

DOI: 10.15593/2224-9400/2021.2.08

УДК 669.2

П.В. Сквородников, В.З. Пойлов, О.В. Погудин

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ХИМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ К ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КОРРОЗИИ КОМПОНЕНТОВ ПОКРЫТИЙ

Современные исследования в направлении разработки стойких к окислению и коррозии материалов, применяемых при изготовлении защитных покрытий для различных условий эксплуатации, не прекращаются. Наиболее используемыми в настоящее время являются оксиды металлов Al_2O_3 , Cr_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 , SiO_2 , MgO , Y_2O_3 , формирующих слой термобарьерного покрытия. Такие покрытия должны быть стойкими к действию корродирующих агентов, которые в результате химического взаимодействия способны привести к деструкции покрытия. В качестве корродирующих агентов могут выступить продукты полного сгорания авиационного топлива CO_2 и H_2O , а также примесные соединения серы, азота и ванадия. Не исключено присутствие в рабочей среде газотурбинного двигателя солей Na_2SO_4 и $NaCl$, поступивших с потоком воздуха из атмосферы, которые также ускоряют процесс коррозии.

Данная работа посвящена термодинамической оценке химической стойкости компонентов защитных покрытий при воздействии корродирующих агентов, позволяющая спрогнозировать их поведение в конкретной среде.

Термодинамический анализ был проведен с использованием программного обеспечения в температурном интервале от 500 до 1200 °C с шагом 100 °C.

В результате проведенных расчетов было установлено, что присутствие SO_3 способствует интенсификации коррозии за счет образования сульфатов, которые при высоких температурах разлагаются с выделением серосодержащих газов. При воздействии хлор-ионов и газообразного углерода высока вероятность образования летучих хлоридов металлов. Образование газообразных продуктов приводит к формированию в покрытии трещин и каналов, способствующих транспорту корродирующих агентов.

Полученные данные термодинамических характеристик представляют научный и практический интерес для исследователей, активно занимающихся разработкой и модернизацией имеющихся систем защитных покрытий материалов авиационной и космической техники.

Ключевые слова: высокотемпературная коррозия, газовая коррозия, корродирующий агент, защитное покрытие, термодинамический анализ, энергии Гиббса.

P.V. Skovorodnikov, V.Z. Poilov, O.V. Pogudin

Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

THERMODYNAMIC EVALUATION OF CHEMICAL RESISTANCE COATINGS COMPONENTS TO HOT CORROSION

Recent research the development of oxidation and corrosion resistant materials used in the manufacture of protective coatings for various operating conditions continues. At present are metal oxides Al_2O_3 , Cr_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 , SiO_2 , MgO , Y_2O_3 , which form a layer of thermal barrier coating the most used. Such coatings must be resistant to the action of corrosive agents which as a result of chemical interaction may trigger to the destruction of the coating. The products of complete combustion of aviation fuel CO_2 and H_2O , as well as impurity compounds of sulfur, nitrogen and vanadium are corrosive agents. The presence of Na_2SO_4 and $NaCl$ salts in the operating environment of the gas turbine engine which came with the air flow from the atmosphere is not excluded.

This article considers to the thermodynamic assessment of the chemical resistance of the protective coatings components to corrosive agents exposed, which it possible their behavior in a specific environment to predict.

Thermodynamic analysis out using software in the temperature range from 500 to 1200 °C with a step of 100 °C was carried.

As a result of the calculations that the presence of SO_3 probably contributes to the intensification of corrosion due to the formation of sulfates it was found which decompose at high temperatures with the release of sulfur-containing gases

Exposure to chlorine ions and gas carbon, there is a high probability to formation of volatile metal chlorides. The formation of gaseous products leads to the formation of cracks and channels in the coating carrying out the transport of corrosive agents.

The obtained data of thermodynamic characteristics are of scientific and practical interest for researchers actively engaged in the development and modernization of existing systems of protective coatings for materials of aviation and space technology.

Keywords: *hot corrosion, gas corrosion, corrosive agent, protective coating, thermodynamic analysis, Gibbs energy.*

Введение. Положительная динамика в направлении разработки новых и модернизации имеющихся систем покрытий не прекращается и требует применения точных методов анализа принятых технологических и конструкторских решений. Оценить химическую стойкость компонентов защитных покрытий можно путем проведения термодинамического анализа, по полученным расчетным данным которого можно сделать вывод об используемых компонентах, выявить, являются ли они реакционно-способными при воздействии корродирующих агентов.

В данном исследовании в качестве компонентов защитных покрытий к высокотемпературной коррозии на основе безопасности и доступности были выбраны следующие соединения: Al_2O_3 , Cr_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 , а также SiO_2 , MgO , Y_2O_3 , используемые в качестве добавок к покрытиям, стабилизирующих их структуру [1–4].

В качестве корродирующих агентов были выбраны соединения, представляющие рабочую среду газотурбинного двигателя и компоненты химически активной окружающей среды. Таким образом, были оценены возможные реакции взаимодействия с H_2O , SO_2 , SO_3 , H_2S , CO_2 , HCl , Cl_2 , Na_2SO_4 и NaVO_3 .

Термодинамический анализ. Величиной, характеризующей химические процессы, протекающие при постоянном давлении и температуре, является энергия Гиббса (ΔG), рассчитываемая по уравнению

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_T^0 - T\Delta S_T^0, \quad (1)$$

где ΔH_T^0 – энтальпия (теплота реакции), Дж/моль; S_T^0 – энтропия, Дж/(моль·К). В данном случае энергия Гиббса является равнодействующей для энтальпийного и энтропийного факторов, а знак минус отражает их взаимное противоположное влияние.

При этом значение энергии Гиббса в исследуемом интервале температур характеризует направление протекания химической реакции: если $\Delta G < 0$, то возможно самопроизвольное протекание процесса; если $\Delta G > 0$, то самопроизвольное протекание процесса невозможно [5].

Термодинамический расчет (ΔG) проводили с использованием программного продукта HSC Chemistry 6.0, для установления вероятности протекания химических реакций между компонентами покрытий и корродирующих агентов в температурном интервале от 500 до 1200 °С с шагом в 100 °С.

Полученные результаты и их обсуждение. Полное сгорание авиационного топлива сопровождается образованием CO_2 и H_2O , присутствие данных газов может оказывать действие на химическую стабильность защитных покрытий [6]. Для оценки влияния продуктов сгорания были проведены термодинамические расчеты, результаты которых представлены на рис. 1 и в реакциях (2), (4), (5), (7)–(9), (11), (13).

При рассмотрении взаимодействия оксидов с диоксидом серы на основании значений энергии Гиббса было установлено, что данные химические реакции не способны к самопроизвольному протеканию в диапазоне исследуемых температур (рис. 2).

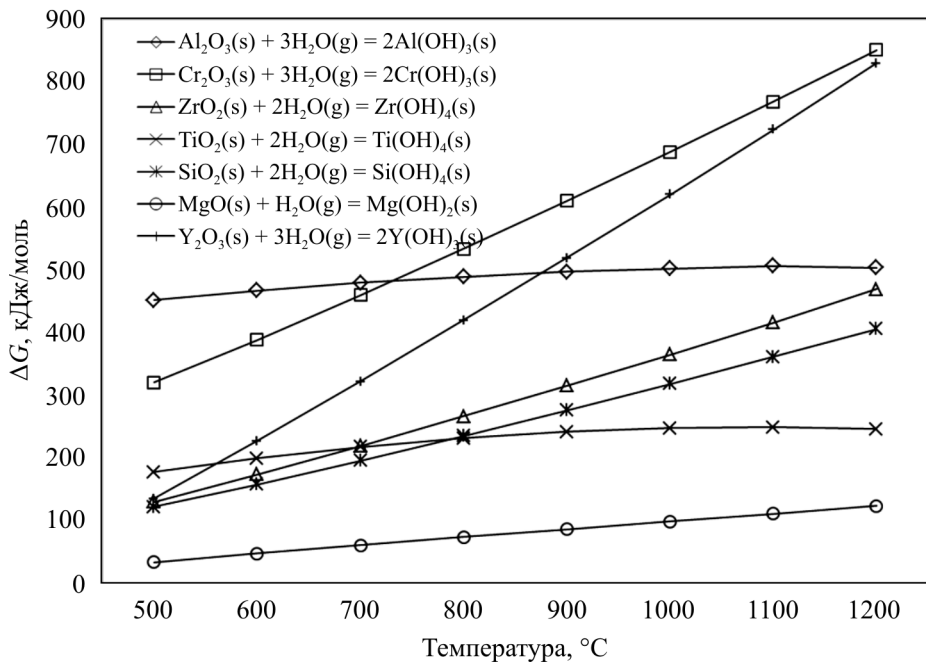


Рис. 1. Зависимость энергии Гиббса от температуры для реакций взаимодействия с H_2O

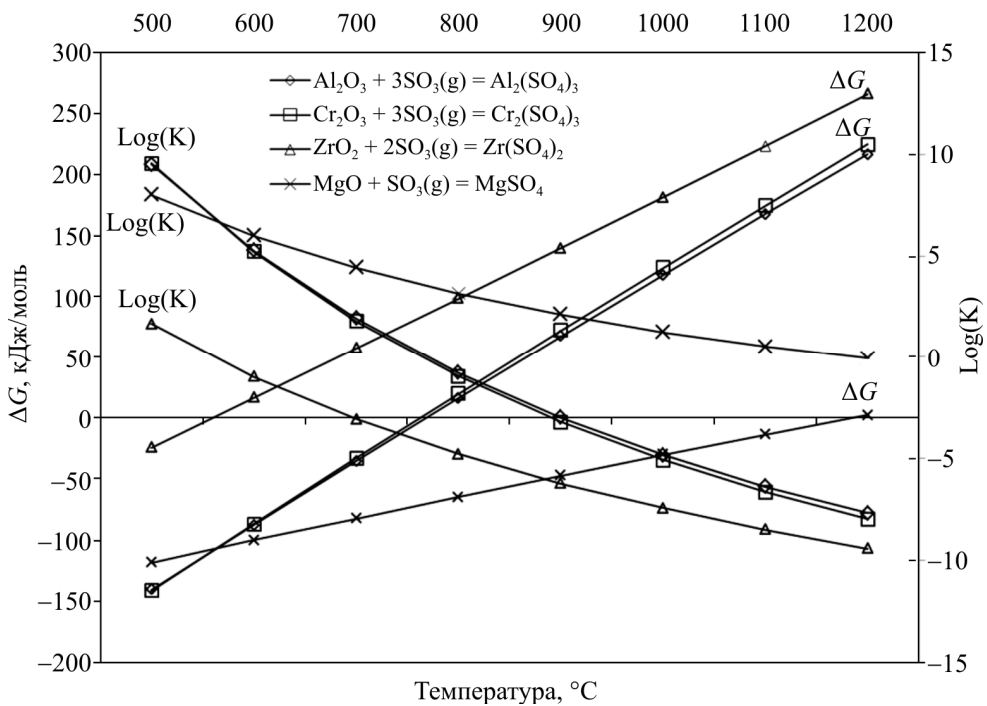


Рис. 2. Зависимость энергии Гиббса от температуры для реакций взаимодействия с SO_3

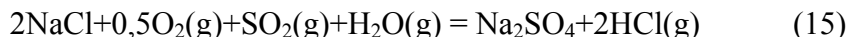
Данные выполненных термодинамических расчетов показывают, что при большей реакционной способности компонентов защитных покрытий возможно самопроизвольное взаимодействие при непосредственном контакте с продуктами сгорания авиационного топлива и других газов, присутствующих в объеме газотурбинного двигателя. Таким образом, была оценена возможность протекания реакций между рассматриваемыми оксидами металлов и SO_3 , CO_2 , H_2S [7–10].

На основании полученных данных термодинамических расчетов было установлено, что все оксиды проявляют химическую стойкость к воздействию CO_2 и H_2S во всем интервале температур (500–1200 °C).



Однако при взаимодействии с SO_3 возможно образование сульфатов, которые разлагаются с выделением серосодержащих газов, в результате чего увеличивается пористость защитного покрытия. Образование MgSO_4 протекает необратимо в прямом направлении в интервале температур от 500 до 1170 °C, при чем с увеличением температуры константа скорости уменьшается, что говорит о меньшей полноте протекания реакции. Образование $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ и $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$ происходит до температуры 750–760 °C. ZrO_2 наименее устойчив до температуры 560 °C, далее с увеличением температуры самопроизвольное образование $\text{Zr}(\text{SO}_4)_2$ невозможно.

Серьезной проблемой является присутствие хлорида натрия, который способствует образованию сульфата натрия и молекулярного хлора или хлороводорода по реакциям:



Образованный в результате реакции (14) молекулярный хлор в присутствии газообразного углерода приводит к образованию хлоридов металлов, которые вследствие летучести могут приводить к истощению защитного покрытия.

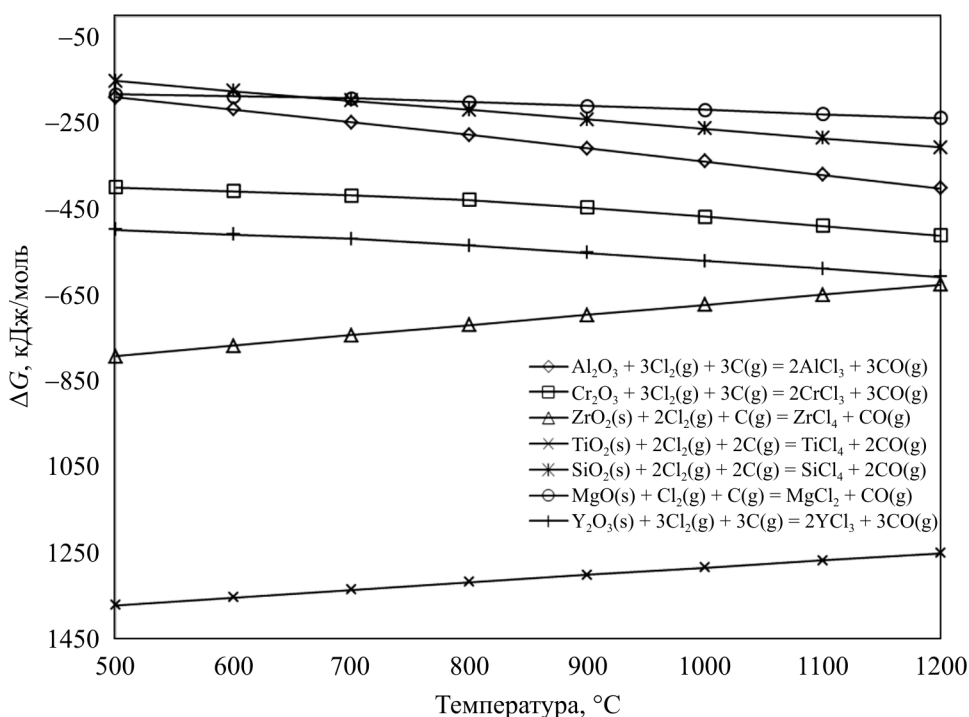


Рис. 3. Зависимость энергии Гиббса от температуры для реакций образования хлоридов

На рис. 3 видно, что самопроизвольное протекание всех реакций в указанном температурном диапазоне возможно, при этом отмечено, что наибольшее значение энергии Гиббса соответствует реакции образования TiCl_4 .

При температуре 500–600 °C реакция (16) является необратимой, в результате чего происходит образование алюмината натрия, имеющего температуру плавления выше 1700 °C.



В то же время выделившийся хлор в реакции (16) может дальше взаимодействовать с компонентами покрытия с образованием хлоридов металлов, выступая в этом случае в роли катализатора процесса коррозии.

Соль Na_2SO_4 может присутствовать в рабочей зоне газотурбинного двигателя вследствие поступления из атмосферы или протекания реакций (14) и (15) [11–14]. Температура плавления Na_2SO_4 составляет 883°C , что, вероятно, может способствовать растворению оксидов в плавящейся соли. Однако по результатам термодинамических расчетов установлено, что SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 стабильны в Na_2SO_4 и предотвращают коррозионное воздействие, препятствуя высокой скорости флюсования. Хотя в присутствии N_2O_5 возможно плавление MgO в Na_2SO_4 . Взаимодействие Na_2SO_4 с Cr_2O_3 , TiO_2 , Y_2O_3 не происходит. Полученные данные представлены на рис. 4.

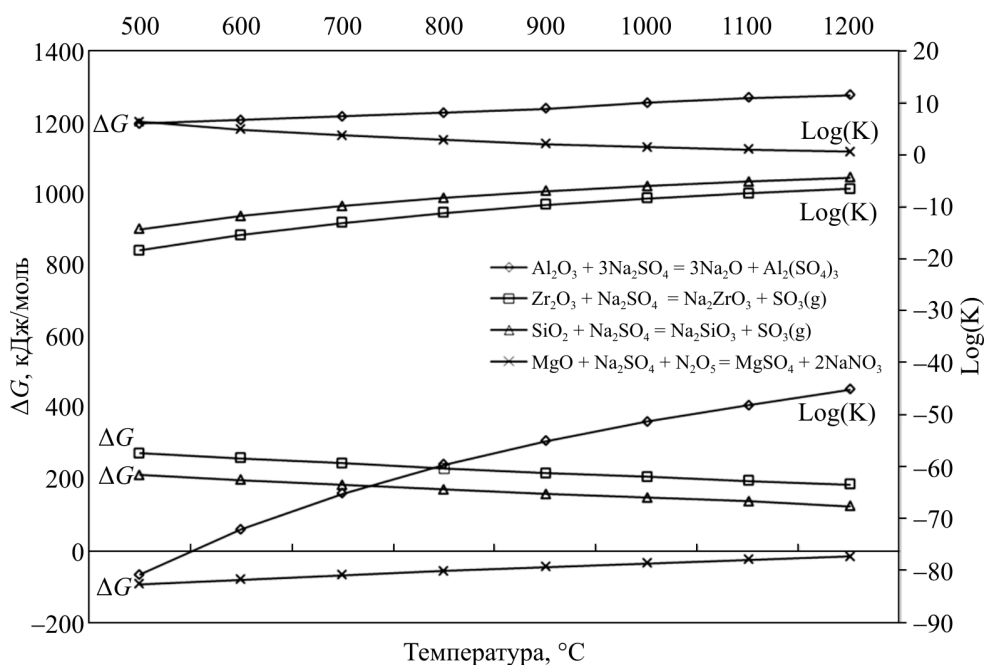


Рис. 4. Зависимость энергии Гиббса от температуры для реакций с Na_2SO_4

В диапазоне температур $1000\text{--}1200^\circ\text{C}$ возможно образование ванадата натрия, плавящегося при температуре 630°C :



Из зависимости энергии Гиббса от температуры (рис. 5) следует, что самопроизвольное протекание реакций с NaVO_3 невозможно. Можно сделать вывод, что используемые в изготовлении оксиды металлов могут быть химически стабильны при воздействии расплавленной соли.

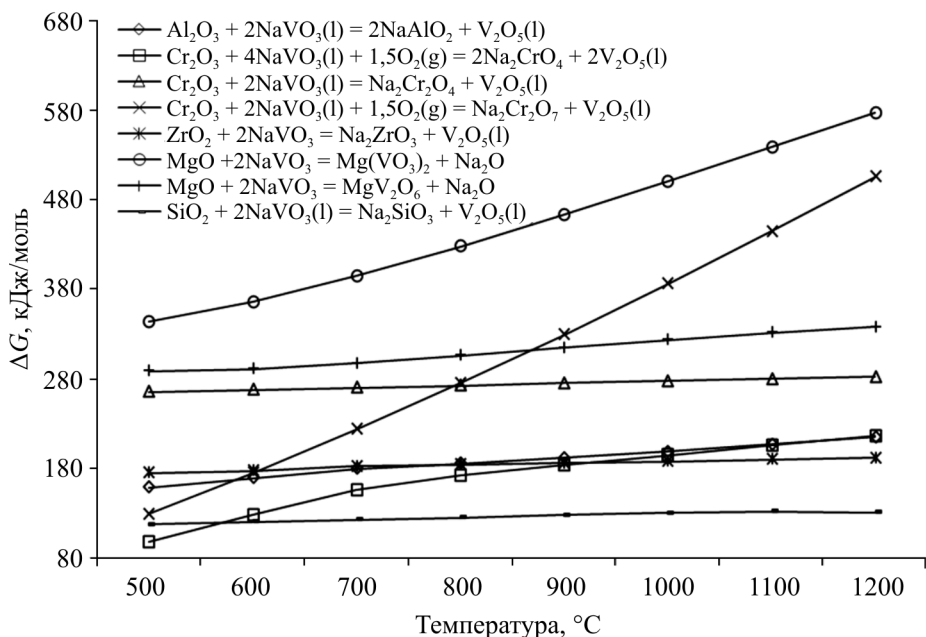


Рис. 5. Зависимость энергии Гиббса от температуры для реакции с NaVO_3

При воздействии расплавленной соли на Al_2O_3 и Cr_2O_3 возможно образование AlVO_4 ($T_{\text{пл}} = 625^\circ\text{C}$) и CrVO_4 ($T_{\text{пл}} = 810^\circ\text{C}$), что негативно скажется на свойствах защитных покрытий, так как расплав может адсорбироваться в порах, что приведет в дальнейшем к разрушению при термоциклировании.

Из литературных данных [15, 16] известно, что при взаимодействии NaVO_3 с покрытием YSZ (ZrO_2 стабилизированный Y_2O_3) происходит взаимодействие по следующей реакции:



В результате протекания реакции (18) происходит образование YVO_4 и истощение покрытия YSZ, связанное с миграцией иттрия к поверхности раздела покрытие – расплав соли, при этом ZrO_2 переходит из тетрагональной в моноклинную фазу.

Выводы. В результате проведенного термодинамического анализа была установлена вероятность протекания химических реакций между компонентами защитных покрытий и корродирующих агентов, данные которых могут быть использованы при прогнозировании химической стабильности разрабатываемых покрытий.

При рассмотрении взаимодействия различных газовых и твердых загрязнителей, которые могут присутствовать в активной зоне работающего газотурбинного двигателя, было установлено:

1. H_2O , SO_2 , CO_2 , H_2S в температурном диапазоне от 500 до 1200 °C не взаимодействуют с рассматриваемыми оксидами металлов, используемых в составе покрытий.

2. При взаимодействии Al_2O_3 , Cr_2O_3 , ZrO_2 , MgO с SO_3 возможно образование сульфатов металлов в ограниченном температурном интервале, при этом нахождение сульфатов в покрытии и дальнейшая работа двигателя при высоких температурах могут привести к разложению этих соединений с образованием серосодержащих газов. Выделение газов приведет к увеличению пористости покрытия и возникновению дефектов.

3. Все рассматриваемые в исследовании оксиды способны образовывать летучие хлориды в присутствии газообразного углерода. Наиболее стойким в данной среде может оказаться Al_2O_3 , MgO и SiO_2 . Образование хлоридов также ведет к возникновению дефектов в покрытии и ускорению скорости коррозионного поражения.

4. Наименее химически стабильным оксидом в расплавленной соли Na_2SO_4 оказался MgO , который в присутствии оксидов азота растворяясь, образует MgSO_4 .

5. Исследуемые оксиды металлов оказались устойчивы к действию NaVO_3 , так как образование в этом случае солей натрия или ванадатов металлов, имеющих довольно высокую температуру плавления (выше 1200–1300 °C), маловероятно.

Список литературы

1. Коррозия металлов и защитные покрытия / В.А. Васин, О.В. Сомов, В.А. Сорокин, И.В. Суминов, В.П. Францкевич, А.В. Эпельфельд. – М.; СПб.: Реноме, 2015. – 368 с.

2. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия / под ред. Е.Н. Каблова. – М.: Наука, 2006. – 632 с.

3. Жаропрочность литейных никелевых сплавов и защита их от коррозии / Б.Е. Патон, Г.Б. Строганов, С.Т. Кишкин, С.З. Бокштейн, А.В. Логунов, И.С. Малашенко, Б.А. Мовчан, В.А. Чумаков. – Киев: Наукова думка, 1987. – 256 с.

4. Хокинг М., Васантасари В., Сидки П. Металлические и керамические покрытия: получение, свойства и применение. – М.: Мир, 2000. – 518 с.
5. Стромберг А.Г., Семченко Д.П. Физическая химия. – М.: Высшая школа, 1988. – 496 с.
6. High-temperature corrosion of an Fe-Ni-based alloy HR6W under various conditions at 750 °C and 810 °C: effect of the temperature, water vapor, simulated ash and SO₂ / Zhiyuan Liang, Tingshan Guo, Shifeng Deng, Qinxin Zhao // *Materials Chemistry and Physics*. – 2020. – Vol. 256. – P. 1–17. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2020.123670
7. Surface sulphide formation on high-temperature corrosion resistance alloys in a H₂S-HCl-CO₂ mixed atmosphere / Manuela Nimmervoll, Alexander Schmid, Gregor Mori, Stefan Honig, Roland Haubner // *Corrosion Science*. – 2021. – Vol. 181. – P. 1–11. DOI: 10.1016/j.corsci.2021.109241
8. Hot corrosion resistance of air plasma sprayed ceramic SSA thermal barrier coatings in simulated gas turbine environments / Baskaran T., Arya Sh.Bh. // *Ceramics International*. – 2018. – Vol. 44. – P. 17695–17708. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.06.234
9. Electrochemical corrosion behavior of carbon steel under dynamic high pressure H₂S/CO₂ environment / Zhang G.A., Zeng Y., Gua X.P., Jiang F., Shi D.Y., Chen Z.Y. // *Corrosion Science*. – 2012. – Vol. 65. – P. 37–47. DOI: 10.1016/j.corsci.2012.08.007
10. The intergranular corrosion of mild steel in CO₂+NaNO₂ solution / Yong Zhou, Yu Zuo // *Electrochimica Acta*. – 2015. – Vol. 154. – P. 157–165. DOI: 10.1016/j.electacta.2014.12.053
11. Effect of nanostructure Fe-Ni-Co spinel oxides/Y₂O₃ coatings on the high-temperature oxidation behavior of Crofer 22 APU stainless steel interconnect / Fatemeh Saeidpour, Hadi Ebrahimifar // *Corrosion Science*. – 2021. – Vol. 182. – P. 1–13. DOI: 10.1016/j.corsci.2021.109280
12. Investigation of three steps of hot corrosion process in Y₂O₃ stabilized ZrO₂ coatings including nano zones / Mohammadreza Daroonparvar, Muhamad Azizi Mat Yajid, Noordin Mohd Yusof, Hamid Reza Bakhsheshi-Rad, Esah Hamzah, Mohsen Nazoktabar // *Journal of Rare Earths*. – 2014. – Vol. 32, no. 10. – P. 989–1002. DOI: 10.1016/S1002-0721(14)60173-3
13. Hot corrosion of Gd₂Zr₂O₇, Gd₂Zr₂O₇/YbSZ, YSZ+Gd₂Zr₂O₇/YbSZ, and YSZ thermal barrier coatings exposed to Na₂SO₄+V₂O₅ / Mohadese Tabeshfar, Mehdi Salehi, Ghasem Dini, Paul Inge Dahl, Mari-Ann Einarsrud, Kjell Wiik // *Surface and Coatings Technology*. – 2021. – Vol. 409. – P. 1–14. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126718
14. Hot corrosion behavior of La₂Zr₂O₇ with the addition of Y₂O₃ thermal barrier coatings in contacts with vanadate-sulfate salts / Zhenhua Xu, Limin He, Rende Mu, Shimei He, Guanghong Huang, Xueqiang Cao // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2010. – Vol. 502, no. 2. – P. 382–385. DOI: 10.1016/j.jallcom.2010.05.121

15. Hot corrosion behavior of $\text{Sc}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ thermal barrier coatings in presence of $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{+V}_2\text{O}_5$ molten salt / Liu H-f., Xiong X., Li X-b., Wang Ya-l // *Corrosion Science*. – 2014. – Vol. 85. – P. 87–93. DOI: org/10.1016/j.corsci.2014.04.001

16. Hot-corrosion resistance and phase stability of $\text{Yb}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3$ costabilized zirconia-based thermal barrier coatings against $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{+V}_2\text{O}_5$ molten salts / Dawon Song, Taeseup Song, Ungyu Paik, Guanlin Lyu, Jinseong Kim, Seung Cheol Yang, Yeon-Gil Jung // *Surface and Coatings Technology*. – 2020. – Vol. 400. – P. 1–7. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126197

References

1. Vasin V.A., Somov O.V., Sorokin V.A., Suminov I.V., Frantskevich V.P., Epel'fel'd A.V. Korroziia metallov i zashchitnye pokrytiia [Metals corrosion and protect coatings]. Moscow, Saint Petersburg, Renome, 2015, 368 p.

2. Lite lopatki gazoturbinnnykh dvigatelei: splavy, tekhnologii, pokrytiia [Cast blades of gas turbine engines: alloys, technologies, coatings] Ed. E.N. Kablov. Moscow, Nauka, 2006, 632 p.

3. Paton B.E., Stroganov G.B., Kishkin S.T., Bokshtein S.Z., Logunov A.V., Malashenko I.S., Movchan B.A., Chumakov V.A. Zharoprochnost' liteinykh nikelovykh splavov i zashchita ikh ot korrozii [Heat resistance of caster nickel alloys and their protection against corrosion]. Kiev, Naukova dumka, 1987, 256 p.

4. Khoking M., Vasantasari V., Sidki P. Metallicheskie i keramicheskie pokrytiia: Poluchenie, svoistva i primeneniye [Metallic and Ceramic Coatings: Production, High Temperature Properties and Applications]. Moscow, Mir, 2000, 518 p.

5. Stromberg A.G., Semchenko D.P. Fizicheskaya khimiya [Physical Chemistry]. Moscow, Vysshaya shkola, 1988, 496 p.

6. Zhiyuan Liang, Tingshan Guo, Shifeng Deng, Qinxin Zhao. High-temperature corrosion of an Fe-Ni-based alloy HR6W under various conditions at 750 °C and 810 °C: effect of the temperature, water vapor, simulated ash and SO_2 . *Materials Chemistry and Physics*, 2020, vol. 256, pp. 1–17. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2020.123670

7. Manuela Nimmervoll, Alexander Schmid, Gregor Mori, Stefan Honig, Roland Haubner. Surface sulphide formation on high-temperature corrosion resistance alloys in a $\text{H}_2\text{S-HCl-CO}_2$ mixed atmosphere. *Corrosion Science*, 2021, vol. 181, pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.corsci.2021.109241

8. Baskaran T., Arya Sh.Bh. Hot corrosion resistance of air plasma sprayed ceramic SSA thermal barrier coatings in simulated gas turbine environments. *Ceramics International*, 2018, vol. 44, pp. 17695–17708. DOI:10.1016/j.ceramint.2018.06.234

9. Zhang G.A., Zeng Y., Gua X.P., Jiang F., Shi D.Y., Chen Z.Y. Electrochemical corrosion behavior of carbon steel under dynamic high pressure $\text{H}_2\text{S/CO}_2$ environment. *Corrosion Science*, 2012, vol.65, pp. 37–47. DOI: 10.1016/j.corsci.2012.08.007

10. Yong Zhou, Yu Zuo. The intergranular corrosion of mild steel in $\text{CO}_2+\text{NaNO}_2$ solution. *Electrochimica Acta*, 2015, vol. 154, pp. 157–165. DOI: 10.1016/j.electacta.2014.12.053
11. Fatemeh Saeidpour, Hadi Ebrahimifar. Effect of nanostructure Fe-Ni-Co spinel oxides/ Y_2O_3 coatings on the high-temperature oxidation behavior of Crofer 22 APU stainless steel interconnect. *Corrosion Science*, 2021, vol. 182, pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.corsci.2021.109280
12. Mohammadreza Daroonparvar, Muhamad Azizi Mat Yajid, Noordin Mohd Yusof, Hamid Reza Bakhsheshi-Rad, Esah Hamzah, Mohsen Nazoktabar. Investigation of three steps of hot corrosion process in Y_2O_3 stabilized ZrO_2 coatings including nano zones. *Journal of Rare Earths*, 2014, vol. 32, no. 10, pp. 989–1002. DOI: 10.1016/S1002-0721(14)60173-3
13. Mohadese Tabeshfar, Mehdi Salehi, Ghasem Dini, Paul Inge Dahl, Mari-Ann Einarsrud, Kjell Wiik. Hot corrosion of $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$, $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7/\text{YbSZ}$, $\text{YSZ}+\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7/\text{YbSZ}$, and YSZ thermal barrier coatings exposed to $\text{Na}_2\text{SO}_4+\text{V}_2\text{O}_5$. *Surface and Coatings Technology*, 2021, vol. 409, pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126718
14. Zhenhua Xu, Limin He, Rende Mu, Shimei He, Guanghong Huang, Xueqiang Cao. Hot corrosion behavior of $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ with the addition of Y_2O_3 thermal barrier coatings in contacts with vanadate-sulfate salts. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, vol. 502, no. 2, pp. 382–385. DOI: 10.1016/j.jallcom.2010.05.121
15. Liu H-f., Xiong X., Li X-b., Wang Ya-l. Hot corrosion behavior of $\text{Sc}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ thermal barrier coatings in presence of $\text{Na}_2\text{SO}_4+\text{V}_2\text{O}_5$ molten salt. *Corrosion Science*, 2014, vol. 85, pp. 87–93. DOI: 10.1016/j.corsci.2014.04.001
16. Dawon Song, Taeseup Song, Ungyu Paik, Guanlin Lyu, Jinseong Kim, Seung Cheol Yang, Yeon-Gil Jung. Hot-corrosion resistance and phase stability of $\text{Yb}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3$ costabilized zirconia-based thermal barrier coatings against $\text{Na}_2\text{SO}_4+\text{V}_2\text{O}_5$ molten salts. *Surface and Coatings Technology*, 2020, vol. 400, pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126197

Получено 30.04.2021

Об авторах

Сковородников Павел Валерьевич (Пермь, Россия) – аспирант кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: pavel.skovorodnikov@yandex.ru).

Пойлов Владимир Зотович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: vladimirpoilov@mail.ru).

Погудин Олег Владимирович (Пермь, Россия) – ведущий инженер кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: veretie@yandex.ru).

About the authors

Pavel V. Skovorodnikov (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Chemical Technology, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: pavel.skovorodnikov@yandex.ru).

Vladimir Z. Poilov (Perm, Russian Federation) – Doctor in Technical Sciences, Professor, Department of Chemical Technology, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: vladimirpoilov@mail.ru).

Oleg V. Pogudin (Perm, Russian Federation) – Senior Engineer, Department of Chemical Technology, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: veretie@yandex.ru).