

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621.785.377

doi: 10.31498/2225-6733.38.2019.181270

© Маслов В.А.¹, Пустовалов Ю.П.², Трофімова Л.А.³, Дан Л.А.⁴

ДИНАМИКА ПРЕВРАЩЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ ИНТЕРКАЛИРОВАНИЯ ГРАФИТА ПРИ ТЕРМОШОКОВОМ НАГРЕВЕ

Рассмотрен процесс расширения графита ГАК-2, полученного из железграфитовых отходов металлургического производства, при образовании термографенита. Исследована микроструктура, образующаяся при интеркаливании и термошоковом нагреве частиц графита. Найдена связь между объемной плотностью термографенита и степенью расширения частиц исходного материала.

Ключевые слова: соединения интеркалированного графита, термографенит, расширение, объемная плотность.

Маслов В.О., Пустовалов Ю.П., Трофімова Л.О., Дан Л.О. Динаміка перетворення сполук інтеркалювання графіту при термошоковому нагріві. Терморозширений графіт (ТРГ) володіє унікальним поєднанням властивостей: широкий діапазон робочих температур, висока хімічна стійкість, прекрасна ущільнююча здатність. Це робить його затребуваним багатьма галузями промисловості. Отримання перерахованих властивостей пов'язано з тим, що інтеркальований графіт має здатність при термообробці при 900 °С (термоударі) багаторазово розширюватися в об'ємі з утворенням малоцильного вуглецевого матеріалу – термографеніту. Спінювання супроводжується виділенням великої кількості газопарової фази, що створює внутрішньо-шаровий тиск порядку декількох сотень атмосфер, яке і є рушійною силою процесу розширення. У даній роботі досліджували процес окислення при інтеркаляції і розширення частинок графіту при термошоковому нагріванні. Частинки графіту ГАК-2 фракцією +0,16 мм окисляли концентрованою сірчаною кислотою з біхроматом калію. Отриманий продукт спучували в печі в гравітаційно-падаючому шарі при температурах 200-1000 °С. Експериментами було встановлено, що мінімальна об'ємна щільність ТРГ (в залежності від конкретних умов – від 2,5 до 5,2 кг/м³) забезпечується при співвідношенні маси окислювача до маси графіту 0,3-0,5. Результати дослідження показали, що при інтеркаляції відбувається розбухання (розширення) частинок графіту. За рахунок цього об'ємна щільність інтеркальованого графіту знижується з 390 до 240 кг/м³ при початковій об'ємній щільності графіту 420 кг/м³. Дослідження микроструктури частинок вихідного, окисленого і термічно розширеного графіту показало, що при незмінному середньомедіанному розмірі частинок вони розширюються по нормалі до поверхні і досягають в довжину розміру в 4,5-7,7 разів більшого, ніж вихідний середньомедіанний розмір. При цьому виявилось, що дрібні частинки більш окислені в порівнянні з більш великими. На підставі залежності питомого об'єму термографеніту від температури термошокового нагріву для різних зразків окисленого графіту отримані питомі обсяги, які досягали 200-400 л/кг при температурі 1000 °С.

¹ д-р техн. наук, професор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, maslov_v_o@pstu.edu

² науч. сотр., ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

³ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, trofimova.pstu@gmail.com

⁴ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, trofimova.pstu@gmail.com

Ключові слова: з'єднання інтеркальованого графіту, графіт, термографеніт, термошоковий нагрів, розширення, насипна щільність.

V.O. Maslov, Y.P. Pustovalov, L.O. Trofimova, L.O. Dan. Dynamics of intercalated graphite compounds transformation at thermal shock heating. Thermally expanded graphite (TEG) has a unique combination of properties: a wide range of operating temperatures, high chemical resistance, excellent sealing ability. That's why it's widely used in many industries. These properties result from the fact that intercalated graphite has the ability to expand many times in volume with the formation of low-density carbon material (thermographenite) at heating up to 900°C (thermal shock). Foaming is accompanied by the release of a large amount of gas vapor phase, creating an intralayer pressure of several hundred atmospheres; the pressure resulting in the expansion process. The present work has studied, the oxidation process during intercalation and expansion of graphite particles during thermal shock heating. GAK-2 graphite particles with +0,16 mm fraction were oxidized with concentrated sulfuric acid with potassium bichromate. The resulting product was expanded in the furnace in a gravitational-falling layer at temperatures of 200-1000°C. It has been found out that the minimum volumetric density of TEG (depending on specific conditions, that is varying from 2,5 to 5,2 kg/m³) is provided if the mass of oxidant and the mass of graphite are in the ratio 0,3-0,5. The results of the study showed that intercalation causes swelling (expansion) of graphite particles. Due to this, the volume density of intercalated graphite decreases from 390 to 240 kg/m³; while the initial volume density of graphite is 420 kg/m³. The study of the microstructure of the particles of the initial, oxidized and thermally expanded graphite showed that with the same mean-median particle size, they expand along the normal to the surface and reach 4,5-7,7 times the size of the original mean median size. It turned out that small particles are more oxidized as compared to larger ones. Specific volumes have been obtained based on the dependence of the specific volume of thermographenite on the temperature of thermal shock heating for various samples of oxidized graphite, and reached 200-400 l/kg at 1000°C.

Keywords: intercalated graphite compounds, graphite, thermographenite, shock heating, expansion, volume density.

Постановка проблеми. Одним из материалов XXI века является термически расширенный графит ТРГ (синонимы – термографенит, термографит, пенографит), который получается путем термического удара на интеркалированный графит [1]. Уникальное сочетание получающихся технических свойств ТРГ приводит к росту его потребления во многих отраслях промышленности [2]. Развитие фундаментальных исследований на эту тему является актуальной задачей. На сегодняшний день остаются нерешенными целый ряд вопросов, связанных с интеркалированием и термическим расширением графита при термошоковом нагреве.

Анализ последних исследований и публикаций. Наиболее распространенным способом интеркалирования графита является сернокислотный в присутствии окислителя перманганата калия.

Реакция интеркалирования характерна для многих слоистых соединений на основе графита. При этом различные атомы и молекулы способны внедряться внутрь кристалла, заполняя межслоевое пространство. При внедрении атомов и молекул в межплоскостное пространство расстояние между графеновыми слоями растёт. Для соединений интеркалирования графита (СИГ) оно возрастает до 1 нм и более (в графите 0,335 нм). Расстояние между графеновыми слоями увеличивается почти в 3 раза (с 0,335 нм до 1,113 нм) [3, 4].

Молекулы интеркаланта проникают между графеновыми слоями, образующими кристалл графита. Это приводит к увеличению межслойных расстояний и ослаблению связей между соседними слоями. Дальнейшее разделение интеркалированного графита на графеновые слои может осуществляться не только механически, но и за счет интенсивного перевода вещества, располагающегося между слоями, в газовую фазу, например, в процессе быстрого нагревания. Этим способом получают в промышленности термически расширенный графит [5].

В работе [5] для экспериментов использовался природный графит (марки ГСМ-1) с раз-

мерами частиц 100 мкм. Для интеркалирования графита использовалась концентрированная серная кислота (H_2SO_4) с $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$. Процесс осуществляли следующим образом: сушка навески графита (110°C), выдержка при комнатной температуре графита в емкости с раствором $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{KHSO}_4 + \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 30-60 мин (соотношение компонентов: 5 см³ интеркаланта на 1 г графита), декантация интеркаланта, промывка водой до pH ~ 6-7 с последующей фильтрацией и сушкой при 110°C .

Активное воздействие на качественный и количественный состав интеркалированного графита (ИГ) оказывает степень заполнения графитовой матрицы интеркалирующим агентом. С практической точки зрения важное значение имеет микрохарактеристика ИГ [6].

Интеркалированный графит обладает способностью при термообработке 900°C и более (термоударе) многократно расширяться в объеме с образованием низкоплотного углеродного материала – термографенита. Выделяется значительное количество газовой фазы, создается внутрислойное давление в несколько сотен атмосфер, что приводит к значительному расширению [7].

Размеры кристаллитов графита по оси «С» увеличиваются в 8 раз и более с образованием червеобразных частиц ТРГ. Механизм термического расширения заключается в следующем. В процессе термолитиза интеркалированного графита, по достижении температур $250\text{-}300^\circ\text{C}$, частицы приобретают форму «раскрытых с поверхности лепестков», что способствует максимальному удалению продуктов реакции с поверхности частиц и незначительному выделению из глубоких слоев по открывшимся порам. С ростом температуры процесс перемещается с поверхности частиц в объем с изменением формы частиц вплоть до червеобразной [7].

Степень расширения определяется структурой исходной матрицы, свойствами интеркаланта, степенью внедрения, толщиной чешуйки исходного графита, конечной температурой и скоростью термолитиза [8].

Образовавшийся ТРГ (термографенит) характеризуется химической инертностью и небольшим объемным весом, способностью к прессованию без связующего, электрическими и магнитными свойствами в широком диапазоне частот.

В процессе получения ТРГ приобретаются новые свойства. Это чрезвычайно низкая объемная плотность, развитая поверхность, способность к формованию (прокатке, прессованию) без добавления связующего. Материал устойчив на воздухе (до $500\text{-}550^\circ\text{C}$), в среде водяного пара (до 650°C), в инертной атмосфере – до 3000°C . Он выдерживает термоудары и низкие температуры (до -240°C). Кроме того материал химически устойчив, обладает высокой тепло- и электропроводностью.

Авторами [9-11] предложено использовать в качестве исходного материала графит, образующийся при металлургической обработке чугуна в миксерном отделении и отделении десульфурации. Ранее проведенные исследования показали близкие к идентичности свойства доменного и природного графита.

Анализ проведенных исследований и публикаций показал значительное количество открытых вопросов как при получении интеркалированного графита, так и ТРГ.

Цель статьи – выделить условия окисления графита, а процесс вспучивания оценивать по отношению к интеркалированному графиту.

Изложение основного материала. В качестве исходного материала при получении интеркалированного графита был использован графит марки ГАК-2, полученный в промышленных условиях из железграфитовых отходов металлургического производства. Была выделена фракция +0,16 мм, с зольностью 0,3%. В качестве окислителя использовалась концентрированная 96% серная кислота с бихроматом калия. Окисление осуществлялось по стандартной методике [9], время окисления – 10 мин. Вспучивание интеркалированного графита осуществлялось в гравитационно-падающем слое при температуре печи 1000°C и высоте печи 700 мм.

Соотношение «масса окислителя–масса графита» существенно влияет на свойства интеркалированного графита, а также на объемную плотность термографенита.

Минимальная объемная плотность термографенита получается при соотношении «окислитель–графит» 0,3-0,5 (рис. 1). Резкое увеличение объемной плотности термографенита происходит при переходе соотношения «окислитель–графит» от 0,12 к 0,10. Для дальнейших экспериментов было принято соотношение равное 0,2.

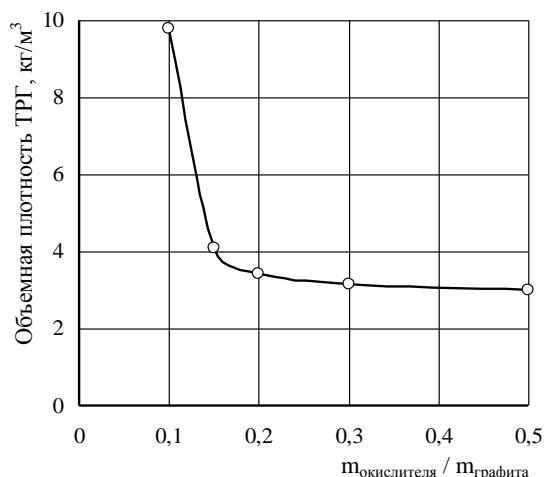


Рис. 1 – Варіант залежності об'ємної щільності ТРГ від співвідношення «окислювач–графіт»

Практически во всех литературных источниках процесс образования термографенита относят к свойствам исходного графита. Процесс получения термографенита фактически является двухстадийным. На первой стадии необходимо рассмотреть процесс получения интеркалированного графита с последующей сушкой. На второй стадии рассматривается процесс термошокового нагрева интеркалированного графита с целью получения термографенита.

В процессе терморасширения графита осуществляется выход интеркалирующего агента из интеркалированного графита. Степень вспучивания зависит от условий образования исходного углеродного и железоуглеродного сырья, морфологии и микроструктуры исходного углеродного сырья [10, 12].

Поэтому было введено два понятия: 1) степень расширения графита при его интеркаляции; 2) степень расширения интеркалированного графита при термошоковом нагреве.

Результаты исследования показали, что при интеркаляции происходит разбухание (расширение) частиц графита (рис. 2). Поэтому об'ємна щільність інтеркалірованого графіта знижується з 390 до 240 кг/м³ при вихідній об'ємній щільності графіта 420 кг/м³.

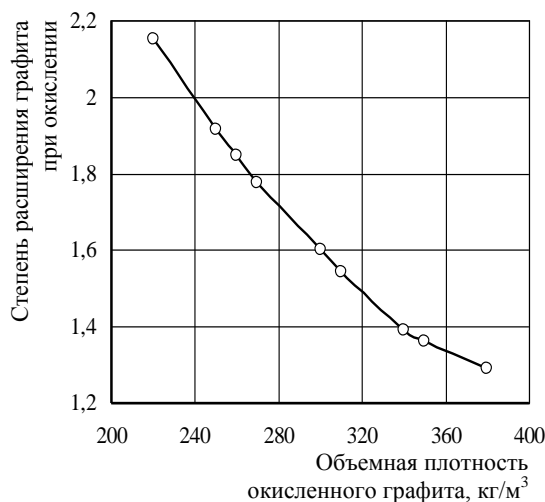


Рис. 2 – Степень расширения графита в процессе окисления

При этом степень расширения частиц графита за счет интеркаляции серной кислотой находится в пределах 1,3-2,1. Если сравнить плотность графита и интеркаланта, то она довольно близка ($\rho_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 1,83 \text{ г/см}^3$; $\rho_{\text{C}} = 2,2-2,3 \text{ г/см}^3$), очевидно, при интеркаляции частично нару-

шается сплошность частиц, рождаются поры, что в общем объеме слоя приводит к снижению объемной плотности.

Анализ связи степени расширения графита в зависимости от объемной плотности термографенита необходимо проводить как по исходному графиту, так и по интеркалированному графиту (рис. 3).

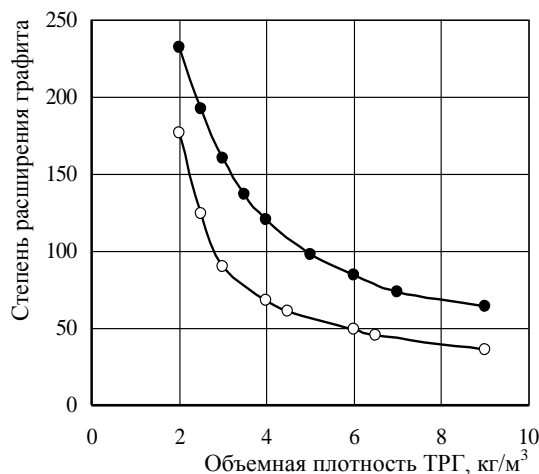


Рис. 3 – Связь степени расширения графита с насыпной плотностью ТРГ: ○ – по отношению к плотности окисленного графита; ● – по отношению к исходной плотности графита

На процесс окисления и вспучивания существенно влияет не среднемедианный размер графитовой частицы, а ее толщина, так как концентрированная серная кислота при использовании бихромата калия проникает между слоями плоской частицы. Важным является выяснение толщины графитовых частиц железграфитовых отходов, получаемых при переделе чугуна. Результаты исследования толщины частиц графита с использованием дифференциального анализа с помощью микроскопа МИМ-8М показали, что для фракции графита –0,16 мм толщина частицы не превышает 24 мкм. Для узких фракций частные кривые имеют ярко выраженные максимумы, которые с уменьшением фракции увеличиваются. Эти максимумы смещаются в сторону более тонких толщин. И только для фракции –0,05 мм частицы с толщиной 3 мкм составляют около 95%.

При окислении, а тем более при термошоковом нагреве, среднемедианный размер частиц сохраняется практически постоянным, а расширение осуществляется в направлении, перпендикулярном поверхности частиц. Термическое расширение окисленных частиц в данной работе осуществлялось в гравитационно-падающем слое, т. е. каждая частица двигалась независимо, поэтому термическому расширению частиц ничего не мешает, и она получается более ровной червеобразной и более однородной (рис. 4). Это позволило установить одну закономерность. Были взяты частицы графита с медианными размерами 200, 100, 40, 30 мкм. Из них были получены «червеобразные» частицы, соответственно, 900, 400, 300 и 230 мкм. Если взять соотношение длины частицы к среднемедианной толщине, то получилось соотношение l/d , соответственно, равное 4,5; 4,0; 7,5; 7,7. Таким образом, было установлено, что мелкие частицы более окислены, а крупные – менее окислены. Это соотношение чувствительно к технологии окисления, а, следовательно, и вспучивания графита.

В завершение проведенных исследований было установлено, что наиболее предпочтительным является обработка интеркалированного графита в гравитационно-падающем слое в режиме «дождевого облака».

В нижней части реактора осуществляется подпитка инертным газом, а газообразные продукты реакции отводятся из горячей зоны реактора [13]. Выделяющаяся газовая фаза движется вверх, в противотоке, и отводится при небольших скоростях. Образующиеся частички термографенита охлаждаются в нижней части реактора в гравитационно-падающем слое в инертном

газе. Это исключает конденсацию на частичках термографенита серной кислоты, серы и других газов. Полученный удельный объем термографенита (рис. 5), существенно зависит от температуры и конечной объемной плотности. До температуры 250°C практически отсутствует расширение. С момента закипания концентрированной серной кислоты (+327°C) расширение интенсифицируется. Парообразная серная кислота приводит к существенному росту давления (до сотен технических атмосфер) между графеновыми плоскостями, а, следовательно, и к внешнему расширению.

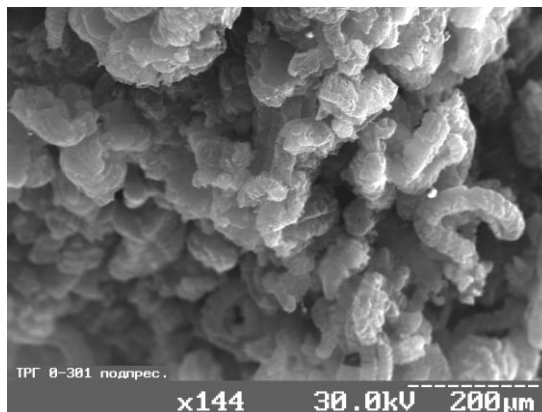


Рис. 4 – Микрофотография ТРГ

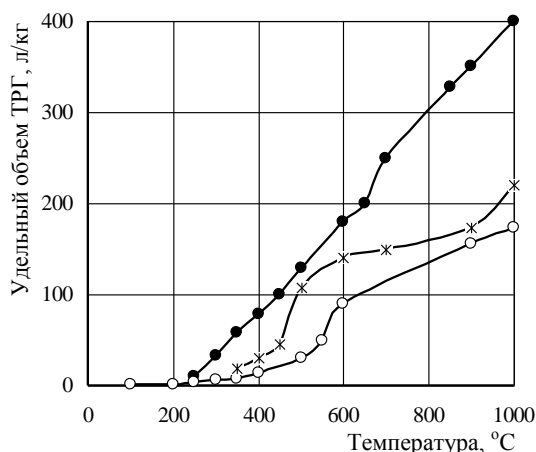


Рис. 5 – Зависимость удельного объема ТРГ от температуры вспучивания: ● – ОГ-37; $\gamma_{\text{нас.}} = 2,5 \text{ кг/м}^3$; * – ОГ-39; $\gamma_{\text{нас.}} = 4,0 \text{ кг/м}^3$; ○ – ОГ-30; $\gamma_{\text{нас.}} = 5,2 \text{ кг/м}^3$

Выводы

1. Определено оптимальное соотношение «масса окислителя : масса графита», обеспечивающее минимальную объемную плотность термографенита, что позволило в итоге получить объемную плотность 1,9-5,2 кг/м³.

2. Установлено расширение графита в процессе интеркалирования концентрированной серной кислотой, в результате которого снижается объемная плотность с 400 до 230 кг/м³. Поэтому при анализе процесса получения термографенита в качестве начальной объемной плотности использована конечная объемная плотность интеркалированного графита. Это приводит к существенному снижению степени расширения и получению более реальных показателей термошокового нагрева.

3. На основании зависимости удельного объема термографенита от температуры для различных образцов окисленного графита получены максимальные удельные объемы в пределах 200-400 л/кг при температуре 1000°C, что позволяет рассматривать получаемый термографенит в композиционных материалах специального назначения.

Список использованных источников:

1. Физико-химические свойства графита и его соединений / Черныш И.Г. [и др.]. – К. : Наукова думка, 1990. – 200 с.
2. Уббеладе А.Р. Графит и его кристаллические соединения / А.Р. Уббеладе, Ф.А. Льюис. – М. : Мир, 1965. – 256 с.
3. Махорин К.Е. Вспучивание природного графита, обработанного серной кислотой / К.Е. Махорин, А.П. Кожан, В.В. Веселов // Химическая технология. – 1985. – № 2. – С. 3-6.
4. Вспучивание графита в плотном и взвешенном слоях / К.Е. Махорин, А.П. Кожан, В.В. Веселов, В.Н. Александров // Химическая технология. – 1987. – № 2. – С. 43-49.
5. Свободные графитовые пленки из терморасширенного графита / А.Т. Дидейкин [и др.]. // Журнал технической физики. – 2010. – Т. 80. – Вып. 9. – С. 146-149.
6. Юрковский И.М. Структурные особенности расширенного графита / И.М. Юрковский, Т.Ю. Смирнова, Л.С. Малей // Химия твердого топлива. – 1986. – № 1. – С. 127-131.
7. Интеркалированные соединения графита акцепторного типа и новые углеродные материалы на их основе / Н.Е. Сорокина, И.В. Никольская, С.Г. Ионов, В.В. Авдеев // Известия академии наук. – 2005. – Т. 54. – № 8. – С. 1699-1716. – (Серия химическая).
8. Фиалков А.С. Углерод, межслоевые соединения и композиты на его основе / А.С. Фиалков. – М. : Аспект-Пресс, 1997. – 718 с.
9. Маслов В.О. Композиційні матеріали на основі залізграфітних відходів металургійного виробництва / В.О. Маслов // Хімічна промисловість України. – 1994. – № 4. – С. 54-60.
10. Технологические аспекты интеркалирования графита серной кислоты / С.Г. Бондаренко, Л.А. Рыкова, Г.А. Статюха, И.Г. Черныш // Химия твердого топлива. – 1988. – № 4. – С. 141-143.
11. А.с. 1828065 СССР, МКИ С 01 В 31/04. Способ получения термически расширенного графита / В.А. Маслов, Ю.П. Пустовалов, В.Э. Макеев. – № 4448247/26; заявл. 27.06.88; опубл. 30.04.95, Бюл. № 12.
12. Черныш И.Г. Исследование процесса окисления графита раствором бихромата калия в серной кислоте / И.Г. Черныш, И.Д. Буряя // Химия твердого топлива. – 1990. – № 1. – С. 123-127.
13. Пат. 2036137 Россия, МПК С 01 В 31/04. Способ получения термически расширенного графита / Ю.П. Пустовалов, В.А. Маслов. – № 4942780/26; заявл. 12.03.91; опубл. 27.05.95.

References:

1. Chernysh I.G., Karpov I.I., Prikhod'ko G.P., Shai V.M. *Fiziko-himicheskie svoystva grafita i ego soedinenij* [Physical and chemical properties of graphite and its compounds]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1990. 200 p. (Rus.)
2. Ubbelade A.R., L'uis F.A. *Grafit i ego kristallicheskie soedineniya* [Graphite and its crystalline compounds]. Moscow, Mir Publ., 1965. 256 p. (Rus.)
3. Mahorin K.E., Kozhan A.P., Veselov V.V. Vspuchivanie prirodnoogo grafita, obrabotannogo sernoj kislotoj [Extrusion of natural graphite treated with sulfuric acid]. *Himicheskaja tehnologija – Chemical Technology*, 1985, no. 2, pp. 3-6. (Rus.)
4. Mahorin K.E., Kozhan A.P., Veselov V.V., Aleksandrov V.N. Vspuchivanie grafita v plotnom i vzveshennom slojah [Graphite swelling in dense and suspended layers]. *Himicheskaja tehnologija – Chemical Technology*, 1987, no. 2, pp. 43-49. (Rus.)
5. Didejkin A.T., Sokolov V.V., Sakseev D.A., Bajdakova M.V., Vul A.Ya. Svobodnye grafitovye plenki iz termorasshirennoogo grafita [Free graphite films of expanded graphite]. *Zhurnal tehnichejskoj fiziki – Technical Physics Journal*, 2010, vol. 80, no. 9, pp. 146-149. (Rus.)
6. Yurkovskij I.M., Smirnova T.Yu., Malej L.S. Strukturnye osobennosti rasshirennoogo grafita [Structural features of expanded graphite]. *Himiya tverdogo topliva – Solid fuel chemistry*, 1986, no. 1, pp. 127-131. (Rus.)
7. Sorokina N.E., Nikolskaya I.V., Ionov S.G., Avdeev V.V. Interkalirovannye soedineniya grafita akceptornogo tipa i novye uglerodnye materialy na ih osnove [Intercalated graphite compounds of the acceptor type and new carbon materials based on them]. *Izvestiya akademii nauk. Seriya himicheskaya – News of the Academy of Sciences. Chemical series*, 2005, vol. 54, no 8, pp. 1699-1716. (Rus.)
8. Fialkov A.S. *Uglerod, mezhsloevye soedineniya i kompozity na ego osnove* [Carbon, interlayer

- compounds and composites based on it]. Moscow, Aspekt-Press Publ., 1997. 718 p. (Rus.)
9. Maslov V.O. Kompozicijni materiali na osnovi zalizografitovih vidhodiv metalurgijnogo virobnictva [Composition materials on the basis of Fe-C containing wastes of metallurgy]. *Khimichna promislovist' Ukraini – Chemical industry of Ukraine*, 1994, no. 4, pp. 54-60. (Ukr.)
 10. Bondarenko S.G., Rykova L.A., Statyuha G.A., Chernysh I.G. Tehnologicheskie aspekty interkalirovaniya grafita sernoj kisloty [Technological aspects of intercalation of graphite with sulfuric acid]. *Himiya tverdogo topliva – Solid fuel chemistry*, 1988, no. 4, pp. 141-143. (Rus.)
 11. Maslov V.A., Pustovalov Yu.P., Makeyev V.E. *Sposob polucheniya termicheski rasshirennogo grafita* [The method of obtaining thermally expanded graphite]. Patent USSR, no. 1828065, 1988. (Rus.)
 12. Chernysh I.G., Buraya I.D. Issledovanie processa okisleniya grafita rastvorom bihromata kaliya v sernoj kislotte [The study of the oxidation of graphite with a solution of potassium dichromate in sulfuric acid]. *Himiya tverdogo topliva – Solid fuel chemistry*, 1990, no. 1, pp. 123-127. (Rus.)
 13. Pustovalov Yu.P., Maslov V.A. *Sposob polucheniya termicheski rasshirennogo grafita* [The method of obtaining thermally expanded graphite]. Patent RF, no. 2036137, 1995. (Rus.)

Рецензент: В.Б.Семакова
канд. техн. наук, доц., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 30.04.2019

УДК 669.245.018:620.193.53

doi: 10.31498/2225-6733.38.2019.181273

© Глотка А.А.¹, Гайдук С.В.²

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КОРРОЗИИ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

Проведено математическое моделирование средней скорости коррозии (\bar{V}_q) для никелевых сплавов с различными системами легирования в условиях синтетической золы при различных температурах. Показана тесная корреляционная связь между средней скоростью коррозии (\bar{V}_q) и величиной соотношения легирующих элементов в составе (K_{nc}). Установлены закономерности влияния состава на свойства жаропрочных никелевых сплавов.

Ключевые слова: жаропрочные никелевые сплавы, средняя скорость коррозии, соотношение легирующих элементов.

Глотка О.А., Гайдук С.В. Математичне моделювання високотемпературної корозії жароміцних нікелевих сплавів. Проведено математичне моделювання середньої швидкості корозії (\bar{V}_q) для нікелевих сплавів з різними системами легування (для моно-, направленої- та рівновісної кристалізації) в умовах синтетичної золы при різних температурах. Оскільки сучасні ЖНС мають складні багатоконпонентні склади, в яких спостерігається комплексний вплив елементів на корозію, оцінка стійкості ВТК була проведена за величиною відомого параметра P_{nc} . Це дозволило зіставляти рівень стійкості сплавів з різними схемами легування. Проте даний параметр не охоплює всі легуючі елементи, які присутні в складі ЖНС. Тому в результаті аналізу і обробки експериментальних даних запропоновано співвідношення легуючих елементів для оцінки корозійної стійкості, яке врахо-

¹ канд. техн. наук, доцент, Запорозький національний технічний університет, г. Запорозьє, glotka-alexander@ukr.net

² д-р техн. наук, Запорозький національний технічний університет, г. Запорозьє