

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

КУДІНОВА КАТЕРИНА ВІТАЛІЇВНА

УДК 621.791.927.55

**СИНТЕЗ УЛЬТРАДИСПЕРСНИХ МОДИФІКОВАНИХ ШАРІВ
НА ТВЕРДИХ СПЛАВАХ ПЛАЗМОВОЮ ОБРОБКОЮ**

спеціальність 05.03.07 – Процеси фізико-технічної обробки

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ 2016

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі «Металорізальні верстати та інструменти» 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 «Металорізальні верстати та інструменти».

Офіційні опоненти: доктор технічних наук
Анякін Микола Іванович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»,
доцент кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій

кандидат технічних наук, с.н.с.

Прокопів Микола Михайлович,

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, с.н.с. відділу технологій високого тиску, функціональних керамічних композитів і дисперсних надтвердих матеріалів

Захист відбудеться «19» грудня 2016 р. о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої ради Д26.002.15 Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» за адресою: 03056, Київ, проспект Перемоги, 37, корпус 19, ауд. 435.

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

Автореферат розісланий «__» _____ 2016 р.

Учений секретар
спеціалізованої ради



Рижов Р.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В даний час в Україні у зв'язку з динамічним розвитком металообробних галузей промисловості зростає потреба у високо-ефективному твердосплавному інструменті. Однак, якість і рівень експлуатаційних властивостей сучасних твердих сплавів вітчизняного виробництва не дозволяє в повній мірі задовольнити вимоги високоєфективних методів обробки. Найбільш перспективною тенденцією в напрямку розвитку інструментальних твердих сплавів є отримання сплавів з ультрадисперсною структурою (середній розмір карбідів - в межах 0,1 ... 0,5 мкм). Розвивається ряд технологій для отримання таких матеріалів. Однак, частка ультрадисперсних сплавів на ринку твердосплавного інструменту залишається вкрай не значною через їх високу вартість. У зв'язку з цим, досить перспективним є розвиток зміцнюючих технологій, які дозволяють створювати на робочій поверхні твердосплавного інструменту покриття або модифіковані шари з ультрадисперсною структурою.

В даний час найбільш перспективними напрямками розвитку зміцнюючих технологій для твердосплавного інструменту є:

- нанесення зносостійких покриттів методами фізичного або хімічного насичення (PVD-, CVD-процеси);
- зміцнююча обробка з використанням поверхневого нагріву висококонцентрованими джерелами енергії (ВКДН) - лазерним променем і плазмовим струменем.

Високі тріботехнічні властивості покриттів обумовлені в значній мірі їх унікальними властивостями - дуже високою мікротвердістю, залишковими напруженнями стиску. Разом з тим товщина таких покриттів дуже мала - зазвичай 3 ... 5 мкм. Незважаючи на певні успіхи в розвитку нових типів зміцнюючих покриттів і технології їх нанесення, проблема в цілому ще не вирішена. До теперішнього часу універсального покриття для різних умов роботи інструменту не існує. Покриття на основі титану (TiN, TiC) ефективні лише при різанні вузького кола оброблюваних матеріалів, перш за все вуглецевих сталей. Устаткування для нанесення покриттів має високу вартість і складність в обслуговуванні.

Вирішити зазначені недоліки в значній мірі дозволяє використання методів поверхневого зміцнення інструментальних матеріалів обробкою ВКДН - лазерним променем і плазмовим струменем.

На теперішній час накоплений значний досвід використання плазмового зміцнення інструменту різних типів і призначення, в тому числі і твердосплавного. Але багато питань залишаються не вирішеними. Не вивченими залишаються механізми структурних перетворень, зміни параметрів кристалічної будови і тонкої структури в модифікованому шарі. Відсутні теоретичні моделі і розрахункові методи вибору оптимальних режимів плазмової обробки твердих сплавів. Відсутні універсальні і коректні методи випробувань експлуатаційних властивостей сплавів з модифікованим шаром. Не ви-

вчені також механізми зношування і руйнування модифікованих твердих сплавів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі «Металорізальні верстати та інструменти» ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» в рамках виконання науково-дослідних робіт: «Створення наукових основ плазмової мікротрібології» (номер державної реєстрації 0109U001373), «Створення наукових основ отримання інструментальних твердих сплавів нового класу з наддисперсною структурою та підвищеними експлуатаційними властивостями» (номер державної реєстрації 0106U001403), «Розробка новітніх технологій інженерії поверхні у галузі різання та зміцнення матеріалів» (номер державної реєстрації 0114U004909). Зазначені науково-дослідні роботи, відповідальним виконавцем яких був здобувач, стали базовими для підготовки та подання даної дисертації.

Мета і задачі дослідження. *Метою дисертаційної роботи є розробка наукових основ технологічних процесів формування модифікованих шарів з ультрадисперсною структурою і підвищеним рівнем експлуатаційних властивостей при поверхневій обробці твердосплавних пластин висококонцентрованим плазмовим струменем.*

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні задачі:

1. Вивчити методи отримання інструментальних твердих сплавів із ультра-дисперсною структурою і методи нано- та мікроструктурування по поверхні інструменту.
2. Розробити математичну модель оптимального управління процесом плазмового поверхневого модифікування твердосплавного інструменту і інженерну методику розрахунку оптимальних режимів обробки.
3. Дослідити механізми структурних перетворень в інструментальних твердих сплавах при плазмовому поверхневому модифікуванні.
4. Розробити методику випробувань і дослідити тріщиностійкість, механізми руйнування і зношування інструментальних твердих сплавів з поверхневим модифікованим шаром.
5. Розробити технологічні процеси плазмового модифікування різального інструменту з твердих сплавів.

Об'єкт досліджень - процеси плазмового поверхневого модифікування інструментальних твердих сплавів за рахунок структурних перетворень в карбідах і зв'язуючої фазі.

Предмет досліджень - мікроструктура, фазовий склад і механічні властивості модифікованих шарів з ультрадисперсною структурою на інструментальних твердих сплавах.

Методи досліджень: математичне моделювання на ПЕОМ; оптична і електронна металографія структур і зламів; рентгеноструктурний аналіз фазового складу, параметрів кристалічної будови і внутрішніх напружень; стійкісні випробування інструменту.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертаційній роботі проведено комплексні дослідження процесу формування на твердих сплавах модифікованих шарів з ультрадисперсною структурою при нагріві висококонцентрованим плазмовим струменем:

1. На підставі рішення диференційного рівняння теплопровідності в нелінійній постановці, з урахуванням залежності теплофізичних характеристик інструментальних твердих сплавів від температури, вперше розроблена математична модель і алгоритм розрахунку оптимальних режимів плазмового модифікування твердих сплавів, що забезпечують утворення в модифікованому шарі ультрадисперсної структури.

2. На підставі металографічних і рентгеноструктурних досліджень встановлені закономірності структурних перетворень в твердих сплавах при нагріві висококонцентрованим плазмовим струменем. Встановлено, що максимальний ефект зміцнення для сплавів типу ТК і ВК ($HV \approx 1700$) досягається при плазмовій обробці без оплавлення композиції з перетвореннями в карбідах і зв'язці. Це обумовлено роздрібленням вихідних карбідних зерен до розмірів 0,1 ... 0,5 мкм, насиченням зв'язки вольфрамом і, як наслідок, її дисперсійним твердінням з виділенням ультрадисперсних (близько 0,1 мкм) вторинних карбідів, а також підвищенням адгезійного зв'язку карбідної і зв'язуючої фаз.

3. Удосконалена методика локальних мікротвердих випробувань і досліджена тріщиностійкість твердих сплавів після плазмового модифікування. Встановлено, що плазмове модифікування призводить до підвищення тріщиностійкості K_{Ic} твердих сплавів на 20% в порівнянні з вихідним станом.

4. Вперше розроблені теоретичні моделі руйнування твердих сплавів у модифікованому стані. Встановлено, що завдяки подрібненню карбідної фази та підвищенню адгезійної міцності композиції, відбувається якісна зміна мікромеханізм поширення тріщини - від інтеркрісталітного відколу по міжфазним межах до квазівідколу у часток ультрадисперсних карбідів. Додатковим фактором підвищення тріщиностійкості модифікованих твердих сплавів є розсіювання енергії руйнування завдяки утворенню мезоструктурних ансамблів.

5. Вперше розроблено методологію управління структуроутворенням в твердих сплавах при плазмовому поверхневому модифікуванні і структурну схему синтезу модифікованих шарів. На підставі металографічних і рентгеноструктурних досліджень розроблені і науково обґрунтовані рекомендації щодо вибору оптимального розташування модифікованої зони на твердо-сплавних пластинах, що забезпечує найбільш високі стійкісні показники інструменту.

Практичне значення одержаних результатів. В ході виконання дисертаційної роботи розроблена математична модель та обчислювальні алгоритми для комп'ютерного моделювання теплового впливу плазмового струменя на інструмент. Розроблено інженерну методику розрахунку параметрів теплових процесів обробки для вибору оптимальних технологій плазмового поверхневого модифікування сплавів.

Наукові і практичні результати роботи отримали дослідно-промислове випробування у виробничих умовах ПАТ «Арселор Міттал Кривий Ріг» і ВАТ «Сервісний центр ТЯЖПРОММОНТАЖ».

Результати досліджень використовуються в навчальному процесі ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» при підготовці магістрів за спеціальностями «Обробка металів за спецтехнологіями», «Інструментальне виробництво».

Особистий внесок здобувача. У дисертаційній роботі внесок автора складається з самостійного вибору підходів опису впливу плазмового струменя на твердосплавну пластинку, розробки математичної моделі, обчислювальних алгоритмів. Здобувачем проведені металографічні дослідження і випробування модифікованих пластин, виконаний аналіз отриманих результатів, сформульовані висновки і положення, що виносяться на захист.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на міжнародних і всеукраїнських науково-технічних конференціях: «Машиностроительные технологии и техника автоматизации-2012» (м. Єреван, Армєнія, 2012 р.) [9], «Сучасні напрямки та перспективи розвитку технології обробки та обладнання в машинобудуванні «Механообробка. Севастопіль – 2013» (м. Севастопіль, Україна, 2013 р.) [3], «Університетська наука – 2008-2016» (м. Маріуполь, Україна, 2008-2016 р. р.) [10-13], «Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта» (м. Санкт-Петербург, Росія, 2012 р.), II Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених, фахівців, аспірантів «Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика» (м. Маріуполь, Україна, 2015-2016 р. р.) [14].

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 15 наукових праць, у тому числі 7 статей у наукових фахових виданнях, з них – 3 статті у виданнях, які включені до міжнародних науково-метричних баз даних; 2 статті в іноземних виданнях, 1 патент України на корисну модель та 5 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій, в яких достатньо повно відображені основні результати роботи.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації - 159 сторінок машинописного тексту, 39 рисунків, 7 таблиць, список джерел їх 149 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 твердосплавного інструменту, який показав, що найбільш перспективними напрямками є створення сплавів нових класів з ультрадисперс-

ною структурою і поверхнєве модифікування. Нові технології отримання і обробки твердих сплавів розглянуті в роботах вітчизняних і закордонних вчених Новікова М.В., Бондаренка В.П., Клименка С.А., Панова В.С., Лисовського А.Ф., Прокопів М.М., Лошака М.Г., Шуберта В.Д. та ін. У свою чергу, поверхнєве модифікування твердих сплавів також розвивається в двох напрямках - нанесення покриттів методами насичення або осадження і обробка висококонцентрованими джерелами нагріву (ВКДН).

Питанням розробки нових типів покриттів для твердосплавного інструменту і технологій їх нанесення присвячені роботи Верещаки О.С., Табокова В.П., Ляшенка Б.А., Антонюка В.С., Фокс-Рабіновича Г.С., Мігранова М.Ш. та ін. Поверхнєва обробка при нагріві ВКДН дозволяє наносити на робочу поверхню твердосплавного 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., Ліхошви В.П., Григорьянца О.Г., Гурєєва Д.М., Подураєва В.Н., Яреська 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.П., Самотугіна С.С., Дзюби В.Л., Сосніна Н.А., Тополянського П.А., Короткова В.А.

Разом з тим, в літературі в даний час відсутні науково-обґрунтовані принципи розробки новітніх технологій плазмового модифікування твердих сплавів, 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 твердих сплавів після плазмового модифікування. Для вивчення розподілу температурних полів і визначення швидкостей нагріву і охолодження використано кінцево-елементне моделювання із застосуванням прикладного пакета MCS.Nastran.

При виконанні розрахунків послідовність дії наступна: визначається необхідний алгоритм для вирішення завдання; визначаються і транслюються параметри режиму, 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. 1.

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):

$$c_p \cdot \bar{\rho} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + c_p \cdot \bar{\rho} \cdot (\nabla_j \cdot T) V_j - \lambda \cdot \nabla_j \nabla_j T = \hat{Q} \quad (1)$$

при початковій умові

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

Після створення математичної моделі створюється модель твердого тіла, відповідно до параметрів непереточуваної твердосплавної пластини і є геометричною моделлю з розбивкою її на кінцеві елементи (рис. 2).

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):

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

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

де k – номер точки на графіку $F(T)$.

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).

Розроблена методика металографічних досліджень, яка дозволяє дослідити мікроструктуру 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 мікроевипробувань твердих сплавів на тріщиностійкість (рис. 3). Плазмова обробка кожного сплаву здійснювалася на двох найбільш оптимальних режимах - з розплавленням зв'язки і без

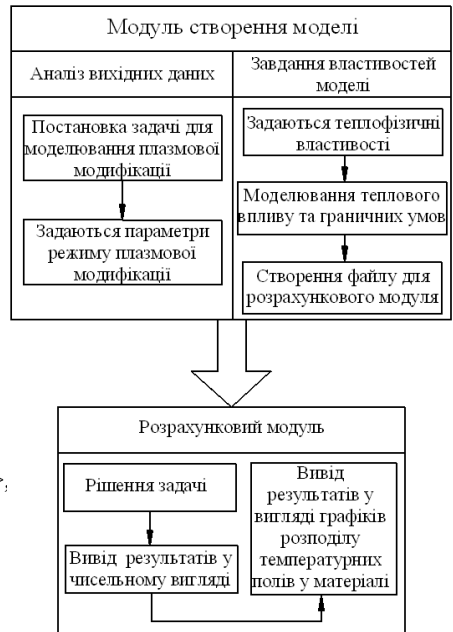


Рис. 1. Алгоритм моделювання процесу плазмового модифікування пластин з твердих сплавів за допомогою системи MSC.Patran-Nastran

оплавлення з перетвореннями в карбідах і зв'язці. Модифікована зона глибиною 2,5... 3 мм і шириною до 10 мм розташовувалася на передній поверхні ріжучих пластин.

За результатами мікровипробувань, при навантаженні пірамідою Віккерса, визначається коефіцієнт інтенсивності напружень для тріщин Палмквіста по формулі (4):

$$K_{Ic} = 0,0073H \cdot a^{0.5} \left(\frac{c}{a} - 1\right)^{-0.34}, \quad (4)$$

де $C = a + l$ (см. рис. 3, б); H – твердість матеріалу,

$$HV = \frac{F_c}{(2a)^2}.$$

У третьому розділі за розробленою методикою виконано моделювання процесів поширення тепла при плазмовому нагріві твердосплавних пластин.

Для розрахунку визначався еквівалентний коефіцієнт теплопровідності:

$$\lambda_{\text{екв}} = \lambda_1 P_1 \cdot \lambda_2 P_2 \cdot \lambda_m P_m = \prod_{i=1}^m \lambda_i^{P_i} \quad (5)$$

де λ_i – коефіцієнт теплопровідності окремого елемента (карбідів, зв'язки); P_i – відносна об'ємна концентрація елемента (карбідів, зв'язки) ($\sum_{i=1}^m P_i = 1$).

Також вводиться функція температури $F(T)$. Застосовувалася апроксимаційна формула (6):

$$\lambda(T) = \lambda_{\text{екв}} \cdot F(T) \approx \lambda_{\text{екв}} \cdot \left\{ F(T_{(k)}) + \frac{T - T_{(k)}}{T_{(k+l)} - T_{(k)}} [F(T_{(k+l)}) - F(T_{(k)})] \right\}, \quad (6)$$

де k – номер точки на графіку $F(T)$.

Результати розрахунку представляються у вигляді графіків розподілу теплових полів (рис. 4) і таблиць з числовими значеннями температури і швидкості охолодження (таблиця 1).

Мікроструктурні дослідження для вибору оптимальних режимів плазмової обробки твердосплавного інструменту показали, що можлива обробка ріжучих кромок пластин з повним поверхневим розплавленням композиції, частковим розплавленням (тільки зв'язуючої фази), без розплавлення з перетворенням в карбідах і зв'язці або перетвореннями тільки в зв'язці. Структура сплавів ВК в вихідному стані являє собою вільні і контактуючі частки карбідів вольфраму, занурені в твердий розчин вольфраму і вуглецю в кобальті (рис. 5, а). Сплави ТК в вихідному стані (після зпикання) мають трьохфазну

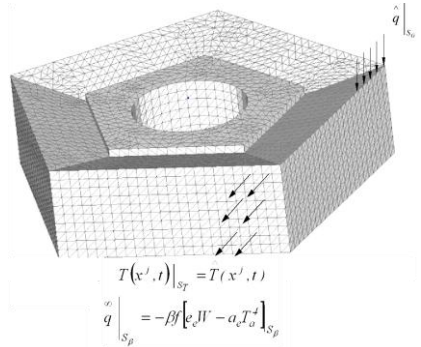


Рис. 2. Кінцево-елементна модель п'ятигранної оброблюваної пластини з граничними умовами другого роду

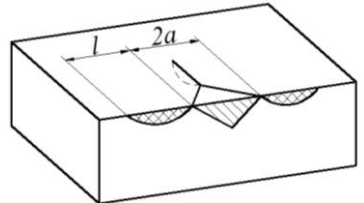


Рис.3. Схема утворення тріщин при локальному навантаженні пірамідою Віккерса (тріщина Палмквіста)

структуру і складаються з овальних кристалів складних карбідів (Ti, W) C, що утворюються в результаті дифузії і розчинення W і C в TiC при зпиканні, зерен карбіду WC гранованої форми і зв'язуючої кобальтової фази (рис. 5, б).

Таблиця 1
Оптимальні режими плазмової обробки твердосплавних пластин із сплаву ВК6

Тип пластини	Товщина пластини	Ток, I, А	V, м/ГОД
ромбічна	3	320	18
	5	360	16
квадратна	3	320	17
	5	350	15
трикутна	3	310	19
	5	340	18
п'ятигранна	3	330	17
	5	360	15

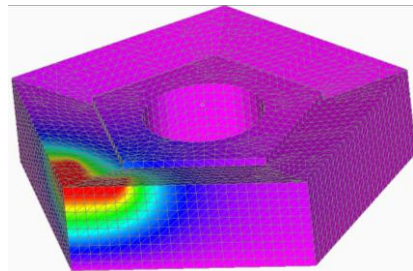


Рис.4. Розподіл теплових полів при впливі плазмового джерела нагріву на п'ятигранну пластину зі сплаву ВК6 в момент часу t_i (обробка по передній поверхні уздовж ріжучої кромки)

Найбільш високі значення твердості досліджених сплавів досягаються при плазмовій обробці без розплавлення зв'язки - при нагріві до температур порядку 1300-1495 ° С. У цьому випадку основним процесом, що визначає структуру і властивості модифікованої зони, є контактне плавлення міжфазних меж «карбід-зв'язка».

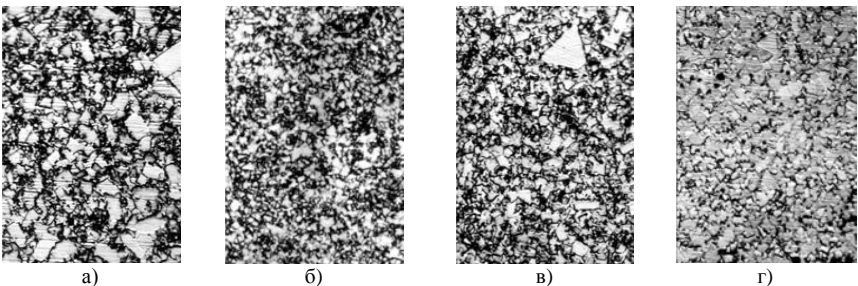


Рис. 5. Мікроструктура твердих сплавів ВК6 (а, б) і Т15К6 (в, г): а і в - вихідний стан; б і г - після плазмової обробки без розплавлення з перетвореннями в карбідах і зв'язці, $\times 2500$

Встановлено, що підвищення твердості зпечених твердих сплавів при плазмовому модифікуванні на оптимальних режимах обумовлено дією твердорозчинного і дисперсійного механізмів зміцнення зв'язуючої фази, підвищенням ступеня дисперсності фази карбіду і, як наслідок, зерногранічного зміцнення композиції при збільшенні питомої поверхні міжфазних меж «карбід-карбід» і «карбід-зв'язка».

Для встановлення механізмів структурно-фазових перетворень при плазмовому модифікуванні твердих сплавів виконані рентгенографічні дослідження (таблиця 2). Дослідження показали, що плазмове модифікування дос-

ліджених сплавів призводить до значного збільшення періоду решітки кобальту. Так як вплив мікронапружень на період решітки Со-фази було виключено, таке значне його збільшення свідчить про підвищення концентрації вольтфраму і вуглецю (в сплавах ВК6 і ВК15), а також титану (в сплаві Т5К10) в кобальтовому твердому розчині заміщення-впровадження.

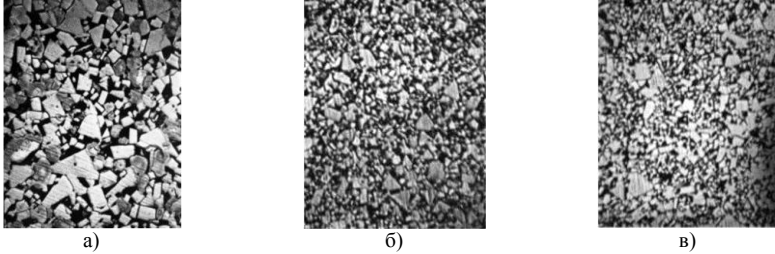


Рис. 6. Структура карбідної фази в сплаві ВК6: а - вихідний стан; б - плазмове модифікування з частковим оплавленням; в - плазмове модифікування без оплавлення; $\times 2500$

Це відбувається в результаті тонкошарового оплавлення меж карбідних зерен при плазмовому нагріві. При подальшому швидкісному охолодженні відбувається дисперсійне твердіння пересиченої легуючими елементами зв'язки з виділенням ультрадисперсних часток карбідів ($d_k \approx 0,1 \dots 0,5$ мкм) (рис. 6). Такий же механізм насичення і твердіння зв'язки реалізується і при їх об'ємній термічній обробці, і при лазерній обробці. Але в разі плазмової обробки є свої специфічні особливості.

При обробці з оплавленням зв'язки відбувається інтенсивне оплавлення меж великих карбідів і розчинення дрібних (рис. 6, б). При обробці без оплавлення зв'язки (на оптимальних режимах) відбувається тільки контактне плавлення по міжфазним межах карбід-зв'язка, велика частина дрібних карбідів розчиняються лише частково. Насичення зв'язки легуючими елементами в даному випадку відбувається в меншій мірі, про що свідчить зменшення періоду решітки кобальту (таблиця 2).

Таблиця 2

Зміна періоду решітки кобальтової фази a , мікронапружень σ і розміру блоків D твердих сплавів при різних варіантах плазмового модифікування

Марка сплаву	Варіант зміцнення	$a \cdot 10^{-10}$, м	D , Å	σ , МПа	
				у карбідах	у зв'язці
ВК6	вихідний стан	3,559	68	-145	845
	з частковим оплавленням	3,573	44	-265	350
	без оплавлення	3,565	12	-170	55
ВК15	вихідний стан	3,547	91	-185	175
	з частковим оплавленням	3,561	35	-200	40
	без оплавлення	3,552	17	-65	-45
Т5К10	вихідний стан	3,551	72	-125	525
	з частковим оплавленням	3,560	45	-55	140
	без оплавлення	3,554	12	-90	30

В результаті дисперсійного твердіння зв'язки виділяються більш дисперсні карбіди, структура в зміцненому шарі стає більш однорідною і ультра-

дисперсною (рис. 6, в). Для всіх досліджених сплавів при обробці без оплавлення встановлена найменша величина розмірів блоків D (табл. 2). Крім того, хороша змочуваність карбідних зерен кобальтом сприяє підвищенню адгезійного зчеплення дисперсного карбідного скелета з цементуючою зв'язкою.

Процеси розчинення і перегрупування карбідної фази, насичення і твердіння зв'язки сприяють посиленню напруженого стану карбідної і сполучною фаз. У початковому стані (після спікання) карбідна фаза відчуває напруження стиснення, а кобальтова - розтягування, які досягають досить високих значень, особливо в малокобальтовому сплаві ВК6. Різниця в коефіцієнтах термічного розширення компонентів твердих сплавів ($\alpha_{WC} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; $\alpha_{Co} = 14,2 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$) при плазмовому впливі призводить до появи додаткових залишкових напружень стиску в карбідній фазі. При обробці сплавів ВК6 і ВК15 з частковим оплавленням залишкові напруження в карбідах збільшуються більшою мірою, ніж при обробці без оплавлення. При обробці ж сплаву Т5К10 встановлена зворотня залежність, що можна пояснити наявністю в структурі крім карбідів вольфраму WC складних карбідів (Ti, W)C. У свою чергу в сплавах ВК з підвищенням вмісту зв'язки напружений стан карбідної фази після зміцнення знижується (табл. 2).

У четвертому розділі були проведені дослідження тріщиностійкості та механізмів руйнування твердих сплавів після плазмового модифікування. Випробування показали, що плазмове модифікування твердих сплавів на оптимальних режимах не призводить до зниження їх тріщиностійкості, незважаючи на значне підвищення твердості. У ряді випадків досягається підвищення коефіцієнта K_{Ic} на 20% в порівнянні з вихідним станом. З рекомендованих режимів обробки найефективнішим є модифікація без розплавлення композиції з реалізацією фазових і структурних перетворень в карбідах і зв'язці.

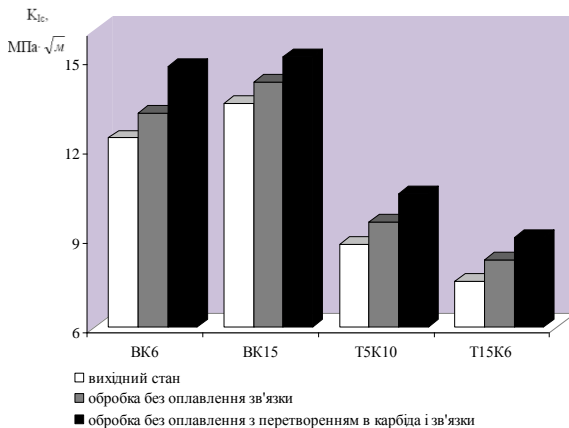


Рис. 7. Тріщиностійкість K_{Ic} (б) твердих сплавів при плазмовому модифікуванні

Було встановлено, що плазмова обробка, сприяючи подрібненню карбідних зерен (зменшення d_k), забезпечує підвищення і твердості, і тріщиностійкості. В даному випадку, переважний вплив надає значне збільшення ΣS_{k-c} - як при спіканні, так і подальшому термозміцненні зі збільшенням питомої поверхні міжфазних меж твердсть і тріщиностійкість сплавів ВК і ТК одночасно підвищуються. Одночасно з цим зростає роль зв'язуючої фази. Насичення її вольфрамом і вуглецем, виділення ультрадисперсних вторинних карбідів при плазмовій обробці сприяють зміцненню зв'язки і дії додаткових механізмів розсіювання енергії при поширенні тріщини. Дані висновки підтверджуються металографічними спостереженнями траєкторії тріщин, що розповсюджуються від кутів відбитка індентора (рис. 8), і фрактографічними дослідженнями зламів (рис. 9).

Позитивний вплив на підвищення тріщиностійкості твердих сплавів при модифікуванні надає утворення звивистої траєкторії тріщини незважаючи на значне подрібнення карбідних зерен (рис. 8, б, г). Це свідчить про утворення нового типу структури не тільки на мікрорівні, але й на мезорівні. Формування мезоструктур в період спікання твердосплавних виробів (за звичайною технологією) пов'язане з певними труднощами. Для їх отримання застосовують ряд методів, які ускладнюють стандартну технологію, наприклад, обробку або просочення брикетів металевими розплавами. У разі плазмової обробки такий ефект досягається за рахунок контактного плавлення по міжфазним межах.

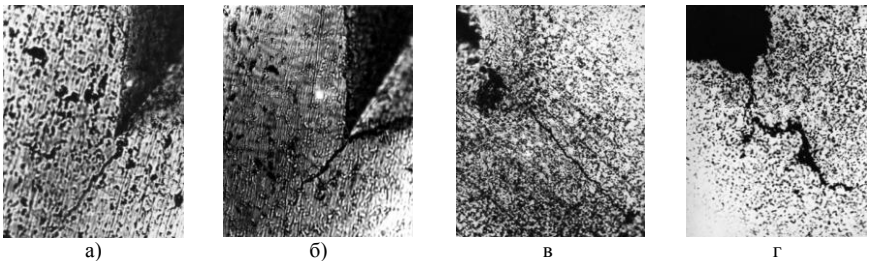


Рис. 8. Характер розвитку тріщин при навантаженні індентором в твердих сплавах: а, б - ВК6; в, г - Т15К6; а, в - вихідний стан; б, г - після плазмової обробки без оплавлення; $\times 600$

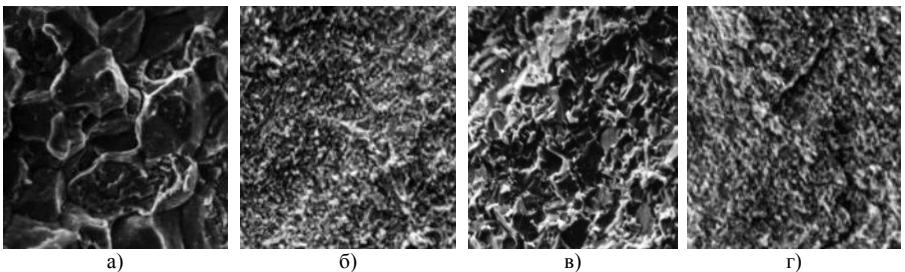


Рис. 9. – Електронні мікрофрактограми зламів: а, б - сплав ВК6; в, г - сплав Т15К6; а, в - вихідний стан; б, г- після плазмової обробки без оплавлення, $\times 2500$; а - $\times 5000$; б - $\times 2500$

Утворення мезоструктурних ансамблів в модифікованих твердих сплавах гальмує самоорганізацію дефектів і сприяє підвищенню тріщиностійкості завдяки розсіюванню енергії руйнування. На зламах зразків мезоструктурні ансамблі утворюють язички та гребені (рис. 9, б, г), а на металографічних знімках відбитків - звивисту траєкторію тріщини (див. рис. 8, г).

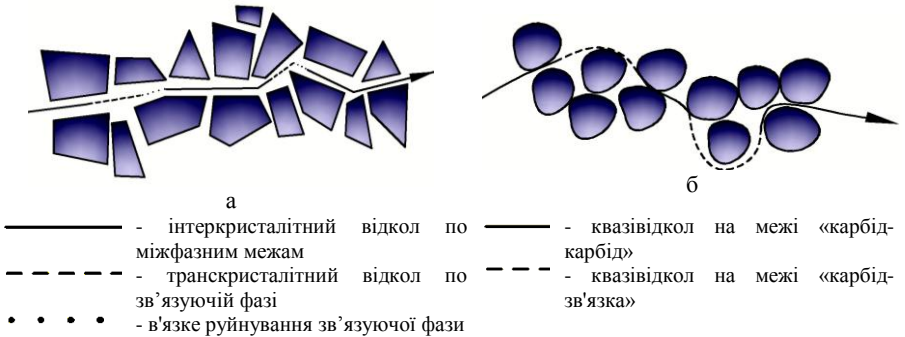


Рис. 10. Моделі руйнування твердих сплавів: а – у вихідному стані (після спікання); б - після плазмового модифікування

На рис. 11 показаний приклад характеру руйнування мезоструктурних ансамблів в модифікованій зоні на сплаві ВК4.

Випробування показали, що плазмове модифікування твердих сплавів на оптимальних режимах не призводить до зниження їх тріщиностійкості, незважаючи на значне підвищення твердості. У ряді випадків досягається підвищення коефіцієнта K_{Ic} на 20 % в порівнянні з вихідним станом. З рекомендованих режимів обробки найефективніше зміцнення без розплавлення композиції з реалізацією фазових і структурних перетворень в карбідах і зв'язці.

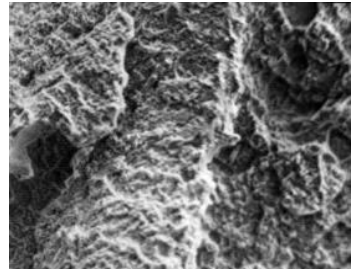


Рис.11. Електронна мікрофрактограма зламу в модифікованій зоні на сплаві ВК4; $\times 2500$

У п'ятому розділі на підставі комплексу виконаних досліджень теплових процесів, структури, фазового складу, параметрів кристалічної будови, в'язкості руйнування модифікованих твердих сплавів розроблено структурну схему синтезу модифікованих шарів на твердих сплавах із заданим рівнем експлуатаційних властивостей (рис. 12). Основними етапами алгоритму синтезу є:

1. Призначення заданих параметрів термодформаційного аналізу. Найбільш оптимальним завданням при плазмовому модифікуванні твердо-сплавного інструменту є мікро- і наноструктурування поверхневого шару з утворенням ультрадисперсної структури.

2. Розрахунок оптимальних режимів плазмової обробки з використанням теплових моделей.

3. Оцінка напруженого стану методами рентгеноструктурного аналізу. При цьому окремо визначаються напруження в карбідів і зв'язці.

4. Визначення твердості HV, параметрів структури (середній розмір часток карбідів d_k) – на контрольних зразках. Методами рентгеноструктурного аналізу визначаються: період решітки кобальтової фази (характеризує ступінь розчинення карбідів і насичення зв'язки вольфрамом і вуглецем) a ; розмір блоків D .

5. Визначення параметрів тріщиностійкості K_{Ic} - виконується при мікронавантаженні індентором. На зламах виконуються мікрофрактографічний аналіз механізмів руйнування.

6. Стійкісні випробування інструменту.

Експлуатаційні випробування і дослідження механізмів зношування зміцненого твердосплавного інструменту в повній мірі підтвердили результати досліджень структури та механізмів руйнування твердих сплавів після плазмового поверхневого модифікування. Випробування показали, що плазмове модифікування призводить до значного (в 2,5 ... 3 рази) підвищення стійкості твердосплавного інструменту.

Металографічними дослідженнями зношених пластин встановлено, що в модифікованих пластинах реалізується якісно інший механізм зношування. Міцний, щільний і недеформований карбідний каркас спостерігається практично у самій зношеній кромки (рис. 13, б, III). Знос стає більш рівномі-

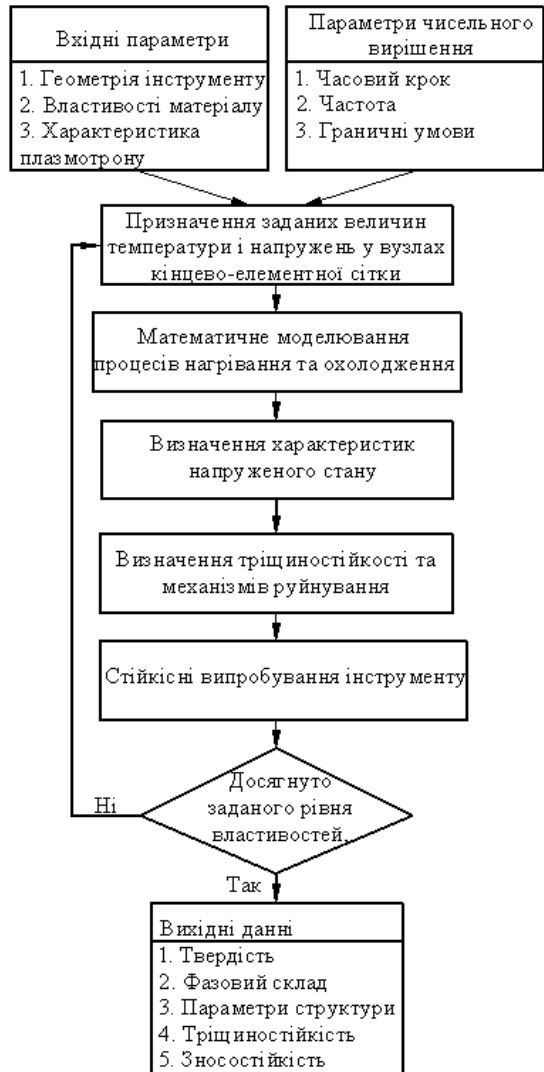


Рис. 12. Структурна схема синтезу модифікованих шарів на інструментальних твердих сплавах

рним, зменшується кількість мікротріщин і викришувань. Недеформована і бездефектна структура зміцненого сплаву спостерігається вже на відстані близько 10 мкм від зношеної ріжучої кромки (рис. 13, б, IV), в той час, як у вихідному стані вона спостерігалася на відстані ~ 50 мкм від кромки (рис. 13, а, II).

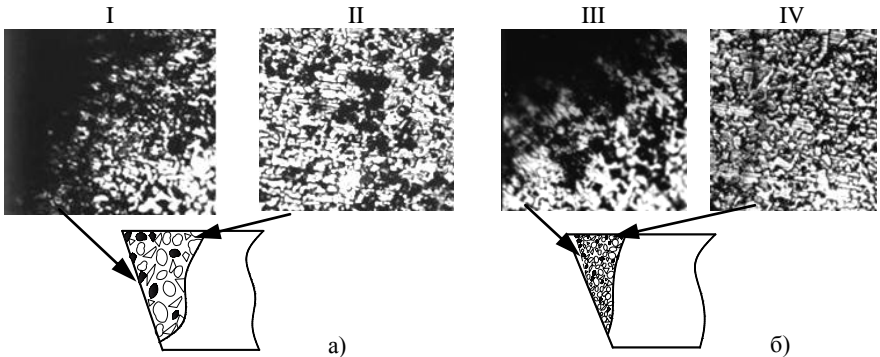


Рис. 13. Схема дифузійного зношування в вихідному стані (а) і після плазмового модифікування (б) та мікроструктура: I, III - у ріжучої кромки на задній поверхні; II - на відстані 50 мкм від кромки; IV - на відстані 10 мкм від кромки

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Аналіз сучасного стану і перспектив розвитку інструментальних твердих сплавів показав, що найбільш перспективними напрямками є створення сплавів з ультрадисперсною структурою та поверхнева модифікація - нанесення покриттів або обробка ВКДН. Разом з тим нанесення покриттів має ряд істотних недоліків і характеризується високою вартістю і складністю устаткування.

2. Найбільш перспективним і актуальним є розвиток методів поверхневого модифікування обробкою висококонцентрованими джерелами нагріву. Найбільш доступною, економічною і продуктивною є обробка висококонцентрованою плазмовим струменем. Однак багато теоретичних та прикладних питань плазмового модифікування (математичне моделювання, структура і експлуатаційні властивості) залишаються не вивченими.

3. Для визначення оптимальних параметрів плазмового модифікування розроблено математичну модель, яка на підставі рішення диференціального рівняння теплопровідності в нелінійній постановці, враховує теплофізичні властивості твердих сплавів. Розроблена інженерна методика розрахунку оптимальних режимів, заснована на рішенні рівняння теплопровідності з використанням програмного пакету MSC.Nastran дозволяє вирішувати як пряму задачу - обчислення T_{max} і W при заданих умовах обробки, так і зворотну задачу - обчислення необхідних (оптимальних) режимів плазмової обробки (I , q , V). З використанням розробленої математичної моделі виконані розрахунки параметрів термічного циклу плазмового нагріву твердосплавних пластин. Розраховано оптимальні режими плазмового модифікування плас-

тин з твердого сплаву, які забезпечують утворення в модифікованому шарі ультрадисперсної структури.

4. На підставі металографічних і рентгеноструктурних досліджень встановлено закономірності структурних перетворень в твердих сплавах при нагріві висококонцентрованим плазмовим струменем. Встановлено, що максимальний ефект зміцнення для сплавів типу ТК і ВК ($HV \approx 1700$) досягається при плазмовій обробці без оплавлення композиції з перетвореннями в карбідах і зв'язці. Створюються умови, при яких відбувається дисперсійне твердіння пересиченої легуючими елементами зв'язки з виділенням ультрадисперсних часток карбідів ($d_k \approx 0,1 \dots 0,5$ мкм), вторинних карбідів.

5. Удосконалена методика локальних мікровипробувань і досліджена тріщиностійкість твердих сплавів після плазмового модифікування. Встановлено, що плазмова модифікація призводить до підвищення тріщиностійкості K_{Ic} твердих сплавів на 20% в порівнянні з вихідним станом. Підвищення тріщиностійкості твердих сплавів пов'язано з подрібненням і перегрупуванням вихідної фази карбіду, насиченням цементуючою зв'язки дисперсними вторинними карбідами, що призводить до зміни величини питомих контактних поверхонь (міжфазних меж) «карбід-карбід» і «карбід-зв'язка» - найбільш слабких ланок композиції.

6. Вперше розроблено теоретичні моделі руйнування твердих сплавів в модифікованому стані. Встановлено, що додатковим фактором підвищення тріщиностійкості модифікованих твердих сплавів є розсіювання енергії руйнування завдяки утворенню мезоструктурних ансамблів.

7. Розроблено методологію управління структуруванням в твердих сплавах, що представляє собою сукупність послідовних теоретичних, експериментальних і технологічних досліджень, які спрямовані на формування в поверхневому шарі інструментального матеріалу структури, що забезпечує високий рівень характеристик конструкційної міцності. На підставі проведених досліджень вперше розроблено структурну схему синтезу модифікованих шарів з ультрадисперсною структурою.

8. Вперше розроблені на підставі аналізу удосконалення навантаження і зношування технологічні рекомендації по розташуванню модифікованої зони на робочій поверхні інструменту. Оптимальним вважається розташування на передній поверхні. Спроектвані установка і пристосування для виконання плазмової обробки у виробничих умовах, що дозволяють здійснювати закріплення твердосплавних пластин різної форми, здійснення обробки під різним кутом нахилу і на різній відстані від джерела нагріву.

9. Стійкісні випробування пластин після плазмового модифікування показали, що плазмове модифікування призводить до підвищення стійкості твердосплавного інструменту в 2,5 ... 3 рази. Металографічні дослідження матеріалу ріжучої кромки після різання показали, що знос стає більш рівномірним, зменшується кількість мікротріщин і викришування. Недеформована і бездефектна структура зміцненого сплаву спостерігається вже на відстані близько 10 мкм від зношеної ріжучої кромки, в той час, як для пластин в вихідному стані ця відстань складає близько 50 мкм.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Самотугін С.С. Вплив плазмової обробки на зміну елементного складу поверхні робочого шару твердосплавного інструменту, її шорсткості та зносостійкості / С.С. Самотугін, В.О. Мазур, К.В. Кудінова // Сверхтвердые материалы: научно-теоретический журнал. – Киев : ИСМ им. В.Н. Бакуля, 2010. – № 4 (186). – С. 64 – 69. Включено до науково-метричної бази Scopus. *(Автором проведено експерименти плазмової обробки, вимірювання та аналіз параметрів мікрорельєфу, підготовлено ілюстрації і текст).*
2. Самотугін С.С. Влияние режимов плазменной обработки на структуру и свойства инструментальных твердых сплавов / С.С. Самотугин, В.И. Лавриненко, Ю.С. Самотугина, Е.В. Кудина // Сверхтвердые материалы. 2011. № 3. С. 74-84. Включено до науково-метричної бази Scopus. *(Автором проведено експерименти плазмової обробки, виготовлено та досліджено зразки мікроструктури, підготовлено ілюстрації і текст).*
3. Самотугін С.С. Математическое моделирование процесса плазменного поверхностного модифицирования твердосплавного инструмента. / С.С. Самотугин, В.А. Мазур, Е.В. Кудина // Вісник СевНТУ. Серія Машинобудування та транспорт.– 2013. – Вип. 140.– С. 123-130. *(Автором проведено аналіз методів математичного моделювання теплового впливу ВКДН, підготовлено ілюстрації і текст).*
4. Samotugin S.S. The study of fracture toughness and failure mechanisms of cutting-tool hardmetals with plasma-modified surface / S.S. Samotugin, V.J. Lavrinenko, E.V. Kudina, U.S. Samotugina // Journal of Superhard Materials. – 2013.– Volume 35.– P.P. 242-250. (іноземне видання) *(Автором проведено експерименти плазмової обробки, вимірювання та аналіз параметрів мікрорельєфу, підготовлено ілюстрації і текст).*
5. Самотугін С.С. Исследование трещиностойкости и механизмов разрушения инструментальных твердых сплавов после плазменного поверхностного модифицирования / С.С. Самотугин, В.И. Лавриненко, Ю.С. Самотугина, Е.В. Кудина // Сверхтвердые материалы – 2013.– № 4.– С. 63-73. Включено до науково-метричної бази Scopus. *(Автором проведено експерименти плазмової обробки, вимірювання та аналіз параметрів тріщиностійкості, підготовлено ілюстрації і текст).*
6. Самотугін С.С. Исследование эксплуатационной стойкости твердосплавных пластин после плазменной поверхностной модификации / С.С. Самотугин, Е.В. Кудина, О.Ю. Нестеров // Захист металургійних машин від поломок. – Маріуполь : ПДТУ. - 2014. – Вип. №16. – С. 201-206. *(Автором проведено експерименти плазмової обробки, проведено стікістні випробування, підготовлено ілюстрації і текст).*
7. Самотугін С.С. Свойства и работоспособность инструментальных твердых сплавов после плазменного поверхностного модифицирования / С.С. Самотугин, Е.В. Кудина, Ю.С. Самотугина, В.И. Лавриненко // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2016. – № 5(137). – С. 25-32. (іноземне видання)

(Автором проведено експерименти плазмової обробки, проведено оптимізацію технологічних параметрів плазмової обробки)

8. Самотугин С.С. Технологические основы плазменного упрочнения твердосплавного инструмента / С.С. Самотугин, Е.И. Антипенко, В.П. Лихошва, В.А. Мазур, Е.В. Семенова, Е.В. Кудинова // Новітні технології в машинобудуванні: металообробка, інструмент, реновація – 36. наук. праць. – Маріуполь : ПДТУ, 2008. – С. 75-87. *(Автором проведено експерименти плазмового зміцнення твердосплавного інструменту, підготовлено текст).*

9. Самотугин С.С. Плазменная поверхностная модификация инструментальных твердых сплавов. / С.С. Самотугин, Ю.С. Самотугина, Е.В. Кудинова // Международная научно-техническая конференция “Машиностроительные технологии и техника автоматизации – Ереван, 2012. – С. 121–128. *(Автором проведено експерименти плазмової обробки, дослідження та аналіз параметрів мікроструктури, підготовлено текст).*

10. Самотугин С.С. Моделирование механизма разрушения ультрадисперсных твердых сплавов / С.С. Самотугин, Е.В. Кудинова // Университетская наука 2012. Тезисы докладов международной н.-техн. конф. – Мариуполь : ПГТУ, 2012. – т. II. С. 239-240. *(Автором проведено аналіз методів дослідження параметрів тріщиностійкості, підготовлено текст).*

11. Самотугин С.С. Моделирование тепловых процессов в ультрадисперсных твердых сплавах при плазменной модификации / С.С. Самотугин, Е.В. Кудинова // Университетская наука 2013. Тезисы докладов международной н.-техн. конф. – Мариуполь : ПГТУ, 2013. – т. I. С. 272-275. *(Автором створено математичну модель теплового впливу ВКДН, підготовлено текст).*

12. Самотугин С.С. Исследование износа твердосплавного инструмента после плазменной модификации / С.С. Самотугин, Е.В. Кудинова // Университетская наука 2014. Тезисы докладов международной н.-техн. конф. – Мариуполь: ПГТУ, 2014. – т. III. С.111-112. *(Автором проведено експерименти плазмової обробки, проведено стійкісний випробування, підготовлено текст).*

13. Самотугин С.С. Оптимизация технологии плазменной обработки однокарбидных и двухкарбидных твердых сплавов / С.С. Самотугин, Е.В. Кудинова // Университетская наука 2015. Тезисы докладов международной н.-техн. конф. – Мариуполь : ПГТУ, 2015. – т. II. С. 63-64. *(Автором проведено експерименти плазмової обробки, проведено оптимізацію технологічних параметрів плазмової обробки, підготовлено текст).*

14. Кудинова Е.В. Разработка модели оптимизации режимов плазменной обработки инструмента из твердого сплава / Е.В. Кудинова // II Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених, фахівців, аспірантів «Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика». – Мариуполь : ПГТУ, 2016. – С. 93-94. *(Автором проведено аналіз методів математичного моделювання теплового впливу ВКДН, проведено оптимізацію технологічних параметрів плазмової обробки, проведено стійкісний експеримент підготовлено текст).*

15. Патент України на корисну модель № 106821 «Спосіб зміцнення ріжучих пластин з твердих сплавів при нагріванні плазмовим струменем» /

Самотугін С.С., Самотугіна Ю.С., Кудінова К.В. від 10.05.2016, Бюл. № 9 МПК С21D 1/06(2006.01) Заявка у 2015 10702 від 03.11.2015 р. (*Автором виконане експериментальне підтвердження запропонованого способу дії плазмового струменя на пластину*).

АНОТАЦІЯ

Кудінова К. В. Синтез ультрадисперсних модифікованих шарів на твердих сплавах плазмовою обробкою. – 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». – МОН України, Київ, 2016.

Дисертація присвячена формуванню модифікованих шарів з ультрадисперсної структурою і підвищеним рівнем експлуатаційних властивостей при поверхневій обробці твердосплавних пластин висококонцентрованою плазмовим струменем.

Розроблено математичну модель оптимального керування процесом плазмового поверхневого модифікування твердосплавного інструменту та інженерну методику розрахунку оптимальних режимів обробки. Досліджено механізми структурних перетворень в інструментальних твердих сплавах при плазмовому поверхневому модифікуванні. Розроблено методику випробувань та досліджено тріщиностійкість, механізми руйнування та зношування інструментальних твердих сплавів з поверхневим модифікованим шаром. Розроблено технологічне устаткування для проведення плазмової обробки. Розроблено технологічні процеси плазмового модифікування ріжучого інструменту з твердих сплавів. Розроблена структурна схема синтезу модифікованих шарів на твердих сплавах після плазмового модифікування. Розроблені рекомендації по вибору оптимального розміщення модифікованої зони на твердосплавних пластинах. Проведені стійкісні дослідження твердосплавних пластин після плазмового модифікування.

Ключові слова: плазмове модифікування, твердосплавний інструмент, механізм руйнування, тріщиностійкість, зносостійкість, математична модель, структурні перетворення, поверхневий шар, мезоструктура, ультрадисперсний, стійкісні дослідження, мезоструктура, металорграфічні дослідження .

АННОТАЦИЯ

Кудинова К. В. Синтез ультрадисперсных модифицированных слоев на твердых сплавах плазменной обработкой. - 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». – МОН Украины, Киев, 2016.

Диссертация посвящена формированию модифицированных слоев с ультрадисперсной структурой и повышенным уровнем эксплуатационных свойств при поверхностной обработке твердосплавных пластин высококонцентрированной плазменной струей.

Разработана математическая модель оптимального управления процессом плазменного поверхностного модифицирования твердосплавного инструмента и инженерная методика расчета оптимальных режимов обработки, основанная на решении уравнения теплопроводности, которая позволяет решать как прямую задачу – вычисление T_{max} и W при заданных условиях обработки, так и обратную задачу – вычисление требуемых (оптимальных) режимов плазменной обработки (I , q , V). С использованием разработанной математической модели выполнены расчеты параметров термического цикла плазменного нагрева твердосплавных пластин. Исследованы механизмы структурных преобразований в инструментальных твердых сплавах при плазменном поверхностном модифицировании. Выявлены закономерности структурных превращений в твердых сплавах при нагреве высококонцентрированной плазменной струей. Установлено, что максимальный эффект упрочнения для сплавов типа ТК и ВК ($HV \approx 1700$) достигается при плазменной обработке без оплавления композиции с превращениями в карбидах и связке. Разработана методика испытаний и исследовано трещиностойкость, механизмы разрушения и износа инструментальных твердых сплавов с поверхностным модифицированным слоем. Установлено, что плазменное модифицирование приводит к повышению трещиностойкости K_{Ic} твердых сплавов на 20% в сравнении с исходным состоянием, дополнительным фактором повышения трещиностойкости модифицированных твердых сплавов является рассеяние энергии разрушения благодаря образованию мезоструктурных ансамблей. Разработано технологическое оборудование для проведения плазменной обработки, позволяющие осуществлять закрепление твердосплавных пластин разной формы, осуществление обработки под разным углом наклона и на разной удаленности от источника нагрева. Разработаны технологические процессы плазменного модифицирования режущего инструмента из твердых сплавов. Разработана структурная схема синтеза модифицированных слоев на твердосплавном инструменте после плазменного модифицирования. Разработаны рекомендации по выбору оптимального размещения модифицированной зоны на твердосплавных пластинах. Проведены стойкостные исследования твердосплавных пластин после плазменного модифицирования. Установлено, что после плазменного модифицирования стойкости твердосплавного инструмента повышается в 2,5...3 раза. Металлографические исследования мате-

риала режущей кромки после резания показали, что износ становится более равномерным, уменьшается количество микросколов и выкрашиваний.

Ключевые слова: плазменное модифицирование, твердосплавный инструмент, механизм разрушения, трещиностойкость, износостойкость, математическая модель, структурные преобразования, поверхностный слой, мезоструктуры, ультрадисперсный, стойкостные испытания, микроскол, режущая кромка, металлографические исследования.

SUMMARY

K.V. Kudinova Synthesis of ultra-dispersed modified layers on hard layers by plasma treatment. – A 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”, Kyiv, 2016.

The thesis is devoted to formation of modified layers with ultra-dispersed structure and improved level of exploitation qualities at surface treatment of hard alloy plates by highly concentrated plasma jet plasma jet. A mathematical simulatuioion of the process of plasma surface modification of hard alloy tools was carried out, as well as engineering methods of evaluation of optimal treatment modes, based on solution of heat conductivity equation, which is to make it possible to solve both a direct assignment –determination of T_{max} and W at specified treatment conditions and a reverse problem of evaluating the required (optimal) modes of plasma treatment (I , q , V). Application of the developed simulation model allowed carrying out of the parameters of thermal cycles of plasma heating of hard alloy plates. Also investigated were the mechanisms of structural transformations in tool hard alloys at surface plasma modification. Regularities of structural transformations in hard alloys at heating with highly concentrated plasma jet were revealed. It was found out that the highest strengthening effect for alloys of TK and BK types ($HV \approx 1700$) could be reached at plasma treatment without melting of the composition with transformations of carbides and in the matrix. Specified was the method of testing and resistance to cracking, destruction and wear mechanisms of tool hard alloys with modified layer were investigated. It was established that plasma modification led to improved (20 % higher) resistance to crack formation K_{Ic} of hard alloys, as compared to the original state, dispersed energy of destruction, due to formation of meso-structural groups being an additional factor of improving resistance to crack formation in modified hard alloys. Technological equipment, required for carrying out plasma treatment was designed, allowing fixation of hard alloy plates of different shapes at different angles of inclination and at different distances from the source of heating. Also designed were the processes of plasma modification of cutting tools, made of hard alloys. A structural diagram of the synthesis of modified layers on hard alloy tools after plasma modification was developed.

Prescribed were recommendations, regarding selection of optimal arrangement of the modified area on hard alloy plates. Investigations of durability of hard alloy plates after plasma modifying investigation were performed. It was found out that following plasma modification of hard alloy tools, their strength and durability could become 2,5 to 3 times higher. Metallographic investigation of the material of cutting edge after cutting showed that wear was more uniform, the quantity of micro- shears and chips was decreased.

Key words: plasma modification, hard alloy tools, destruction mechanism, resistance to crack formation, mathematical simulation, structural transformations, surface layer, meso-structures, ultra-disperse.