# ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.762.1

## Разработка медно-графитового композиционного материала для работы в условиях сухого трения

**А.М. Егоров**
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

**Аннотация**
Современное электромашиностроение предъявляет высокие требования к надежности узлов токосъема. Скользящие электрические контакты, представляющие собой пары трения, должны одновременно обеспечивать стабильную электропроводность и низкий коэффициент трения в условиях отсутствия смазочного материала. Традиционные монометаллические материалы не позволяют в полной мере удовлетворить данным противоречивым требованиям, что обусловливает необходимость разработки композиционных материалов, структура которых обеспечивает сочетание высокой несущей способности с выраженными антифрикционными характеристиками. Наиболее перспективным методом получения таких материалов является порошковая металлургия, позволяющая точно регулировать состав и структурные параметры изделия. В рамках первого этапа работы проведены исследования, направленные на разработку медно-графитового композиционного материала, предназначенного для токопроводящей вставки пантографа высокоскоростного железнодорожного транспорта. В качестве исходных компонентов использовали медный порошок марки ПМС-1 (ГОСТ 4960–75) и карандашный графит ГК-1 (ГОСТ 4404–78) с добавлением стеарата цинка, выполняющего функцию технологической смазки. Полученные на первом этапе результаты сформировали основу для последующего определения механических и физических свойств композитов, включая твердость, прочность, износостойкость и электропроводность.
Цель статьи — разработка медно-графитового композиционного материала с оптимальными механическими, антифрикционными и электрофизическими свойствами для изготовления токопроводящей вставки пантографа высокоскоростного железнодорожного транспорта.

**Ключевые слова:** порошковая металлургия, электроконтактные материалы, механические свойства, спекание, медь, графит

**Для цитирования.** Егоров А.М. Разработка медно-графитового композиционного материала для работы в условиях сухого трения. *Молодой исследователь Дона.* 2026;11(4):104–108.

## Development of the Copper-Graphite Composite Material for Operation in Dry Friction Conditions

**Arseniy M. Egorov**
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

**Abstract**
In modern electrical engineering there exist very rigid requirements to reliability of current collection assemblies. Sliding contacts, which are the friction pairs, must simultaneously ensure stable electrical conductivity and have a low friction coefficient in the absence of lubricant. The common monometallic materials cannot fully satisfy these conflicting requirements, which fosters the need to develop composite materials with the structure that combines high load-bearing capacity with pronounced antifriction properties. The most promising technology for producing such materials is powder metallurgy, which enables precise control over the composition and structural parameters of the product. In the frame of the 1st stage of the study, the research was focused on the development of the copper-graphite composite material intended to be used in high-speed railway pantograph contact strips. PMS-1 copper powder (GOST 4960–75) and GK–1 pencil graphite (GOST 4404–78) with the addition of zinc stearate as the process lubricant were taken as source materials. The results obtained during the first stage of the study served the basis for subsequent

https://mid-journal.ru

© Егоров А.М., 2026

determination of the mechanical and physical properties of the composites, including hardness, strength, wear resistance, and electrical conductivity. The aim of the article was to develop a copper-graphite composite material with optimal mechanical, antifriction, and electrophysical properties for production of the pantograph contact strip for the high-speed railway transport.

**Keywords:** powder metallurgy, electrical contact materials, mechanical properties, sintering, copper, graphite

**For Citation.** Egorov AM. Development of the Copper-Graphite Composite Material for Operation in Dry Friction Conditions. *Young Researcher of Don.* 2026;11(4):104–108.

**Введение.** Современное электромашиностроение предъявляет высокие требования к надежности узлов токосъема. Скользящие электрические контакты, представляющие собой пары трения, должны одновременно обеспечивать стабильную электропроводность и низкий коэффициент трения при отсутствии смазочного материала. Данная проблема особенно актуальна для высокоскоростного железнодорожного транспорта, где надежность функционирования токопроводящих элементов непосредственно влияет на безопасность и эффективность эксплуатации подвижного состава.

Материал скользящего контакта должен обладать комплексом специальных свойств: высокой тепло- и электропроводностью, эрозионной стойкостью к воздействию электрической дуги, сопротивлением свариванию и механической прочностью. Для предотвращения схватывания трущихся поверхностей контактная пара должна состоять из разнородных материалов с различной твердостью. Ключевую роль в обеспечении антифрикционных характеристик играют твердые смазки, вводимые в состав композита [1]. В медно-графитовых материалах функцию такой смазки выполняет графит, который снижает трение и предотвращает образование задиров [2]. В ряде случаев в композицию дополнительно вводят дисульфид молибдена, сульфиды или легкоплавкие металлы, например галлий, которые при рабочих температурах формируют эффект жидкостного трения, что способствует дополнительному уменьшению износа.

Наиболее распространенной основой для токосъемников, включая пантографы и коллекторные пластины, является медь, обеспечивающая высокую электропроводность. Классические бронзографитовые контакты содержат 70–80 % меди, 2–5 % графита, а также олово, никель и железо. Однако простая механическая смесь порошков меди и графита не всегда позволяет достичь оптимального сочетания прочности и проводимости [3]. Перспективным направлением является применение графита, плакированного, то есть покрытого медью. Такой подход позволяет улучшить смачиваемость частиц, повысить плотность и прочность материала после спекания, а также снизить коэффициент трения.

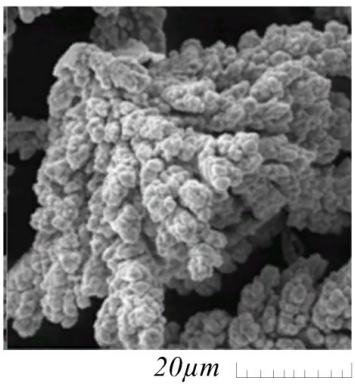
Целью работы является разработка медно-графитового композиционного материала с оптимальными механическими, антифрикционными и электрофизическими свойствами для изготовления токопроводящей вставки пантографа высокоскоростного железнодорожного транспорта.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

– изучить свойства исходных порошковых материалов;
– изготовить образцы медно-графитовых композитов с различным содержанием графита;
– исследовать влияние температуры и продолжительности спекания на формирование структуры материала;
– провести анализ микроструктуры полученных образцов;
– определить влияние содержания графита и режимов спекания на коэффициент трения материала.

**Основная часть.** В работе применяли стабилизированный медный порошок марки ПМС-1 (ГОСТ 4960–75) и карандашный графит ГК-1. Средний размер частиц порошка ПМС-1 составлял 80 мкм. Общий вид порошка ПМС-1 в состоянии поставки и морфология его частиц представлены на рис. 1.

*а)*




*б)*

Рис. 1. Порошок медный ПМС-1: *а* — в состоянии поставки; *б* — морфология частиц порошка

https://mid-journal.ru

В таблице 1 и 2 приведены данные по химическому составу используемых материалов: медного порошка ПМС-1 и графита карандашного ГК-1

Таблица 1

Химический состав, мас.% медного порошка ГОСТ 4960–75

| Марка материала | Cu (не менее) | Fe (не менее) | O (не менее) | Прокаленный остаток после обработки порошка азотной кислотой, % |
|---|---|---|---|---|
| ПМС-1 | 99,5 | 0,02 | 0,30 | Не более 0,05 |

Содержание примесей, % (не более): Pb — 0,05, As — 0,005, Sb — 0,001, сульфатов в пересчете на ион SO42- — 0,01, влага — 0,05.

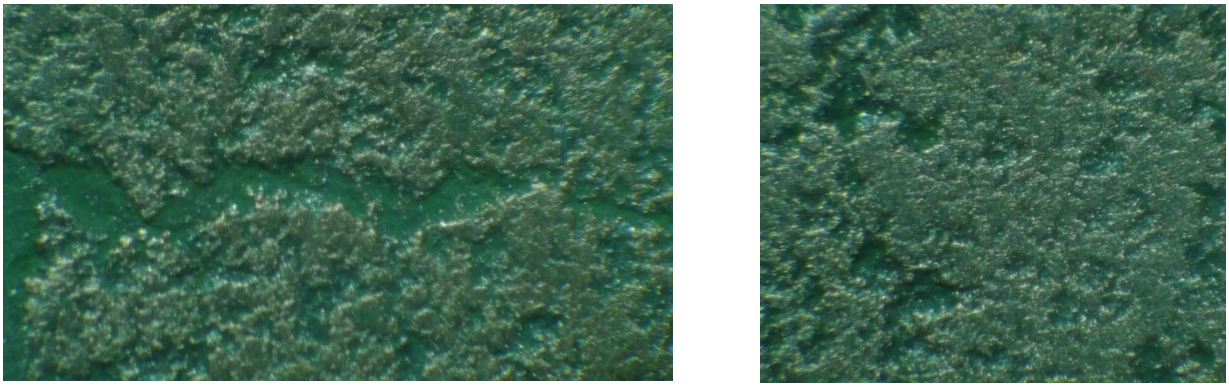
Таблица 2

Характеристики графита карандашного ГК–1 (ГОСТ 4404–78)

| Показатель | Значение |
|---|---|
| Содержания углерода, мас. %, | 98 |
| Содержание золы, мас. %, | ≈1 |
| Прочие летучие соединения, мас. %, | ≈0,5 |
| Массовая доля влаги, мас. %, | ≈0,5 |
| Размер частиц порошка, мкм | 50-80 |

Графит карандашный вводили в состав шихты в различных пропорциях — 20 % и 30 %. Для снижения внешнего и межчастичного трения в процессе прессования применяли порошок стеарата цинка (ТУ 6–09–17–316–96). В настоящее время стеарат цинка является одной из наиболее широко используемых твердых смазок в порошковой металлургии, поскольку обеспечивает минимальный коэффициент внешнего и межчастичного трения [4].

Статическое холодное прессование образцов выполняли в лаборатории кафедры «Материаловедение и технология металлов» на ручном гидравлическом прессе с максимальным усилием 30 тонн. Спекание образцов осуществляли в лаборатории термической обработки кафедры «Материаловедение и технология металлов» ДГТУ в муфельной печи LF-7/13-G1 (Россия) при температуре 850–1050 °С в среде защитного газа — диссоциированного аммиака. Продолжительность спекания составляла 60–180 минут. Микроструктуру спеченных образцов исследовали с использованием металлографического микроскопа «МЕТАМ РВ-22». Анализ структуры проводили на специально подготовленных металлографических шлифах. Результаты микроструктурного анализа представлены на рис. 4.



*а)* *б)*

Рис. 4. Микроструктура спеченных медно-графитовых образцов при температуре: *а* — 850 °С; *б* — 950 °С

Углерод сохраняется в структуре композита в качестве самостоятельной фазы в виде свободного графита. Он локализуется преимущественно по границам медных зерен и в поровых пространствах. В микроструктуре данный компонент визуализируется как включения темного цвета или тонкие прослойки, разграничивающие частицы меди. Ввиду отсутствия смачиваемости графита медью при заданных температурах, он оказывается механически зажат между спекающимися медными частицами [5]. При значительном содержании углерода (20 %) формируется не островная структура с отдельными включениями, а каркасная или сетчатая морфология. Графит стремится обволакивать зерна меди, что создает препятствие для их полноценного спекания. Механические характеристики полученного материала (в частности, пластичность) могут снижаться из-за наличия графитовых прослоек, однако композит приобретает превосходные антифрикционные свойства при работе в условиях сухого трения [6].

В ходе экспериментальных исследований были построены графические зависимости, отражающие влияние концентрации вводимого углерода на коэффициент трения спеченных образцов при контакте со сталью 20. Спекание проводилось в течение 30, 60 и 90 минут при температурных режимах 850 °С, 950 °С и 1050 °С. Полученные результаты проиллюстрированы на рис. 4.

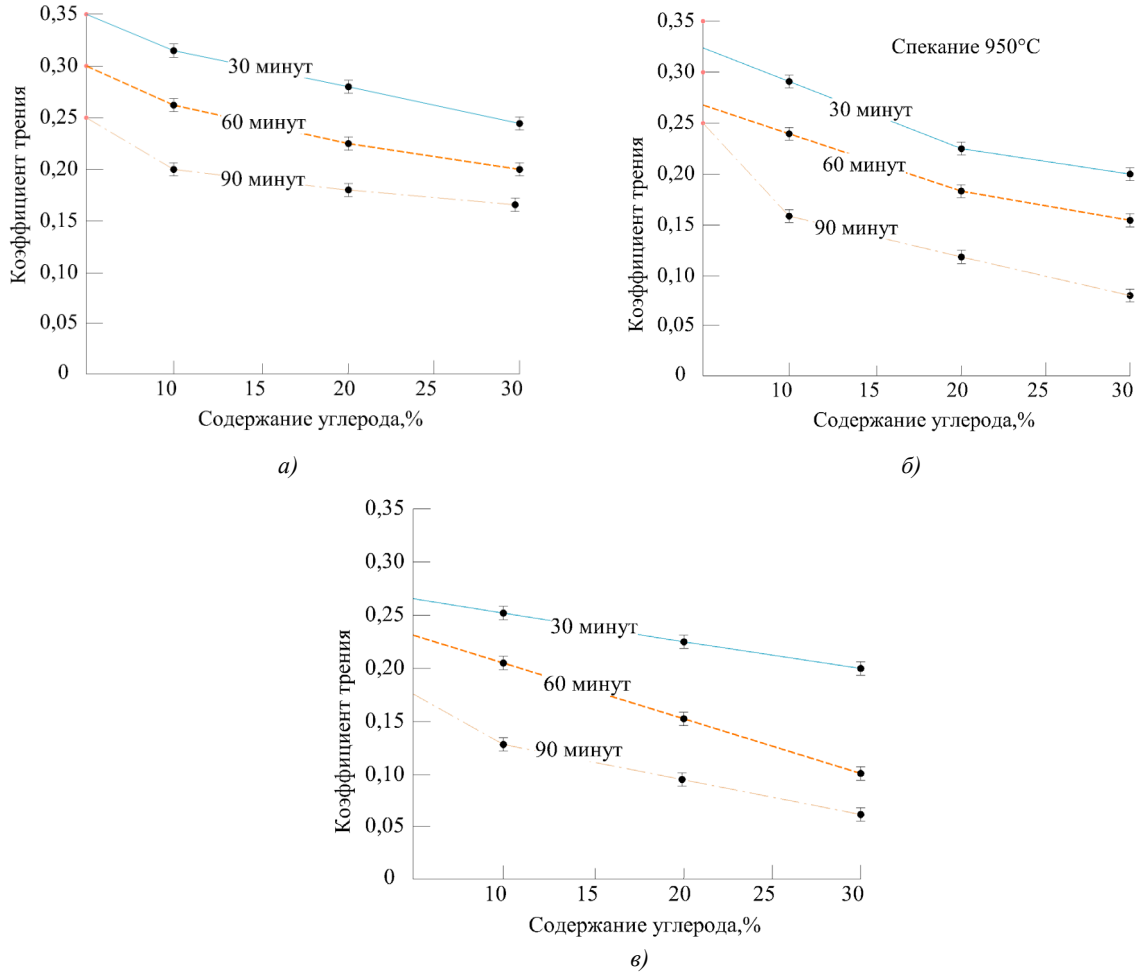



Рис. 4. Зависимость коэффициента трения от содержания углерода в шихте при спекании:
*а* — 850 °С; *б* — 950 °С; *в* — 1050 °С

При температуре 850 °С процесс протекает в твердой фазе [7]. Коэффициент трения в данном случае остается относительно высоким. Кривые демонстрируют резкое снижение значений при добавлении первых 5–10 % углерода, после чего интенсивность спада уменьшается. Разница в показателях между временем выдержки 30 и 90 минут достигает 40 %. После кратковременного спекания (30 минут) структура остается рыхлой, а неравномерное распределение графита обуславливает повышенное трение. Увеличение времени процесса свыше 60 минут активизирует диффузионные взаимодействия, что способствует снижению коэффициента трения на 15–20 % [8].

Повышение температуры спекания до 950 °С приводит к общему снижению коэффициента трения. При выдержке в 90 минут различие между составами с 10 % и 20 % графита становится незначительным, что объясняется формированием сплошных смазочных слоев. Минимальный коэффициент трения для всех исследуемых образцов зафиксирован при 1050 °С, что приближено к температуре плавления меди. В этом режиме графики сближаются, указывая на ослабление зависимости свойств от времени выдержки. Таким образом, период спекания в интервале 30–60 минут является достаточным для получения качественного материала. Рост концентрации углерода с 20 % до 30 % сопровождается эффектом насыщения и лишь незначительно корректирует антифрикционные параметры [9]. Наиболее выраженный эффект снижения трения достигается при введении 20 % углерода. Для обеспечения низкого коэффициента трения (0,1–0,15) целесообразно проводить спекание в диапазоне 950–1050 °С в течение 60 минут. Фактор времени является критически значимым преимущественно при низкотемпературном режиме 850 °С [10].

Заключение. По итогам проведенных экспериментальных работ по созданию медно-графитового композиционного материала для узлов сухого трения можно сформулировать следующие выводы:

– Разработана и реализована технологическая последовательность получения композитов на основе медного порошка ПМС-1 и графита ГК-1, включающая статическое холодное прессование и последующее спекание в среде диссоциированного аммиака. Подтверждена возможность синтеза материалов с содержанием углеродной фазы 20 % и 30 %.

– Установлено, что в процессе спекания углерод обособляется в виде свободного графита, располагающегося по границам зерен. При концентрации графита 20 % формируется сетчатый каркас, который, препятствуя сращиванию медных частиц, обеспечивает высокие антифрикционные показатели при умеренной механической прочности.

– При температуре 1050 °С достигаются минимальные значения коэффициента трения для всех составов, при этом влияние продолжительности термической обработки на итоговые свойства нивелируется.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям.

**Список литературы**

1. Витязь П.А., Ильющенко А.Ф., Савич В.В. Состояние и перспективы развития порошковой металлургии в России, Украине и Беларуси. В*: Доклады 12-го Международного симпозиума «Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка». Минск, 07–09 апреля 2021 г*. Минск: Белорусская наука; 2021. С. 26–80.

2. Дмитрович А.А., Лешок А.В., Роговой А.Н., Сарока Д.И. Композиционные фрикционные материалы: основные виды и требования к ним. Порошковая металлургия. В: *Сборник научных трудов. Минск, ноябрь – декабрь 2021.* Минск: Белорусская наука. 2015;(38):190–194. https://doi.org/10.32864/0202-4977-2020-41-6-659-664

3. Егоров М.С., Еремеева Ж.В., Егорова Е.В. *Методы получения железных и стальных порошков и конструкционных материалов на их основе.* Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет; 2021.50 с.

4. Логинов Ю.Н. *Изготовление полуфабрикатов и изделий из порошков меди и медных сплавов*. Екатеринбург: УГТУ-УПИ; 2008. 208 с.

5. Егоров М.С., Егорова Р.В., Ковтун М.В. Влияние содержания углерода на формирование контактной поверхности при горячей допрессовке. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2023;7(2):90–101. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-90-101

6. Manikandan N, Kalaiselvan K, Karthikeyan AG, Dharagavineeth S. Wear Characteristics of Sintered Cu-Sn/Graphite Lubricants Composites. *Materials Today: Proceedings*. 2022;66(3): 1464–1470. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.464

7. Гуревич Ю.Г., Анциферов В.Н., Савиных Л.М., Оглезнева С.А.,.Буланов В.Я. *Износостойкие композиционные материалы.* Екатеринбург: УрО РАН; 2005. 216 с.

8. Гревнов Л.М., Оглезнева С.А., Куликова А.А. Исследование легирования порошковых сталей разными формами углерода. *Фундаментальные исследования*. 2017;(11(2)):284–288. URL: https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41936 (дата обращения: 01.06.2026).

9. Болсуновская Т.А., Ефимочкин И.Ю., Севостьянова Н.В. Влияние марки графита в качестве твердой смазки на триботехнические свойства металлического композиционного материала. *Труды ВИАМ.* 2018;67(7):69–77.

10. Ильющенко А.Ф., Лешок А.В., Дьячкова Л.Н., Пинчук Т.И., Бейлина Н.Ю.. Триботехнические свойства спеченного фрикционного материала с коллоидным графитом. *Трение и износ*. 2021;42(6):629–638. https://doi.org/10.32864/0202-4977-2021-42-6-629-638

***Об авторе:***

**Арсений Максимович Егоров,** студент кафедры «Материаловедение и технология металлов» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ArsenMaxEgorov@mail.ru

***Конфликт интересов:*** **авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

***Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.***

***About the Author:***

**Arseniy M. Egorov,** Student of the Materials Science and Metal Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), ArsenMaxEgorov@mail.ru

***Conflict of interest statement:*** **the authors declare no conflict of interest.**

***All authors have read and approved the final manuscript.***