

УДК 629.083

ЖАРОСТІЙКІ ПОКРИТТЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ ДЛЯ ПОДОВЖЕННЯ РЕСУРСУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ (ОГЛЯД)

Харченко С.Д., канд. техн. наук, Ковтун С.І., докт. техн. наук

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, Київ, 03057, Україна

<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2021.10>

Проведено аналіз сучасних жаростійких матеріалів, в складі яких присутні тугоплавкі сполуки боридів, нітридів, карбідів в яких границя плавлення становить близько 2000 °С. Показано нові підходи отримання жаростійких матеріалів і результати вивчення їх структури, фазового складу, фізико-механічних властивостей.

Проведен анализ современных жаростойких материалов, в составе которых присутствуют тугоплавкие соединения боридов, нитридов, карбидов с предельной температурой плавления около 2000 °С. Показаны новые подходы получения жаростойких материалов и результаты изучения их структуры, фазового состава, физико-механических свойств.

An analysis of modern heat-resistant materials has been carried out, which contain refractory compounds of borides, nitrides, carbides with a limiting melting point of about 2000 °С. New approaches to obtaining heat-resistant materials and the results of studying their structure, phase composition, physical and mechanical properties are shown.

Бібл. 30, табл. 1, рис. 3.

Ключові слова: жаростійкі покриття, тугоплавкі сполуки, енергетичне обладнання.

Вступ

На даний час для підвищення довговічності, надійності та подовження ресурсу теплонавантажених конструкційних елементів використовуються жаростійкі матеріали, з яких безпосередньо виготовляються конструктивні елементи. Проте, для елементів енергетичного обладнання ефективним та економічно обґрунтованим підходом, що має значний ефект, є використання жаростійких покриттів. Окрім жаростійкості, дані покриття мають досить високу корозійну стійкість, зокрема до газової корозії. Для їх нанесення можуть застосовуватись такі методи: іонно-плазмовий, атмосферно-плазмовий, термодифузійний, шлікерний та ін.

Структура та властивості тугоплавких сполук

Всі сучасні жаростійкі матеріали переважно у своєму складі містять тугоплавкі сполуки. По своїй суті тугоплавкі сполуки мають високу граничну температуру плавлення, яка становить близько 2000 °С. До тугоплавких сполук відносять бориди, нітриди, карбіди, інтерметаліди, оксиди і це не повний перелік. В наукових публікаціях досить повно визначено їх властивості та можливості застосування як жаростійких [1-5], достатньо різноманітно висвітлено нові підходи до упорядкування тугоплавких сполук [6-8] при їх наноструктуруванні [9-10]. Значний внесок в дослідження наноструктурного стану тугоплавких сполук на основі боридних, нітридних, карбідних плівок було зроблено вченими США, Швеції, Австрії.

Були отримані одно- та багаточарові плівки, які окрім підвищеної жаростійкості мали також поверхневу твердість до 30-50 ГПа.

При аналізі властивостей тугоплавких жаростійких сполук велику увагу приділяють так званим МАХ-фазам. Структура і властивості (фізичні, фізико-хімічні) більшості МАХ-фаз ретельно описані в роботі [11]. Найбільш детально вивчені сполуки, що утворюються в системі Ti-Si-C та мають досить високу температуру плавлення близько 1600 °С. Слід приділити увагу жаростійким МАХ-фазам типу Ti-Al-C, температура плавлення яких становить до 1300-1400 °С [12].

Поряд з МАХ-фазами приділяють увагу двомірним МХ-фазам. До них відносять сполуки, в складі яких міститься алюміній [13].

У якості тугоплавких жаростійких сполук з високими показниками жаростійкості доцільно використовувати нітрид бору. Велика увага в даному напрямі приділяється двомірному нітриду бору, що має високу стійкість до окислення – близько 850 °С [14].

Окрім традиційних жаростійких тугоплавких сполук, що досить широко вивчені і описані, слід приділити увагу високоентропійним з'єднанням, зокрема карбідам і нітридам. Великий науковий теоретичний і практичний інтерес викликають високоентропійні сплави, до складу яких входять п'ять і більше компонентів заміщення, при цьому серед них немає переважаючого. В основі ідеї при формуванні туго-

плавких високоентропійних жаростійких сполук є термодинамічна неупорядкованість в твердому розчині. Як наслідок, поява викривленої кристалічної решітки та сповільнення дифузійних процесів та фазових перетворень. Дані зміни відзначались вигідними фізико-механічними та фізико-хімічними показниками, що досить широко висвітлено в ряді публікацій і монографій [15-17].

Структура та властивості жаростійких покриттів

Активним полем діяльності при розробці жаростійких покриттів є структура керамічного шару. В останні роки все частіше зустрічається в патентах опис керамічних покриттів, які містять два і більше шарів кераміки.

В роботах компанії Unite Technologies Corporation розглянуті жаростійкі покриття на основі оксидів цирконію, стабілізованого 30% оксиду скандія з додаванням оксидів лантанової групи. Коефіцієнт теплопровідності такого керамічного шару покриття становить 1,38 Вт/(м•К).

Компанія Chromalloy Gas Turbine Corporation пропонує використовувати двошаровий матеріал з робочою температурою до 1200°C, перший шар якого являє собою стандартний діоксид цирконію, стабілізований діоксидом ітрія, а зовнішній шар – з підвищеним шаром діоксиду ітрію до 25% мас. Показано, що при збільшенні кількості шарів, зменшується теплопровідність.

Компанією Mitsubishi Heavy Ind. Ltd розглянуті жаростійкі покриття з керамічними шарами з формулою $A_2Zr_2O_7$, де міститься один із рідкоземельних елементів. Дано порівняння отриманих покриттів з різною пористістю від 1 до 25%, найкращими результатами теплопровідності володіють двошарові покриття з пористою структурою.

В якості тугоплавких сполук широкого застосування набули високоентропійні сплави на основі нітридів, карбідів. При цьому властивості металевих високоентропійних сплавів сильно змінюються при переході до нітридних і карбідних сплавів. Проте високі показники жаростійкості покриттів на основі тугоплавких сполук можливо досягнути, не лише завдяки високоентропійному фактору, а також шляхом використання традиційного підходу щодо легування та наноструктурування [18].

Вплив подвійних і градієнтних структур на властивості наноматеріалів та особливості їх отримання показано в роботі [19]. Продемонстровані на прикладі моделі результати такі: наноструктури можуть

мати високі показники міцності і електропровідності; розмір зерен еквівалентний міцності, їх зменшення пропорційно збільшенню міцності і пластичності; плівки з подвійною структурою мають більшу термічну стабільність у порівнянні зі звичайними наноматеріалами.

Поряд з використанням МАХ-фаз, МХ-фаз, високоентропійних сплавів як жаростійких продовжують вивчати традиційні сплави. Відомі жаростійкі карбідні покриття на основі ніобію і хрому [20], що характеризуються високою жаростійкістю: якщо звичайна температура нагрівання під гартування сталі У8А без покриття складає 1023 К, то виріб з покриттям може нагріватися під гартування впродовж 12 хвилин з мінімальною втратою маси покриття. Для сталі 45 ця температура складає 1123 К і час нагрівання зменшується до 2 хвилини. Температура нагрівання під гартування сталі 35 – 1173 К, час нагрівання – 0,5 хвилини, що може бути придатним лише для малогабаритних деталей. Якщо габарити виробу потребують більш тривалого нагрівання під гартування, необхідно застосовувати захисні атмосфери чи засипки. В якості таких засипок можна рекомендувати карбюризатор чи чавунну стружку. Травлення дифузійного шару показало наявність в ньому трьох зон. Рентгеноструктурним пошаровим аналізом встановлено, що з зовнішньої сторони шару розташована фаза типу $Cr_{23}C_6$, під нею фаза типу NbC , а з внутрішньої – фаза типу Cr_7C_3 (рис. 1).

Запропоновані жаростійкі карбідні покриття на основі ніобію і хрому поряд з підвищеною жаростійкістю, мають технологічну складність їх нанесення, що унеможливає їх використання саме у якості захисних покриттів.

Також широко використовують можливість отримання жаростійких корозійних захисних покриттів на графітних матеріалах, які використовуються як конструкційні матеріали атомних станцій.

Покриття наносили методом вакуумного активованого насичення з використанням рідкої фази і процесу саморозповсюджуючого високотемпературного синтезу (СВС). Склад покриття визначали за допомогою термодинамічного аналізу та рентгенографії.

Боросиліцидні покриття зменшують пористість вуглецевих матеріалів, а також збільшують їх жаро- і корозійну стійкість [21].

Жаростійкість захисних покриттів на вуглецевих матеріалах суттєво залежить від вибору складу і способу формування покриттів так і структури і складу початкових матеріалів. На рис. 2 показано покриття, на яке

попередньо нанесено шлікер. Запропоновані жаростійкі покриття ефективні у використанні лише на вуглецевих матеріалах, що суттєво обмежує їх використання, проте мають досить високі показники жаростійкості.

В роботі [22] підібрано корозійностійкі покриття, що забезпечують високі захисні властивості при температурах до 450°C. Данні покриття наносяться на високоміцні конструкційні сталі. Проведені випробування на загальну корозійну стійкість, жаростійкість, прискорені циклічні використання на корозійну стійкість, випробування в камері сольового туману і показано, що кращим комплексом властивостей володіють

покриття на основі Al-Si з алюмохромфосфатним зв'язуючим. В статтях [23-25] досліджено алюмінієві шлікерні покриття, що забезпечують захист деталей котлів. Роботи [26-28] присвячені шлікерним покриттям, які наносять на нікелеві, залізонікелеві і кобальтові сплави.

В статті [6] запропоновано емалеві жаростійкі покриття, склад даного покриття заснований на системах $SiO_2-Al_2O_3-BaO$ і $SiO_2-Al_2O_3-B_2O_3$. Наведено результати випробувань зразків з покриттями при витримці 100 год, а також термостійкості до появи дефектів в покритті (табл. 1).

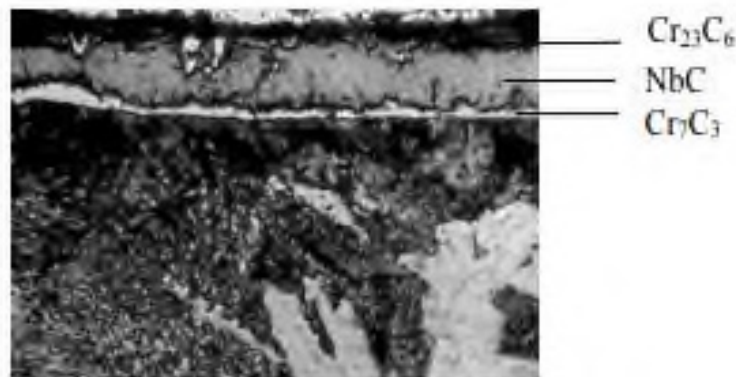


Рис. 1. Мікроструктура карбідного покриття отриманого на сталі У10А при комплексному насиченні ніобієм та хромом. $x 450$. Температура нанесення $T = 10500$ С, час

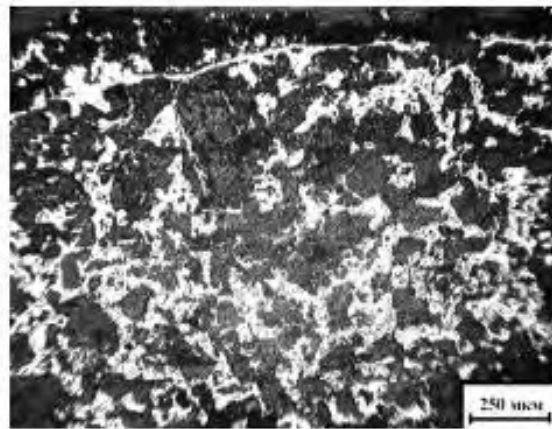


Рис. 2. Мікроструктура поперечного перерізу покриття графіту АРВ

Таблиця 1

Температура випробування, °С	Жаростійкість		Термостійкість	
	Приріст, г/(м ² *г)		Режим, °С	Кількість циклів
	Без покриття	З покриттям		
700	0,06	0,003	700	500
900	0,18	0,024	900	250

В роботі [29] розроблені покриття системи SiC–Si₃N₄–SiO₂, які можуть використовуватись для нанесення на поверхні елементів, що працюють за температури до 1100°C.

Випробування на жаростійкість наведені на рис.3. В роботах [29,30] представлені результати дослідження жаростійких покриттів на основі алюмінідів заліза, кобальту, нікелю які наносяться дифузійним методом

Вивчені основні види дефектів та шлях їх ліквідації. Підбрано оптимальний відсотковий склад Al і Si в алюмосиліцидних шлікерних покриттях, що забезпечує їх жаростійкість, пластичність та в'язкість руйнування. Крім того, показано позитивний вплив бору.

Висновки

Аналіз розглянутих науково-технічних літературних джерел в області розвитку матеріалів і технологій нанесення жаростійких покриттів показав, що основним методом підвищення робочої температури керамічного шару покриття є зміна хімічного складу кераміки шляхом введення додаткової кількості легуючих рідкоземельних елементів.

Важливим методом підвищення якості жаростійких покриттів є оптимізація товщини керамічного шару і формування бар'єрного мікрошару на границі розподілу. Формування багаточарової структури керамічного шару і створення додаткових включень в проміжних шарах дозволяє понизити коефіцієнт теплопровідності на 60%.

Для збільшення стійкості покриттів до сколювання застосовують матеріали з підвищеним вмістом алюмінію і мінімальною кількістю хрому, оскільки при температурах більше 1000°C утворення захисного поверхневого шару обумовлено переважно утворенням оксиду алюмінію, в той час як оксидна плівка на основі хрому руйнується і призводить до пошкодження покриття шляхом сколювання.

Таким чином, на підставі проведеного аналізу жаростійких покриттів, можна зробити висновок, що не існує універсальних захисних покриттів для енергетичного обладнання. Кожне жаростійке покриття і технологія його нанесення розробляється в залежності від умов його використання, температурних режимів експлуатації, ергономічної ефективності.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Yu-Lei Zhang, He-Jun Li, Xi-Yuan Yao, et al.* Oxidation protection of C/SiC coated carbon/carbon composites with Si-Mo coating at high temperature. *Corrosion Science*. 2011. V. 53. p. 2075-2079.
2. *Jian-Feng, Bo Wang, He-Jun Li, et al.* A MoSi₂/SiC oxidation protective coating for carbon/carbon composites. *Corrosion Science*. 2011 V. 53. p. 834-839.
3. *Yan Zhi-Qiao, Xiong Xiang, Xiao Peng, et al.* A multilayer coating of dense SiC alternated with porous Si-Mo for the oxidation protection of carbon/carbon silicon carbide composites. *Carbon*. 2008. V. 46. p. 149-153.
4. *Ткаченко Л.А., Шаулов А.Ю., Берлин А.А.* Защитные жаропрочные покрытия углеродных материалов. *Неорганические материалы*. 2012. Т. 48, №3. С. 261-271.
5. *Змий В.И., Руденький С.Г.* Реакционноактивированная диффузия и вакуумные покрытия. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2010. 158 с.
6. *Змий В.И., Руденький С.Г., Карцев Р.Ф., Бредихин М.Ю.* Влияние активатора, жидких сред и СВС-процесса на получение в вакууме комплексных защитных покрытий на конструкционных материалах. *Доповіді учасників V Міжнародної конференції «Вісник» УТМ*. 2009. №1(2).
7. *Babak V., Lyashenko B., Shchepetov V., Kharchenko S.* Heat Protective Coatings on Niobium Alloys *Mech. Adv. Technol.* no. 3(90). 2020. P. 88–98

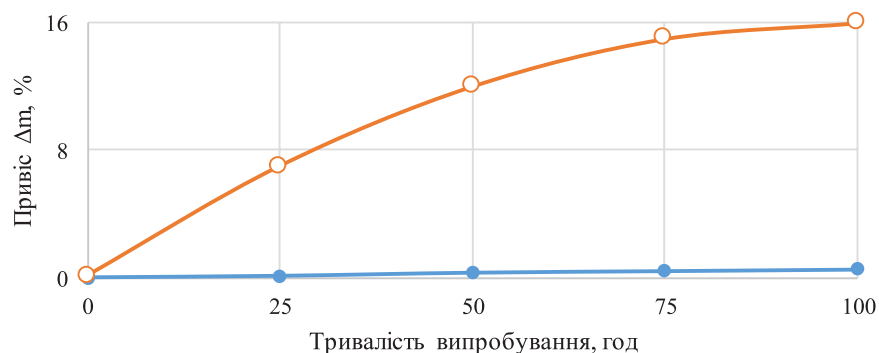


Рис. 3. Жаростійкість зразків матеріалу системи Fe(Ni)–Cr–Al–Y з жаростійким покриттям (●) і без покриття (○) [29]

8. Христофоров А.И., Ястребова С.А. Зависимость свойств керамических изделий от состава и технологических параметров. Огнеупоры и техническая керамика. 2006. № 9. С.32-36.
9. Kornmann Michel. Clay Bricks and Roof Tiles, Manufacturing and Properties. Paris: Lasim, 2007. 308 p.
10. Кашкаев И.С., Шейнман Е.Ш. Производство глиняного кирпича. М.: Высш. шк. 1978. 248 с.
11. Удачкин И.Б., Пащенко, А.А., Черняк Л.П., Захарченко П.В., Семидидько А.С., Мясникова Е.А. Комплексное развитие сырьевой базы промышленности строительных материалов. К.: Будівельник. 1988. 104 с.
12. Шарипов Р.Я., Стороженко Г.И. Заводской опыт внедрения новых технологий для улучшения качества керамического кирпича. Строительные материалы. 2005. № 6. С.11-13.
13. Огородник И.В. Особенности производства эффективной стеновой керамики. Строительные материалы и изделия. 2012. № 3(74). С. 23 – 26.
14. Gusev A.I., Rempel A.A., Magerl A.J. Disorder and Order in Strongly Nonstoichiometric Compounds: Transition Metal Carbides, Nitrides, and Oxides. Berlin: Springer, 2001.
15. Бобина М.М., Лоскутова Т.В., Погребова І.С., Бесов А.В. Жаростійкість карбідних покриттів на основі ніобію та хрому, нанесених на поверхню вуглецевих сталей. Фізика і хімія твердого тіла. 2007. Т.8. №4. С.827-830.
16. Змий В.И., Руденький С.Г., Кунченко В.В., Тимофеева Е.В., Кунченко Ю.В., Ажажа Р.В. Жаростойкие комплексные покрытия на углеродных материалах. Вопросы атомной науки и техники. 2014. № 2. С. 158-161.
17. Babak V.P., Shchepetov V.V., Suprun T.T., Kharchenko O.V., Kharchenko S.D. Thermal barrier coatings on niobium-based alloys structural materials. Mechanics and Advanced Technologies №2 (86), 2019.
18. Agüero A., Muelas R., Pastor A., Osgerby S. Long exposure steam oxidation testing and mechanical properties of slurry aluminide coatings for steam turbine components. Surface & Coatings Technology. 2005. No. 200. P. 1219–1224.
19. Agüero A., Muelas R., Gutierrez M., Van Vulpen R., Osgerby S., Banks J.P. Cyclic oxidation and mechanical behaviour of slurry aluminide coatings for steam turbine components. Surface & Coatings Technology. 2007. No. 201. P. 6253–6260.
20. Денисова В.С., Соловьева Г.А., Орлова Л.А. Синтез ресурсных жаростойких эмалевых покрытий на основе стекол барий-алюмосиликатной системы для никелевых сплавов. Успехи в химии и химической технологии. 2014. Т. XXVIII. №8. С 39–42.
21. Пугачева Н.Б. Современные тенденции развития жаростойких покрытий на основе алюминидов железа. Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2015. №3. С. 51–82.
22. Болтон У. Конструкционные материалы: металлы, сплавы, полимеры, керамика, композиты. Изд. Додэка-XXI. 325 с.
23. Иванова Л.А., Сергеева А.Е., Косицын Н.О. Композиционные материалы. Одесса: Полиграф, 2010. 190 с.
24. Любин Дж. Справочник по композиционным материалам : в 2-х т. М.: Машиностроение, 1988. Т.1. 584 с.
25. Иванова Л.А., Косицын Н.О. Процессы формообразования гетерогенных керамических систем. Полиграф, 2008. 124 с.
26. Иванова Л.А., Косицын Н.О. Синтез композиционных материалов на основе стабилизированного кремнезема. Наук. праці ОНАПТ. Вып.40. Т. 2. 2011. С. 381-385
27. Айлер Р. Химия кремнезема. М.: Мир, 1982. Т.1. 416 с
28. Соловьева Г.А. Жаростойкое стеклокерамическое покрытие для защиты деталей камер сгорания газотурбинных двигателей. Авиационные материалы и технологии. 2016. №4 (45). С18-22.
29. Пугачева Н.Б. Современные тенденции развития жаростойких покрытий на основе алюминидов железа. Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2015. №3. С. 51–82.
30. Ачимов А.А., Толмачев И.М., Удовиченко С.Ю. Исследование жаростойкого диффузионного покрытия на лопатках газотурбинных двигателей из жаропрочного никелевого сплава. Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2014. №7. С. 105–111.

HEAT-RESISTANT COATINGS AND PROSPECTS OF THEIR USE FOR PROLONGATION OF THE RESOURCE OF POWER EQUIPMENT (Review).

Kharchenko S., Kovtun S.

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist (Zhelyabova) Str., Kyiv, 03057, Ukraine.

<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2021.10>

An analysis of modern heat-resistant materials has been carried out, which contain refractory compounds of borides, nitrides, carbides with a limiting melting point of about 2000 °C. New approaches to obtaining heat-resistant materials and the results of studying their structure, phase composition, physical and mechanical properties are shown. For elements of power equipment, an effective and economically sound approach that has a significant effect is the use of heat-resistant coatings. Each heat-resistant covering and technology of its drawing is developed depending on conditions of its use, temperature modes of operation, ergonomic efficiency. The main method of increasing the operating temperature of the ceramic coating layer is to change the chemical composition of the ceramic by introducing an additional number of alloying rare earth elements. An important method of improving the quality of heat-resistant coatings is to optimize the thickness of the ceramic layer and the formation of a barrier microlayer at the interface.

References 30, table 1, figures 3

Key words: heat-resistant coatings, refractory compounds, power equipment.

1. *Yu-Lei Zhang, He-Jun Li, Xi-Yuan Yao, et al.* Oxidation protection of C/SiC coated carbon/carbon composites with Si-Mo coating at high temperature. *Corrosion Science*. 2011. V. 53. p. 2075-2079.
2. *Jian-Feng, Bo Wang, He-Jun Li, et al.* A MoSi₂/SiC oxidation protective coating for carbon/carbon composites. *Corrosion Science*. 2011 V. 53. p. 834-839.
3. *Yan Zhi-Qiao, Xiong Xiang, Xiao Peng, et al.* A multilayer coating of dense SiC alternated with porous Si-Mo for the oxidation protection of carbon/carbon silicon carbide composites. *Carbon*. 2008. V. 46. p. 149-153.
4. *Tkachenko L.A., Shaulov A.Yu., Berlin A.A.* [Protective heat-resistant coatings of carbon materials], [Inorganic materials], 2012. V. 48, №3. P. 261-271. (in Rus.)
5. *Serpent V.I., Rudenkiy S.G.* [Reaction-activated diffusion and vacuum coatings]. Kharkiv: [NSC KIPT], 2010. 158 p. (in Rus.)

6. *Zmiy VI, Rudenky SG, Kartsev RF, Bredikhin M.Yu.* [Influence of activator, liquid media and SHS process on obtaining vacuum protective coatings on structural materials]. [Reports of the participants of the V International Conference "Bulletin" UTM]. 2009. №1(2). (in Rus.)
7. *Babak V., Lyashenko B., Shchepetov V., Kharchenko S.* Heat Protective Coatings on Niobium Alloys *Mech. Adv. Technol.* №3(90). 2020. P. 88-98
8. *Khristoforov A.I., Yastrebova S.A.* [Dependence of the properties of ceramic products on the composition and technological parameters], [Refractories and technical ceramics], 2006. № 9. P.32-36. (in Rus.)
9. *Kornmann Michel.* Clay Bricks and Roof Tiles, Manufacturing and Properties. Paris: Lasim, 2007. 308 p.
10. *Kashkayev I.S., Sheinman E.Sh.* [Clay brick production]. M.: [Higher school]. 1978. 248 p. (in Rus.)
11. *Udachkin I.B., Pashchenko, A.A., Chernyak L.P., Zakharchenko P.V., Semididko A.S., Myasnikova E.A.* [Comprehensive development of the raw material base of the building materials industry]. K.: [Budivelnik]. 1988. 104 p. (in Rus.)
12. *Sharipov R.Ya., Storozhenko G.I.* [Factory experience in introducing new technologies to improve the quality of ceramic bricks], [Construction Materials], 2005. № 6. P.11-13. (in Rus.)
13. *Ogorodnik I.V.* [Features of the production of effective wall ceramics], [Building materials and products]. 2012. №3(74). C. 23-26. (in Rus.)
14. *Gusev A.I., Rempel A.A., Magerl A.J.* Disorder and Order in Strongly Nonstoichiometric Compounds: Transition Metal Carbides, Nitrides, and Oxides. Berlin: Springer, 2001.
15. *Bobina M.M., Loskutova T.V., Pogrebova I.S., Busov A.V.* [Heat resistance of carbide coatings based on niobium and chromium, applied to the surface of carbon steels], [Physics and chemistry of solid solid]. 2007. V.8. №4. P.827-830. (in Ukr.)
16. *Serpent V.I., Rudenkiy S.G., Kunchenko V.V., Timofeeva E.V., Kunchenko Yu.V., Azhazha R.V.* [Heat-resistant complex coatings on carbon materials], [Questions of atomic science and technology]. 2014. № 2. P. 158-161. (in Rus.)
17. *Babak V.P., Shchepetov V.V., Suprun T.T., Kharchenko O.V., Kharchenko S.D.* Thermal barrier coatings on niobium-based alloys structural materials. *Mechanics and Advanced Technologies* №2 (86), 2019.
18. *Agüero A., Muelas R., Pastor A., Osgerby S.* Long exposure steam oxidation testing and mechanical properties of slurry aluminide coatings for steam turbine components. *Surface & Coatings Technology*. 2005. No. 200. P. 1219–1224.

19. *Agüero A., Muelas R., Gutierrez M., Van Vulpen R., Osgerby S., Banks J.P.* Cyclic oxidation and mechanical behaviour of slurry aluminide coatings for steam turbine components. *Surface & Coatings Technology*. 2007. No. 201. P. 6253–6260.
20. *Denisova V.S., Solovieva G.A., Orlova L.A.* [Synthesis of resource heat-resistant enamel coatings based on glasses of bariumaluminosilicate system for nickel alloys], [*Advances in chemistry and chemical technology*], 2014. V.XXVIII. №8. P.39-42. (in Rus.)
21. *Pugacheva N.B.* [Modern trends in the development of heat-resistant coatings based on iron aluminides]. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2015. №3. P. 51–82. (in Rus.)
22. *Bolton W.* [Structural materials: metals, alloys, polymers, ceramics, composites]. Ed. Dodeka -XXI. 325 p. (in Rus.)
23. *Ivanova L.A., Sergeeva A.E., Kositsyn N.O.* [Composite materials]. Odessa: Polygraph. 2010. 190 p. (in Rus.)
24. *Lubin J.* [Handbook of composite materials: in 2 volumes]. M. : [Mechanical engineering], 1988. V.1. 584 p. (in Rus.)
25. *Ivanova L.A., Kositsyn N.O.* [Formation processes of heterogeneous ceramic systems]. *Polygraph*, 2008. 124 p. (in Rus.)
26. *Ivanova L.A., Kositsyn N.O.* [Synthesis of composite materials based on stabilized silica]. [*Science. works of ONAPT*]. V. 40(2). 2011. P. 381-385 (in Rus.)
27. *Ayler R.* [Chemistry of silica]. M. : [Mir], 1982. V.1. 416 p.(in Rus.)
28. *Solovyova G.A.* [Heat-resistant glass-ceramic coating for protection of parts of combustion chambers of gas turbine engines]. [*Aviation materials and technologies*]. 2016. №4 (45). P. 18-22. (in Rus.)
29. *Pugacheva N.B.* [Modern trends in the development of heat-resistant coatings based on iron aluminides]. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2015. №3. P. 51–82. (in Rus.)
30. *Achimov A.A., Tolmachev I.M., Udovichenko S.Yu.* [Investigation of a heat-resistant diffusion coating on gas turbine engine blades made of a heat-resistant nickel alloy]. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2014. №7. P. 105–111. (in Rus.)

Отримано 20.07.2021
Received 20.07.2021