

АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ОРДЕНА ТРУДОВОГО ЧЕРВОНОГО ПРАПОРА  
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА  
ім.І.М.Францевича

На правах рукопису

УДК 532.72: 621.762.5:539.219.3:517.946:669.018.25

ЧЕРНІКОВА Олена Сергіївна

ЗАКОНОМІРНОСТІ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОІМПУЛЬСНОЇ ОБРОБКИ НА  
СТРУКТУРУ І ЗНОСОСТІЙКІСТЬ СПЕЧЕНИХ ТВЕРДИХ СПЛАВІВ.

Спеціальність: 05.16.01 - Металознавство і термічна обробка металів.

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
дисертації на здобуття вченого ступеня  
кандидата технічних наук

1994

AB 30.004

Робота виконана в ордену Трудового Червоного Прапора  
Інституті проблем матеріалознавства ім.І.М.Францевича Академії  
Наук України

Наукові керівники: доктор технічних наук

О.І.Райченко

доктор фізико-математичних наук

Ю.М.Солонін

Офіційні опоненти: доктор технічних наук

В.М.Мінаков

кандидат технічних наук

П.А.Бойко

Головна організація: ВО ім.С.П.Корольова

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00756451 (S)

Захист відбудеться "22" листопада 1994р. в "14" год.

на засіданні спеціалізованої ради Д.016.23.02

Ордену Трудового Червоного Прапора

Інституту проблем матеріалознавства АН України за адресою:

252680, Київ -680, ДСП, вул.Кржижанівського 3

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту проблем  
матеріалознавства АН України

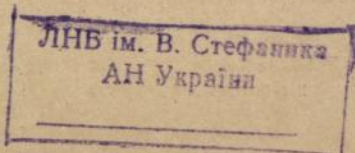
Автореферат розісланий "12" листопада 1994р.

Вчений секретар

спеціалізованої ради

доктор технічних наук

Р.В.Мінакова



AB-30.064

## I. Загальна характеристика роботи

**II. Актуальність роботи.** Успішний розвиток багатьох галузей промисловості - гірничодобувної, металообробної, машинобудівельної і ряду інших - пов'язане не тільки зі створенням нових конструкційних матеріалів, але і з підвищенням якості ріжучого інструменту.

На сьогодні найважливішими інструментальними матеріалами продовжують залишатися вольфрамові тверді сплави, створені більше, ніж 60 років тому. Найчастіше твердосплавний інструмент експлуатується в умовах абразивного середовища. По цій причині експериментальні дослідження зносостійкості і її зв'язку з фізико-механічними властивостями інструментальних матеріалів надзвичайно важливі і актуальні.

Певні досягнення в покращенні якості твердих сплавів одержані завдяки усуненню пористості (гаряче ізостатичне і динамічне пресування), підвищенню міцності зв'язки (термообробка), а також використанню різноманітних способів фізичної дії (лазерна обробка, іонно-променева, радіаційно-термічна обробка і інші), які дозволяють підвищити в різній мірі фізико-механічні і експлуатаційні характеристики відносно вихідних спечених твердих сплавів. Але перелічені методи не завжди характеризуються достатньою ефективністю, екологічною чистотою і малою енергомісткістю. В зв'язку з цим розробка нового енергозберігаючого і екологічно безпечного методу дії на структуру і властивості спечених твердих сплавів електричним струмом високої щільності ( $j > 10^6 \text{ A/m}^2$ ) з метою одержання твердих сплавів з підвищеними фізико-механічними і експлуатаційними властивостями є дуже актуальною.

Дана робота виконана у відповідності з темами ІПМ АН України: -42П-90, 23НТ-90, 31П-91, 37П-91, 03.02., 23П-92, 41П-92, 42П-92, 1.6.2.127.

**1.2 Мета роботи.** Розробка електроімпульсного методу обробки спечених твердих сплавів; установлення кореляційних залежностей між режимами електроімпульсної обробки, структурою, фізико-механічними і експлуатаційними характеристиками; теоретичний аналіз температурно-напруженого стану твердого сплаву в процесі електроімпульсної обробки, а також визначення впливу рівня залишкових внутрішніх напружень, викликаних проходженням імпульсу струму високої щільності, на механічні властивості твердих сплавів; розробка на основі одержаних залежностей оптимальних режимів обробки твердих сплавів.

Для досягнення мети роботи вирішувались наступні задачі:

- дослідження впливу режимів електроімпульсної обробки на фізико-механічні властивості твердих сплавів (з вмістом вольфраму і безвольфрамових); визначення оптимального діапазону енерговитрат при електроімпульсній обробці з метою підвищення зносостійкості;
- дослідження впливу електроімпульсної обробки на мікроструктуру і особливості напруженого стану твердих сплавів, а також їх впливу на механічні властивості твердих сплавів, зокрема на зносостійкість;
- встановлення взаємозв'язку між фізико-механічними властивостями модельних об'єктів (псевдосплав W-50%Cu, спечений молібден), підданих електроімпульсній дії, і рівнем залишкових напружень, викликаних цією обробкою;
- створення математичної моделі процесу електроімпульсної обробки, проведення аналізу температурно-напруженого стану твердого сплаву в процесі електроімпульсної обробки;
- виявлення на основі експериментальних досліджень і проведених теоретичних розрахунків механізму електроімпульсної обробки твердих сплавів.

### 1.3 Наукова новизна.

1. Вперше проведене систематичне дослідження впливу імпульсів струму високої щільності на структуру і властивості твердих сплавів.
2. Виявлене явище значного підвищення зносостійкості твердих сплавів при електроімпульсній обробці.
3. Встановлений механізм цього явища, який полягає в генерації орієнтованих мікронапружень завдяки локально-неоднорідному прогріву гетерофазного матеріалу в процесі імпульсної дії і їх неповній релаксації при охолодженні.
4. Встановлена кореляція між напруженим станом гетерофазного матеріалу і його зносостійкістю. Показано, що при підвищенні зносостійкості твердого сплаву ВК8 вдвічі в результаті електроімпульсної обробки рівень орієнтованих залишкових напружень збільшується в 1.6 разу. Показано, що збільшення кількості пластичної складової фази в твердому сплаві (ВК6, ВК3, ВК15) призводить до більшого рівня залишкових напружень після імпульсної обробки.
5. Запропонований алгоритм розрахунку температурно-напруженого стану твердого сплаву при електроімпульсній обробці, який дозволяє визначати рівень залишкових внутрішніх напружень в гетерофазних матеріалах, що може служити раціональною основою для способу підвищення рівня експлуатаційних характеристик твердих сплавів.

### 1.4. Практична цінність і реалізація результатів роботи.

В результаті проведених досліджень розроблений спосіб одержання твердих сплавів (з вмістом вольфраму, титановольфрамової групи, безвольфрамових), захищений А.с. N1775947 СРСР, пріоритет винаходу 08.06.1990р.

Вивчені закономірності впливу струмів великої щільності на структуру, напружений стан, фізико-механічні і експлуатаційні

властивості твердих сплавів дозволяють одержувати матеріали з оптимальним сполученням цих властивостей. Вони також можуть бути використані при розробці нових зносостійких матеріалів для різних галузей промисловості. Дослідно-промислові дослідження ріжучих пластин і твердосплавних вставок бурового інструменту для роторного буріння, підданих електроімпульсній обробці, були проведені в Особливому конструкторсько-технологічному бюро ІПМ АН України (м.Київ), в Інституті надтвердих матеріалів (м.Київ), НКТБ Уфимського нафтоінституту (м.Уфа). Ріжучі пластини показали гарні експлуатаційні властивості і перспективність використання твердих сплавів, оброблених імпульсами струму, для обробки чавуну при певних умовах роботи. Випробування твердих сплавів як елементів бурового інструменту також показали підвищені експлуатаційні властивості і перспективність використання оброблених сплавів для роторного буріння м'яких і середніх гірських порід. Проведені на деревообробному комбінаті (м.Київ) випробування ріжучих пластин остей дискових пилок з твердосплавними пластинами ВК8 при розпилюванні деревостружкових, столярних плит і деревини хвойних порід показали, що ріжучі властивості оброблених імпульсами твердосплавних пластин вищі, ніж у пластин у вихідному стані, і розроблений метод підвищення властивостей твердих сплавів може бути рекомендований до впровадження у виробництво.

### **1.5. Апробація роботи.**

Основні результати і окремі розділи роботи доповідались і обговорювались на III Республіканському научно-технічному семінарі "Електрофізичні технології в порошковій металургії", Рига.1986р.; V Республіканському науково-технічному семінарі "Електрофізичні

технології в порошковій металургії", Москва, 1990р.; VI Республіканському науково-технічному семінарі "Електрофізичні технології в порошковій металургії", Київ, 1992р.; Міжнародних конференціях "European Conference in Residual Stresses", Frankfurt, Germany, 1992; "International Conference on Materials by Powder Technology", PTM'93, Dresden, Germany, March 1993; "Plansee-Seminar'93", May 1993; "Euromat 93", Paris, 1993.

### 1.6 Положення дисертації, які виносяться на захист

1. Ефект підвищення зносостійкості твердих сплавів при їх обробці імпульсами струмів високої щільності і оптимальний діапазон енерговитрат електроімпульсної обробки, який знаходиться в межах  $1.25 \cdot 10^{-3} \dots 28.3$  кВт г/кг для твердих сплавів типу ВК,ТК і безвольфрамових.
2. Результати досліджень впливу електроімпульсної обробки на мікроструктуру і особливості напруженого стану твердих сплавів і модельних об'єктів (псевдосплав W-Cu і спеченого молібдену), а також їх вплив на механічні властивості твердих сплавів, зокрема на їх зносостійкість.
3. Механізм цього явища, що полягає в генерації орієнтованих мікронапружень завдяки локально-неоднорідному прогрівові гетерофазного матеріалу в процесі імпульсної дії і їх неповний релаксації при охолодженні.
4. Алгоритм розрахунку температурно-напруженого стану твердого сплаву при електроімпульсній обробці, який дозволяє визначати оптимальний рівень внутрішніх залишкових напружень в гетерофазних матеріалах, що може служити раціональною основою для способу підвищення рівня експлуатаційних характеристик ...

### 1.7. Публікації.

По матеріалах роботи опубліковано 16 друкованих праць, з них одне авторське свідоцтво.

### 1.8. Структура і об'єм дисертації.

Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, основних результатів і висновків, додатків. Матеріал викладений на 150 сторінках, містить 36 рисунків, 30 таблиць, бібліографічний список з 150 найменувань.

### 2. Зміст роботи.

У вступі показана актуальність теми, яка складає предмет досліджень, коротко викладені зміст і структура роботи. Сформульовані положення, які виносяться на захист, і наукова новизна дисертаційної роботи.

#### 2.1. Розділ I. Літературний огляд.

Перший розділ роботи є аналітичним оглядом літератури, в якому дані основні відомості про фізичну природу взаємодії електричного струму великої щільності з металами, проведений аналіз робіт по вивченню впливу струмів високої щільності на структуру і властивості оброблюваних об'єктів, проаналізовані основні результати, одержані при дії концентрованих потоків енергії (лазерна обробка, іонно-променева, магнітна, радіаційно-термічна і інші) на поверхню твердих сплавів, а також вплив термічної обробки на структуру і властивості твердих сплавів. Показана перспективність застосування методу електроімпульсної обробки з метою підвищення фізико-механічних властивостей і експлуатаційних властивостей спечених твердих сплавів. Сформульовані мета і задачі дослідження.

2.2. Розділ II. Другий розділ присвячений опису установки для електроімпульсної обробки твердих сплавів, а також методики реєстрації параметрів електроімпульсної обробки. В ній також приведені характеристики вихідних матеріалів і описані методики

експериментальних досліджень структури, фізико-механічних властивостей матеріалів. Об'єктами досліджень були тверді сплави, спечені у водні по традиційній технології. Параметри структурного стану вивчали електронно-мікроскопічним, рентгеноструктурним і рентгенофазовим аналізом, а також методом рентгеновської тензометрії.

Матеріали характеризувались: густиною, питомим електроопором, коерцитивною силою, магнітною проникністю, питомою намагніченістю насичення, модулем пружності, твердістю по Вікерсу, тріщиностійкістю, межею стійкості на згин, ударною в'язкістю, зносостійкістю при абразивному зношуванні і при обробці чавуну.

Описані також застосовувані методи статистичної обробки експериментальних даних.

**2.3. Розділ III.** Дослідження впливу електроімпульсної обробки на структуру і властивості твердих сплавів.

Цей розділ присвячений насамперед визначенню оптимального діапазону енерговитрат при електроімпульсній обробці твердих сплавів з метою підвищення їх зносостійкості.

Електроімпульсна обробка твердих сплавів проводилась на дослідно-технологічній установці, змонтованій на базі модуля "Імпульс-А" в ІПМ АН України. Максимальна напруга на батареї конденсаторів дорівнює 6кВ, максимальна енергосмість установки - 10кДж. Система вимірювань дозволяє реєструвати одночасно розрядний струм і напругу. Електроімпульсна обробка спечених твердих сплавів проводилась таким чином: зразки твердих сплавів прямокутного перерізу розміщувались між плитами навантажуючого пристрою імпульсної установки. Питомі електровитрати при обробці твердих сплавів розраховувались по формулі:

$$E = \sum_{i=1}^n \frac{k \cdot I \cdot U_{зар} \cdot \tau \cdot \eta}{m},$$

де  $K$  - відношення  $U_{зар}/U_{зар.}$ ,  $U_{зар.}$ -падіння напруги на зразку, В;  $U_{зар}$  - потенціал заряду конденсаторів, В;  $I$  - сила струму, А;  $m$  - вага зразка, кг;  $n$  - кількість імпульсів струму;  $\tau$  - час обробки, год.

Зразки піддавались випробуванням на зносостійкість по методиці, розроблений в ІНМ АН України (СТП ИСМ 610-83), на установці АИ-2.

Зносостійкість визначалась по формулі:

$$\sigma_w = \frac{1}{W'} [км/мм],$$

де  $W'$  - інтенсивність зношування, рівна відношенню зносу до обумовленого шляху.

Відносний коефіцієнт підвищення зносостійкості визначали по формулі:

$$K = \frac{\sigma_w n/0}{\sigma_w g/0};$$

де  $\sigma_w g/0$ ,  $\sigma_w n/0$  - зносостійкість твердосплавних зразків до і після електроімпульсно обробки відповідно, км/мм.

Відносний коефіцієнт підвищення зносостійкості фактично характеризує в скільки разів підвищилась зносостійкість в залежності від енергії обробки. На рис.1 дана залежність відносного коефіцієнту підвищення зносостійкості  $K$  від енергії обробки  $E$  для сплаву ВК8. Навіть при достатньо низькій енергії ( $10^{-3}$  кВт год./кг) вже спостерігається підвищення зносостійкості ( $K > 1$ ). Підвищення енергозатрат до значень  $E = 10^{-2}$  кВт год./кг практично не змінює значення відносного коефіцієнту пі. зшення зносостійкості  $K$ . При дальшому збільшенні енергії спостерігається немонотонна залежність  $K$  від  $E$  з максимальним значенням  $K=2$  при  $E=0.3$  кВт год./кг. Таким чином, виявляються вичерпані можливості збільшення енергії обробки одиничними імпульсами, оскільки збільшення як струму, так і

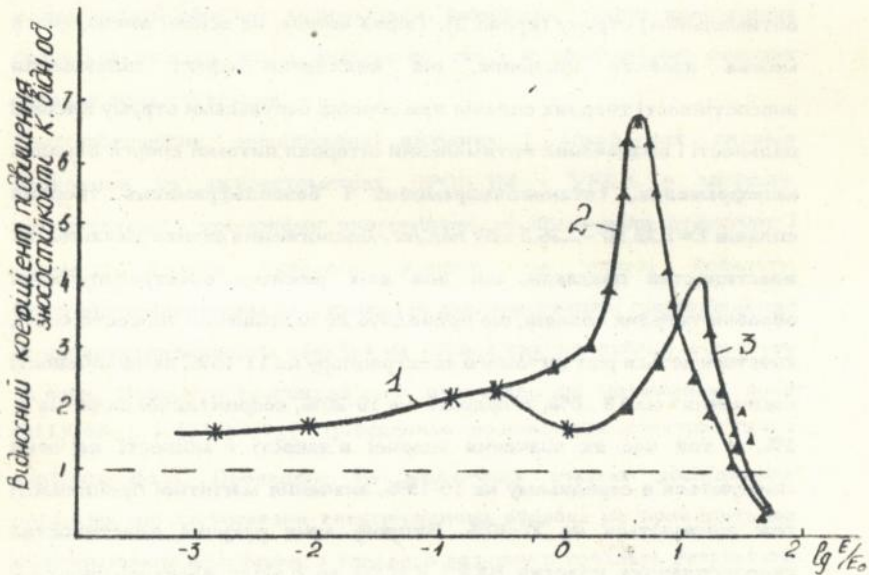


Рис. 1. Залежність відносного коефіцієнту підвищення зносостійкості  $K$  від енергії обробки  $E$  для сплаву ВК8

- $*$  - дані одержані при обробці одиничними імпульсами
- $\blacktriangle$  - дані одержані при обробці серіями імпульсів

тривалості, вже не ведуть до збільшення  $K$ . Дальше збільшення енергії можливе за рахунок багаторазової імпульсної обробки. Крива 2 відображає зміну  $K$  при багаторазовій обробці імпульсами з оптимальними параметрами. Крива також має немонотонний характер з максимальним значенням  $K=6.5$ . Аналогічна залежність, дещо зміщена по енергії і з меншим значенням  $K_{max}$  спостерігається при багаторазовій обробці імпульсами з великим значенням (не оптимальним) струму (крива 3). Таким чином, на основі викладеного можна зробити висновок, що виявлений ефект підвищення зносостійкості твердих сплавів при обробці імпульсами струму високої щільності і визначений оптимальний інтервал питомої енергії обробки вольфрамових, титановольфрамових і безвольфрамових твердих сплавів  $E=1.25 \cdot 10^{-3} \dots 26.3$  кВт год./кг. Дослідження фізико-механичних властивостей показали, що для всіх режимів електроімпульсної обробки твердих сплавів, що приводять до підвищення зносостійкості, спостерігається ріст питомого електроопору на 11-15%, намагніченості насичення - на 18-20%, твердості - на 18-20%, коерцитивної сили - на 2-3%, в той час як значення ударної в'язкості і міцності на згин знижуються в середньому на 10-15%, значення магнітної проникності теж знижуються на 27-30%. Випробування ріжучих властивостей твердосплавних пластин ВК8 і КТС20 до і після електроімпульсної обробки показали, що стійкість пластин як із вольфрамового сплаву ВК8, так і безвольфрамового сплаву КТС20, після електроімпульсної обробки підвищується.

Для з'ясування причин суттєвого підвищення зносостійкості твердих сплавів при електроімпульсній обробці проведено комплексне дослідження структури оброблених і вихідних зразків. Використовувалась трансмісійна електронна мікроскопія і рентгеноструктурний аналіз. Зйомки проводили на електронних

мікроскопах М-200 і JEM1000-X. Порівняльні дослідження вихідного і обробленого твердих сплавів не виявили помітних відмінностей між оструктури. В обох випадках твердий сплав містить зерна карбіду вольфраму правильної ограненої форми (у вигляді трикутників і прямокутників) з розміром порядку одного мікрону. Як у вихідному, так і в обробленому матеріалах зерна карбіду вольфраму містять певну кількість дислокацій. Електронна мікродифракція свідчить про те, що в результаті обробки залишається незмінною також кристалічна структура зв'язки. Як в вихідному, так і в обробленому твердих сплавах вона є кубічною.

Рентгенографічні дослідження вихідних і оброблених сплавів проводили на дифрактометрах ДРОН-3М і УРД-6 в мідному, кобальтовому і хромовому випромінюванні. Визначали структуру і параметр ґратки твердого розчину на основі кобальту. Рентгенографічний аналіз підтвердив дані електронної мікроскопії про те, що електроімпульсна обробка не змінює вихідну кубічну структуру зв'язки. Параметр ґратки зв'язки визначали по положенню ліній  $(311)CoK_{\alpha 1}$  і  $(220)CrK_{\alpha 1}$ . Попередньо розчинялась електролітично карбідна фаза. Проведене на модельних зразках дослідження показало, що застосована електролітична обробка не приводить до вилужування вольфраму з твердого розчину в кобальті. Результати приведені в таблиці 1. В межах досяжної точності (0.5%) параметр ґратки зв'язки не змінюється в процесі обробки і відповідає вмісту в кобальті 2-3% W (по масі).

Для визначення розмірів областей когерентного розсіювання (ОКР) і величини мікроспотворень в карбідній фазі використовували метод гармонічного аналізу уширення рентгеновських ліній. Знімали профілі ліній  $(100)$  і  $(301)$ . Дані по ширині ліній приведені в таблиці 2. В спеченому твердому сплаві ширина ліній помітно збільшена в.

Таблиця 1. Параметр  $\alpha$  зв'язки твердого сплаву ВК8 до і після електроімпульсної обробки, нм

N зразка	Випромі- нювання	$\alpha$ , нм вих.	$\alpha$ , нм обр.
1.	CoK <sub>a1</sub>	0.3552	0.3553
2.	CoK <sub>a1</sub>	0.3554	0.3552
3.	CrK <sub>a1</sub>	0.3548	0.3549
4.	CrK <sub>a1</sub>	0.3553	0.3552
5.	CrK <sub>a1</sub>	0.3549	0.3550

Таблиця 2. Ширина ліній (100) і (301)CuK<sub>a1</sub> порошку WC і карбідної фази твердого сплаву ВК8

Зразок	Напівширина (100), град	Напівширина (301), град.
WC-порошок	0.087	0.291
ВК8вих.	0.178	1.485
ВК8обр.	0.184	1.485
ВК8обр.	0.181	1.470

Таблиця 3. Вплив електроімпульсної обробки на рівень напружень  $\sigma$  (МПа) в карбідній фазі твердих сплавів.

Марка сплаву	Вихідний стан		Після електроімпульсної обробки, $E=0.298$ кВт ч/кг
	$\sigma_1$	$\sigma_2 = \sigma_3$	
ВК6	-65	1 -100	-96 1 -160
ВК8	-90	1 -180	-152 1 -297
ВК15	-120	1 -220	-264 1 -450

порівнянні з порошком WC і практично не міняється при обробці. При цьому аналіз показав, що уширення ліній обумовлене виключно спотвореннями ґратки, тобто дисперсією міжплощинних віддалей, в той час як величина ОКР  $>100\text{нм}$ , тобто вони вже не дають вклад в уширення.

Відомо, що залишкові напруження суттєво впливають на механічні властивості матеріалів. В багатофазних матеріалах в залежності від фазового складу, величини коефіцієнтів лінійного розширення і ін. виникають неорієнтовані мікронапруження різного знаку, співмірні з розмірами структурних складових фаз. Класичним прикладом в цьому відношенні є гетерогенні тверді сплави (WC-Co, WC-TiC-Co, WC-Ni), одержувані методом рідкофазного спікання. Вони як правило мають значні мікронапруження, які впливають на міцність і зносостійкість. Рентгенівська тензометрія на сьогодні є основним і практично єдиним неруйнівним методом вимірювання міжфазних напружень в твердих сплавах. Для визначення залишкових напружень використовували метод скісних зйомок. Вимірювались зміщення ліній (301)CuK<sub>α1</sub> карбіду вольфраму при значеннях  $\psi = 0, 10, 20, 40, 50$  градусів. Вихідним зразком служив спечений твердий сплав, поверхня якого попередньо полірувалась, а потім відпалювалась для знаття наклепування. Величину напружень розраховували по формулах для ортотриаксимального стану при  $\sigma_2 = \sigma_3$ ;  $\sigma_1 \neq 0$ .

$$\sigma_1 = \frac{E [2\varepsilon_x \nu + \varepsilon_1 (1-\nu)]}{1-\nu-2\nu^2}; \quad \sigma_2 = \sigma_3 = \frac{E \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \nu)}{1-\nu-2\nu^2};$$

де  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  - три складові нормальних напружень, E - модуль пружності (для WC E=700ГПа),  $\nu$  - коефіцієнт Пуасона (для WC  $\nu=0.22$ ),  $\varepsilon_1$  - відносна деформація ґратки в напрямі, перпендикулярному поверхні зразка,  $\varepsilon_2$  - відносна деформація в напрямі паралельному поверхні зразка.

Показано, що збільшення кількості пластичної складової у твердих сплавах призводить до більшого рівня залишкових напружень після імпульсної обробки (Табл.3).

Таким чином, розглянуті вище зміни властивостей твердих сплавів при електроімпульсній обробці повинні бути віднесені на рахунок генерації орієнтованих мікронапружень завдяки локально-неоднорідному прогрівові гетерофазного матеріалу. Як уже підкреслювалось, в оброблених сплавах ширина рентгеновських ліній не змінюється, тобто додаткові напруження достатньо однорідні і не збільшують дисперсію параметру ґратки. В той же час уширення ліній вихідного зразка зв'язане з розкидом величин пружної деформації і зних зерен карбиду.

Для детальнішої оцінки співвідношення між залишковими напруженнями і уширенням рентгеновських ліній проводились додаткові дослідження на модельних об'єктах, зокрема, на псевдосплаві W-Cu, а також на спеченому молібдені. Рівень залишкових напружень W-Cu оцінювали по спрощеній методиці, а саме по зміні міжплощинної віддалі  $(321)\text{CuK}_{\alpha 1}$  вздовж нормалі до поверхні розраховували суму головних напружень  $\tilde{\sigma}_1 + \tilde{\sigma}_2$ . З рис.2 видно, що вихідний сплав W-Cu, як і спечений твердий сплав, вже характеризується високим рівнем залишкових напружень ( $\sim 320\text{MPa}$ ). Лінії такого зразка уширені. Після селективного вилужнювання міді з псевдосплаву відбувається як часткова релаксація залишкових напружень, так і помітне звуження ліній (рис.2, крива 3). Після розчинення міді на поверхні зразка залишається шар чистого во: дфразу, що утворює каркас, який достатньо легко відшаровується і розтирається в порошок. При цьому параметр ґратки і ширина ліній зазнають дальших змін і наближаються до еталонних значень (рис.2, крива 2). Таким чином, залишкові напруження в псевдосплаві W-Cu,

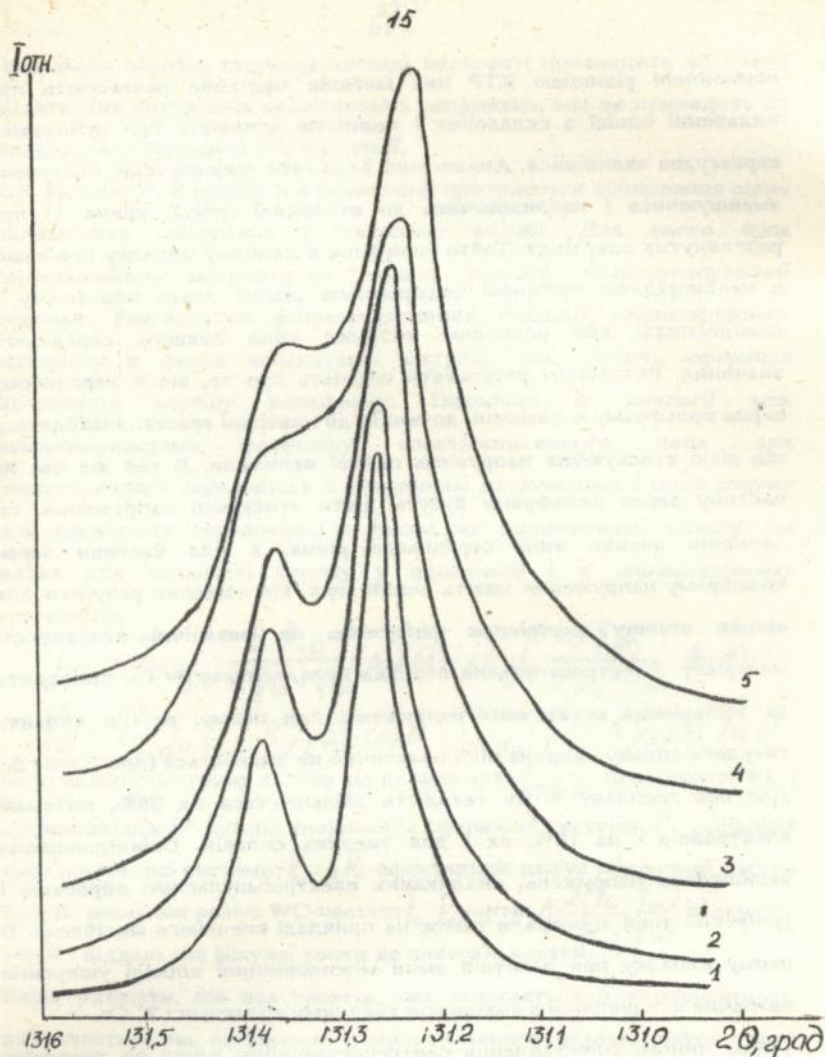


Рис.2. Профілі ліній (321) вольфраму в вихідному псевдосплаві W-Cu (4); після вилужнювання міді (3); після руйнування вольфрамового каркасу (2); для відновленого з триоксиду порошку вольфраму (1); для обробленого імпульсами струму (5).

обумовлені різницею КТР цих металів частково релаксують при видаленні однієї з складових і повністю зникають при руйнуванні каркасу, що залишився. Аналогічно веде себе ширина лінії, поступово зменшуючись і наближаючись до еталонної (рис.2, крива 1) при розглянутих операціях. Тобто уширення в данному випадку пов'язане з неоднорідною пружною деформацією різних зерен вольфраму в псевдосплаві або розкидом величин коло деякого середнього значення. Розглянуті результати свідчать про те, що в середньому зерна вольфраму в площині, дотичній до поверхні зразка, знаходяться під дією стискуючих напружень певної величини. В той же час на частину зерен вольфраму будуть діяти стискуючі напруження, по величині значно вищі середнього рівня, а для частини зерен вольфраму напруження мають інший знак. Це важливо розуміти для оцінки впливу внутрішніх напружень на механічні властивості матеріалу. Електроімпульсна обробка псевдосплаву W-Cu приводить до збільшення остаточних напружень, при цьому, як і в випадку твердого сплаву, ширина лінії практично не змінюється (рис.2, лінія 5). Для псевдосплаву W-Cu твердість збільшується на 25%, питомий електроопір - на 18%, як і для твердих сплавів. Співвідношення залишкових напружень, викликаних електроімпульсною обробкою і уширення ліній оцінювали також на прикладі спеченого молібдену. В цьому випадку при помітній зміні міжплощинної віддалі уширення незначне в порівнянні з вихідними твердими сплавами і W-Cu.

Таким чином, співставлення рентгенографічних даних по твердому сплаву і W-Cu дозволяє стверджувати наступне:

-в спечених композиційних матеріалах, в яких залишкові напруження обумовлені різницею КТР фаз, уширення рентгенівських ліній обумовлене дисперсією напружень;

-імпульсна обробка струмом високої щільності призводить до появи додаткових внутрішніх орієнтованих напружень, але не приводить до додаткового збільшення їх дисперсії.

**2.5. Розділі V.** В розділі 5 в основному проводиться обчислення рівня залишкових напружень у твердому сплаві. Для цього була запропонована математична модель процесу електроімпульсної обробки. Розглянутий репрезентативний елемент композиційного матеріалу в формі кобальтової матриці, яка містить сферичне включення карбіду вольфраму. Виходячи із аналогії між закономірностями розподілу електростатичного поля для діелектричного середовища з сферичним включенням і поля струму для провідного середовища з таким же включенням, запису ем вираз для щільності струму у включенні і в навколишньому середовищі.

$$\vec{j}_{WC} = \vec{i}_r \cdot j_0 \frac{3 \xi_{WC}}{2 \xi_{Co} + \xi_{WC}} \cdot \cos \theta - \vec{i}_\theta \cdot j_0 \frac{3 \xi_{WC}}{2 \xi_{Co} + \xi_{WC}} \cdot \sin \theta$$

$$\vec{j}_{Co} = \vec{i}_r \cdot j_0 (1 - R^3/r^3) \cdot \cos \theta - \vec{i}_\theta \cdot j_0 (1 + R^3/2r^3) \sin \theta$$

де  $j_0$  - щільність струму далеко від включення;  $\xi_{WC}, \xi_{Co}$  - провідності WC і Co відповідно;  $\theta$  - кутова координата сферичної системи;  $r$  - радіальна координата цієї системи;  $R = \lambda R$  - ефективний радіус сферичної частки WC;  $R$  - реальний радіус WC-частки;  $i_r, i_\theta$  - орти;  $\lambda = \frac{2(\xi_{Co} - \xi_{WC})}{\xi_{Co} + \xi_{WC}}$  - параметр,  $u = r - R$  - віддаль від біжучої точки до поверхні частки.

Якщо вважати, що вся енергія, яка запасається в конденсаторах, витрачається на нагрівання твердосплавного зразка, тобто такий процес квазіадиабатичний, тоді можна записати вираз:

$$q = \frac{Q}{V} = 0.24 \frac{j^2 t}{\xi} = mc \Delta T,$$

звідки:

$$\Delta T = \frac{0.24 j^2 t}{\xi \cdot \rho \cdot c} = \frac{0.24}{\xi \cdot \rho \cdot c} \int_0^{t_k} j^2(t) dt,$$

де  $\xi, \rho, c$  - питома провідність, теплоємність і густина відповідно.

Меридіональний переріз сферичного кобальтового шару був розділений на рівні сектори від 0 до 90 градусів, площа яких біла вирахована по формулі:

$$S_i = \frac{\pi (R_i + R_{i+1})(R_{i+1} - R_i)}{n},$$

де  $n$  - кількість секторів.

Напруження вираховані у відповідності з формулами

$$\sigma_1 = 4\mu\alpha_k \frac{3\lambda_k + 2\mu_k}{\lambda_k + 2\mu_k} \left\{ \frac{1}{R_k^2} \int_0^{R_k} T^2 r^2 dr - \frac{1}{2} \int_0^r T^2 r^2 dr \right\}$$

$$\sigma_2 = \sigma_3 = 2\mu\alpha_k \frac{3\lambda_k + 3\mu_k}{\lambda_k + 2\mu_k} \left\{ \frac{1}{2} \int_0^r T^2 r^2 dr + \frac{2}{3} \int_0^r T^2 r^2 dr - T \right\}$$

де  $\mu$  і  $\lambda$  - коефіцієнти Ламе;  $\alpha$  - коефіцієнт температурного розширення;  $k = \{i, e\}$ , де "i" відноситься до включення карбиду вольфраму, "e" - до кобальтової матриці.

Коефіцієнти Ламе можуть бути визначені з формул:

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}; \quad \nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}$$

Теоретично вирахований перший інваріант тензора напружень в карбідній частці після електроімпульсної обробки дорівнює 0.297 ГПа. Розрахований по експериментальних даних перший інваріант тензора напружень в вихідному твердому сплаві після спікання дорівнює 0.450 ГПа, а після електроімпульсної обробки - 0.720 ГПа, тобто рівень напружень підвищився на 0.270 ГПа. На рис.3 показана еюра трьох головних нормальних напружень в сферичному шарі кобальту в залежності від  $y=r/R$  і на границі WC-Co. Видно, що при проходженні імпульсу струму великої потужності через репрезентативний елемент твердого сплаву в сферичному шарі кобальтового прошарку виникає неоднорідне поле напружень. Причому в кобальтовому шарі і на границі WC-Co спостерігаються як напруження розтягування, так і стискування. Зі збільшенням радіальної координати напруження розтягування в кобальтовому шарі, проходячи через мінімум, досягають максимальних значень при  $y=0.075$  мкм і змінюють знак на

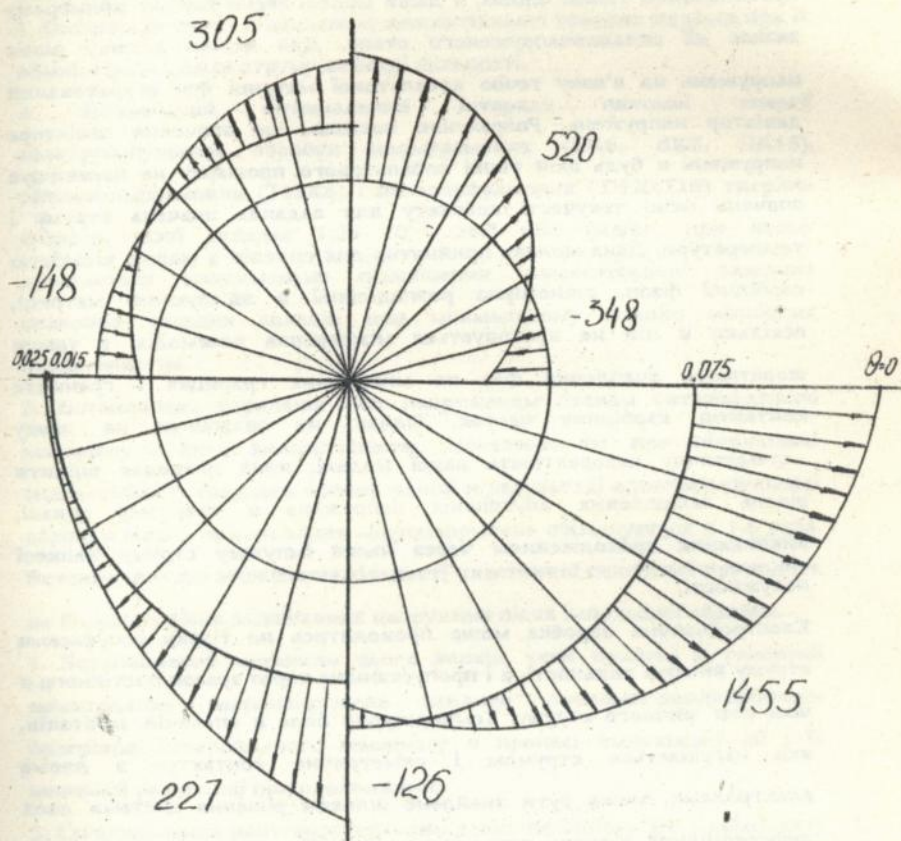


Рис.3. Епюра трьох головних нормальних напружень в сферичному шарі кобальту в залежності від  $u=r-R$  і на границі WC-Co.

протилежний. Таким чином, в даній моделі зерно карбіду вольфраму знає дії складнонапруженого стану. Для оцінки впливу рівня напружень на в'язку течію кобальтової матриці був розрахований девіатор напружень. Розрахунок показав, що значення девіатора напружень в будь якій точці кобальтового прошарку не перевищує значень межі текучесті кобальту для заданих значень струму і температури. Дана модель прийнятна для сплавів з малою кількістю карбідної фази, рівномірно розподіленої в зв'язуючій матриці, оскільки в ній не враховується міжзеренна взаємодія, а також жорсткість зчеплення фаз на міжфазних границях і границях контактів карбідних часток. Однак, не зважаючи на деяку атематичну некоректність даної моделі, вона дозволяє оцінити рівень залишкових внутрішніх напружень в твердому сплаві, викликаних проходженням через нього імпульсу струму великої потужності.

Електрофізична обробка може проводитись не тільки імпульсами струму високої щільності, а і пропусканням через зразок постійного в часі електричного струму. Температурне поле в спеченій заготовці, яка нагрівається струмом і симетрично контактує з двома електродами, може бути знайдене шляхом рішення системи двох диференціальних рівнянь теплопровідності. В даній роботі одержане аналітичне рішення поставленої задачі для випадку постійних фізичних характеристик твердосплавного зразка і сталених електродів. Також розроблена методика числового рішення рівнянь теплопровідності блоку "зразок-електроди-пуансон" при умовах врівноваження температурних залежностей властивостей вказаних об'єктів. Одержані результати переконують в перевагах нової методики, однак можна визначити області температур, для яких можна застосувати аналітичні рішення.

### Загальні висновки.

1. Виявлений ефект підвищення зносостійкості твердих сплавів при їх обробці імпульсами струму великої щільності.

2. Визначений оптимальний інтервал питомої енергії електроімпульсної обробки вольфрамових (ВК6, ВК8, ВК15), титанвольфрамових (Т15К6) і безвольфрамових (ТН20,Т16) твердих сплавів, який складає  $1.25 \cdot 10^{-3} \dots 26.3$  кВт год/кг, при якому досягається максимальне підвищення зносостійкості вихідних спечених твердих сплавів при мінімальному падінні міцнісних характеристик.

3. Встановлена кореляція між напруженим станом гетерофазного матеріалу і його зносостійкістю. Показано, що при підвищенні зносостійкості твердого сплаву вдвічі в результаті електроімпульсної обробки рівень орієнтованих мікронапружень збільшується в 1.6 раза. Встановлено, що збільшення кількості пластичної складової приводить до більшого рівня залишкових напружень після імпульсної обробки.

4. Встановлений механізм цього явища, який полягає в генерації орієнтованих мікронапружень завдяки локально-неоднорідному прогрівові гетерофазного матеріалу в процесі імпульсної дії і їх неповній релаксації при охолодженні.

5. Співставлення рентгенографічних даних по сплаву ВК і композиту W-Cu показує :

а) в спечених композиційних матеріалах, в яких залишкові внутрішні напруження обумовлені різницею КТР фаз, уширення рентгеновських ліній обумовлене дисперсією напружень;

б) імпульсна обробка призводить до появи додаткових внутрішніх напружень, але не приводить до додаткового збільшення їх дисперсії.

6. Запропонований алгоритм розрахунку температурно-напруженого стану твердого сплаву в процес електроімпульсної обробки, який

дозволяє визначати рівень залишкових напружень в гетерофазних матеріалах, що може служити раціональною основою для способу підвищення рівня експлуатаційних характеристик твердих сплавів. Запропонована також математична модель розрахунку температурних полів в моделі електрод-зразок-електрод при пропусканні через неї постійного в часі струму з врахуванням впливу температурної залежності електрофізичних і теплових характеристик матеріалів на динаміку температурних полів. Ця модель може бути з успіхом використана при розрахунках температурних полів, що виникають в результаті пропускання струму через об'єкт обробки.

**Основні результати опубліковані в наступних роботах:**

1. А.И.Райченко, Е.С.Черникова "Математическая теория электронагрева порошка совместно с проводящими ток электродами-пуансонами", Тезисы докладов III Республиканского научно-технического семинара "Электрофизические технологии в порошковой металлургии", Рига, 15-18 декабря 1986г.
2. А.И.Райченко, Е.С.Черникова "Математическая модель электрического нагрева пористого материала совместно с проводящими ток электродами-пуансонами", Порошковая металлургия, №5, 1989, с.35-41.
3. Райченко А.И., Черникова Е.С. Теоретический анализ нагрева псевдосплава при пропускании электрического тока" Порошковая металлургия, №7, 1989, с.17-19.
4. Черникова Е.С., Райченко А.И., Буренков Г.Л., Черненко Л.И. "Свойства структурных составляющих и физико-механические характеристики твердых сплавов с высоким сопротивлением абразивному износу." Тезисы V Республиканского научно-технического семинара "Электрофизические технологии в порошковой металлургии", Москва, 31 мая-2июня 1990г.
5. Райченко А.И., Черникова Е.С., Грекова М.Л., Минакова Р.В., Болжун Г.А. "Теория влияния термических напряжений на электроэрозию пористых материалов" Тезисы докладов VI Республиканского научно-технического семинара "Электрофизические технологии в порошковой металлургии", 5-7 октября 1992г.

6. Райченко А.И., Райченко А.А., Черникова Е.С. "Теория растворения твердой частицы в жидкометаллической связке при пропускании электрического тока" Тезисы докладов VI Республиканского научно-технического семинара "Электрофизические технологии в порошковой металлургии", 5-7 октября 1992г.
7. Черникова Е.С., Райченко А.И., Олевский Г.А. "Анализ электронного нагрева твердого сплава с учетом температурных зависимостей его характеристик" Порошковая металлургия, №11, 1992.
8. A.I.Raichenko, A.A.Raichenko, E.S.Chernikova "The mathematical model of the process of the dissolution of the solid particle in the liquid metal under the conducting of the electric current." Abstracts of reports of the 3rd European Conference on Advanced Materials and Processes "Euromat 93", Paris, 8-10 June 1993.
9. E.S.Chernikova, A.I.Raichenko, E.A.Olevsky "The analysis of the electric heating of the WC-Co hard-alloy under consideration of the dependence of its characteristics on the temperature". Abstracts of reports of the 3rd European Conference on Advanced Materials and Processes "Euromat 93", Paris, 8-10 June 1993.
10. A.I.Raichenko, A.A.Raichenko, E.S.Chernikova "The mathematical model of the process of the dissolution of the solid particle in the liquid metal under the conducting of the electric current " Journal de Physique IV, Colloque C7 suppl. au J. de Phys.III, vol.3, novemb.1993, p.12229-1233.
11. E.S.Chernikova, A.I.Raichenko, E.A.Olevsky "The analysis of the electric heating of the WC-Co hard-alloy under consideration of the dependence of it's characteristics on the temperature". Journal de Physique IV, Colloque C7, suppl. au J. de Phys.III, vol.3, novemb.1993, p.1235-1239.
12. А.И.Райченко, А.А.Райченко, Е.С.Черникова, А.А.Мирошніченко "Математический анализ электроконвективного растворения твердой сферы в жидком металле при пропускании электрического тока" "Магнитная электродинамика", №2, 1994.
13. A.I.Raichenko, Yu.M.Solonin, E.S.Chernikova, E.A.Olevsky "The correlation between the properties of the hard-alloys and the elastic stresses, initiated by the high-power treatment" Proc. of the European Conference on Residual Stresses., Frankfurt, Germany, 4-6 November, 1992.
14. Yu.M.Solonin, A.I.Raichenko, E.S.Chernikova, L.L.Kolomiet, E.A.Olevsky "High-power treatment of the WC-Co and W-Cu composites: structure and properties" Proc.of the International Conference on Materials by Powder Technology, PTM'93, Dresden, Germany, 23-26 March 1993.

15. Райченко А.И., Черникова Е.С., Буренков Г.Л., Черненко Л.И.  
"Способ получения твердых сплавов" А.с.1775947 СССР.

16. Yu M.Solonin, A.I.Raichenko, E.S.Chernikova, E.A.Olevsky "The hard-  
alloys structure and properties change after the high-power treatment"  
Proc.13th Plansee Seminar 1993, Vol.2 (1993), p.264-272.

Евг

457530

AB 30.064