

УДК 621.793.7

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.280519.42.434

ВПЛИВ АРМУВАННЯ КЕРАМІЧНОГО ПОКРИТТЯ НА ТЕПЛОТЕХНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

ВАШКЕВИЧ Ф. Ф.¹, канд. техн. наук, доц.,

СПІЛЬНИК А. Я.^{2*}, канд. техн. наук, доц.,

ЗАГОРОДНИЙ О. Б.³, ст. викл.,

ЖУРАВЕЛЬ В. І.⁴, ст. н. с.,

ЛЯСОТА А. В.⁵, провідн. фахівець

¹ 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: 0000-0003-0962-0890

^{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: Zhuravel.39@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-9501-5106

⁵ 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 4269 2434

Анотація. Постановка проблеми. Керамічні покриття, володіючи високою температурою плавлення, можуть бути отримані розплавленням матеріалів у потоці плазми. Для цього використовують плазмові установки типу УПУ, Київ-7 та ін. Але ці покриття мають суттєвий недолік – вони слабо опираються змінним температурним навантаженням, тобто термостійкість цих покриттів досить низька. Останнім часом для підвищення термостійкості почали напиляти не чисту кераміку, а суміші декількох окислів. У цій статті досліджувалась термостійкість шпінелі з армуванням сіткою та без армування. **Методика.** Для виготовлення такої композиції використовували золь-гель процес. Для напилення вказаної шпінелі підготовляли частинки порошку крупністю 50...100 мкм та використовували плазмову установку типу УПУ. Товщина напиленого покриття складала 2...3 мм. Металеву сітку підбирали з нержавіючої сталі і NiCr з крупністю комірки 3 мм. Для фіксації сітки на поверхні металу використовували точкове мікрозварювання. Для дослідження коефіцієнтів теплопровідності шпінелі скористались приладом для вимірювання теплопровідності ИТ-λ-400. Вимірювання теплопровідності проводили в режимі монотонного нагрівання методом динамічного калориметра. Для дослідження теплопровідності використовували теплопровідну пасту до 400 °С. **Результати.** Теплопровідність шпінелі типу Al₂O₃ Cr₂O₃ зі збільшенням температури незначно зменшується, приблизно на 5...10 %, і складає для покриття без армування 3,5...3,21 Вт/м К, для армованого – 5,46...4,46 Вт/м К. На теплопровідність покриття впливає армування його сіткою, яке викликає підвищення теплопровідності в широкому інтервалі температур від 25 до 400 °С. **Наукова новизна.** Результати дослідження теплозахисних покриттів, армованих металевою сіткою для шпінелі наведені вперше. **Практична значимість.** Для отримання покриттів шпінелі типу Al₂O₃ Cr₂O₃, що володіють високою теплопровідністю і міцністю, можна рекомендувати армування металевою сіткою.

Ключові слова: керамічний композитний матеріал; плазмове напилення; теплозахисне покриття; шпінель; теплопровідність

ВЛИЯНИЕ АРМИРОВАНИЯ КЕРАМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ НА ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

ВАШКЕВИЧ Ф. Ф.¹, канд. техн. наук, доц.,

СПИЛЬНИК А. Я.^{2*}, канд. техн. наук, доц.,

ЗАГОРОДНИЙ А. Б.³, ст. препод.,

ЖУРАВЕЛЬ В. И.⁴, ст. н. с.,

ЛЯСОТА А. В.⁵, вед. спец.

¹ Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Государственное высшее учебное заведение «Придніпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Дніпро, Украина, тел. +38 (0562) 46-98-82, ORCID ID: 0000-0003-0962-0890

^{2*} Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Государственное высшее учебное заведение «Придніпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Дніпро, 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 матеріалознавства та обробки матеріалів, Государственное высшее учебное заведение «Придніпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Дніпро, Украина, тел. +38 (0562) 46-98-82, ORCID ID: 0000-0002-4158-1740

⁴ Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Государственное высшее учебное заведение «Придніпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Дніпро, Украина, тел. +38 (0562) 46-98-82, e-mail: Zhuravel.39@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-9501-5106

⁵ Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Государственное высшее учебное заведение «Придніпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Дніпро, Украина, тел. +38 (0562) 46-98-82, ORCID ID: 00000002 4269 2434

Аннотация. Постановка проблемы. Керамические покрытия, обладающие высокой температурой плавления, могут быть получены расплавлением материалов в потоке плазмы. Для этого используют плазменные установки типа УПУ, Киев-7 и др. Но эти покрытия имеют существенный недостаток – они слабо сопротивляются переменным температурным нагрузкам, т. е. термостойкость этих покрытий очень низкая. В последнее время для повышения термостойкости начали напылять не чистую керамику, а смеси нескольких окислов. В данной работе исследовалась термостойкость шпинели как с армированием сеткой, так и без армирования. **Методика.** Для изготовления такой композиции использовался золь-гель процесс. При напылении указанной шпинели подготавливались частички порошка крупностью 50...100 мкм и использовалась плазменная установка типа УПУ. Толщина напыленного покрытия находилась в пределах 2...3 мм. Металлическая сетка подбиралась из нержавеющей стали и NiCr с крупностью ячейки 3 мм. Для фиксации сетки на поверхности металла использовали точечное микросваривание. Для исследования коэффициентов теплопроводности шпинели воспользовались прибором для измерения теплопроводности ИТ-λ-400. Измерение теплопроводности проводилось в режиме монотонного нагревания методом динамического калориметра. При исследовании теплопроводности использовалась теплопроводная паста до 400 °С. **Результаты.** Теплопроводность шпинели типа Al_2O_3 Cr_2O_3 с увеличением температуры незначительно уменьшается, приблизительно на 5...10 %, и составляет для покрытия без армирования 3,5...3,21 Вт/м К, для армированного – 5,46...4,46 Вт/м К. На теплопроводность покрытия влияет армирование его сеткой, которое вызывает повышение теплопроводности в широком интервале температур от 25 до 400 °С. **Научная новизна.** Результаты исследования теплозащитных покрытий, армированных металлической сеткой, для шпинели приведены впервые. **Практическая значимость.** Для получения покрытий шпинели типа Al_2O_3 Cr_2O_3 , обладающих высокой теплопроводностью и прочностью, можно рекомендовать армирование металлической сеткой.

Ключевые слова: керамический композитный материал; плазменное напыление; теплозащитное покрытие; шпинель; теплопроводность

THE INFLUENCE OF CERAMIC COATING REINFORCEMENT ON THERMAL ENGINEERING PROPERTIES

VASHKEVYCH F.F.¹, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,

SPIILNYK A.Ya.^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,

ZAHORODNYI O.B.³, *Assistant Professor*,

ZHURAVEL V.I.⁴, *Senior Research Assistant*,

LIASOTA A.V.⁵, *Head Researcher*

¹ Department of Materials and Materials Processing, State Higher Educational 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 and Materials Processing, State Higher Educational 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 and Materials Processing, State Higher Educational 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 and Materials Processing, State Higher Educational 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

⁵ Department of Materials and Materials Processing, State Higher Educational Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-A, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-98-82, ORCID ID: 00000002 4269 2434

Abstract. Purpose. Ceramic coatings, having a high melting point, can be obtained by melting materials in a plasma stream. For this purpose, plasma units like UPU, Kyiv-7 and others are used. But these coatings have a significant drawback – they resist poorly variable temperature loads, i.e. the thermal stability of these coatings is quite low. Now, not pure ceramics but mixtures of several oxides are sprayed to increase the thermal stability. In this article, the thermal stability of the spinel with mesh reinforcement and without reinforcement is studied. **Methodology.** For the manufacture of such a composition sol-gel process was used. During the spraying of the indicated spinel, powder particles with a particle size of 50–100 μm were prepared and a UPU plasma unit was used. The thickness of sprayed coating was within 2...3 mm. Metal mesh was selected from stainless steel and NiCr with a lattice size of 3 mm. For fixing the mesh on the metal surface, point micro-welding was used. A device for measuring the thermal conductivity of IT- λ -400 was used to study the thermal conductivity coefficients for the spinel. The measurement of thermal conductivity was carried out in the monotonous heating mode using the dynamic calorimeter method. In the study of thermal conductivity, heat conductive paste up to 400 °C was used. **Results.** The thermal conductivity of the spinel Al_2O_3 Cr_2O_3 type slightly decreases with temperature increasing, approximately by 5...10 %, and amounts to 3.5...3.21 W/m·K for the coating without reinforcement, and 5,46...4,46 W/m K for the reinforced. The thermal conductivity of a coating is affected by its reinforcement with a mesh, which causes an increase in thermal conductivity in a wide range of temperatures from 25 to 400 °. **Scientific novelty.** The results of the study of thermal protective coatings reinforced with metal mesh for spinel are presented for the first time. **Practical relevance.** To obtain coatings for the spinel Al_2O_3 Cr_2O_3 type with high thermal conductivity and strength, we can recommend the reinforcement with metal mesh.

Keywords: ceramic composite material; plasma spraying; heat protective coating; spinel; thermal conductivity

Постановка проблеми. Керамічні покриття (в основному це окисли металів), що володіють високою температурою плавлення, можуть бути отримані розплавленням матеріалів у потоці плазми. Для цього використовують плазмові установки типу УПУ, Київ-7 та ін. Але ці покриття мають суттєвий недолік – вони слабо опираються змінним температурним навантаженням, тобто термостійкість цих покриттів досить низька[1–7].

Останнім часом для підвищення їх термостійкості почали напиляти не чисту кераміку, а суміші декількох окислів, наприклад шпінелі. У наведених нижче дослідженнях використовували шпінель Al_2O_3 Cr_2O_3 .

Матеріали та методи дослідження. Для виготовлення такої композиції використовували золь-гель процес. Для напилення вказаної шпінелі виготовляли частинки порошку крупністю 50...100 мкм, які розплавляли в плазмовій установці типу УПУ. Товщина напиленого покриття складала 2...3 мм. Дослідження проводили на шпінелі армованій металеву сіткою та без армування. Металеву сітку підбирали з нержавіючої сталі і NiCr з крупністю комірки 3 мм. Для фіксації сітки на поверхні

металу використовували точкове мікрозварювання.

Результати та їх обговорення. Аналіз сіток, використаних для армування, показав, що найбільш перспективна сітка ткани (рис. 1 з), оскільки за такого способу виготовлення можна застосовувати дрід будь-якого хімічного складу (вольфрам, молибден, ніхром, нержавіюча сталь). Ткани сітка легко утримує необхідний розмір комірки. Сітки перфорована і просічна обмежені в матеріалі та розмірах комірки. Сітка плетена дуже рухлива, що ускладнює її заповнення керамічним матеріалом.

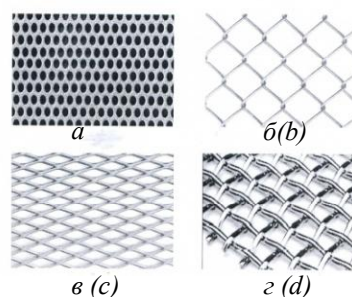


Рис. 1. Різновиди сіток, які можна використовувати для армування: а – перфорована, б – плетена, в – просічна, з – ткани. / Fig.1. Variety of grids that can be used for reinforcement: a – perforated, b – wicker, c – permeable, d – woven

Для дослідження температурної залежності шпінелей типу Al_2O_3 Cr_2O_3

використали прилад для вимірювання теплопровідності ИТ-λ-400. У дослідженні теплопровідності застосовували теплопровідну пасту до 400 °С.

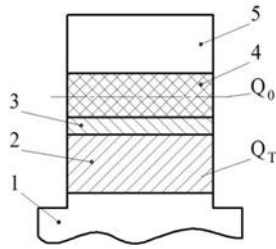


Рис. 2. Теплова схема методу: 1 - основа, 2 - тепломір, 3 - контактна пластинка, 4 - зразок, 5 - стержень. / Fig. 2. Thermal circuit of the method. 1 - base, 2 - heatmeter, 3 - wayplate, 4 - sample, 5 - rod

Вимірювали теплопровідності у режимі монотонного нагрівання методом динамічного калориметра. Теплова схема методу показана на рисунку 2.

У цьому дослідженні для теплового потоку Q_0 , який проходить через зразок товщиною "h" і захоплений стержнем, для будь-якого рівня температур справедлива формула:

$$Q = \lambda \frac{\Delta T_0}{h} S, \text{ де } \lambda = \frac{Q h}{\Delta T_0 S},$$

де, ΔT_0 – перепад температур на зразку, K_2 , S – площа поперечного перетину зразка, m^2

Таблиця 1

Експериментальні дані для визначення коефіцієнтів теплопровідності покриття Al_2O_3 Cr_2O_3 , без армування / Experimental data for determining the coefficients of thermal conductivity of Al_2O_3 Cr_2O_3 coating, without reinforcement

T_i , °C	n_r мкВ	n_o мкВ	K_T , Вт/К	n_r / n_o	λ_i Вт/мК	$A(T)$ К/мВ
25	11,5	7,5	0,1197	1,53333	3,22	24,8
	12,0	5,2		1,60000	3,55	
50	21,0	14,0	0,1219	1,50000	3,21	24,5
	20,5	13,0		1,57692	3,57	
75	24,0	15,0	0,1244	1,60000	3,49	24,6
	23,3			1,55333	3,58	
100	24,5	16,0	0,1295	1,53125	3,48	24,7
	24,0	15,0		1,60000	3,84	
125	25,0	16,1	0,1253	1,55279	3,41	24,8
	24,0	15,0		1,60000	3,72	
150	25,0	16,1	0,1259	1,55279	3,43	25,0
	23,8	15,0		1,58666	3,70	
175	25,0	16,0	0,1278	1,56250	3,50	25,0
	23,8	14,8		1,60810	3,81	
200	25,0	16,0	0,1267	1,56250	3,47	25,0
	23,6	14,7		1,60544	3,77	
225	25,1	16,1	0,127368	1,55900	3,48	24,9
	24,2	15,2		1,59210	3,76	

250	25,6	17,0	0,1279	1,50588	3,38	24,9
	25,0	15,8		1,58227	3,75	
275	25,8	17,0	0,1281	1,51764	3,41	24,8
	25,3	16,0		1,58125	3,75	
300	25,0	16,8	0,1277	1,48809	3,33	24,5
		16,2		1,54320	3,66	
325	24,5	16,0	0,1255	1,53125	3,37	24,2
	24,1			1,50625	3,50	
350	24,0	16,0	0,1236	1,50000	3,25	24,0
	23,5	15,8		1,48734	3,41	
375	24,0	16,0	0,1232	1,50000	3,24	23,8
	23,0	15,8		1,45569	3,33	
400	23,0	15,5	0,1234	1,48377	3,21	23,8
	22,5			1,45161	3,32	

Примітка. T_i – температура вимірювання, °C, n_m – покази приладу на тепломірі, мкВ, n_o – покази приладу на зразку, мкВ, $A(T)$ – чутливість термопари, К/мВ, K_T – постійна приладу, Вт/К. Дані в чисельнику – вимір зразка № 1, дані в знаменнику – вимір зразка № 2.

Експериментальні дані для визначення коефіцієнтів теплопровідності покриття Al_2O_3 Cr_2O_3 зразків, армованих сіткою (діаметр 15 мм, товщина 3,21 мм), наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Експериментальні дані для визначення коефіцієнтів теплопровідності покриття Al_2O_3 Cr_2O_3 , з армуванням сіткою / Experimental data for determining the coefficients of thermal conductivity of Al_2O_3 Cr_2O_3 coating, with grid reinforcement

T_i , °C	n_r мкВ	n_o мкВ	K_T , Вт/К	n_r / n_o	λ_i Вт/мК	$A(T)$ К/мВ
25	11,5	5,5	0,1197	2,09090	4,55	24,8
	12,0	5,2		2,30769	5,09	
50	22,0	9,5	0,1219	2,31578	5,13	24,5
	21,0	9,00		2,33333	5,17	
75	25,0	11,0	0,1244	2,27272	5,14	24,6
	23,0	10,0		2,30000	5,20	
100	26,0	11,2	0,1295	2,32142	5,46	24,7
	23,5	10,0		2,35000	5,53	
125	25,2	11,2	0,1253	2,25000	5,12	24,8
	23,0	10,0		2,30000	5,24	
150	25,1	11,1	0,1259	2,26126	5,17	25,0
	23,0	10,0		2,30000	5,26	
175	25,0	11,0	0,1278	2,27272	5,28	25,0
	23,0	10,0		2,30000	5,34	
200	25,2	11,2	0,1267	2,25000	5,18	25,0
	23,0	10,0		2,30000	5,29	
225	26,0	11,8	0,127368	2,20338	5,10	24,9
	23,2	10,5		2,20952	5,11	
250	26,5	12,0	0,1279	2,20833	5,13	24,9
	23,6	11,0		2,14545	4,99	
275	26,7	12,7	0,1281	2,10236	4,89	24,8
	24,0	11,0		2,18181	5,07	
300	26,0	12,0	0,1277	2,16666	5,027	24,5
	24,2	11,2		2,16071	5,01	
325	25,0	12,0	0,1255	2,08333	4,75	24,2
	23,2	11,0		2,10909	4,81	

350	24,5	11,0	0,1236	2,27272	5,00	24,0
	22,5	11,0		2,04545	4,59	
375	23,6	11,8	0,1232	2,00000	4,48	23,8
	22,0	11,0		2,00000	4,48	
400	22,5	11,3	0,1234	1,99115	4,46	23,8
	21,5	11,0		1,95454	4,38	

У розрахункову формулу для визначення коефіцієнта теплопровідності внесено ряд поправок для врахування систематичних похибок вимірювання. З урахуванням втрат тепла через бокові поверхні стержня, зразка та тепломіра, втрат тепла на нагрівання зразка, а також теплового опору в місцях заведення термопар та контактних пластин вираз теплопровідності "λ" може бути записано в вигляді:

$$\lambda = \frac{Q}{\frac{\Delta T \cdot S}{L} - P_k} \text{ Вт/мК,}$$

де σ - поправка, яка враховує теплоємність зразка; P_k - поправка, яка враховує тепловий опір контакту, неідентичність і тепловий опір заведення термопар, м²К/Вт.

Параметри K_m та P_k є «постійними» вимірювача і визначаються в процесі градування приладу по матеріалах із відомими теплофізичними властивостями теплоємності та теплопровідності.

У статті наведено дослідження з теплопровідності шпінелі типу Al₂O₃ Cr₂O₃ у двох варіантах: шпінель, армована металевою сіткою та неармована.

Зразки для дослідження теплопровідності готували з відшарованого покриття за розмірами, вказаними на рисунку 3.

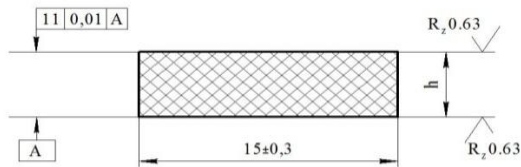


Рис.3. Креслення зразка / Fig. 3 Drawing a sample

Графічна залежність коефіцієнтів теплопровідності шпінелі від температури для покриттів, не армованих металевою сіткою та армованих, показані на рисунках 4 і 5.

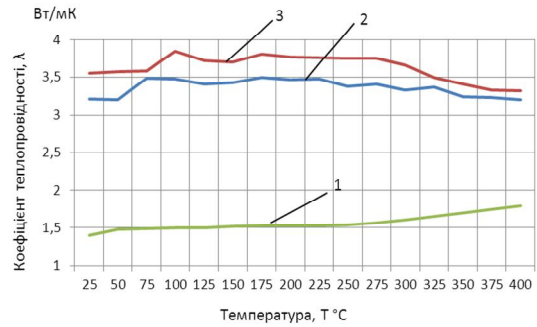


Рис. 4. Залежність коефіцієнта теплопровідності шпінелі Al₂O₃ Cr₂O₃ від температури для покриттів, не армованих металевою сіткою:

1 - теплопровідності кварцевого скла; 2 - виміри зразка № 1; 3 - виміри зразка № 2 / Fig.4 The dependence of the thermal conductivity of the spinel Al₂O₃ Cr₂O₃ on the temperature for the coatings not arranged by a metal grid. 1. thermal conductivity of quartz glass; 2 - measurements of sample number 1; 3 - measurements of sample number 2

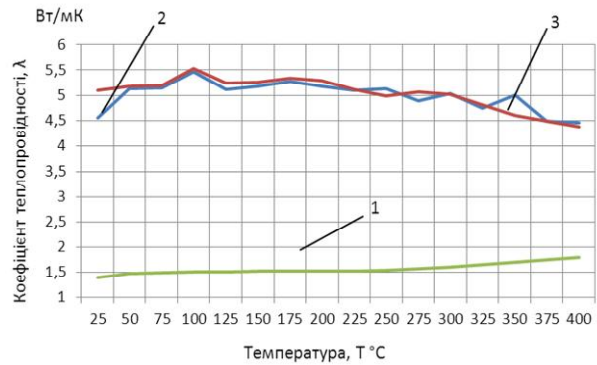


Рис. 5. Залежність коефіцієнта теплопровідності шпінелі Al₂O₃ Cr₂O₃ від температури для покриттів, армованих металевою сіткою: 1 - теплопровідності кварцевого скла; 2 – виміри зразка № 1; 3 – виміри зразка № 2 / Fig. 5. The dependence of the heat transfer coefficient of the spinel Al₂O₃ Cr₂O₃ on the temperature of the coatings arranged by a metal grid. 1. thermal conductivity of quartz glass; 2 – measurements of sample number 1; 3 – measurements of sample number 2

Висновки

1. Теплопровідність шпінелі типу Al₂O₃ Cr₂O₃ зі збільшенням температури незначно зменшується, приблизно на 5...10 %, і складає для покриття без армування 3,5...3,21 Вт/м К, для армованих – 5,46...4,46 Вт/м К.

2. На теплопровідність покриття впливає армування його сіткою, яке викликає підвищення теплопровідності в широкому інтервалі температур від 25 до 400 °С.

3. Для отримання плазмових покриттів з високою міцністю, можна рекомендувати їх армування металевією сіткою. шпінелі, яка мала б високу теплопровідність

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Физика твердого тела : монография / [Павлов П. В., Хохлов А. Ф.]. – Москва : Высшая школа, 1985. – 384 с.
2. Лялякин В. П. Физическая сущность и условия сцепления частиц металлического порошка с подложкой при газотермическом напылении / В. П. Лялякин, Н. Н. Литовченко., А. С.Саблуков, В. И. Денисов, В. Н. Соковцева. // Технология металлов. – 2006. – № 5. – С. 36–44. – Режим доступа : <http://hvof.org/theory/gptstructure/>.
3. Демиденко Л. М. Высокоогнеупорные композиционные покрытия : монография / Л. М. Демиденко. – Москва : Metallurgiya, 1979. – 245 с.
4. Газотермические покрытия из порошковых материалов : справочник. / [Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко, Е. Н. Ардатовская]. – Киев : Наукова думка, 1987. – С. 543.
5. Плазменно-порошковые покрытия : монография / [Ю. С. Борисов, А. Л. Борисова]. – Киев : Техника, 1986. – 223 с.
6. Большаков В. И. Особенности применения световой и электронной микроскопии при изучении структурообразования покрытий / В. И. Большаков, А. В. Зайцев, Г. Д. Сухомлин, Ф. Ф. Вашкевич // Metalloznavstvo ta termichna obrobka metaliv. – 2007. – № 1. – С. 7–12.
7. Химико-термическая обработка и защитные покрытия в авиадвигателестроении : монография [Ю. С. Елисеев, Н. В. Абрамов, В. В. Крымов]. – Москва : Высшая школа, 1999. – 256 с.

REFERENCES

1. Pavlov P.V. and Khokhlov A.F. *Fizika tverdogo tela* [Solid State Physics]. Moscow : Vysshaya shkola, 1985, 384 p.(in Russian).
2. Lyalyakin V.P., Litovchenko N.N., Sablukov A.S., Denisov V.I. and Sokovtseva V.N. *Fizicheskaya sushchnost' i usloviya stsepleniya chastits metallicheskogo poroshka s podlozhkoy pri gazotermicheskom napylenii* [Physical nature and adhesion conditions of particles of a metal powder with a substrate during gas thermal spraying]. *Tekhnologiya metallov* [Metal technology]. 2006, no. 5, pp. 36–44. (in Russian).
3. Demidenko L.M. *Vysokoogneupornyye kompozitsionnyye pokrytiya* [High-refractory composite coatings]. Moscow : Metallurgy Publ., 1979, 245 p. (in Russian).
4. Borisov Yu.S., Kharlamov Yu.A., Sidorenko S.L. and Ardatovskaya Ye.N. *Gazotermicheskiye pokrytiya iz poroshkovykh materialov. Spravochnik* [Thermal coatings from powder materials Reference]. Kyiv : Naukova Dumka, 1987, 543 p. (in Russian).
5. Borisov Yu.S. and Borisova A.L. *Plazmenno-poroshkovyye pokrytiya* [Plasma powder coatings]. Kyiv : Technics, 1986, 223 p. (in Russian).
6. Bol'shakov V.I., Zaytsev A.V., Sukhomlin G.D. and Vashkevich F.F. *Osobennosti primeneniya svetovoy i elektronnoy mikroskopii pri izuchenii strukturoob-razovaniya pokrytiy* [Features of the use of light and electron microscopy in the study of the structure formation of coatings]. *Metalloznavstvo ta termichna obrobka metaliv*. [Metallurgy and metallurgy of metals]. 2007, no. 1, pp.7–12. (in Russian).
7. Yeliseyev Yu.S., Abramov N.V. and Krymov V.V. *Khimiko-termicheskaya obrabotka i zashchitnyye pokrytiya v aviadvigatelestroyenii* [Chemical heat treatment and protective coatings in the aircraft engine-building industry]. Moscow : Vyszha shkola, 1999, 256 p. (in Russian).

Надійшла до редакції: 28.03.2019 р.