

Інструмент, порошки, пасти

УДК 621.922.34

В. І. Лавріненко*, **А. Г. Лубнін**, **В. М. Ткач**, **І. П. Фесенко**,
В. В. Смоквина

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля
НАН України, м. Київ, Україна

*lavrinenko@ism.kiev.ua

Особливості структурної організації одношарового алмазно-гальванічного покриття для правлячого інструменту

Досліджено особливості отримання структурної організації одношарового алмазно-гальванічного покриття для правлячого інструменту, яку розглядали як орієнтацію та анізотропію алмазних зерен в структурі шару покриття і також як введення в покриття разом з крупними алмазними зернами дрібнодисперсного наповнювача, розміри частинок якого менші на два порядки. Порівняння гальванічної нікелевої зв'язки, нанесеної різними методами, за показниками орієнтації та анізотропії поверхневого шару підтвердило суттєву різницю структури. Наведено особливості алмазно-гальванічного покриття із введенням в нього мікропорошків карбиду кремнію і бору. Показано, що за рахунок технологічних методів можна впливати на структурну організацію в робочому шарі такого одношарового алмазного інструменту і спрямовано змінювати його властивості.

Ключові слова: алмазно-гальванічне покриття, правлячий інструмент, структура, структурна організація, твердість, теплопровідність.

Сучасна металообробка потребує застосування алмазно-абразивних інструментів з гарантованою зносостійкістю і сталою ріжучою здатністю. Одним з визначальних умов досягнення цього є регулярність структури робочого шару інструменту: її ізотропність або, навпаки, спрямована анізотропність. Це питання є складним і вимагає різнонаправлених підходів, що пов'язане з особливістю будови робочого шару алмазно-абразивного інструменту, а саме наявністю зв'язки з дрібним функціональним наповнювачем і суттєво крупнішим абразивним наповнювачем – алмазними зернами.

Для спеченого алмазного інструменту в реальних алмазних кругах, отриманих за стандартною технологією спікання і пресування, існує певна структурна організація робочого шару [1]. В [2] було показано, що для такого ви-

падку і робочий шар покриття, і зерна в ньому орієнтовані під кутом 45°. Це має значення для працездатності зерен, якщо враховувати напружений стан у системі зерно-зв'язка [3]. Авторами [4] показано, що структурну організацію спеченого робочого шару можна змінити, якщо орієнтація алмазних зерен в робочому шарі спеченого композита змінюється від 45° до 67–90°. Але для одношарового інструменту з алмазно-гальванічним покриттям (АГП) таких досліджень майже не проведено. Відомі є лише деякі результати [5], і вони відносяться до застосування в такому покритті лише алмазних порошків марок АС15 та АС32.

Нині, через появу на ринку високоміцних марок алмазних порошків АС200–АС400 і застосування їх в алмазному правлячому інструменті виникла необхідність в дослідженні можливостей спрямованого впливу на структуру одношарової гальванічної нікелевої зв'язки для підвищення зносостійкості такого інструменту. Тобто, застосувати певний матеріалознавчий підхід до інструменту з АГП, чого майже немає у відомих авторам публікаціях. Визначення умов утворення одношарових АГП із певною структурною організацією та спрямованим впливом на їхні фізико-механічні властивості є важливим для правильного вибору технологічних засобів, що можуть забезпечити збільшення стійкості АГП, що і було метою даної роботи.

Однією з найбільш важливих характеристик електролітично осаджених металів є мікротвердість, яка залежить від умов електроосадження: складу і природи електроліту, температури і густини струму (ik). Зі збільшенням густини струму мікротвердість так званого “блискучого” нікелю зростає, але водночас формуються напруження, що призводять до деформації розмірних параметрів на реальному інструменті, а для так званого “матового” нікелю з гарячого (50 °С) і холодного (18 °С) електролітів значення мікротвердості проходять через максимум і відповідно дорівнюють 2,5 і 2,9 ГПа при $ik = 3,5 \text{ А/дм}^2$ [5]. Іншим ключовим фактором, що визначає працездатність і довговічність інструменту є міцність зчеплення алмазоносного шару, яка погіршується зі збільшенням густини струму ik . Найкращі характеристики, за даними [5], спостерігаються у нікелю матового при використанні гарячого електроліту і при поетапному підвищенні густини катодного струму в процесі зарощування до $ik = 1 \text{ А/дм}^2$.

Для правлячого інструменту на першому етапі було проведено дослідження, що частково підтвердили викладене вище. Було розглянуто два варіанти нікелевої гальванічної зв'язки із застосуванням двох типів електролітів і формуванням двох видів гальванічної зв'язки. Для першої зв'язки, умовно названої “матовою”, за основу був взятий сульфаміно-кислий електроліт. Для другої зв'язки, умовно названої “блискучою”, за основу було взято сірчанокислий електроліт з добавками для створення блиску. Вміст елементів у зв'язці наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Елементний склад гальванічних зв'язок

Зв'язка	Вміст елементів у зв'язці, % (за масою)				
	С	О	Al	Fe	Ni
“матова”	15,50–29,01	0,46–0,59	0,02	0,02–0,03	70,50–83,85
“блискуча”	11,18–15,28	1,31–1,61	0,09	0,07–0,21	83,25–86,91

Аналіз даних табл. 1 дозволяє зробити припущення, що різний вміст елементів може спричинити відмінність у властивостях таких зв'язок. Тому було

досліджено такі важливі властивості, як мікротвердість і теплопровідність, остання – важлива для відведення тепла із зони різання через алмазні зерна і зв'язку. Теплопровідність зразків матеріалів зв'язок при кімнатній температурі визначали нестационарним методом за допомогою пристрою для вимірювання коефіцієнта теплопровідності високотеплопровідних матеріалів ИТЗ-МХТИ (МХТИ, РФ) [6]. Принцип дії пристрою ґрунтується на імпульсному (10–30 с) нагріванні зразка з наступним охолодженням його до початкової температури. При цьому тепловий потік направлений вздовж зразка від нагрівника до теплоприймача. Відносна похибка визначення коефіцієнта теплопровідності складала 5%. Зразки для вимірювань теплопровідності мали форму пластин зі шліфованими плоско-паралельними поверхнями розміром 15×15(20) мм і товщиною 0,8–1,2 мм. Перед та після вимірювань проводили повірку приладу. Повірку проводили на еталонних зразках нікелю (91±6 Вт/(м·К)) і міді (390±27 Вт/(м·К)), які входять до комплекту приладу. Результати досліджень наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Властивості гальванічних зв'язок

Зв'язка	Твердість, ГПа	Теплопровідність λ , Вт/(м·К)
“матова”	1,58–1,69	102–111
“блискуча”	3,56–3,93	72–77

Як свідчить аналіз табл. 1 і 2, матове покриття має меншу твердість, проте підвищену теплопровідність, а відтак, в залежності від умов застосування гальванічних нікелевих зв'язок можливо застосовувати відносно м'які, але високотеплопровідні зв'язки, або більш тверді, але менш теплопровідні. Підвищена твердість “блискучої” зв'язки можна пояснити введенням домішок блискоутворювача, а відчутну (у середньому в 1,43 рази) різницю у теплопровідності – збільшеним вмісту вуглецю в “матовій” зв'язці (див. табл. 1). Разом з тим, через різний вміст вуглецю, автори звернули увагу на певну впорядкованість структури цих різних зв'язок, оскільки спостерігається відмінна структурованість по напрямку протяжності (орієнтації) основної нікелевої фазової складової (рис. 1, а і 2, а).

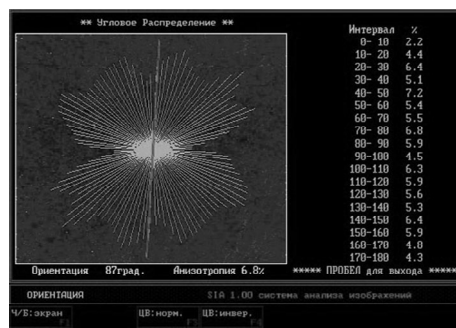
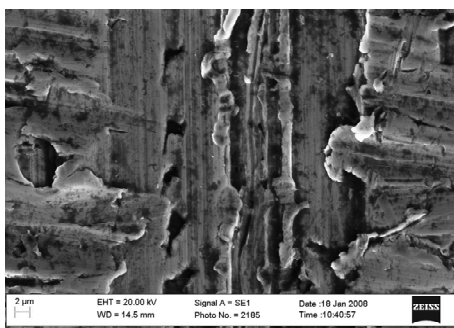


Рис. 1. Структура “матової” зв'язки (а) і її показники анізотропії та орієнтації (б).

Для оцінки показників орієнтації та анізотропії робочого шару було застосовано показники Фур'є-аналізу зображень [4]. Порівняння двох методів гальванічного нанесення нікелевої зв'язки за показниками орієнтації та анізотропії поверхневого шару підтвердило суттєву різницю їх структури. На рис. 1 наведено приклади структурованості поверхонь шліфів композитів та

показники орієнтації і анізотропії для “матової” зв’язки, а на рис. 2 – для “блискучої”. Видно, що орієнтація структури “матової” зв’язки – 87° , а “блискучої” – 17° . Тобто, на думку авторів, на теплопровідність АГП впливають як зміна вмісту вуглецю в покритті, так і наявність структурованості покриття у напрямку відведення тепла, а відтак і теплопровідність “матової” зв’язки є більшою. Загалом це означає, що технологічними методами можна вплинути на структурну організацію робочого шару такого одношарового алмазного інструменту і змінити його властивості.

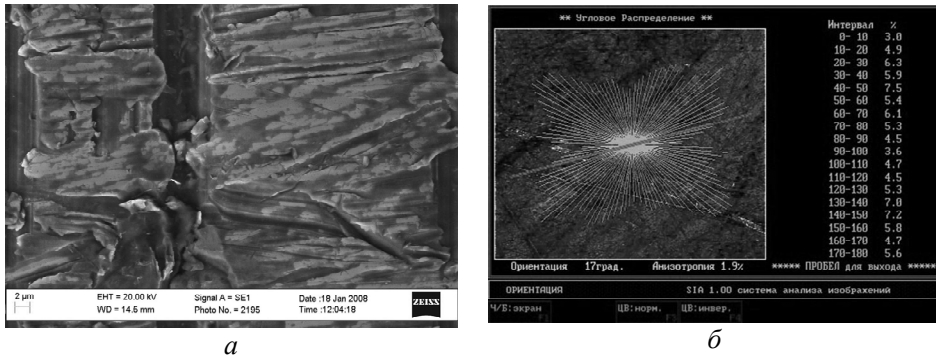


Рис. 2. Структура “блискучої” зв’язки (а) та її показники анізотропії та орієнтації (б).

Для досліджень АГП на зносостійкість було застосовано алмазні порошки марки 160Т зернистістю 400/315. Попередньо зі сталеві фолги було виготовлено диски з елементами, що виступали. Потім на кожні два таких елементи наклеювали електропровідним клеєм десять кристалів. Отвердження клею провадили у термошафі за температури 130°C , зарощування алмазних зерен – у ванні із сірковокислим нікелем за густини струму $0,5\text{ А/дм}^2$ (рН електроліту – 4,0–4,5) протягом 7 діб при неперервному обертанні диску. Після зарощування алмазних зерен нікелем пластини відрізали від диску і напаявали на циліндричні державки для проведення випробувань на зносостійкість. Випробування на зносостійкість провадили на круглошліфувальному верстаті мод. ЗБ151: правили абразивний круг ПП 600×63×305 24А40СМ27К6 за режимами правки: швидкість обертання круга – 35 м/с, подовжня подача – 1,0 м/хв, поперечна подача – 0,02 мм/хід (табл. 3).

Встановлено, що алмазні зерна у “матовій” зв’язці мають менший знос, аніж ті, що закріплені у “блискучій” зв’язці (див. табл. 3). У середньому збільшення зносостійкості алмазних зерен у “матовій” зв’язці складає 1,42. Як показано вище, теплопровідність “матової” зв’язки перевищує теплопровідність “блискучої” в 1,43 рази. Тобто значення майже співпадають, а це означає, що коли основне навантаження припадає на алмазні зерна, то краще відведення тепла з зони обробки дозволяє підвищити їх зносостійкість. Але, можливо, при подальшому підвищенні навантаження на алмазне зерно більше значення матиме утримання алмазних зерен в більш твердій зв’язці.

Таблиця 3. Відносні витрати алмазних порошків в зразках АГП з різними зв’язками при правленні абразивного круга

Зв’язка покриття АГП	Відносні витрати алмазних порошків, мг/кг
“матова”	7,19–10,24
“блискуча”	11,23–13,62

Також було проведено дослідження особливостей структурної організації одношарового АГП зі співосадженням мікропорошків абразиву. Для нанесення покриття було вибрано сірчаноокислий нікелевий електроліт. Для отримання більш достовірних результатів застосовували алмазні порошки АС250Т вузького діапазону зернистості – 630/600. Надалі зі сталеві фольги було виготовлено диски з десятима елементами, що виступають, на які наклеювали електропровідним клеєм по десять кристалів алмазу АС250Т 630/600. У якості співосадженого у нікелеву зв'язку абразиву було вибрано карбід кремнію зеленого зернистістю 5/0. Зарощування алмазних зерен нікелем провадили у ванні, в яку було додано мікропорошок КЗ 5/0 у кількості 20 г/л при густині струму 1,0 А/дм² (рН електроліту – 4,0–4,5).

Осадження мікропорошку відбувалося за наступною схемою: спочатку протягом певного часу осаджували при безперервному перемішуванні мікропорошку та обертанні диску з алмазними зернами, потім протягом декількох хвилин осаджували при зупиненому диску і без перемішування. За добу робили біля сотні зупинок обертання диску і насосу для перемішування мікропорошку. Зарощування алмазних зерен нікелем з мікропорошком відбувалося протягом 7 діб. Таким чином, в шарі нікелю товщиною 2,0–2,5 мм осаджували до 800 шарів мікропорошку.

Після зарощування алмазних зерен нікелем з мікропорошком пластини відрізали від диску і напаявали на циліндричні державки для проведення випробування на зносостійкість (табл. 4) на круглошліфувальному верстаті за умовами, які викладено вище.

Таблиця 4. Відносні витрати алмазних порошків АС250Т 630/500 в зразках АГП зі співосадженням мікропорошків карбиду кремнію 5/0 при правленні абразивного круга

Зразок	Відносні витрати алмазних порошків, мг/кг, в зразках АГП		Коефіцієнт підвищення зносостійкості
	без мікропорошку	з мікропорошком	
1	6,52	5,33	1,22
2	8,36	7,25	1,15
3	4,70	2,69	1,75

З табл. 4 видно, що зміна структурної організації у одношаровому АГП зі співосадженням мікропорошків карбиду кремнію зеленого дозволяє підвищити зносостійкість АГП у 1,15–1,75 рази.

Одночасно було досліджено введення в покриття АГП мікропорошків карбиду бору тієї ж зернистості, що і карбиду кремнію (5/0) у кількості 20 г/л. Зображення мікроструктури і елементний склад різних варіантів АГП наведено в табл. 5.

Аналіз табл. 5 свідчить про наступне. Твердість “матового” АГП як з мікропорошком карбиду кремнію (SiC), так без нього, є меншою за аналогічні “блискучі” АГП. У “матовому” АГП більше кисню та карбону, і менше нікелю. Це частково збігається з даними табл. 1. Введення SiC збільшує вміст карбону в АГП і в обох випадках зменшує твердість. Характерним є те, що в “матовому” АГП на поверхні, навіть у відбитку виміру твердості, спостерігаються рівномірно розташовані частинки мікропорошку SiC (рис. 3, а), чого майже немає у відбитку “блискучого” АГП (рис. 3, б). Тобто в “матовому” АГП розподіл мікропорошку в структурі є більш рівномірним, що і дозволяє збільшити його зносостійкість.

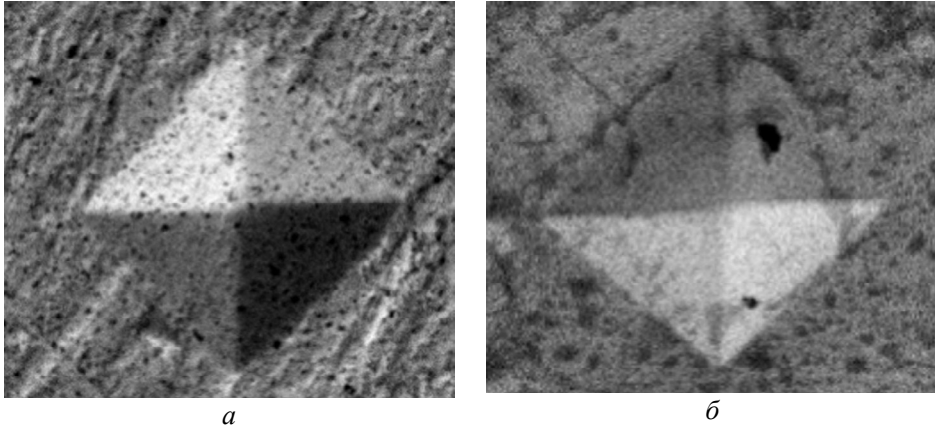


Рис. 3. Наявність мікропорошку карбіду кремнію зеленого на поверхні (у відбитку виміру твердості) “матової” (а) і “блискучої” зв’язки (б).

Таблиця 5. Мікроструктура, елементний склад і твердість АГП без введення та із введенням мікропорошків карбідів кремнію (SiC) і бору (B₄C)

Покриття	Мікроструктура покриття	Вміст елементів, % (за масою)					Твердість, ГПа
		C	O	Si	Fe	Ni	
“блискуче”		3,66	0,20	0,01	0,00	96,13	4,41
“матове”		5,85	1,67	0,35	0,58	91,54	3,16
“блискуче” з 20 г/л SiC		4,68	0,45	0,17	0,07	94,63	3,80
“матове” з 20 г/л SiC		7,43	1,49	3,72	0,39	86,94	3,05
“блискуче” з 20 г/л B ₄ C		13,57	2,83	0,22	5,64	77,29	–
“матове” з 20 г/л B ₄ C		26,90	4,10	0,23	4,96	63,61	–

Особливостями співосадження в АГП мікропорошку карбіду бору (див. табл. 5) є те, що у цьому випадку формується своєрідна “рихла” поверхня, яка навіть не дає можливості виміряти твердість покриття через відсутність чіткого відбитка. Такі поверхні містять підвищений вміст карбону і кисню. Підвищена кількість кисню, ймовірно, викликана утворенням склоподібного B_2O_3 , що, як наслідок, і обумовлює таку “рихлу” поверхню (крім того відбувається дифузія заліза з підкладки, на яку наносили нікелеве покриття). Все це вказує на те, що співосадження карбіду бору в АГП є недоцільним.

ВИСНОВКИ

За рахунок технологічних методів можна змінювати структурну організацію робочого шару одношарового гальванічного алмазного інструменту і спрямовано змінювати його властивості.

Одержане одношарове АГП для правлячого інструменту має особливості структурної організації, такі як орієнтація та анізотропія алмазних зерен у структурі шару покриття, а також введення в покриття разом з крупними алмазними зернами ще і дрібнодисперсного наповнювача, розміри частинок якого менші на два порядки.

Встановлено, що “магові” та “блискучі” АГП мають різну структурованість і суттєво різняться за орієнтацією шару покриття. “Матове” покриття є менш твердим, але більш теплопровідним, “блискуче” покриття має більшу твердість, але суттєво меншу теплопровідність.

Визначено, чому співосадження мікропорошку карбіду кремнію зеленого дозволяє підвищити зносостійкість АГП у 1,15–1,75 рази. У “матовому” АГП на поверхні, навіть у відбитку піраміди при вимірюванні твердості, спостерігаються рівномірно розташовані частинки мікропорошку карбіду кремнію, чого майже немає у відбитку “блискучого” АГП, тобто в “матовому” АГП розподіл мікропорошку в структурі є більш рівномірним, що і дозволяє збільшити його зносостійкість.

V. I. Lavrinenko, [A. G. Lubnin](#), V. M. Tkach, I. P. Fesenko,
V. V. Smokvyna
Bakul Institute for Superhard Materials,
National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
Features of the structural organization of a single-layer
diamond-galvanic coating for the ruling tool

The peculiarities of obtaining the structural organization of a single-layer diamond-galvanic coating for the ruling tool, which was considered as orientation and anisotropy of diamond grains in the structure of the coating layer and also as introduction into the coating together with large diamond grains of fine filler, particle size smaller by two orders of magnitude. Comparison of the galvanic nickel bond, applied by different methods, in terms of orientation and anisotropy of the surface layer confirmed a significant difference in structure. The peculiarities of diamond-galvanic coating with the introduction of micropowders of silicon carbide and boron carbide are given. It is shown that due to technological methods it is possible to influence the structural organization in the working layer of such a single-layer diamond tool and aimed to change its properties.

Keywords: diamond-galvanic coating, ruling tool, structure, structural organization, hardness, thermal conductivity.

1. Лавриненко В.И., Федоренко В.Т. Технологические и энергетические аспекты учета и обеспечения структурной организации в рабочем слое шлифовальных кругов из СТМ. *Сверхтв. материалы*. 2004. № 4. С. 89–95.

2. Лавриненко В.И. Угол направления действия касательных напряжений – ключ к инструменту из СТМ. *Сверхтв. материалы*. 2002. № 2. С.71–76.
3. Лавриненко В.И., Кулаковский В.Н. Напряжения, возникающие в зоне контакта зерно–связка с учетом наклона зерен. *Сверхтв. материалы*. 2002. № 4. С. 71–75.
4. Лавриненко В.И., Ткач В.Н., Сытник Б.В., Пасичный О.О. Технологические аспекты изменения структурной ориентации рабочего слоя кругов из СТМ. *Сверхтв. материалы*. 2008. № 2. С. 87–91.
5. Сверхтвердые материалы. Получение и применение. Монограф. в 6 т. / под общ. ред. Н.В. Новикова. Т. 3. Композиционные инструментальные материалы. Киев: ИСМ им. В.М. Бакуля НАН Украины, 2005. 280 с.
6. Фесенко І.П., Туркевич В.З., Часник В.І., Прокопів М.М., Петруша І.А., Пріхна Т.О., Кайдаш О.М., Бочечка О.О., Сергієнко Н.В., Сербенюк Т.Б., Мошіль В.Є., Харченко О.В., Свердун В.Б., Лавріненко В.І., Ткач В.М., Осіпов О.С., Івженко В.В., Подоба О.П., Марченко А.А., Гадзира М.П., Давидчук Н.К., Олійник Г.С., Згалат-Лозинський О.Б., Букетов А.В., Туз Ю.М., Кисла Г.П., Струніна Ю.О., Стрельчук В.В., Коломис О.Ф., Подоба Я.О., Відута Л.В., Нечитайло В.Б., Геворкян Е.С., Часник Д.В., Мартинюк Я.В. Теплопровідність надтвердих матеріалів: Теоретична оцінка. Експериментальне визначення. Корсунь-Шевченківський: ФОП Майдаченко І.В., 2018. 28 с.

Надійшла до редакції 06.07.20

Після доопрацювання 11.11.20

Прийнята до опублікування 17.11.20