

УДК 621.74.02

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-7-302-88-92

*Н. Ю. Мирошкин¹, В. А. Гулевский², В. С. Кувакин¹, К. И. Сенцов¹***ПОВЫШЕНИЕ ЗАПОЛНЕНИЯ ОТКРЫТЫХ ПОР
УГЛЕГРАФИТОВОГО КАРКАСА РАСПЛАВОМ МФ-9**¹ Волгоградский государственный технический университет² Волгоградский индустриальный колледж

e-mail: lp@vstu.ru

Работа посвящена исследованию влияния предварительного омеднения внутренней поверхности пор углеграфитового каркаса на процент заполнения открытых пор сплавом МФ-9. Показано, что добавление ультразвуковой обработки углеграфитовых заготовок в процессе металлизации позволяет нанести медное покрытие на глубину до 5 мм. Выявлено, что медное покрытие на поверхностях открытых пор углеграфита оказывает положительное воздействие на процент заполнения пор сплавом МФ-9.

Ключевые слова: пропитка, углеграфит, ультразвук, армирование, токосъемные контакты

*N. Yu. Miroshkin¹, V. A. Gulevsky², V. S. Kuvakin¹, K. I. Sentsov¹***INCREASING THE FILLING OF OPEN PORES OF THE CARBON
GRAPHITE FRAMEWORK WITH MF-9 MELT**¹ Volgograd State Technical University² Volgograd Industrial College

The work is devoted to the study of the effect of preliminary application of copper electrochemical coating on the surfaces of open pores of the carbon-graphite framework on the percentage of filling of open pores with MF-9 alloy. It is shown that the addition of ultrasonic treatment of carbon-graphite blanks in the metallization process allows applying copper coating to a depth of up to 5 mm. It is revealed that copper coating on the surfaces of open pores of carbon-graphite has a positive effect on the percentage of filling of pores with MF-9 alloy.

Keywords: impregnation, carbon graphite, ultrasound, reinforcement, current collecting contacts

Введение

Проблема импортозамещения технологий изготовления расходных материалов, используемых в различных отраслях промышленности, становится все более актуальной. Одним из примеров таких материалов являются токосъемные элементы пантографов, электродвигателей, область применения которых распространена от бытовой техники и электроинструмента до автомобилей, тепло- и электровозов [1–3]. Жидкофазное получение (пропитка углеграфитового каркаса расплавом меди) таких композиционных материалов (КМ) осложняется необходимостью приложения избыточного давления, порядка 50–100 атм., на жидкую фазу, для чего необходимо использовать импортное, сложное и энергозатратное автоклавное оборудование [1, 4, 5]. Основные предприятия, которые обладают технологиями и необходимым оборудованием для реализации жидкофазной пропитки углеграфита расплавом меди, находятся в странах Европы (Англия, Франция, Германия), что приводит к использованию параллельного импорта для поставок таких композитивов в Россию и значительно удорожает

производство [5, 6]. Поэтому разработка технологии позволяющей обеспечить получение КМ углеграфит-медный сплав с высокими эксплуатационными характеристиками без оказания избыточного давления на расплав меди является важнейшей задачей. Одним из наиболее рациональных и доступных методов пропитки является самопроизвольная пропитка, суть которой заключается в помещении углеграфита в расплав, который под действием гравитации самопроизвольно заполняет открытые поры каркаса. Однако, поскольку медные сплавы инертны по отношению к углероду краевой угол смачивания жидкой меди на поверхности графита составляет порядка 140°, что препятствует самопроизвольному проникновению металла в открытые поры углеграфитового каркаса [1, 5–7].

Решение этой проблемы заключается в создании покрытия, которое будет смачиваться расплавом меди.

Целью работы является разработка технологии повышения процента заполнения открытых пор углеграфитового каркаса в условиях самопроизвольной пропитки меди МФ-9.

Материал и методы исследования

В качестве углеграфитового каркаса были использованы графитовые электродетки марки ЭГ-14 с габаритами 56×26×33 мм, предназначенные для использования в электрических машинах общепромышленного назначения, а также в электродвигателях и генераторах тяговых и подвижных составов городского и железнодорожного электротранспорта. Открытая пористость используемого углеграфита составила 25 %, плотность 1600 кг/см³, удельное электрическое сопротивление 38 мкОм·м. Нанесение медного покрытия проводилось в гальванической ванне с одновременным воздействием ультразвука частотой 20 КГц. Раствором для меднения выступал сернокислый электролит следующего состава: медь сернокислая – 180 г/л, серная кислота – 80 г/л. Выбор электролита заключался в доступности компонентов и устойчивости к загрязнению углеродными частицами, возможность работы при низких плотностях тока, что позволяет использовать доступные и распространенные источники тока, например в виде зарядных устройств автомобильных аккумуляторов, а также низкая токсичность компонентов и готового раствора.

Пропитку заготовок под воздействием ультразвука проводили при помощи ультразвуковой ванны ПСБ-2860-05 Экотон с мощностью ультразвукового генератора 150 Вт, снабженного двумя ультразвуковыми пьезоэлектрическими преобразователями частотой 22 кГц, при мощности колебаний 90 %.

Пропитку подготовленных заготовок проводили путем помещения углеграфита в тигель

с расплавом МФ-9 и выдержкой в печи при температуре 950 °С от 10 до 60 мин.

После пропитки образцы взвешивались, и полученная масса сравнивалась с исходной, заранее измеренной перед пропиткой. По полученным данным производили расчет процента заполнения открытых пор заготовок согласно следующей формуле. Определение массы образцов проводили на лабораторных весах второго класса точности.

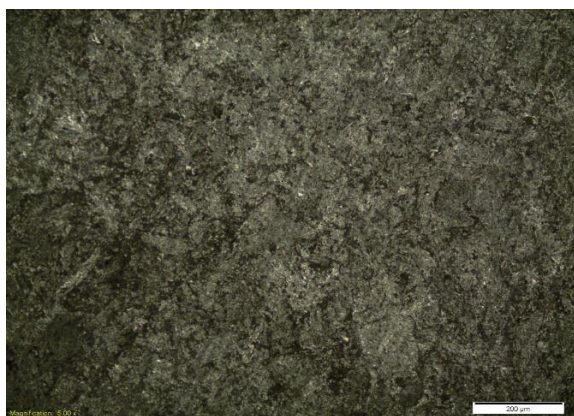
$$E = \frac{\text{Привес, \%}}{\text{Пористость, \%} \times k} \times 100$$

где k – отношение плотности инфильтрата к плотности углеграфита

Проведение микроструктурных исследований полученных образцов после гальванизации и пропитки проводили с помощью оптического микроскопа Olympus BX 51. Удельное электрическое сопротивление композиционных материалов определялось согласно ГОСТ 23776–79 [14].

Результаты и их обсуждение

Микроструктурный анализ поверхности и сердцевины образцов после нанесения медного электрохимического покрытия в электролите без воздействия ультразвука показал, что металлическое покрытие образуется только на поверхности заготовки (рис. 1, а) не зависимо от времени выдержки. При добавлении к процессу металлизации ультразвукового воздействия было установлено, ультразвук оказывает положительное влияние на глубину осаждения металлического покрытия (рис. 1, б), увеличивая ее с повышением времени выдержки исследуемых образцов с габаритами 10×10.



а



б

Рис. 1. Микроструктура омедненного углеграфитового образца:
а – на глубине 0,5 мм от поверхности; б – на глубине 5 мм под воздействием ультразвука в течение 20 мин

Качество композита, полученного жидкофазной пропиткой, в большей степени зависит от количества металла, который заполнил открытые поры углярафита. Поэтому в качестве ключевого критерия оценивания эффективности пропитки был принят процент заполнения пор, который выражается отношением привеса образцов после пропитки к пористости углярафита и соотношению плотности матричного сплава к плотности углярафита [25].

Выявлено положительное влияние предварительно нанесенного медного электрохимического покрытия на открытые пор углярафитового каркаса перед пропиткой, так при температуре 950 °С и выдержке в 10 мин процент заполнения пор предварительно омедненных образцов в 5,3 раза выше, чем у образцов без предварительной подготовки (рис. 2).

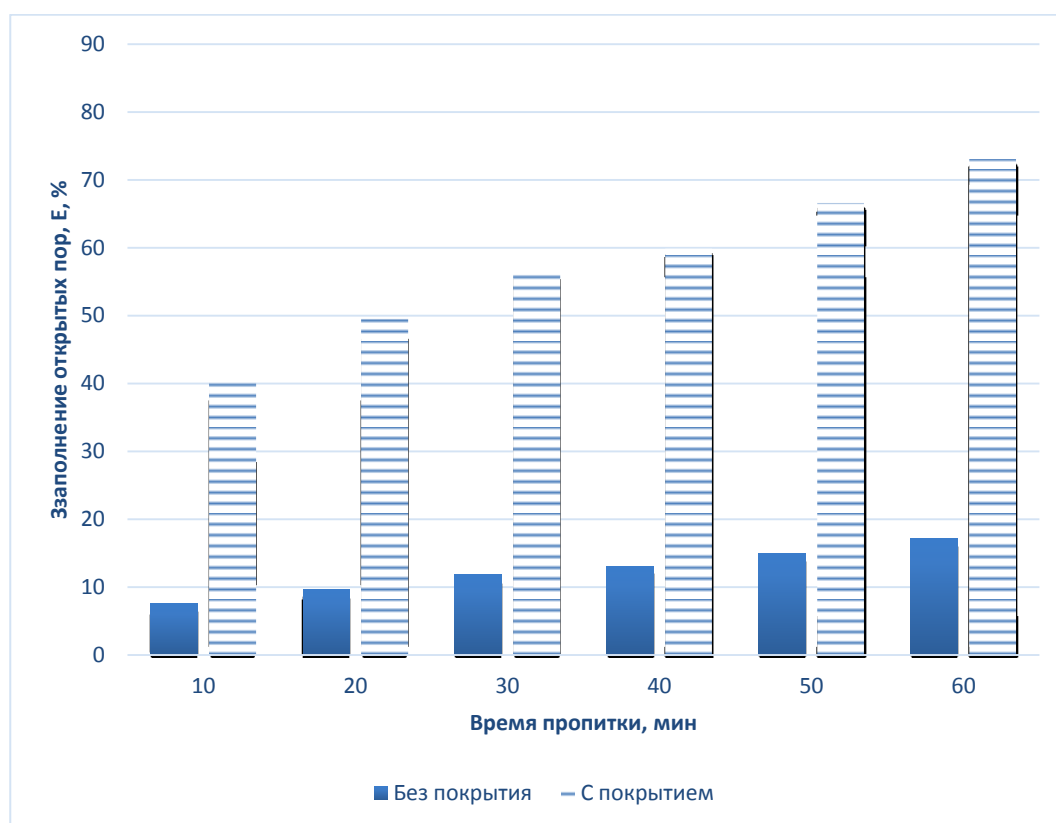


Рис. 2. Заполнение пор углярафитовой заготовки в зависимости от времени пропитки

Медное покрытие на поверхностях открытых пор углярафитового каркаса привело к снижению значения краевого угла смачивания при взаимодействии твердой и жидкой фаз, что облегчило проникновение сплава МФ-9 в поры углярафитового каркаса. Полученные расчетные данные подтверждаются микроструктурными исследованиями (рис. 3, а, б). Так КМ пропитанные без предварительного нанесения медного покрытия показывают значительно меньшее количество металла в своей структуре. При этом КМ пропитанные с использованием предварительной подготовки, в которую входило нанесение медного покрытия на поверхности открытых пор углярафита, демонстрируют высокое со-

держание металла в своей структуре, которое увеличивается с повышением времени выдержки исследуемых образцов в расплаве МФ-9.

Поскольку меднографитовые композиты чаще всего применяются в электродвигателях электротранспорта и электроинструмента были проведены исследования по определению удельного электрического сопротивления в зависимости от процента заполнения пор (рис. 4). Как показали испытания удельное электрическое сопротивление материала снижается в 4,2 раза при заполнении пор более 70 %. Это говорит о формировании непрерывного дополнительного металлического каркаса с более низким сопротивлением чем у углярафит.

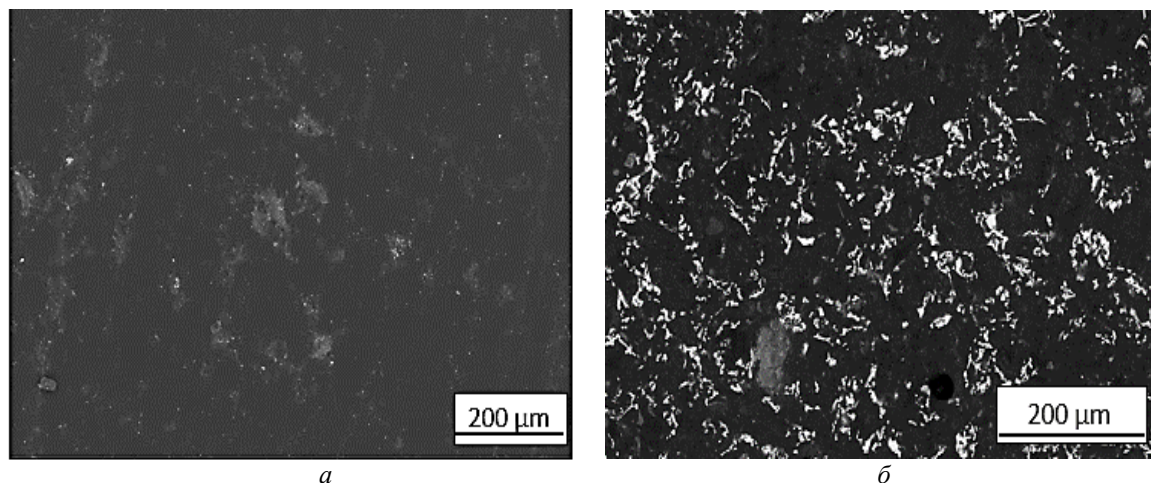


Рис. 3. Микроструктура сердцевины полученных КМ (а) без меднения и (б) с предварительным меднением после выдержки в расплаве в течение 60 мин

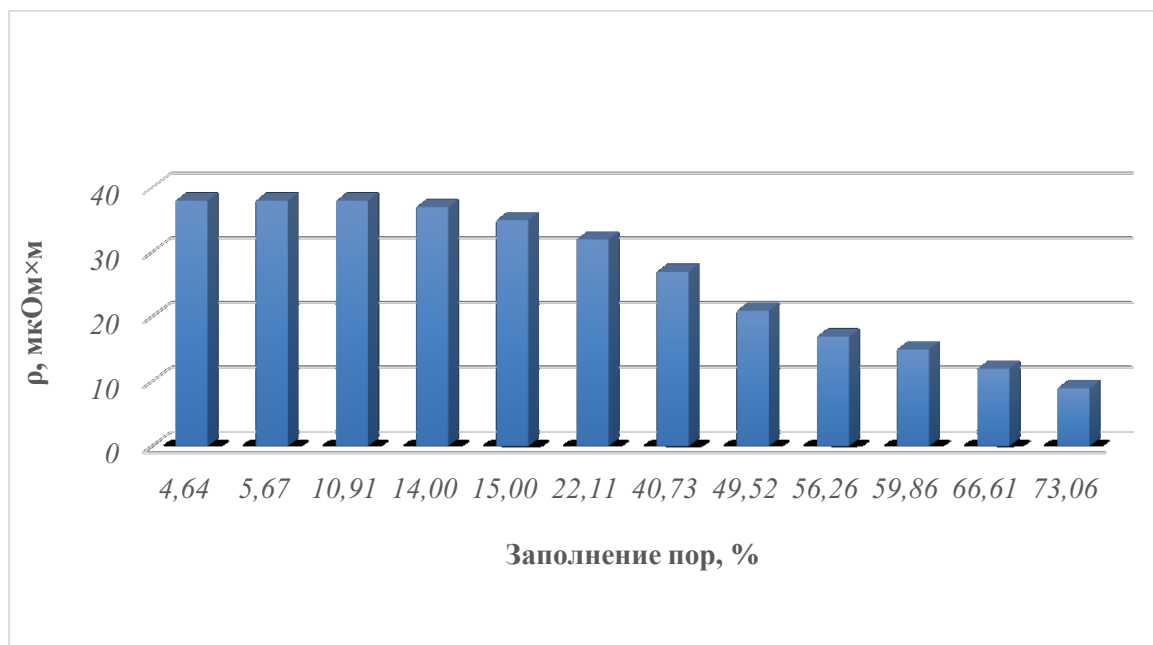


Рис. 4. Удельное электрическое сопротивление полученных КМ в зависимости от процента заполнения пор сплавом МФ-9

Выводы

1. Экспериментально показано, что при совместном нанесении электрохимического медного покрытия и ультразвукового воздействия, ультразвук оказывает положительное влияние на глубину осаждения металлического покрытия, увеличивая ее с повышением времени выдержки исследуемых образцов.
2. Выявлено, что медное покрытие на поверхностях открытых пор углеродистого каркаса привело к снижению значения краевого

угла смачивания при взаимодействии твердой и жидкой фаз, это облегчило проникновение сплава МФ-9 в поры углеродистого каркаса, и привело к заполнению 73 % пор металлом при выдержке в течении 60 мин.

3. Установлено, что удельное электрическое сопротивление материала снижается в 4,2 раза при заполнении пор более 70 %. Это говорит о формировании непрерывного дополнительного металлического каркаса с более низким сопротивлением чем у углеродистый.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Фиалков, А. С.* Углеродные материалы / А. С. Фиалков. – Москва : Энергия, 1979. – 320 с.
2. *Берент, В. Я.* Перспективы улучшения работы сильноточного скользящего контакта «контактный провод – токосъемный элемент полоза токоприемника» / В. Я. Берент // Железные дороги мира. – 2002. – № 10. – С. 46–51.
3. Пропитка углеродистых металлических сплавами : монография / В. А. Гулевский, В. И. Антипов, Л. В. Виноградов, Н. А. Кидалов, А. Г. Колмаков ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2017. – 271 с.
4. *Гершман, И. С.* Токосъемные углеродно-медные материалы / И. С. Гершман // Вестник ВНИИЖТ. – 2002. – № 5. – С. 16–20.
5. *Ali, M. M.* Composites materials for sustainable space industry: A review of recent developments / M. M. Ali, N. Nived // World Review of Science, Technology and Sustainable Development. – 2021. – N 2-3(17). – P. 172-196.
6. Wettability in metal matrix composites / M. Malaki, A. F. Tehrani, B. Niroumand, M. Gupta // Metals. – 2021. – N 7(1). – DOI:10.3390/met11071034.
7. *Найдич, Ю. В.* Закономерности контактного взаимодействия графита с расплавленными металлами / Ю. В. Найдич, Г. А. Колесниченко // Известия АН СССР, Металлы. – 1968. – № 4. – С. 220–230.