

ВОЗМОЖНОСТИ ЛЕГИРОВАНИЯ МАТРИЧНОГО СПЛАВА СВИНЦА ПРИ БЕЗГАЗОСТАТНОЙ ПРОПИТКЕ УГЛЕГРАФИТА

© 2021 г. В.А. Гулевский

Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ), г. Волгоград, Россия

Статья поступила в редакцию 30.10.20 г., доработана 06.01.21 г., подписана в печать 15.01.21 г.

Аннотация: Исследован процесс формирования композиционного материала углеграфит–свинец методом пропитки пористого каркаса АГ-1500 расплавом свинца, содержащего 2 ат.% Cu. Описана кинетика заполнения открытой пористости углеграфита (УГ) металлическим расплавом в режиме постоянного нагрева печи и устройства для пропитки. Особенностью данного способа является объемное расширение сплава свинца, пропитывающего пористый углеграфит. Его помещают в герметичную стальную емкость, заполненную свинцом на 2/3 объема, вакуумируют, доливают расплав и герметизируют. Далее устройство размещают в печи таким образом, чтобы сплав свинца с медью, уже имеющий температуру ниже температуры ликвидуса на 20–30 °С при нагреве в печи до 900 °С, пропитывал УГ-каркас с дальнейшим расширением при постоянном нагреве. Капилляры пористого каркаса заполняются в ходе непрерывного роста температуры расплава. После извлечения УГ, пропитанного сплавом свинца, его исследовали с помощью рентгеноспектрального и энергодисперсионного методов анализа. Выявлено перераспределение элементов пропитывающего сплава на границе УГ-каркас–Pb-сплав в зависимости от его исходного состава. Так, за время пропитки сплавом Pb–2%Cu углеграфитового каркаса под давлением до 5 МПа на внутренней поверхности пор и на границе со сплавом происходит перераспределение меди, которое приводит к образованию межфазного слоя, содержащего 70 % Cu. В ходе проведенных исследований удалось получить композит с содержанием меди 1,85 ат.% в пропитывающем Pb-сплаве на поверхности раздела с углеграфитом.

Ключевые слова: пропитка, углеграфит, матричные сплавы, растворимость.

Гулевский В.А. – канд. техн. наук, доцент кафедры «Машины и технология литейного производства» ВолгГТУ (400005, Россия, г. Волгоград, пр-т им. Ленина, 28). E-mail: gulevskiy.v@mail.ru.

Для цитирования: Гулевский В.А. Возможности легирования матричного сплава свинца при безгазостатной пропитке углеграфита. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2021. Т. 15. No. 2. С. 41–48. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2021-2-41-48.

Possibilities of matrix lead alloy doping at non-gasostatic carbon-graphite impregnation

V.A. Gulevsky

Volgograd State Technical University

Received 30.10.2020, revised 06.01.2021, accepted for publication 15.01.2021

Abstract: The study covers the process of carbon-graphite – lead composite formation by impregnating a porous AG-1500 scaffold with a lead melt containing 2.0 at.% Cu. The paper describes the kinetics of filling the carbon-graphite open porosity with molten metal with the continuously heated furnace and impregnating device. A feature of this method is the volumetric expansion of the lead alloy impregnating porous carbon-graphite. It is placed in a sealed steel container filled with lead by 2/3 of its volume with further vacuuming, melt adding and sealing. Then the device is placed in the furnace so that the lead-copper alloy, already having a temperature below the liquidus temperature by 20–30 °C when heated in the furnace to 900 °C, impregnates the carbon-graphite scaffold with further expansion at constant heating. Porous scaffold capillaries are filled as the melt temperature continuously increases. Once graphite-carbon impregnated with lead alloy is taken out, it was investigated using X-ray spectral and energy-dispersive analysis. It was found that the elements of the impregnating alloy were redistributed at the carbon-graphite scaffold/Pb alloy interface depending on its initial composition. During the carbon-graphite scaffold impregnation with the Pb–2%Cu alloy under a pressure of up to 5 MPa, copper redistribution occurs on its inner pore surface and the boundary with the alloy, which leads to the formation of an interphase layer containing 70 % Cu. The conducted research made it possible to obtain a composite with a copper content of 1.85 at.% in the impregnating Pb alloy at the interface with carbon graphite.

Keywords: impregnation, carbon-graphite, matrix alloys, solubility.

Gulevsky V.A. – Cand. Sci. (Eng.), Associate professor, Department of foundry machinery and technology, Volgograd State Technical University (400005, Russia, Volgograd, Lenina ave., 28). E-mail: gulevskiy.v@mail.ru.

For citation: Gulevsky V.A. Possibilities of matrix lead alloy doping at non-gasostatic carbon-graphite impregnation. *Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya (Powder Metallurgy and Functional Coatings)*. 2021. Vol. 15. No. 2. P. 41–48 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2021-2-41-48.

Введение

Одним из способов получения композиционных материалов является пропитка твердых неметаллических каркасов расплавами металлов. В частности, композиты на основе углеграфитового (УГ) каркаса и свинца можно использовать для изготовления вкладышей радиальных и упорных подшипников, направляющих втулок, пластин, поршневых колец, радиальных уплотнений в различных машинах, приборах и механизмах [1–3].

Для пропитки пористых углеграфитовых материалов металлическими расплавами используют апробированные технологии, такие как автоклавная пропитка и компрессионное литье.

Автоклавный метод позволяет осуществить пропитку пористых каркасов металлическими расплавами при давлении аргона ~10 МПа и температуре 350 °С (для сплава свинца с оловом марки СО5) в течение 60 мин [3]. Технология компрессионного литья включает размещение пористого УГ-каркаса в пресс-форме, заливку дозы матричного расплава и создание с помощью плунжера давления на расплав ~10 МПа при температуре 350 °С (для сплава СО5) в течение 0,3–0,5 мин [4].

Цель настоящей работы — исследование процесса пропитки УГ-каркаса сплавом системы Pb–Cu и определение растворимости меди в свинце, наблюдающейся при пропитке с целью совершенствования технологии получения композитов УГ–свинец. При этом применен разработанный в ВолГТУ способ безгазостатной пропитки в герметичном устройстве, где давление на пропитываемый сплав и, соответственно, его перемещение в порах УГ, создается за счет его термического (теплого) расширения в замкнутом объеме [5].

Методика и материалы

В качестве объектов исследования использовали углеграфит марки АГ1500 с открытой пористостью 14–16 % и средним диаметром пор 60–80 мкм и пропитывающий сплав свинца с медью (Pb–2%Cu) [4].

Образцы композита получали следующим образом (рис. 1). Предварительно в отдельном тигле расплавляли сплав свинца, а в другой тигель, температура которого не превышала 300 °С, помещали образец пористого УГ 2 с медной проволокой. Далее УГ-каркас фиксировали специальным держателем для предотвращения его всплытия

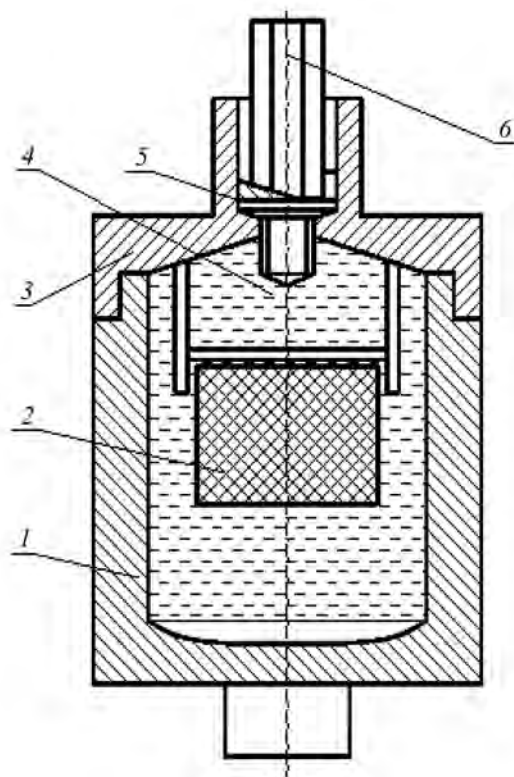


Рис. 1. Схема устройства для пропитки пористого углеграфита металлическим расплавом

1 — нижняя часть устройства для пропитки; 2 — пористый УГ; 3 — крышка; 4 — пропитывающий сплав Pb–2%Cu; 5 — медная прокладка; 6 — болт-поршень

Fig. 1. Diagram of the device for porous carbon-graphite impregnation with molten metal

1 — lower part of the impregnation device; 2 — porous carbon-graphite; 3 — cover; 4 — Pb–2%Cu impregnating alloy; 5 — copper gasket; 6 — piston bolt

на поверхность жидкого свинца, после чего внутренний объем устройства с расплавом и образцом вакуумировали до давления остаточных газов 0,01 МПа [5]. В другой печи заранее нагревали до температуры 650 °С крышку 3 и болт-поршень 6. Далее разогретой крышкой накрывали холодную нижнюю часть устройства 1 с УГ и сплавом свинца 4, температура которого составляла 320 °С и через отверстие в крышке заливали расплав свинца доверху, после чего в резьбовое отверстие вкручивали предварительно разогретый до 900 °С болт-поршень 6 (не допуская попадания внутрь воздуха). Собранный конструкцию снова помещали в печь, разогретую до 900 °С.

Давление пропитывающего сплава внутри герметичной емкости, где осуществляется пропитка пористого УГ, изменяется в ходе процесса от 2 до

5 МПа (расчет и методика приведены в работе [4]). Давление возникает за счет термического (теплового) расширения свинца при его нагреве до температуры 900 °С.

Анализ распределения химических элементов в композите определяли с помощью рентгеноспектрального анализа на приборе Camebax («Самеса», Франция) и двухлучевого микроскопа Versa 3D (США) [4].

Результаты экспериментов и их обсуждение

На основании выполненных экспериментов можно предложить следующую модель (схему) движения Pb—Cu-расплава по открытой поре-капилляру условной длиной 100 мм (рис. 2).

Известно, что объем расплава при переходе сплава свинца с медью из твердого состояния в жидкое увеличивается на 3,2—4,0 % [6]. Поэтому дальнейший нагрев образца композита в устройстве для пропитки от 327 до 900 °С приводит к расчетным значениям давления расплава свинца от 2 до 5 МПа соответственно [4].

Однако сложность представления модели движения расплава Pb—Cu по открытой поре (капилляру) заключается в том, что жидкий металл в поре УГ (на рис. 2 он показан в момент расплавления) и начало его движения совместно с порцией свинца,

проникнувшего внутрь поры в результате вакуумной пропитки, — это подготовительный этап [4].

На первом этапе процесса пропитки (участок *А*, рис. 2) давление металла при фазовом переходе Pb—Cu-сплава из твердого состояния в жидкое достигает ~2 МПа, что позволяет заполнить условный капилляр на длину ~20 мм. В результате термического расширения предыдущего слоя металла в капилляре длиной 20 мм пропитка продолжается также за счет увеличения этого объема металла при дальнейшем росте температуры (участок *А1*).

На участке *Б* заполнение пор происходит в результате перетока расплава из мелких пор в крупные за счет действия давления металла в капиллярной системе. Расплав свинца является несмачивающей жидкостью для УГ, и в этом случае заполнение пор происходит по эффекту гистерезиса капилляра (участок *Б1*) [7].

На участке *В* давление металла в поре и заполнение им части капилляра на длину ~7÷10 мм обусловлено скоростью нагрева печи (8 °С/мин). При этой температуре (327 °С через 1 мин — 335 °С и т.д.) жидкий свинец движется в поре с минимальной скоростью 0,042 мм/с [8]. Дополнительное создание градиента температуры (при увеличении скорости нагрева до 20 °С/мин) и давление расплава свинца позволяют существенно увеличить скорость его потока в капилляре до 0,078 мм/с (участок *В1*) [9].

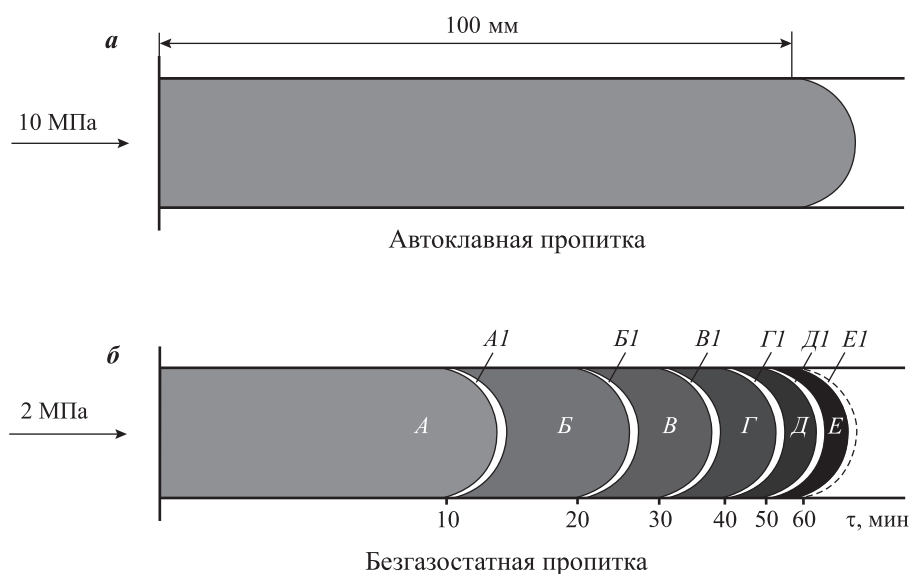


Рис. 2. Схема движения потока металла в капилляре при пропитке под давлением внешней среды — газа (*а*) и расплава (*б*)

Fig. 2. Diagram of metal movement in a capillary when impregnating under the pressure of external medium — gas (*a*) and melt (*b*)

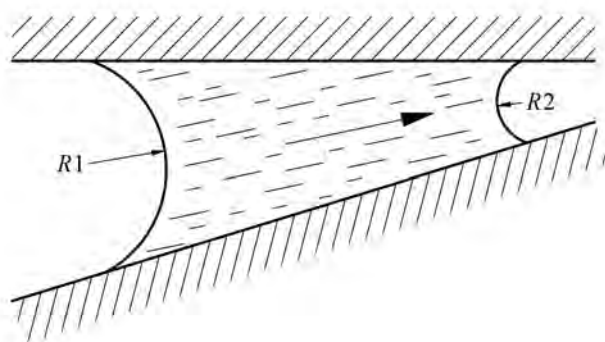


Рис. 3. Передвижение жидкости в капилляре переменного сечения под действием разности капиллярных давлений [12]

Fig. 3. Liquid movement in a variable section capillary under the action of capillary pressure difference [12]

На участке *Г* давление и время заполнения части поры (участка капилляра) зависят от плавного увеличения температуры за определенный промежуток времени. Проходя по сечению поры, металл аккумулируется в тупиковых порах («карманах») и за счет механизма термического расширения продвигается дальше в капилляр под действием давления $P = 2 \div 5$ МПа в зависимости от повышения температуры (участок *ГД*) [10, 11].

На участке *Д* капиллярное перемещение жидкости может вызывать градиент капиллярного

давления, возникающий в результате различия кривизны поверхностей менисков в капилляре переменного сечения (рис. 3) (участок *ДИ*). Данное явление учитывается за счет увеличения показанного объема металла при дальнейшем росте температуры.

На участке *Е* аналогичный эффект наблюдается и при изменении поверхностного натяжения при адсорбции элементов, которые снижают ее поверхностное натяжение. Жидкость перемещается в том направлении, где адсорбция вещества на ее поверхности меньше (эффект Маранго—Гиббса) (участок *ЕИ*) [13].

Таким образом, устройство для пропитки находится в режиме постоянного нагрева, заполнение капилляра происходит с непрерывным увеличением температуры расплава на основе свинца, путь, пройденный металлом, сохраняется, а давление в капилляре аккумулируется и способствует дальнейшему продвижению жидкости (см. рис. 2).

Одним из преимуществ безгазостатного метода пропитки является наличие не только предполагаемого диффузионного, но и механического (физического) взаимодействия расплава с УГ-поверхностью пор каркаса. В сравнении с автоклавной пропиткой данный метод имеет невысокие скорости заполнения капилляров жидким металлом

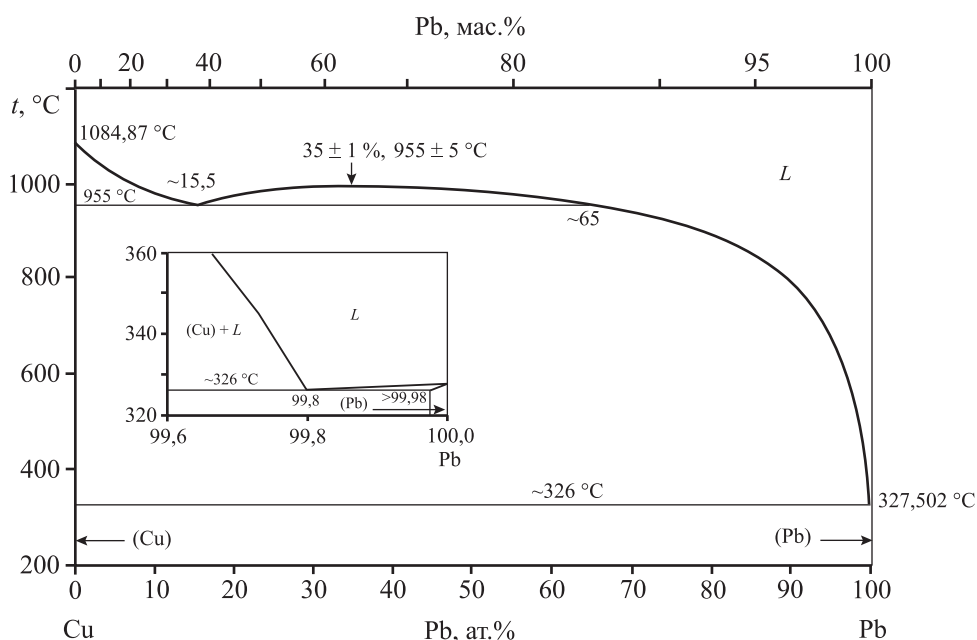


Рис. 4. Диаграмма состояния системы Cu—Pb [22]

Fig. 4. Diagram of Cu—Pb system state [22]

и пропитки, поэтому диффузионное взаимодействие металлического расплава с поверхностью пропитываемого пористого УГ возможно, и оно также влияет на адгезионную прочность межфазной границы композита [14—18].

Известно, что растворимость Cu в жидком Pb находится в интервале температур от эвтектической до монотектической. Кривая растворимости

пересекает монотектическую линию при 67 ат.% Pb. Авторы [19, 20] показали, что растворимость Pb в Cu при температуре 600 °C находится в пределах 0,09 ат.% Pb. В работе [21] на основании термодинамических данных представлена обобщенная диаграмма Cu—Pb. Другие исследователи [21, 22] также считают, что растворимость Cu в Pb не превышает 0,023 ат. % Cu (рис. 4).

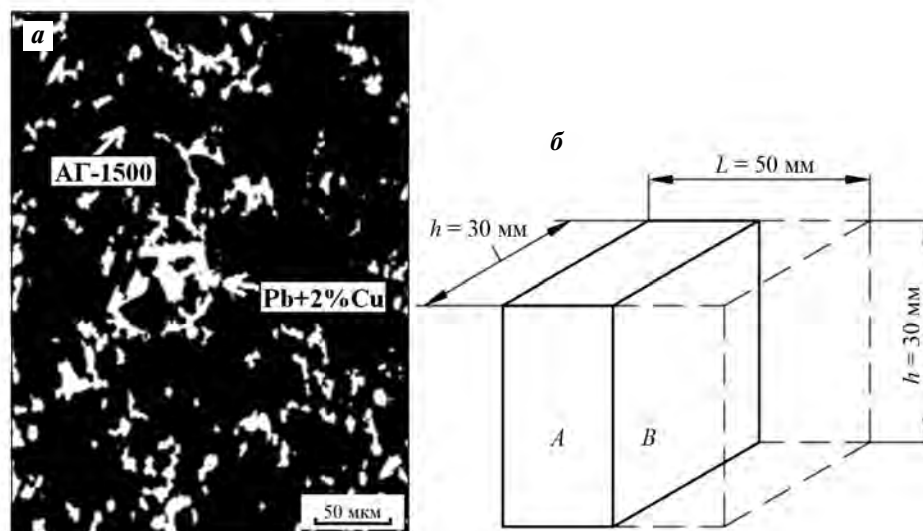


Рис. 5. Микроструктура образца композита (а) ($\times 300$) и схема исследования (б)

A — поверхность пропитки, B — центр образца

Fig. 5. Microstructure of composite sample (a) ($\times 300$) and study flow diagram (b)

A — impregnation surface, B — sample center

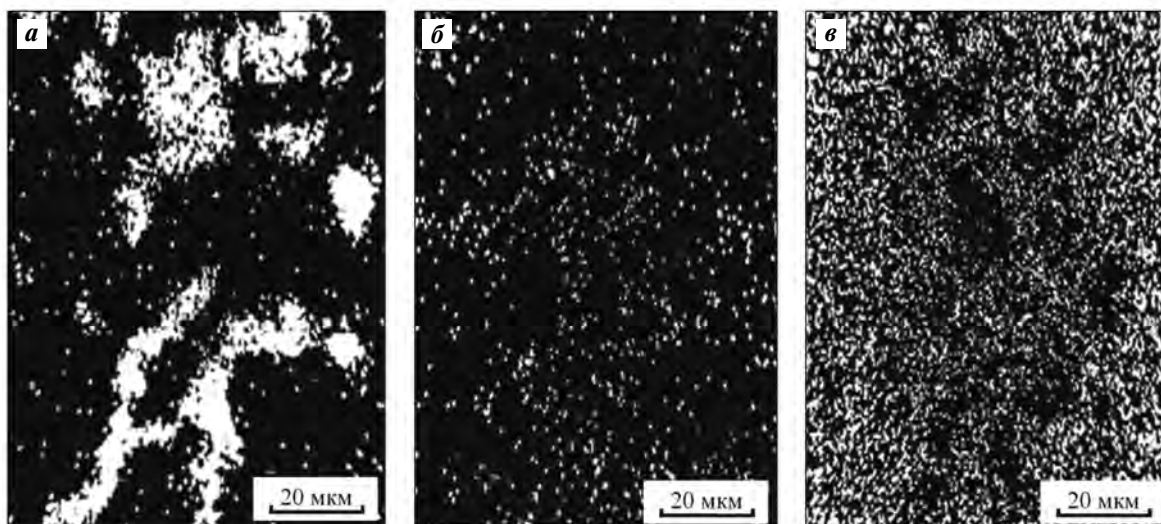


Рис. 6. Карты распределения свинца (а), меди (б) и углерода (в) в образце композита на основе углеродистого графита, пропитанного сплавом Pb—2%Cu ($\times 1000$) [23]

Fig. 6. Charts of lead (a), copper (b) and carbon (c) distribution in the composite sample based on carbon-graphite sample impregnated with Pb—2%Cu alloy ($\times 1000$) [23]

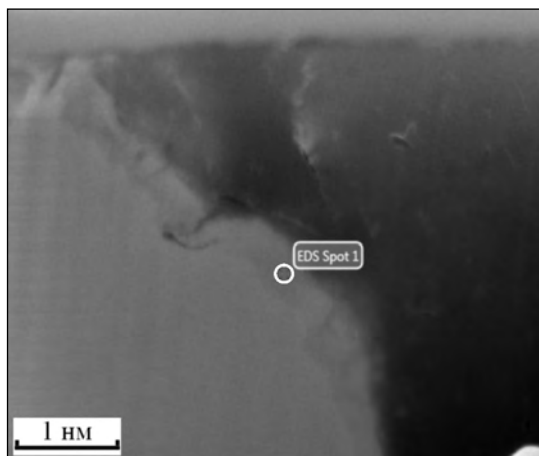


Рис. 7. Микроструктура межфазной границы композита углеграфит/сплав Pb—Cu ($\times 63000$)

Светлое поле — пропитывающий Pb—Cu-сплав, темное — углеграфит АГ-1500

Fig. 7. Microstructure of carbon-graphite/Pb—Cu alloy composite interphase boundary ($\times 63000$)

Light field — impregnating Pb—Cu alloy, dark field — AG-1500 carbon-graphite

Однако на основании выполненных в ВолГТУ исследований было определено изменение растворимости элементов расплава в зависимости от условий проведения эксперимента. Следует отметить, что мы впервые столкнулись с подобным эффектом в неоднократно повторяемых сложных технологических условиях получения композиционного материала УГ—свинец.

Характерную структуру композита (рис. 5) изучали с поверхности пропитки (обл. А) и в центре образца (обл. В) с размерами $h = 30$ мм и $L = 50$ мм.

На рис. 6 показано распределение химических

элементов в композиционном материале: светлые поля — поры, заполненные сплавом свинца с медью, темные поля — углеграфитовый каркас (рис. 6, а).

В ходе исследований было экспериментально установлено перераспределение элементов между фазами пропитывающего сплава. За время пропитки сплавом Pb—2%Cu углеграфитового каркаса под давлением до 5 МПа на границе «поверхности поры — расплав» наблюдается перераспределение меди: ее содержание у поверхности капилляра может достигать 70 %. Также согласно методике расчета по уравнению Дюпре—Юнга изменяется величина работы адгезии с 110 кДж/моль у свинца до 135 кДж/моль у Pb—Cu-сплава [4]. При этом медь является менее активным элементом по положению в электрохимическом ряду активности металлов по сравнению со свинцом: Cu — 1,90 и Pb — 2,33 [24].

На рис. 7 представлено изображение исследуемой зоны межфазной границы образца углеграфит—сплав Pb—Cu.

Межфазная граница хорошо различима, и ее размеры позволяют провести исследования химического состава с помощью двухлучевого микроскопа Versa 3D (рис. 7, т. 1). Установлено, что на межфазной границе содержание меди в составе композита составляет 1,85 ат. % (рис. 8).

Заключение

Предложен механизм безгазостатной пропитки углеграфита расплавом Pb—Cu с помощью разработанного в ВолГТУ способа в герметичном устройстве, где давление на пропитывающий сплав (и его перемещение в порах УГ) создается за

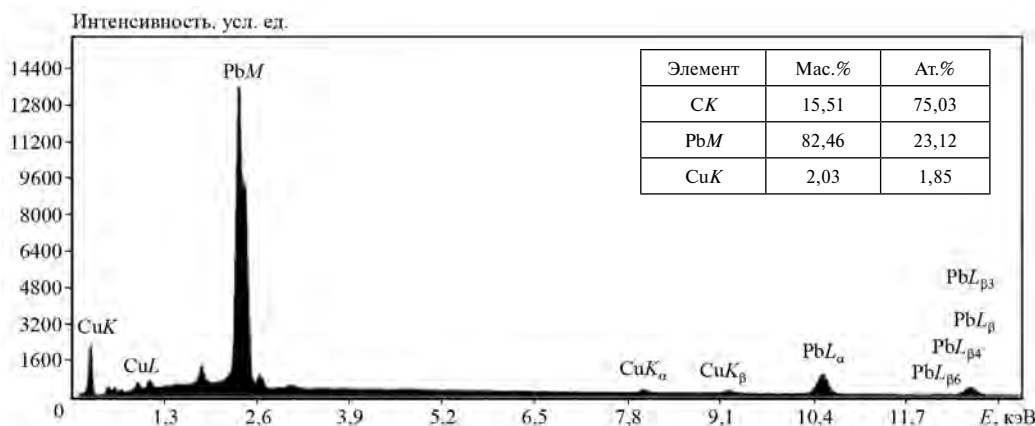


Рис. 8. Распределение химических элементов на межфазной границе углеграфит/сплав Pb—Cu

Fig. 8. Distribution of chemical elements on the carbon-graphite/Pb—Cu alloy interphase boundary

счет его термического (теплого) расширения в замкнутом объеме.

Проведенные эксперименты позволили выявить изменение растворимости элементов системы Pb—Cu при пропитке под давлением углеграфитового каркаса сплавом на основе свинца.

На основании полученных результатов в дальнейшем будет более подробно исследован механизм перераспределения меди или другого легирующего элемента на межфазной границе с пропитывающим расплавом и пористым углеграфитовым каркасом.

Литература/References

1. Костиков В.И., Еремеева Ж.В., Слюта Д.А., Яицкий Д.Л., Шарипзянова Г.Х. Фрикционные свойства углерод-углеродных композиционных материалов. Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2008. No. 3. С. 52—55.
Kostikov V.I., Ereemeeva Zh.V., Slyuta D.A., Yaitsky D.L., Sharipzyanova G.Kh. Frictional properties of carbon-carbon composite materials *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya*. 2008. No. 3. P. 52—55 (In Russ.).
2. Carbon-based sliding materials. GmbH, Germany: Schunk Kohlenstofftechnik. URL: <https://www.schunk-carbontechnology.com/ru/> (accessed: 27.03.2021).
3. Sogabe T., Onishi Y., Inoue H., Okada O., Matsumoto T. Development of metal-impregnated carbon materials by using HIP. *Rev. High Pressure Sci. Technol.* 1997. Vol. 7. P. 1072—1074.
4. Гулевский В.А., Антипов В.А., Виноградов Л.В., Кидалов Н.А., Колмаков А.Г. Пропитка углеграфита металлическими сплавами. Волгоград: ВолгГТУ, 2017.
Gulevsky V.A., Antipov V.A., Vinogradov L.V., Kidalov N.A., Kolmakov A.G. Impregnation of carbon graphite with metal alloys. Volgograd: VSTU, 2017 (In Russ.).
5. Гулевский В.А., Головинов П.С., Кидалов Н.А., Антипов В.И., Колмаков А.Г., Виноградов Л.В. Способ изготовления композиционных материалов: Пат. 2571295 (РФ). 2015.
Gulevskii V.A., Golovinov P.S., Kidalov N.A., Antipov V.I., Kolmakov A.G., Vinogradov L.V. Method of making composite materials: Pat. 2571295 (RF). 2015 (In Russ.).
6. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей. Л.: Наука, 1975.
Frenkel Ya.I. Kinetic theory of liquids. Leningrad: Nauka, 1975 (In Russ.).
7. Сотников Г.В. Исследование капиллярной пропитки для моделирования реальных процессов в горючих системах. Записки горного института. 2003. No. 5. С. 85—87.
Sotnikov G.V. Study of capillary impregnation for modeling real processes in peat systems. *Zapiski gornogo instituta*. 2003. No. 5. P. 85—87 (In Russ.).
8. Башкатова С.Т., Винокуров В.А. Поверхностные явления и дисперсные системы в нефтегазовых технологиях. М.: РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2005.
Bashkatova S.T., Vinokurov V.A. Surface phenomena and dispersed systems in oil and gas technologies. Moscow: RGU nefti i gaza, 2005 (In Russ.).
9. Вейник А.И. Новая система термодинамики обратимых и необратимых процессов. Минск: Высш. школа, 1966.
Veinik A.I. A new system of thermodynamics of reversible and irreversible processes. Minsk: Vysshaya shkola, 1966 (In Russ.).
10. Новикова С.И. Тепловое расширение твердых тел. М.: Наука, 1974.
Novikova S.I. Thermal expansion of solids. Moscow: Nauka, 1974 (In Russ.).
11. Закон Бойля-Мариотта. URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ntes> (дата обращения: 21.06.2019).
Boyle-Marriott Law. URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ntes> (accessed: 21.06.2019) (In Russ.).
12. Смачивание, капиллярный эффект. URL: https://ozlib.com/817825/tehnika/smachivanie_kapillyarnyy_effekt (дата обращения: 27.03.2021).
Wetting, capillary effect URL: https://ozlib.com/817825/tehnika/smachivanie_kapillyarnyy_effekt (accessed: 27.03.2021) (In Russ.).
13. Factsheets by Toyo Tanso, Ividen, UCAR, POCO Graphite Inc., Ultra Carbon Corp., Great Lakes Carbon Corp. 1990—2004.
14. Уравнение Пуайзеля. URL: <https://v-kosmose.com/fizika/uravnenie-puazeylya-i-vyazkost> (дата обращения: 13.07.2019).
Poiseuille equation. URL: <https://v-kosmose.com/fizika/uravnenie-puazeylya-i-vyazkost> (accessed: 13.07.2019) (In Russ.).
15. Антонова Н.М., Кулинич В.И., Дорофеев В.Ю. Адгезионная прочность композиционного покрытия с полимерной матрицей на основе натрий-карбоксиметилцеллюлозы с металлическим наполнителем из порошка алюминия. Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2008. No. 2. С. 12—16.
Antonova N.M., Kulinich V.I., Dorofeev V.Yu. Adhesion strength of a composite coating with a polymer matrix based on sodium carboxymethyl cellulose with a metal

- filler of aluminum powder. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya*. 2008. No. 2. P. 12–16 (In Russ.).
16. *Зиновьев В.Е.* Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. М.: Металлургия, 1989.
Zinoviev V.E. Thermophysical properties of metals at high temperatures. Moscow: Metallurgiya, 1989 (In Russ.).
17. *Андрижиевский, А.А.* Механика жидкости и газа: Уч. пос. Минск: БГТУ, 2014.
Andrizhievsky A.A. Mechanics of liquid and gas: A textbook. Minsk: BSTU, 2014 (In Russ.).
18. *Бельтюков А.Л., Ладыанов В.И., Шишмарин А.И.* Вязкость расплавов Fe—Si с содержанием кремния до 45 ат.%. *Теплофизика высоких температур*. 2014. No. 2. С. 205–212.
Beltyukov A.L., Ladyanov V.I., Shishmarin A.I. Viscosity of Fe—Si melts with silicon content up to 45 at %. *Teplofizika vysokikh temperature*. 2014. No. 2. P. 205–212 (In Russ.).
19. *Seith W., Johren H., Wagner J., Metallkunde Z.* Miscibility gaps in binary and ternary metallic systems in molten state. *Z. Metallkunde*. 1955. Bd. 46. S. 773–776.
20. *Chakrabarti D.J., Laughlin D.E.* The Cu—Pb (copper—lead) system. *J. Phase Equilib.* 1984. Vol. 5. P. 503–510.
21. *Хансен М., Андерко К.* Структуры двойных сплавов. М.: Металлургиздат, 1962.
Hansen M., Anderko K. Structures of double alloys. Moscow: Metallurgizdat, 1962 (In Russ.).
22. Фазовая диаграмма системы Cu—Pb. URL:<http://www.himikatus.ru/art/phase-diagr1/Cu-Pb.php> (дата обращения: 19.03.2019).
Phase diagram of the Cu—Pb system. URL:<http://www.himikatus.ru/art/phase-diagr1/Cu-Pb.php> (accessed: 19.03.2019) (In Russ.).
23. *Гулевский В.А., Мухин Ю.А., Загребин А.Н.* Матричный сплав для пропитки углеграфитового каркаса. *Изв. ВолгГТУ*. 2009. No. 11. С. 81–84.
Gulevsky V.A., Mukhin Yu.A., Zagrebin A.N. Matrix alloy for impregnation of the carbon frame. *Izvestiya VolgGTU*. 2009. No. 11. P. 81–84 (In Russ.).
24. Электрохимическая активность металлов. URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/112845> (дата обращения: 19.05.2019).
Electrochemical activity of metals. URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/112845> (accessed: 19.05.2019) (In Russ.).