

УДК 621.762

ПРОПИТКА ГРАФИТА АЛЮМИНИЕМ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ

© 2024 г. А. А. Антанович*

Институт физики высоких давлений им. Л.Ф. Верещагина РАН, Троицк, 108840 Россия

**e-mail: antanov@hppi.troitsk.ru*

Поступила в редакцию 29.11.2023 г.

После доработки 10.01.2024 г.

Принята к публикации 10.01.2024 г.

Для пропитки графита марки ГМЗ жидким алюминиевым сплавом Д16 использовали способ и аппарат высокого давления, применяемые ранее для пропитки углеродных каркасов жидким каменноугольным пеком в изостатической технологии производства углерод-углеродных композиционных материалов. Заготовку графита и рассчитанное по исходной пористости графита количество алюминиевого сплава помещали в тонкостенный контейнер, дегазировали в вакуумной печи, после чего контейнер с содержимым герметизировали. Термобарическую обработку проводили при температуре 750°C и давлениях 100 и 200 МПа. После окончания обработки определяли плотность и пористость полученных металлографитных композитов, а также их прочность на сжатие. В результате проведения указанных термобарических обработок плотность и прочность на сжатие полученных композитов существенно возросли, а пористость заметно уменьшилась.

Ключевые слова: пропитка, графит, алюминий, металлографит, композит, высокие давления, горячее изостатическое прессование, газостат, плотность, пористость, прочность на сжатие.

DOI: 10.31857/S1028096024050147, **EDN:** FSYKDV

ВВЕДЕНИЕ

Графит широко используют в антифрикционных устройствах различного назначения. Так, например, подшипники скольжения с графитовыми втулками успешно применяют в насосах, предназначенных для работы при высоких температурах, а также в агрессивных средах. Графитовые подшипники скольжения успешно работают при скоростях, существенно превышающих допустимые величины для его металлических аналогов [1], а срок их службы как минимум в три раза дольше, чем у металлических аналогов. Основным недостатком графита при использовании в таких устройствах является его хрупкость. В тоже время, алюминиевые сплавы обладают высокой удельной прочностью, низким коэффициентом теплового расширения и хорошей коррозионной стойкостью. Однако коэффициент трения таких сплавов нестабилен, так как зависит от нагрузки, температуры и скорости скольжения.

В связи с этим представляет интерес получение металлографитного композита, состоящего

из пористого графита в качестве каркаса, пропитанного алюминием или сплавом на его основе в качестве матричного металла. Пористость конструктивных графитов находится в пределах 15–30%, поэтому относительно небольшое по объему введенное количество матричного металла не должно заметно снизить антифрикционные свойства композита по сравнению с чистым графитом, но позволит существенно повысить его прочностные характеристики, что было подтверждено исследованиями различных авторов. Для получения таких композитов используют способ пропитки графита расплавами матричных металлов под высоким давлением с применением различных принципов и технических устройств для создания высоких давлений. Например, для пропитки графита алюминиевым сплавом АК12 (силумин) [2, 3] высокое давление создавали самим расплавленным матричным сплавом, заполняющим весь внутренний объем сосуда высокого давления, за счет перегрева расплава на 150°C по сравнению с температурой сосуда и разницы коэффициентов объемного термического рас-

ширения материала сосуда и расплава металла. Основным недостатком такого способа пропитки является необходимость использования неоправданно большого количества матричного металла для создания высокого давления. Это количество в десятки раз больше количества металла, необходимого для заполнения открытых пор графита, а создаваемое в этом случае давление не превышает 20 МПа. Тем не менее, полученный таким образом композит показал хорошие эксплуатационные свойства [2].

В работе [4] графит пропитывали алюминиевым сплавом в два этапа. Сначала тигель, содержащий заготовку графита и навеску сплава, помещали в автоклав, нагревали до 750°C в вакууме до тех пор, пока графит не погружался в тигель с расплавленным алюминиевым сплавом. Затем давление в автоклаве повышали до 3 МПа путем введения в него газообразного азота и выдерживали при этом давлении в течение 10 мин для пропитки углерода алюминиевым сплавом. После восстановления давления окружающей среды тигель извлекали из автоклава и вновь нагревали для извлечения пропитанного графита из тигля. Полученный композит показал степень пропитки металлом 98,7% и прочность на разрыв 217 МПа. Похожая работа [5] была посвящена пропитке биоморфных углеродных каркасов алюминием при давлении инертного газа 8,5 МПа. Указанные биоморфные углеродные каркасы получали пиролизом в вакууме различных сортов древесины при температуре 1400°C в течение 2 ч. Результаты испытаний полученных композитов показали значительное улучшение механических свойств пористого углерода, а также стабилизацию коэффициента трения и снижение скорости износа материала.

В работах по изостатической пропитке и карбонизации в технологии производства углерод-углеродных композиционных материалов [6] применяли специально разработанные способ и аппарат высокого давления для пропитки углеродных каркасов каменноугольным пеком. Схема такого аппарата типа “цилиндр–поршень” приведена на рис. 1. Отличительными особенностями аппарата является то, что цилиндр набирали из отдельных силовых колец, поставленных друг на друга, а средой, передающей давления служит сухой кварцевый песок. Для различных целей было изготовлено несколько подобных аппаратов с внутренним диаметром цилиндров от 150 до 1000 мм. Кроме того, применяя различное число силовых колец цилиндра, можно обрабатывать заготовки различной высоты. Целью настоящей работы являлось исследование применимости

такого аппарата для пропитки графит сплавами на основе алюминия.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Работу проводили с применением аппарата высокого давления с внутренним диаметром 150 мм. Для пропитки использовали заготовки графита марки ГМЗ диаметром 38 мм и высотой 20 мм и навески алюминиевого сплава Д16 массой 17 г, рассчитанные исходя из пористости выбранной марки графита 26%. При выбранных размерах образцов было достаточно использовать всего два силовых кольца высотой 22,5 мм каждое. Графит и сплав размещали в тонкостенном металлическом контейнере диаметром 40 мм с открытой верхней крышкой и нагревали в вакуумной печи до температуры 750°C, после чего выдерживали 10 мин при этой температуре. Эта операция обеспечивала расплавление всего количества металла, дегазацию и герметизацию пористого объема графитовой заготовки. После остывания контейнер герметично закрывали крышкой и помещали в аппарат высокого давления. В аппарате высокого давления контейнер с заготовкой композита вновь нагревали до температуры 750°C при атмосферном давлении, затем повышали давление в аппарате до заданной величины, выдерживали достигнутые термобарические параметры в течение 5 мин, после чего нагрев контейнера прекращали, а давление снижали до атмосферного.

Полученную заготовку композиционного материала извлекали из контейнера и обрабатывали на токарном станке для снятия с ее поверхности

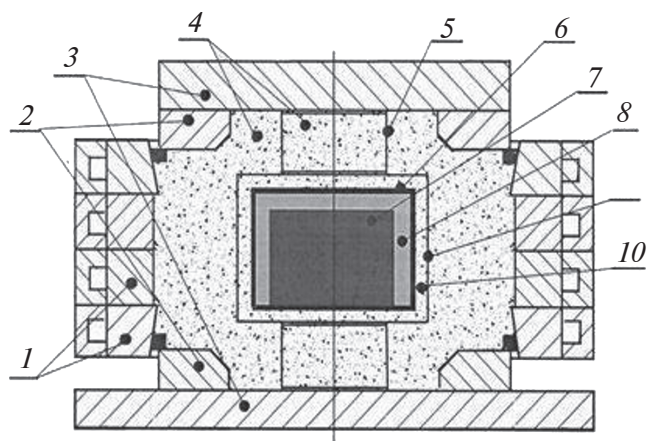


Рис. 1. Схема аппарата высокого давления: 1 – силовые кольца цилиндра; 2 – поршни; 3 – опорные плиты; 4 – песок; 5 – токоподвод; 6 – контейнер; 7 – графит; 8 – матричный металл; 9 – нагреватель; 10 – электроизоляция.

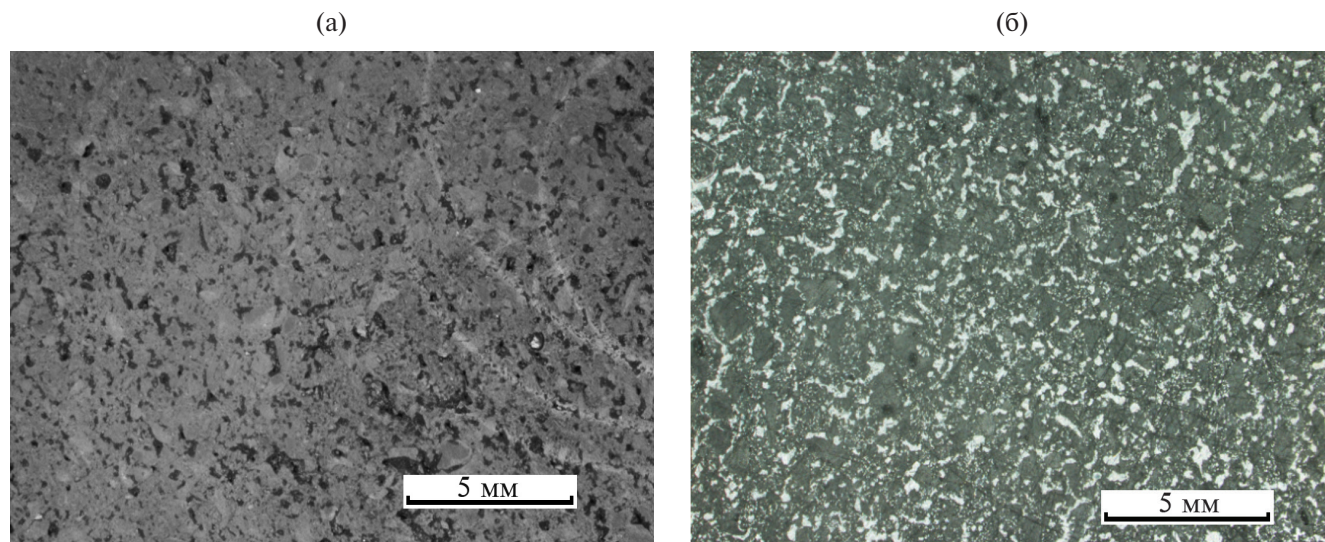


Рис. 2. Изображения торцевых поверхностей цилиндрических образцов графита ГМЗ (а) и композита (б).

Таблица 1. Некоторые свойства графита и полученных композитов; в скобках указаны условия получения образцов

Характеристики	Графит	Композит (100 МПа)	Композит (200 МПа)
Плотность, г/см ³	1.65	2.14	2.28
Пористость, %	26	8	3
Прочность на сжатие, МПа	36	118	207

металла, не вошедшего в поры графита. Образованные таким образом образцы композитов имели диаметр 35 мм и высоту 19 мм. На полученных образцах определяли некоторые свойства композитов. Обмерную плотность определяли, как отношение массы образца к его объему, пористость — расчетным путем, принимая плотность графита равной 2.2 г/см³, а прочность на сжатие как отношение разрушающего усилия к первоначальной площади поперечного сечения образца с использованием гидравлического пресса ИП-1000.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Пропитку графита сплавом алюминия проводили при значениях давления 100 и 200 МПа. На рис. 2 приведены фотографии торцевых поверхностей цилиндрических образцов исходного графита и композита, полученного при давлении пропитки 200 МПа. Изображения получены с помощью оптического микроскопа Nikon SMZ 1270 после механической обработки материалов. На рис. 2б видны вкрапления металла в поверхностные поры графита. Были определены также плотность, пористость и прочность на сжатие графита и композита, значения которых приведены

в табл. 1. Прочность на сжатие композита, полученного пропиткой при давлении 200 МПа, почти в шесть раз превышает прочность исходного графита, а значение пористости такого композита (3%), по всей видимости, является величиной закрытой пористости графита ГМЗ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты свидетельствуют о применимости аппарата высокого давления, разработанного и используемого в технологии производства углерод-углеродных композиционных материалов, для пропитки графита алюминием или его сплавами, а также другими легкоплавкими металлами. Получаемый при таком подходе металлграфитный композит обладает существенно более высокими прочностными характеристиками, чем исходный графит, что позволяет улучшить долговечность изготавливаемых из композита деталей и устройств.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Института физики высоких давлений

им. Л.Ф. Верещагина Российской академии наук. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Автор данной работы заявляет, что у него нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронков Б.Д. Подшипники сухого трения. Ленинград: Машиностроение, 1979. 224 с.
2. Gulevsky V., Markina N., Zatyamin D., Yudin A., Novoseltsev A., Erizhipov A. // *Nor. J. Development. Int. Sci.* 2019. V. 36. P. 39.
3. Патент SU 1759932 A1. Способ изготовления композиционных материалов. / Волгоградский политехнический институт. Бусалаев И.Д., Соловьев И.А., Рубенчик Ю.И., Гулевский В.А. // БИ 1992. № 33.
4. Патент US 3949804. Method of manufacturing a metal-impregnated body. / Toyota Motor Corp. Kaneko Y., Komiyama Y., Kondo K., Noda F., Murakami H., Uchida K. // 1976.
5. Wang T.-Ch., Fan T.-X., Zhang D., Zhang G.-D. // *Carbon*. 2006. V. 44. Iss. 5. P. 900. <https://www.doi.org/10.1016/j.carbon.2005.10.022>
6. Колесников С.А., Антанович А.А., Максимова Д.С., Чеблакова Е.Г. Изостатические технологии в изготовлении углерод-углеродных композиционных материалов. // Научно-исследовательскому институту конструкционных материалов на основе графита – 60 лет. М.: Научные технологии, 2020. С. 19.

Impregnation of Graphite with Aluminum under High Pressure

A. A. Antanovich*

Vereshchagin Institute of High-Pressure Physics RAS, Troitsk, 108840 Russia

**e-mail: antanov@hppi.troitsk.ru*

To impregnate graphite of the GMZ brand with liquid aluminum alloy D16, a high-pressure method and apparatus previously used for impregnating carbon frames with liquid coal pitch in the isostatic technology for the production of carbon-carbon composite materials were used. The graphite blank and the amount of aluminum alloy calculated from the initial porosity of graphite were placed in a thin-walled container, degassed in a vacuum furnace, after which the container with the contents was sealed. Thermobaric treatment was carried out at a temperature of 750°C and pressure of 100 and 200 MPa. After finishing the treatment, the density and porosity of the obtained metallographic composites, as well as their compressive strength, were determined. As a result of these thermobaric treatments, the density and compressive strength of the obtained composites increased significantly, and the porosity decreased markedly.

Keywords: impregnation, graphite, aluminum, metallographite, composite, high pressures, hot isostatic pressing, gasostat, density, porosity, compressive strength.