}$ різців після модифікування і переточувань показана на рис. 15.

Дослідно-промислове впровадження технології плазмового наноструктурування різьбонарізного інструменту з швидкорізальних сталей проведено в умовах ТОВ «Азовський судоремонтний завод».

Результати практичних випробувань повністю підтвердили теоретичні та експериментальні положення та залежності, які отримані під час дослідження.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. В даний час одним з найбільш перспективних напрямків підвищення працездатності різьбонарізного інструменту є обробка поверхні висококонцентрованими джерелами енергії (ВКДЕ). Основна перевага використання ВКДЕ в порівнянні з нанесенням покриттів, - збільшення товщини обробленого шару в 10...100 разів. З методів обробки ВКДЕ найбільш доступною і продуктивною є плазмова обробка. Однак багато питань впливу плазмового нагріву на формування структури і властивостей різьбонарізного інструменту залишаються невивченими.

2. Розроблено математичну модель і алгоритм плазмового наноструктурування різьбонарізного інструменту з швидкорізальних сталей і твердих сплавів, які засновані на рішенні диференціального рівняння теплопровідності в нелінійній постановці з урахуванням зміни теплофізичних властивостей матеріалів від температури. Розроблено інженерну методіку розрахунку оптимальних режимів, заснована на кінцево-елементному моделюванні з застосуванням при-

кладного програмного пакета MSC.Nastran. Методика дозволяє призначати оптимальні режими плазмової обробки для різьбонарізного інструменту, (на прикладі гребінок з швидкорізальних сталей і різців з тврдосплавними пластинами), що забезпечують протікання в модифікованій зоні необхідних фазових і структурних перетворень і досягнення найбільш високих значень експлуатаційних властивостей.

3. З використанням рентгеноструктурних і металографічних досліджень встановлено основні механізми зміцнення при плазмовому модифікуванні різьбонарізного інструменту з швидкорізальних сталей. Показано, що подрібнення структури і підвищення твердості обумовлено розчиненням дрібних і середніх карбідних частинок і значним опалювальному великих карбідів. Решта великі і дрібні карбіди мають строго правильну форму сфери або еліпсоїда, що свідчить про рівномірний розплавлення їх периферійних обсягів і розчиненні в матриці. Відпуск після плазмового модифікування сприяє виділенню ультрадисперсних вторинних карбідів, що мають переважно неправильну форму.

4. Основним процесом визначаючим характер фазових і структурних перетворень в твердих сплавах при плазмовому модифікуванні, є контактне плавлення карбідних зерен, що призводить до подрібнення подібних (первинних) карбідних зерен, насичення зв'язки вольфрамом і вуглецем і, як наслідок, дисперсійному зміцненню зв'язки за рахунок виділення вторинних дисперсійних карбідів.

5. Умови сучасного виробництва і застосування різьбонарізного інструменту в Україні показує, що розробки нових і вдосконалення існуючих технологій отримання та додаткової обробки інструменту, є актуальними на сьогоднішній день. Встановлено можливість утворення в модифікованій зоні субмікроструктурної структури із середнім розміром карбідних часток $d_k \approx 100$ нм, з підвищеним рівнем твердості і більш сприятливим розподілом залишкових напружень.

6. Дослідження стійкості показали, відсутність початкового ділянки інтенсивного зносу (у т. ч. стадії підробітки), що також вносить певний внесок у ступінь підвищення зносостійкості. Відмінною особливістю є те, що метал модифікованої зони на ріжучих крайках має субмікроструктурну структуру в порівнянні з вихідним твердим сплавом.

7. Стійкістими випробуваннями встановлено підвищення стійкості різців з модифікованою зоною в 2,15 - 2,75 рази (відповідно за критеріями рівного і оптимального зносу). Після переточувань стійкість різців знижується (що пов'язано зі зниженням твердості ріжучих кромок), залишаючись більш високою в порівнянні з вихідним станом.

8. Розроблена методика розрахункової оцінки швидкості різання при нарізуванні різьби тврдосплавними профільними різцями після плазмового поверхневого модифікування, заснована на введенні в розрахункове рівняння додаткового поправочного коефіцієнта K_p , що дозволяє значно (до 2-х разів) підвищити швидкість різання і, тим самим, продуктивність обробки. При цьому

розміри модифікованої зони забезпечують виконання декількох (до 10) переточувань без повторного зміцнення..

9. Розроблено методологію для підвищення ефективності процесів різьбонарізання інструментом, які пройшли плазмове модифікування, використано комплексний підхід на основі розгляду єдиної технологічної системи, в яку в якості взаємопов'язаних складових входять підсистеми «Плазмове модифікування» і «Різьбонарізання». Розроблені принципи системного підходу дозволяють в залежності від поставленого завдання, вибирати оптимальні параметри плазмової обробки для конкретного типу різьбонарізного інструменту і конкретних умов різьбонарізання або вибирати оптимальні параметри процесу різьбонарізання (наприклад, режим різання) для конкретного типу інструменту після плазмового модифікування.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Samotugin S.S. Increasing tool life of hardmetal threading tools by plasma modification of insert surface / S.S. Samotugin, V.J. Lavrinenko, O.A. Khrystenko, U.S. Samotugina // Journal of Superhard Materials. – 2019.– No. 2 – P.P. 133-138. (Включено до науково-метричної бази Scopus) *(Автором проведено експерименти плазмової обробки, виготовлено та досліджено зразки мікроструктури, підготовлено ілюстрації і текст).*

2. Самотугин С.С. Повышение стойкости твердосплавных резцовых резцов плазменным поверхностным модифицированием / С.С. Самотугин, В.И. Лавриненко, О.А. Христенко, Ю.С. Самотугина // Надтверді матеріали. 2019. № 2. С. 83-90. Фахове видання України категорії «А». *(Автором проведено експерименти плазмової обробки, виготовлено та досліджено зразки мікроструктури, підготовлено ілюстрації і текст).*

3. Самотугин С.С. Плазменное модифицирование резьбонарезного инструмента / С.С. Самотугин, О.А. Христенко // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. - 2017. – Вип. 34. – С. 105-112. Фахове видання України категорії «А». *(Автором проведено експерименти плазмової обробки, виготовлено та досліджено зразки мікроструктури, підготовлено ілюстрації і текст).*

4. Самотугин С.С. Структура и свойства плазменной модифицированной зоны обработки резьбонарезных резцов с твердосплавными пластинами / С.С. Самотугин, О.А. Христенко // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки – 2017. – Вип. 36. – С.128-134. Фахове видання України категорії «А». *(Автором проведено експерименти плазмової обробки, підготовлено ілюстрації і текст).*

5. Самотугин С.С. Нанотехнологии в машиностроении: плазменное модифицирование резьбонарезного инструмента / С.С. Самотугин, О.А. Христенко // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки – 2018. – Вип. 37. – С.105-114. Фахове видання України категорії «А». *(Автором*

проведено експерименти з дослідження субмікрокристалічної структури, підготовлено текст).

6. Самотугін С.С. Конструктивні особливості плазмотронів для наноструктуризації металорізального інструменту / С.С. Самотугін, Пірч І.І., Ю.С. Самотугіна, О.О. Безумова // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки – 2020. – Вип. 40. – С.24-31. Фахове видання України категорії «А». (Автором проведено експерименти плазмової обробки, підготовлено ілюстрації і текст).

7. Самотугін С.С. Выбор оптимальных режимов плазменной обработки инструмента из твердых сплавов / С.С. Самотугин, Е.В. Кудинова, О.А. Христенко, В.П. Беляковский, Я.Н. Шибистая // Технология машиностроения – 2018. - №7 – С. 30–34. (Автором проведено аналіз методів математичного моделювання теплового впливу ВКДН, підготовлено текст).

8. Самотугін С.С. Анализ технологической системы, процесс резбонарезания, прошедшим плазменное модифицирование / С.С. Самотугин, О.А. Христенко // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2019. – № 3(15). – С. 134-138. (іноземне видання) (Автором проведено аналіз методів дослідження технологічної системи, підготовлено текст).

9. Самотугін С.С. Плазменное субмикро- и наноструктурирование инструмента из стали Х12М / С.С. Самотугин, Ю.С. Самотугина, О.А. Христенко, Т.К. Ткаченко, В.И. Лавриненко // Технология машиностроения – 2020. - №5 – С. 42–52. (Автором проведено експерименти з дослідження субмікрокристалічної структури, підготовлено текст).

10. Самотугін С.С. Нанесение модифицированных слоёв с нанокристаллической структурой на холоднодеформирующий инструмент / С.С. Самотугин, В.И. Лавриненко, Ю.С. Самотугина, О.А. Христенко, О.Н. Шичева, А.А. Пономоренко // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2021. – № 1. – С. 37-44. (іноземне видання) (Автором проведено аналіз методів дослідження технологічної системи, підготовлено текст).

11. Самотугін С.С. Математическая модель процесса поверхностного плазменного упрочнения резбонарезной гребенки / С.С. Самотугин, В.О. Мазур, О.А. Христенко // Захист металургійних машин від поломок: Зб. наук. пр. – 2014. – Вип. 16. - С. 14 – 18. (Автором проведено аналіз методів математичного моделювання теплового впливу ВКДН, підготовлено ілюстрації і текст).

12. Самотугін С.С. Технологические основы плазменного поверхностного модифицирования резбонарезного инструмента / С.С. Самотугин, О.А. Христенко // Наука та виробництво. Зб. наук. пр. – Маріуполь, 2017. – Вип. 17. – С. 65-69. (Автором проведено експерименти плазмової обробки, проведено стікстні випробування, підготовлено ілюстрації і текст).

13. Самотугін С.С. Особенности расчетов режима резания твердосплавными резбонарезными резцами с модифицированным слоем / С. С. Самотугин, О.А. Христенко, Е.В. Кудинова, Ю.Г. Касаткин // Наука та виробництво. Зб. наук. пр. – Маріуполь, 2018. – Вип. 18. – С. 43-46. (Автором проведено експерименти з дослідження режимів різання твердосплавними резцами з модифікованим шаром, підготовлено ілюстрації і текст).

нти плазмової обробки, проведено оптимізацію параметрів плазмової обробки).

14. Христенко О.А. Системный анализ технологических процессов резьбонарезания и поверхностного наноструктурирования инструмента / О.А. Христенко // Наука та виробництво. Зб. наук. пр. – Маріуполь, 2018. – Вип. 18. – С. 80-87. (Автором проведено експерименти плазмової обробки, проведено оптимізацію технологічних параметрів плазмової обробки).

15. Samotugin S.S. Повышение работоспособности резьбонарезного инструмента плазменной обработкой/ Samotugin S.S., Samotugina Y.S., Bezumova O.O. // Сучасні виклики і актуальні проблеми науки, освіти та виробництва: міжгалузеві диспути. XIII міжнародна науково практична інтернет-конференції, 26 лютого 2021, м. Київ. – 367 с. - С. 311-318. (Автором проведено експерименти плазмового зміцнення різьбонарізного інструменту, підготовлено текст).

16. Самотугин С.С. Повышение работоспособности резьбонарезных твердосплавных резцов плазменным поверхностным модифицированием / С. С. Самотугин, О. А. Христенко // Фізичні та комп'ютерні технології. Матеріали ХХІІІ Міжнародної науково-практичної конференції, 21–22 грудня 2017, м. Харків. – Одеса: ОНПУ, 2017. – 229 с. - С. 30-32. (Автором проведено аналіз методів дослідження параметрів тріщиностійкості, підготовлено текст).

17. Самотугин С.С. Работоспособность твердосплавных резцовых резцов после плазменного модифицирования и переточек / С. С. Самотугин, О. А. Христенко // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: Материалы международной научно-технической конференции, 26-29 сентября 2018 г., г. Одесса. – Одесса: ОНПУ, 2018. – 208 с. – С. 170-173. (Автором проведено експерименти плазмової обробки, проведено стікістні випробування, підготовлено текст).

18. Самотугин С.С. Перспективы использования высококонцентрированного плазменного нагрева для повышения работоспособности резьбонарезного инструмента / С. С. Самотугин, О. А. Христенко // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: Материалы международной научно-технической конференции, 20-22 сентября 2017 г., г. Одесса. – Одесса: ОНПУ, 2017. – 148 с. – С. 119-121. (Автором проведено експерименти плазмової обробки, підготовлено текст).

19. Самотугин С. С. Плазменное наноструктурирование режущих кромок резьбонарезной гребенки из стали Р6М5 / С. С. Самотугин, О. А. Безумова (Христенко) // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: Материалы международной научно-технической конференции, 16-18 мая 2019 г., г. Одесса. – Одесса: ОНПУ, 2019. – 200 с. – С. 162-164. (Автором проведено експерименти з дослідження субмікрокристалічної структури, підготовлено текст).

АНОТАЦІЯ

Безумова О.А. «Плазмове субмікро- і наноструктурування різьбонарізного інструменту». – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.07 – Процеси фізико-технічної обробки. - Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2021.

Дисертація присвячена формуванню модифікованих шарів з субмікро- і нанокристалічною структурою і підвищеним рівнем експлуатаційних властивостей при поверхневій обробці різьбонарізного інструменту зі швидкорізальних сталей та твердих сплавів висококонцентрованим плазмовим струменем.

У літературному огляді виконаний аналіз умов роботи різьбонарізного інструменту. Показан характер зносу різьбонарізного інструменту, механізми зносу, зони зносу. показана перспективність розвитку різних методів зміцнення для підвищення працездатності різьбонарізного інструменту. Особливість різьбонарізного інструмента це дуже велика номенклатура як по розмірах, від дуже дрібних мітчиків, до крупних фрез, різців, так і за різноманітністю видів. Нині існує 4 підходи до зміцнення. Найбільш розвиваються останнім часом це нанесення покриттів, і поверхневе модифікування. Ці два найбільш поширених методи якраз розвиваються у бік отримання дисперсних структур у тому числі і наноструктур.

Дисертаційна робота виконана на плазмовому комплексі в умовах кафедри «Наноінженерія в галузевому машинобудуванні», основний елемент цього комплексу це плазматрон. Плазматрон використовується побічної дії: деталь і інструмент електрично нейтральні. Особливість його конструкції це сенкціонована міжелектродна вставка. Спеціально для того, щоб підвищити швидкість охолодження і отримати плазмове наноструктурування.

Експериментами встановлено, що можна впливати на цей процес шляхом виконання каналу плазматрона не циліндричної форми, а конічної. Міра звуження каналу впливає на твердість при обробці.

Розроблена методика математичного моделювання процесу плазмового модифікування різьбонарізного інструмента. У основі розрахунку теплової дії висококонцентрованих джерел нагріву на метал лежить закон теплопровідності Фур'є. Для вирішення цього завдання використано звичайно-елементне моделювання із застосуванням прикладного пакету MCS.Nastran.

Розроблено математичну модель оптимального керування процесом плазмового поверхневого модифікування різьбонарізного інструменту та інженерну методику розрахунку оптимальних режимів обробки. Уперше на основі звичайно-елементного рішення диференціального рівняння теплопровідності в нелінійній постановці розроблені алгоритми і інженерні методики розрахунку оптимальних режимів плазмового модифікування різьбонарізного інструменту зі швидкорізальних сталей і твердих сплавів, що забезпечують утворення в моди-

фікованій зоні субмікро- і нанокристалічної структури з підвищеним рівнем експлуатаційних властивостей.

У 3м розділі дисертації досліджена структура і властивості різьбонарізного інструмента зі швидкорізальної сталі на прикладі гребінки. Для такого інструмента відомо два підходи плазмовою модифікування з об'ємною термообробкою і з триразовою відпусткою Тип структури, що утворюється в модифікованій зоні в результаті комплексного об'ємно-поверхневого зміцнення гребінок із сталі Р6М5, займає проміжне положення між нанокристалічною (до 100 нм) і субмікроструктурною.

Досліджено механізми структурних перетворень гребінки зі швидкорізальної сталі та різьбонарізного різця з напаяною твердосплавною пластиною при плазмовому поверхневому модифікуванні. Встановлені закономірності наноструктурування різальних кромek різьбонарізного інструменту при плазмовому модифікуванні без оплавлення поверхні. Встановлено, що при наноструктуруванні сталевго інструменту набуття найбільш високих значень дисперсності обумовлене збільшенням швидкості охолодження, розчиненням вихідних карбідів і виділенням нанодисперсних вторинних карбідів.

Розроблено методику випробувань та досліджено тріщиностійкість, механізми руйнування та зношування різьбонарізного інструменту з поверхневим модифікованим шаром. Розроблено технологічне устаткування для проведення плазмової обробки. Розроблено технологічні процеси плазмового модифікування різьбонарізного інструменту з твердих сплавів та швидкорізальних сталей.

Розроблена структурна схема управління наноструктуруванням після плазмового модифікування. Розроблені рекомендації по вибору оптимального розміщення модифікованої зони на різьбонарізному різці з напаяними твердосплавними пластинами та різьбонарізній гребінки зі швидкорізальної сталі. Проведені стійкісні дослідження різьбонарізного інструменту після плазмового модифікування.

Розроблений науково-методологічний комплекс управління наноструктуризацією поверхні різьбонарізного інструменту при плазмовому модифікуванні. Встановлено, що найбільш високі дисперсність структури і експлуатаційні властивості модифікованої зони досягаються за рахунок реалізації дислокаційного і дисперсійного механізмів зміцнення для сталевго інструменту і твердосплавного, дисперсійного і зернограничного - для твердосплавного інструменту.

Розроблений комплексний підхід на основі розгляду єдиної технологічної системи, в яку в якості взаємозв'язаних складових входять підсистеми "Плазмове модифікування" і "Різьбонарізання". Новий підхід є основою для створення інтегрованих технологій механічної і фізико-технічної обробки і їх програмного управління.

Ключові слова: плазмове модифікування, різьбонарізний інструмент, механізм руйнування, тріщиностійкість, зносостійкість, математична модель, структурні перетворення, поверхневий шар, субмікроструктурування, наноструктурування, стійкісні дослідження, металорграфічні дослідження.

АННОТАЦИЯ

Безумова О.А. Плазменное субмикро- и наноструктурирование резбонарезного инструмента. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.07 - Процессы физико-технической обработки. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», МОН Украины, Киев, 2021.

Диссертация посвящена формированию модифицированных слоев из субмикро- и нанокристаллической структурой и повышенным уровнем эксплуатационных свойств при поверхностной обработке резбонарезного инструмента из быстрорежущих сталей и твердых сплавов высококонцентрированной плазменной струей. Разработана математическая модель оптимального управления процессом плазменного поверхностного модифицирования резбонарезного инструмента и инженерная методика расчета оптимальных режимов обработки. Исследованы механизмы структурных превращений гребенки из быстрорежущей стали и резбонарезного резца с напаянной твердосплавной пластиной при плазменном поверхностном модифицировании. Разработана методика испытаний и исследована трещиностойкость, механизмы разрушения и изнашивания резбонарезного инструмента с поверхностным модифицированным слоем. Разработано технологическое оборудование для проведения плазменной обработки. Разработаны технологические процессы плазменного модифицирования резбонарезного инструмента из твердых сплавов и быстрорежущих сталей. Разработана структурная схема управления наноструктурированием после плазменного модифицирования. Разработаны рекомендации по выбору оптимального размещения модифицированной зоны на резбонарезном резце с напаянными твердосплавными пластинами и резбонарезной гребенки из быстрорежущей стали. Проведены стойкостные исследования резбонарезного инструмента после плазменного модифицирования.

Ключевые слова: плазменное модифицирование, резбонарезной инструмент, механизм разрушения, трещиностойкость, износостойкость, математическая модель, структурные превращения, поверхностный слой, микроструктурирование, наноструктурирование, стойкостные исследования, металлографические исследования.

ABSTRACT

O.A. Bezumova Plasma submicro- and nanostructuring of threading tools. – Qualifying scientific work of the rights of manuscript.

A thesis for a degree of candidate of technical science (Ph.D.), speciality 05.03.07 –Processes of physical and technical treatment. - National technical university of Ukraine “Kiev Polytechnic Institute name of Igor Sicorskiy”, Kyiv, 2021.

Dissertation is sanctified to forming of the modified layers from submicro- and by a nanocrystalline structure and increase level of operating properties at superficial treatment of thread instrument from high speed steel and carboloies by a plasma stream. In a literary review the executed analysis of terms of work of thread instrument. The character of wear of thread instrument, mechanisms of wear, zone of wear. the shown perspective of development of different methods of strengthening is for the increase of capacity of thread instrument. The feature of thread instrument it a very large nomenclature as on sizes, from ultrafine markers, to the large milling cutters, chisels, so on the variety of kinds. Presently there are 4 approaches to strengthening. Most develop lately this causing of coverages, and superficial retrofitting. These two most widespread метода just develop toward the receipt of dispersible structures including nanostructures.

Dissertation work is executed on a plasma complex in the conditions of department "Nanoengineering in a branch engineer", the basic element of this complex it a plasmatron. A plasmatron is used indirect action: a detail and instrument are electric neutral. Feature of his construction this partitioned interelectrode insertion. Specially in an order to promote cooling speed and get plasma nanostructure. It is set experiments, that it is possible to influence on this process by implementation of channel of plasmatron not cylindrical form, but conical. Measure of narrowing of channel influences on hardness at treatment. Worked out methodology of mathematical design of process of the plasma retrofitting of thread instrument. In basis of calculation of thermal action of concentrate sources of heating the law of heat-conducting of Fourier lies on a metal. For the decision of this task an usually-element design is used with application of the applied package of MCS.Nastran.

A mathematical optimal case of the plasma superficial retrofitting of thread instrument a process frame and engineering methodology of calculation of the optimal modes of treatment are worked out. First on the basis of usually-element decision of differential equalization of heat-conducting in the nonlinear raising the worked out algorithms and engineering methodologies of calculation of the optimal modes of the plasma retrofitting of thread instrument from high speed steel and carboloies that provide formation in the modified zone of submicro- and nanocrystalline structure with an increase level of operating properties. In the third part of dissertation an investigational structure and properties of thread instrument are from high-speed steel on the example of comb. For such instrument two approaches are known by plasma retrofitting with by volume heat treatment and with

triple vacation Type of structure that appears in the modified zone as a result of the complex by volume of-superficial strengthening of combs from steel of P6M5 occupies intermediate position between nanocrystalline (to 100 nm) and micro-crystalline.

The mechanisms of structural transformations of comb are investigational from high-speed steel and thread chisel from a hard-alloy plate at the plasma superficial retrofitting. The set conformities to law of nanostructure of cutting edges of thread instrument are at the plasma retrofitting without melting surface. It is set that during nanostructure of steel instrument of acquisition of the most high values of dispersion is conditioned by the increase of cooling speed, dissolution of initial carbides and selection of nanodispersible secondary carbides.

Methodology of tests is worked out and investigational crackfirmness, mechanisms of destruction and wear of thread instrument with the superficial modified layer. A technological equipment is worked out for realization of plasma treatment. The technological processes of the plasma retrofitting of thread instrument are worked out from carboloies and high speed steel. The worked out flow diagram of management of nanostructure is after the plasma retrofitting. Worked out recommendations on the choice of the optimal placing of the modified zone on a thread chisel by hard-alloy plates and thread combs from high-speed steel. Firmness studies of thread instrument are undertaken after the plasma retrofitting.

The worked out scientifically-methodological complex of management nanostructure of surface of thread instrument is at the plasma retrofitting. It is set that most high dispersion of structure and operating properties of the modified zone are arrived at due to realization of dislocation and dispersible mechanisms of strengthening for a steel instrument and hardsolution, dispersible and grainboarded - for a hard-alloy instrument. The worked out complex approach is on the basis of consideration of the single technological system in that as associate constituents subsystems enter the "Plasma retrofitting" and "Threading". New approach is basis for creation of the integrated technologies of mechanical and фізико-технічної treatment and them programmatic management.

Key words: plasma modification, threading tool, fracture mechanism, crack resistance, wear resistance, mathematical model, structural transformations, surface layer, microstructuring, nanostructuring, meso-structures, ultra-disperse.