

УДК 621.793.7

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.261218.25.561

ВПЛИВ СПІВВІДНОШЕННЯ КОМПОНЕНТІВ КОМПОЗИЦІЙНОГО ПОКРИТТЯ НА ОСНОВІ МІДІ Й ОКИСУ АЛЮМІНІЮ НА ТЕПЛО ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ, ЗНОСОСТІЙКІСТЬ І МІКРОТВЕРДІСТЬ

ВАШКЕВИЧ Ф. Ф.¹, к. т. н, доц.,
СПІЛЬНИК А. Я.^{2*}, к. т. н, доц.,
ЗАГОРОДНІЙ О. Б.³, ст. викл.,
ЖУРАВЕЛЬ В. І.⁴, ст. н. с.

¹Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-98-82, ORCID ID: 0000-0003-0962-0890.

^{2*} Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 910-49-47, +38 (098) 600-32-58, e-mail: anatolyspl@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4931-9675.

³ Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-98-82, ORCID ID: 0000-0002-4158-1740.

⁴ Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-98-82, e-mail: Zhuravel39@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-9501-5106.

Анотація. Постановка проблеми. Проблеми під час тертя та зношування виникають головним чином у разі використанні деталей в екстремальних умовах. Найбільш повно їх вирішує металокераміка. Але конструктори не завжди мають у своєму розпорядженні довідкові дані щодо вибору металокераміки. У статті досліджуються такі властивості як твердість, зносостійкість та теплотехнічні властивості металокерамічного покриття на основі міді та окису алюмінію (Cu + Al₂O₃). **Методика.** Твердість оцінювали, вимірюючи мікротвердість на приладі ПМТ-3 з навантаженням 0,2 кг, уколи виконували із кроком 0,1 мм. Для визначення мікротвердості виготовляли зразки типу «металізаційна фігура» на стандартизованих режимах роботи плазмотрона. Із них зразків виготовляли шліфи для досліджень. Зносостійкість оцінювалась часом, за який відшароване покриття товщиною 1 мм прошивається абразивним матеріалом. Абразивний матеріал – електрокорунд крупністю 100...200 мкм, який подавався стиснутим повітрям під тиском 0,6 МПа. Відстань від сопла до покриття складала 10 мм, а витрати абразиву 6,4·10⁻⁴ кг/с. Для визначення коефіцієнта теплопровідності в інтервалі температур 100...700 °С метод пластини. Для випробування на термічну стійкість – метод попереминого нагріву та різкого охолодження зразків струменем стиснутого повітря за режимом: 20... 900...20 °С. Для вимірювання об'ємного опору використовували електронний прилад типу Е6-3, а електроміцність визначали за допомогою апарата АИИ-70. **Результати.** Твердість композиційного покриття Cu + Al₂O₃ збільшується майже у 6,6 раза за збільшення відсоткового складу Al₂O₃ до 90 %. Зі збільшенням відстані від поверхні напиленого покриття в глибину мікротвердість зменшується. При цьому крутизна падіння для покриттів із більшим у містом оксиду алюмінію більша, ніж для покриттів із малим умістом кераміки. Зносостійкість покриттів перебуває в пропорційній залежності від мікротвердості. Зі збільшенням відсоткового вмісту міді в покритті коефіцієнт теплопровідності збільшується до теплопровідності міді. Коливання коефіцієнта теплопровідності залежить від товщини покриття. Термостійкість плазмових покриттів максимальна тоді, коли кількість керамічної (Al₂O₃) і металеві (Cu) складових приблизно однакова. Таке ж співвідношення можна використовувати не тільки в захисному, а і в електроізоляційному покритті. **Наукова новизна.** Значно розширена інформація про технологічні властивості покриттів на основі міді та кераміки. **Практична значимість.** Результати дослідження можуть служити довідковим матеріалом для конструкторів та технологів машинобудівних підприємств.

Ключові слова: керамічний композитний матеріал; плазмове напилення; теплозахисне покриття; тепло- та електротехнічні властивості; зносостійкість; мікротвердість

ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ КОМПОЗИЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ МЕДИ И ОКИСИ АЛЮМИНИЯ НА ТЕПЛО И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ И МИКРОТВЕРДОСТЬ

ВАШКЕВИЧ Ф. Ф.¹, к. т. н, доц.,
СПИЛЬНИК А. Я.^{2*}, к. т. н, доц.,

ЗАГОРОДНИЙ А. Б.³, *ст. препод.*,
ЖУРАВЕЛЬ В. И.⁴, *ст. н. с.*

¹Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днипро, Украина, тел. +38 (0562) 46-98-82, ORCID ID: 0000-0003-0962-0890.

^{2*} Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днипро, Украина, тел. +38 (050) 910-49-47, +38 (098) 600-32-58 e-mail: anatolyspl@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4931-9675.

³ Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днипро, Украина, тел. +38 (0562) 46-98-82, ORCID ID: 0000-0002-4158-1740.

⁴ Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днипро, Украина, тел. +38 (0562) 46-98-82, e-mail: zhuravel.39@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-9501-5106

Аннотация. Постановка проблемы. Проблемы в области трения и износа возникают, главным образом, при использовании деталей в экстремальных условиях. Наиболее полно их решает металлокерамика. Но конструкторы не всегда располагают справочными данными по выбору металлокерамики. В данной работе исследуются такие свойства как твердость, износостойкость и теплотехнические свойства металлокерамического покрытия на основе меди и окиси алюминия ($Cu + Al_2O_3$). **Методика.** Твердость оценивали, измеряя микротвердость на приборе ПМТ-3 с нагрузкой 0,2 кг, уколы выполняли с шагом 0,1 мм. Для определения микротвердости изготавливали образцы типа «металлизационная фигура» на стандартизированных режимах работы плазмотрона. Из них изготавливали шлифы для исследований. Износостойкость оценивалась временем, за которое отслоение покрытия толщиной 1 мм прошивается абразивным материалом. Абразивный материал – электрокорунд крупностью 100...200 мкм, который подавался сжатым воздухом под давлением 0,6 МПа. Расстояние от сопла до покрытия составляло 10 мм, а расход абразива $6,4 \cdot 10^{-4}$ кг/с. Для определения коэффициента теплопроводности в интервале температур 100...700 °С применяли метод пластины. Для испытания на термическую устойчивость – метод попеременного нагрева и резкого охлаждения образцов струей сжатого воздуха по режиму: 20...900...20 °С. При измерении объемного сопротивления использовали электронный прибор типа Е6-3, а электропрочность определяли с помощью аппарата АИИ-70. **Результаты.** Твердость композиционного покрытия $Cu + Al_2O_3$ увеличивается до 6,6 раза при увеличении процентного состава $Cu + Al_2O_3$ до 90 %. С увеличением расстояния от поверхности напыленного покрытия в глубину микротвердость уменьшается. При этом крутизна падения для покрытий с большим содержанием окиси алюминия больше, чем для покрытий с малым содержанием керамики. Износостойкость покрытий находится в пропорциональной зависимости от микротвердости. С увеличением процентного содержания меди в покрытии коэффициент теплопроводности увеличивается до теплопроводности меди. Колебания коэффициента теплопроводности зависят от толщины покрытия. Термостойкость плазменных покрытий максимальна тогда, когда количество керамической ($Cu + Al_2O_3$) и металлической (Cu) составляющих примерно одинаково. Такое же соотношение можно использовать не только в защитном, но и в электроизоляционном покрытии. **Научная новизна.** Значительно расширена информация о технологических свойствах покрытий на основе меди и керамики. **Практическая значимость.** Результаты исследования могут служить справочным материалом для конструкторов и технологов машиностроительных предприятий.

Ключевые слова: керамический композитный материал; плазменное напыление; теплозащитное покрытие; тепло-и электротехнические свойства; износостойкость; микротвердость

INFLUENCE OF THE RELATIONSHIP BETWEEN COMPONENT COMPOSITIONS ON BASIS OF MINE AND OXIDE ALUMINUM ON HEAT AND ELECTRICAL ENGINEERING, PROPERTIES AND MICROTILITY

VASHKEVICH F.F.¹, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,
SPILNYK A.Ya.^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,
ZAHORODNYI O.B.³, *Assist.*,
ZHURAVEL V.I.⁴, *Sen. Res. Assist.*

¹Department of Materials Science and Material Processing, State Higher Education Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-98-82, ORCID ID: 0000-0003-0962-0890.

^{2*} Department of Materials Science and Material Processing, State Higher Education Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (050) 910-49-47, +38 (098) 600-32-58, e-mail: anatolyspl@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4931-9675.

³ Department of Materials Science and Material Processing, State Higher Education Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel +38 (0562) 46-98-82, ORCID ID: 0000-0002-4158-1740.

⁴. Department of Materials Science and Material Processing, State Higher Education Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel.+38 (0562) 46-98-82, e-mail: zhuravel.39@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-9501-5106

Abstract. Problem statement. Problematic issues in the field of friction and wear occur mainly when used in extreme conditions of work parts. It increasingly meets the requirements of metal ceramics. But designers do not always have reference data on the selected metal ceramics. In this work, such properties as hardness, wear resistance and thermal properties of metal-ceramic coating on the basis of copper and aluminum oxide are investigated. (Cu + Al₂O₃). **Methodology.** The hardness was evaluated by measuring the microhardness of the PMT-3 device with a load of 0,2 kg, the incisions were carried out in a step of 0,1 mm. To determine the microhardness, samples of the type "metallization figure" were made on the standardized modes of the plasma torch. From these specimens, research slabs were made. Wear resistance was estimated by the time, for which the layered coating with a thickness of 1 mm is stitched with abrasive material. The abrasive material is an electroporation of 100...200 microns in diameter, which was fed with compressed air at a pressure of 0,6 MPa. The distance from the nozzle to the coating was 10 mm, and the abrasive costs 6,4·10⁻⁴ kg/s. The plate method was used to determine the thermal conductivity in the temperature range of 100...700 °C. For the thermal stability test, the method of alternating heating and sharp cooling of the samples by compressed air jet of the regime was used: 20...900...20 °C. When measuring the volumetric resistance, an electronic unit of type E6-3 was used, and the electrodilivity was determined using the АИИ-70 apparatus. **Results.** The hardness of the composite coating Cu + Al₂O₃ increases to 6,6 times with an increase in the percentage of Cu + Al₂O₃ to 90 %. With increasing distance from the surface of the spray coating in depth, the microhardness decreases. In this case, the steepness of the fall for coatings with a higher content of aluminum oxide than for coatings with low potassium content. The durability of the coatings is proportional to the microhardness, with the increase in the percentage of copper in the coating, the coefficient of thermal conductivity increases to the thermal conductivity of copper. Fluctuation of the coefficient of thermal conductivity depends on the thickness of the coating. Thermal stability of plasma coatings is maximal when the amount of ceramic (Cu + Al₂O₃) and metal (Cu) components is approximately the same. The same ratio can be used not only in the protective, but also in the electrical insulation. **Scientific novelty.** Significantly expanded information on the technological properties of coatings based on copper and ceramics. **Practical significance.** The results of the study can serve as reference material for designers and technologists of machine-building enterprises.

Keywords: ceramic composite material; plasma spraying; heat shielding; heat and electrotechnical properties; wear resistance; microhardness

Постановка проблеми

Проблеми у процесі тертя та зношування виникають головним чином у разі використання деталей в екстремальних умовах – за дуже високої температури глибокому вакуумі, в контакті з розплавленими металами, а також у сильно абразивному середовищі. Вибір матеріалу при цьому доволі складний. Ці проблеми здатні вирішити металокераміка. Але конструктори не завжди мають у своєму розпорядженні довідкові дані щодо вибраної металокераміки [1–4]. У статті досліджуються такі властивості як твердість, зносостійкість та теплотехнічні властивості металокерамічного покриття на основі міді та окису алюмінію (Cu + Al₂O₃).

Матеріали та методи дослідження

Матеріалом для дослідження стало металокерамічне покриття на основі міді та окису алюмінію (Cu + Al₂O₃). В силу специфіки напилених покриттів (пористість, невелика товщина) твердість оцінювали, вимірюючи мікротвердість на приладі ПМТ-3 з навантаженням 0,2 кг, уколи виконували з кроком 0,1 мм. Для визначення мікротвердості виготовляли зразки типу «металізаційна фігура» на стандартизованих режимах роботи плазмотрона. Зі зразків виготовляли шліфи для досліджень. Змінним параметром у дослідженнях мікротвердості був склад покриття, який варіював від 90 % міді і 10 % окису алюмінію до 10 % міді та 90 % окису алюмінію. Паралельно з дослідженнями мікротвердості

проводили дослідження зносостійкості напиленого покриття. Зносостійкість оцінювали часом, за який відшароване покриття товщиною 1 мм прошивається абразивним матеріалом. Як абразивний матеріал використовувався електрокорунд крупністю 100...200 мкм, який подавали стиснутим повітрям під тиском 0,6 МПа. Відстань від сопла до покриття складала 10 мм, а витрати абразиву 6,4·10⁻⁴ кг/с. Для визначення коефіцієнта теплопровідності композиційного покриття в інтервалі температур 100...700 °C застосовували метод пластини. Цей метод дозволяв замірювати теплопровідність тонких покриттів. Для випробування на термічну стійкість – метод попереминого нагріву та різкого охолодження зразків струменем стиснутого повітря за режимом: 20...900...20 °C. Для вимірювання об'ємного опору використовували електронний прилад типу Е6-3, а електроміцність визначали за допомогою апарата АИИ-70.

Результати та їх обговорення

Наведені нижче результати досліджень показують вплив відсоткового вмісту міді в композиції Cu + Al₂O₃ на його твердість та зносостійкість. Результати дослідження твердості напиленого покриття показані в таблиці 1.

Вплив окису алюмінію в композиційному покритті Cu + Al₂O₃ на зносостійкість видно по кривій 1.

Таблиця 1

Вплив вмісту окису алюмінію на мікротвердість композиційного покриття Cu + Al₂O₃ / Influence of the content of aluminum oxide on the microhardness of the composition coating of Cu + Al₂O₃

Співвідношення міді та окису алюмінію в композиційному покритті	Cu	90	80	70	60	50	40	30	20	10
	Al ₂ O ₃	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Середня мікротвердість, Н _μ 10 ⁻⁵ , Н/м ²		185	259	377	544	768	821	942	1120	1225

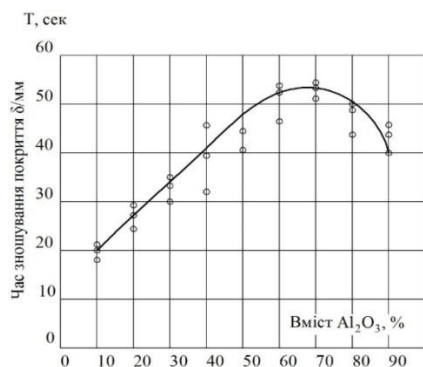


Рис. 1. Вплив вмісту окису алюмінію на зносостійкість композиційного покриття Cu + Al₂O₃ / Fig. 1. Influence of the content of aluminum oxide on the wear resistance of the composite coating Cu + Al₂O₃

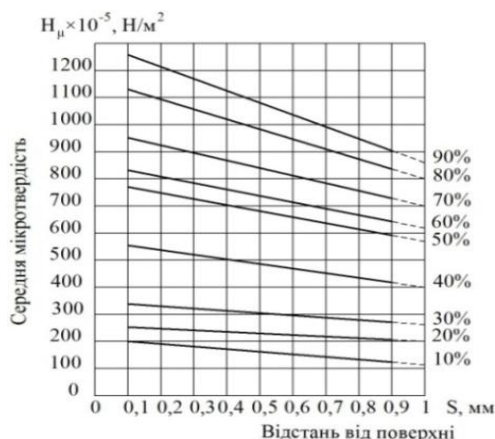


Рис. 2. Зміна мікротвердості композиційного покриття Cu+Al₂O₃ по висоті покриття залежно від відсоткового вмісту окису алюмінію в покритті / Fig. 2. Change in the microhardness of the composition coating of Cu + Al₂O₃. At the height of the coating, depending on the percentage of aluminum oxide in the coating

Узагальнюючи дослідження щодо зносостійкості плазмового покриття, можна дійти висновку, що мікротвердість збільшується зі збільшенням відсоткового вмісту окису алюмінію. Цю залежність можна пояснити тим, що зі збільшенням кількості твердих включень у вигляді частинок окису алюмінію в мідному покритті вони стають перешкодою проникненню алмазного наконечника під час вимірюванні твердості.

Зі збільшенням відстані від поверхні напиленого покриття в глибину мікротвердість зменшується (рис. 2). При цьому крутизна падіння для покриттів із більшим умістом окису алюмінію більша, ніж для покриттів із малим умістом кераміки. Така залежність існує тому, що сам оксид алюмінію має дві модифікації γ-Al₂O₃ і α-Al₂O₃. Остання має більш високу твердість.

Наслідком високої швидкості охолодження тонкого шару, що прилип до металевої поверхні, стає те, що γ-Al₂O₃ утворюється швидше, ніж α-Al₂O₃. Із приближенням до поверхні, тобто зі збільшенням товщини покриття, теплопровідність його зменшується, це добра передумова для утворення α-Al₂O₃. Зі збільшенням відсоткового вмісту окису алюмінію в покритті вірогідність утворення α-Al₂O₃ збільшується.

Зносостійкість покриттів перебуває в пропорційній залежності від мікротвердості. А саме, збільшення мікротвердості покриттів викликає збільшення зносостійкості, тобто зі збільшенням відсоткового вмісту окису алюмінію в композиції Cu + Al₂O₃ збільшується його зносостійкість.

Ця залежність справедлива для тих покриттів, вміст оксиду алюмінію в яких не більш 70 %. Подальше збільшення вмісту оксиду алюмінію спричинює погіршення зносостійкості. Така залежність пояснюється характером руйнування, аналогічного тому, яке відбувається під час зношування твердих сплавів типу ВК і ТК. Коли в покритті кількість твердих включень невелика, характер зношування визначається стиранням або вимиванням струменем абразивного матеріалу м'якої мідної основи з наступним видаленням і твердих включень.

Якщо кількість твердих включень велика, понад 70 %, то через крихкість поверхневого шару відбувається процес руйнування, який спричинює різке зниження зносостійкості композиційного покриття на основі міді та оксиду алюмінію. А тому у разі використання композиційного покриття на основі міді та оксиду алюмінію для захисту від абразивного зношування не слід брати композиції, в яких вміст оксиду алюмінію перевищує 70 %.

Цю композицію можна з успіхом використовувати не тільки як зносостійку, і як теплоелектроізоляційну. Але для цього вона повинна мати високі теплоелектроізоляційні властивості, такі як теплопровідність, термостійкість, електропровідність та електроміцність.

Результати досліджень впливу співвідношення компонентів покриття на коефіцієнт

теплопровідності та термостійкості зведені в таблицю 2.

Таблиця 2

Вплив співвідношення компонентів покриття Cu + Al₂O₃ на коефіцієнт теплопровідності і термостійкість / Influence of the ratio of the components of the coating Cu + Al₂O₃ on the coefficient of thermal conductivity and heat resistance

Склад покриття	Товщина покриття	Коефіцієнт теплопровідності ккал/м год град за температури, (°C)							Термостійкість у циклах*
		100	200	300	400	500	600	700	
20 % Cu +	0,3	0,96	1,15	1,30	1,49	1,68	1,86	2,10	11/15
80 %	0,2	1,20	1,32	1,46	1,64	1,83	2,03	2,26	10/14
Al ₂ O ₃	0,1	1,22	1,42	1,60	1,80	2,00	2,22	2,50	6/8
40 % Cu +	0,3	16,10	16,20	16,80	17,70	18,90	19,70	21,60	18/21
60%	0,2	17,00	17,10	17,80	18,60	19,70	21,00	22,70	17/19
Al ₂ O ₃	0,1	18,00	18,60	19,20	20,10	21,20	22,30	23,50	13/15
60 % Cu +	0,3	30,23	30,28	30,36	30,46	30,58	30,71	31,05	17/20
40 %	0,2	30,27	30,35	30,44	30,55	30,68	30,93	31,33	15/18
Al ₂ O ₃	0,1	30,03	30,42	30,56	30,73	30,95	31,19	31,35	14/15
80 % Cu +	0,3	94,30	92,60	91,30	89,70	88,70	87,80	87,00	15/17
20 %	0,2	95,60	93,60	92,30	91,80	89,60	88,70	87,80	14/16
Al ₂ O ₃	0,1	96,70	94,70	93,00	91,50	90,30	89,20	88,30	13/15

*В чисельнику – термостійкість покриттів за плазм твірного газу азоту, в знаменнику – аргону

Зі збільшенням відсоткового вмісту міді в покритті коефіцієнт теплопровідності збільшується до теплопровідності міді. Коливання коефіцієнта теплопровідності залежно від товщини можна пояснити зміною кількості пор у покритті. Чим товще покриття, тим більше в покритті пор, що затримують тепловий потік.

Термостійкість плазмових покриттів максимальна тоді, коли кількість керамічної (Al₂O₃) і металевої (Cu) складових приблизно однакова. Для оцінювання електроізоляційних властивостей покриттів проведено дослідження залежності електропровідності та електроміцності від вмісту компонентів. Тільки покриття з умістом понад 50 % об'ємних Al₂O₃ показали різке збільшення питомого об'ємного електроопору, величина якого досягала значень 10⁸ Ом/см, зі зростанням вмісту Al₂O₃.

Збільшення відсоткового вмісту оксиду алюмінію в покритті викликає зростання напруги пробою впритул до максимального 3 кВ (до 90 % Al₂O₃ + 10 % Cu) за товщини покриття 0,4...0,5 мм (рис. 3).

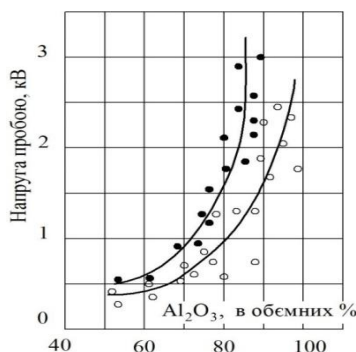


Рис. 3. Зміна електроізоляційних властивостей композиційного покриття Cu + Al₂O₃ залежно від складу керамічного компонента / Fig. 3. Change of electrical insulating properties of the composition coating of Cu + Al₂O₃ depending on the composition of the ceramic component

Подальше збільшення товщини покриття не дає бажаного зростання напруги пробою.

Тільки наступна обробка покриттів (просичування електроізоляційними матеріалами ФС-1, Т-11) дозволяє збільшити напругу пробою майже вдвічі та довести її до 6 кВ.

Таким чином, якщо використовувати композиційне покриття як електроізоляційне, необхідно складати композицію (50 % Cu + 50 % Al₂O₃) і використовувати не тільки як захисне покриття, і як підшар для нанесення чистої кераміки типу Al₂O₃ або ZrO₂.

Висновки

1. Твердість композиційного покриття Cu + Al₂O₃ збільшується до 6,6 раза за збільшення відсоткового складу Al₂O₃ до 90 %.

2. Зі збільшенням відстані від поверхні напиленого покриття в глибину мікротвердість зменшується. При цьому крутизна падіння для покриттів із більшим умістом оксиду алюмінію більша, ніж для покриттів із малим умістом кераміки.

3. Зносостійкість покриттів перебуває в пропорційній залежності від мікротвердості, для захисту від абразивного зношування не слід використовувати композиції, в яких вміст оксиду алюмінію перевищує 70 %.

4. Зі збільшенням відсоткового вмісту міді в покритті коефіцієнт теплопровідності збільшується до теплопровідності міді. Коливання коефіцієнта теплопровідності залежить від товщини покриття.

5. Термостійкість плазмових покриттів максимальна тоді, коли кількість керамічної (Al₂O₃) і металевої (Cu) складових приблизно однакова.

6. Якщо використовувати композиційне покриття як електроізоляційне, необхідно вибирати композицію (50 % Cu + 50% Al₂O₃) і використовувати не тільки як захисне покриття, але і

як підшар для нанесення чистої кераміки типу Al_2O_3 або ZrO_2

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Газотермические покрытия из порошковых материалов : справочник / [Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко, Е. Н. Ардатовская]. – Киев : Наукова думка, 1987. – 543 с.
2. Газотермические покрытия : монография / [В. И. Анциферов, А. М. Шмаков, С. С. Агеев, В. Я Буланов]. – Екатеринбург : УФ Наука, 1994. – 318 с.
3. Муляков Л. М. Защитные покрытия деталей газотурбинных двигателей / Л. М. Муляков //Технология металлов. – 2000. – № 11. – С 20–29.
4. Ильичев М. В. Эффективный метод плазменного нанесения жаростойкого покрытия на медную основу / М. В. Ильичев, М. Х. Исакаев, Г. А. Желобцова, В. А. Катаржис, Н. О. Спектор, Г. А. Филиппов // сборник статей конференции по физике низкотемпературной плазмы «ФНТП–2001» (1–7 июля, 2001). – Петрозаводск, 2001. – С. 23–30.

REFERENCES

1. Borisov Yu.S., Kharlamov Yu.A., Sidorenko S.L. and Ardatovskaya Ye.N. *Gazotermicheskiye pokrytiya iz poroshkovykh materialov : spravochnik* [Thermal coatings from powder materials : directory]. Kyiv : Naukova Dumka, 1987, 543 p. (in Russian).
2. Antsiferov V.I., Shmakov A.M., Ageyev S.S. and Bulanov V.Ya. *Gazotermicheskiye pokrytiya* [Thermal coatings]. Yekaterinburh: UV Science, 1994, 318 p. (in Russian).
3. Mulyakov L.M. *Zashchitnyye pokrytiya detaley gazoturbinnnykh dvigateley* [Protective coatings for parts of gas turbine engines]. *Tekhnologiya metallov* [Technology of metals]. 2000, no. 11, pp. 20–29. (in Russian).
4. Ilichev M.V, Isakayev M.Kh., Zhelobtsova G.A., Katarzhis V.A., Spektor N.O. and Filippov G.A. *Effektivnyy metod plazmennogo naneseniya zharostoykogo pokrytiya na mednyu osnovu* [Effective method of plasma deposition of heat-resistant coating on copper base]. *Sbornik statey konferentsii po fizike nizkotemperaturnoy plazmy* [Collect of articles of the Conference on the physics of low-temperature plasma]. FNTTP–2001. Petrozavodsk : July 1–7, 2001. (in Russian).

Надійшла до редакції 21.10.2018