



УДК 621.762

<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-2-5-13>Научная статья
Research article

Влияние солей меди на физико-механические свойства композиционных материалов медь–графит

Н. Д. Оглезнев, И. И. Якубаев, С. А. Оглезнева[✉], С. Е. ПорозоваПермский национальный исследовательский политехнический университет
Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29[✉ ogleznevasa@pstu.ru](mailto:ogleznevasa@pstu.ru)

Аннотация. Исследованы композиционные материалы на основе электролитического порошка меди, содержащие 1 и 5 мас. % порошка коллоидного графита, с добавлением в микроколичествах сульфата и ацетата меди. Материалы получали методами двойного холодного прессования в пресс-форме при давлении 600 МПа, промежуточного спекания (отжига) в водороде при температуре 870 °С и окончательного спекания в вакууме при предплавильной температуре меди. Методами рентгенофазового анализа, сканирующей электронной микроскопии, испытаний на прочность при трехточечном изгибе и определения электросопротивления исследовано влияние солей меди на плотность, пористость, удельное электросопротивление и прочность композиционных материалов медь–графит. Установлено, что с увеличением содержания графита повышаются пористость и удельное электросопротивление композиционных материалов, а прочность снижается. В материалах, содержащих сульфат меди, происходит восстановление меди из соли в виде нанодисперсных частиц на поверхностях и внутри графитовых чешуек, что способствует снижению удельного электросопротивления по сравнению с композитами медь–графит без добавок солей. При добавлении ацетата меди в композиционный материал восстановление меди из соли происходит преимущественно на поверхностях частиц графита в виде микродисперсных частиц и их сростков, так как раствор ацетата меди не смачивает графит. Удельное электросопротивление при этом было несколько больше, чем у композита с сульфатом, но меньше, чем у материала без солей. Прочность на изгиб исследованных материалов при введении солей понижалась за счет повышения пористости и появления дефектов кристаллического строения графита при его интеркалляции медью.

Ключевые слова: композиционный материал (КМ), медь, графит, сульфат меди, ацетат меди, удельное электросопротивление, пористость, прочность, интеркалляция

Для цитирования: Оглезнев Н.Д., Якубаев И.И., Оглезнева С.А., Порозова С.Е. Влияние солей меди на физико-механические свойства композиционных материалов медь–графит. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия.* 2024;18(2):5–13. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-2-5-13>

Influence of copper salts on the physical and mechanical properties of copper–graphite composite materials

N. D. Ogleznev, I. I. Yakubaev, S. A. Oglezneva, S. E. Porozova

Perm National Research Polytechnic University
29 Komsomolsky Prosp., Perm 614990, Russia[✉ ogleznevasa@pstu.ru](mailto:ogleznevasa@pstu.ru)

Abstract. We investigated composite materials based on electrolytic copper powder containing 1 and 5 wt. % powder of colloidal graphite the addition of trace amounts of copper sulfate and acetate. The materials were obtained through double cold pressing in a mold at a pressure of 600 MPa, intermediate sintering (annealing) in hydrogen at a temperature of 870 °C, and final sintering in vacuum at the copper premelting temperature. To analyze the influence of copper salts on the density, porosity, electrical resistivity,

and strength of copper–graphite composite materials, we employed X-ray phase analysis, scanning electron microscopy, conducted strength tests in three-point bending, and determined electrical resistivity. We established that higher graphite content results in increased porosity and electrical resistivity of composite materials, along with decreased strength. In the materials containing copper sulfate, copper is reduced from the salt in the form of nanodispersed particles on the surfaces and inside graphite flakes, leading to a decrease in electrical resistivity compared to copper–graphite composites without salt additives. When copper acetate was added to the composite material, copper is reduced from the salt mainly on the surfaces of graphite particles in the form of microdispersed particles and their aggregations, as the copper acetate solution does not wet the graphite. In this case, the electrical resistivity was somewhat higher than that of the composite with sulfate but lower than that of the material without salts. The bending strength of the studied materials decreased as salts were introduced due to increased porosity and emerging defects in the crystal structure of graphite during its intercalation with copper.

Keywords: composite material (CM), copper, graphite, copper sulfate, copper acetate, electrical resistivity, porosity, strength, intercalation

For citation: Ogleznev N.D., Yakubaev I.I., Oglezneva S.A., Porozova S.E. Influence of copper salts on the physical and mechanical properties of copper–graphite composite materials. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2024;18(2):5–13. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-2-5-13>

Введение

Композиты медь–углерод сочетают высокий уровень тепло- и электропроводности меди, низкие значения коэффициента теплового расширения, удельного веса и высокую температуру плавления углерода [1], поэтому они широко используются в электротехнических приборах и полупроводниковой промышленности в качестве материалов теплопроводящих оснований для корпусов мощных выпрямительных и лазерных диодов, СВЧ-транзисторов и усилителей мощности [2; 3], а также для электроэрозивной обработки металлов, мощных силовых модулей и оптоэлектронных приборов скользящих электрических контактов пантографов, щеток электродвигателей и других частей техники [4]. Удельное электро-сопротивление графита, тем не менее, на 2 порядка больше, чем у меди, поэтому добавление его в больших количествах снижает электропроводность композиционного материала (КМ) в целом.

Улучшению проводящих свойств графита может способствовать интеркалирование ионами металлов вплоть до формирования сверхпроводящих структур. Например, графит, интеркалированный кальцием, переходит в сверхпроводящее состояние [5], а железо способствует повышению тепло- и электропроводности углеродных материалов [6]. Известны также интеркалаты меди в графите [7; 8] и углеродных нанотрубках (УНТ) [9]. Однако технологии изготовления материалов систем медь–графит, медь–УНТ осложняются отсутствием физико-химического взаимодействия между компонентами, в том числе большой величиной поверхностного натяжения расплава металлов [10]. Введение ионов металлов в графит, УНТ и фуллерены осуществляют с помощью растворов солей. Например, в работе [9] порошок УНТ смешивался с гидратом ацетата меди, и после термической обработки внутри УНТ были получены квантовые медные провода длиной до 50 нм. Для интеркалирования графита авторами [7; 8] исполь-

зован хлорид меди и получены суперпроводящие материалы [11].

Из-за большой разницы в коэффициентах теплового расширения традиционные методы подготовки не могут эффективно обеспечить межфазное соединение между медной матрицей и углеродом [12]. Даже прокатка при различных температурах с высокими степенями деформации [13] не позволяет улучшить прочность на межфазной границе и снизить величину удельного электросопротивления.

Так как графит с медной матрицей не имеет физико-химического взаимодействия, то для улучшения связи меди с углеродом на межфазной границе в КМ добавляют карбидообразующие элементы (бор, хром и др. [14]), производят окисление поверхности углерода кислотами [15] и солями, что обеспечивает введение ультрадисперсной меди в поры материала и обуславливает снижение коэффициента трения, износа, улучшение электропроводности и механических свойств [16]. Также используется предварительное химическое меднение природного чешуйчатого графита [17], что улучшает адгезию графита к медной матрице, но усложняет и удорожает технологический процесс.

Известны случаи получения интеркалированных структур графита без его специальной обработки. В работе [18] к расплаву меди добавляли графит при температуре 1200–1250 °С. Полученный медный сплав имел электрическое сопротивление ниже, а прочность на растяжение выше, чем у существующих медных сплавов. Авторы [19] интеркалирование проводили путем выдерживания образцов высокоориентированного пиролитического графита (НОРГ) в течение 20 мин в расплаве меди чистотой 99,99 % при температуре 1473 К в вакууме. Анализ дифракционной картины графита, содержащего атомы меди, показал, что в его структуре появляются плоскости, атомы в которых смещены из своих начальных положений. Полученные результаты авторы объясняют образованием промежуточных комплексов с ионами

меди в графите, и если атом металла покидает пару колец в плоскости сетки графита, то в последней мгновенно устанавливаются «алмазные» связи с одно-временным гофрированием молекулярных сеток в том месте, где находился металл.

Метод порошковой металлургии позволяет управлять свойствами КМ за счет варьирования в широком диапазоне составов и технологических приемов. В работе [20] получен композиционный материал медь–графит спеканием при предплавильной температуре меди. Дополнительные рефлексы, обнаруженные рентгенофазовым анализом спеченного КМ медь – коллоидный графит, соответствуют рефлексам, описанным в работе [21]. Полученные материалы имели низкое удельное электросопротивление и были испытаны как электроды-инструменты для электроэрозионной обработки, показавшие высокие эксплуатационные свойства, обусловленные высокой электро- и теплопроводностью.

Таким образом, учитывая способ предварительной обработки графита кислотами и высокую упругость паров меди, образование интеркалированных соединений с медью вполне возможно [21; 22].

Цель настоящего исследования – изучение влияния обработки графита солями меди на физико-механические свойства КМ медь–графит.

Методики эксперимента и исследований

Для получения образцов медь–графит в качестве исходного сырья использовали порошок меди ПМС-1 (ГОСТ 49-60-75), графит коллоидный марки С-1 (ТУ 113-08-48-63-90), соли CuSO_4 (ГОСТ 19347-2014) или $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Cu}$, приготовленные из порошка меди и ледяной уксусной кислоты. Смачивание поверхности спрессованного порошка графита 7 %-ными водными растворами солей проводили методом лежащей капли, угол смачивания определяли по фотографиям. В ряде случаев в растворы солей добавляли неионогенные поверхностно-активные вещества (ПАВ).

Порошок графита С-1 смешивали с солями меди в количествах, которые после восстановления должны были обеспечить в нем 10 %-ное содержание меди, добавляли дистиллированную воду с необходимыми количествами солей и ПАВ (или без них), диспергировали в ультразвуковой ванне (УЗВ) СТ-400С (Россия), высушивали при комнатной температуре и затем восстанавливали в водороде при температурах 750 и 1000 °С. Для изготовления КМ порошки меди и графита смешивали в количестве 1 или 5 мас. % с неионогенным поверхностно-активным веществом (в ряде случаев добавляли соли). Смеси диспергировали в УЗВ (СТ-400С) с добавлением этилового

спирта и высушивали. Полученные порошки прессовали при давлении 600 МПа на прессе П-125 (Россия) и отжигали в печи СГВ (Россия) в среде водорода при температуре 870 °С в течение 1 ч. После отжига проводили доуплотнение в пресс-форме при давлении 600 МПа. Окончательное спекание образцов осуществляли в вакууме при $t = 1070 \div 1080$ °С в течение 2 ч (печь СНВЭ-1.3.1/16, Россия).

Рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре XRD-6000 («Shimadzu», Япония) в CuK_α -излучении. Идентификацию фазового состава выполняли по картотеке Международного центра дифрактометрических измерений. Для обработки данных использовалась программа Crystallographica Search-Match Version 2.0.3.1 (Oxford Cryosystems Ltd). Параметры съемки: диапазон углов от 10 до 110°, шаг 0,02°. Структуру образцов КМ медь–графит исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 3 с EDX-анализатором (Чехия).

Испытания свойств проводили на 3–10 образцах на точку. Плотность и пористость композиционных материалов определяли расчетным методом по стандартной методике (ГОСТ 18898-89). Удельное электросопротивление КМ рассчитывали из сопротивления образца, определенного прибором GOM-802 (Россия) методом, основанным на измерении разности потенциалов на участке проводника. Испытания на прочность при трехточечном изгибе образцов без трещин проводили на машине FP 10/1 (Германия) по ГОСТ 18227-85 со скоростью нагружения 2 мм/мин; расстояние между опорами составляло 40 мм.

Результаты и их обсуждение

Краевой угол смачивания поверхности графита раствором сульфата меди был намного меньше, чем угол смачивания раствором ацетата меди (рис. 1, а, б). Добавление неионогенного ПАВ в водные растворы обеих солей еще уменьшило эти показатели: для сульфата меди с 70 до 34° (рис. 1, в), что в соответствии с известной формулой Т. Юнга свидетельствует о смачиваемости и приближении к растеканию по графиту раствора с ПАВ, а для ацетата меди наблюдалась несмачиваемость – краевой угол снизился незначительно – со 110 до 98° (рис. 1, г).

Следует отметить, что по истечении нескольких минут капли растворов солей все же начинали растекаться по поверхности графита, что свидетельствует о начале его взаимодействия с солями. Эксперимент по восстановлению обработанного растворами солей порошка графита позволил сымитировать механизм формирования структуры композиционного материала медь–графит при спекании.

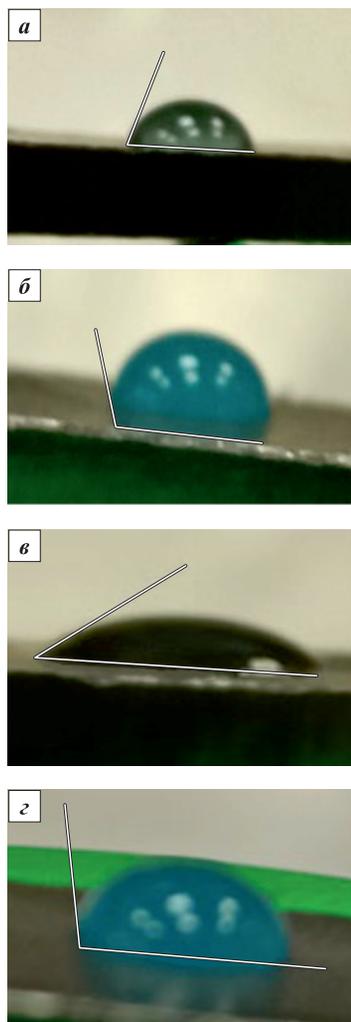


Рис. 1. Определение краевого угла смачивания водными растворами солей $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Cu}$ и CuSO_4 на поверхности прессованного порошка графита

- a* – р-р CuSO_4 без ПАВ ($\theta = 70^\circ$)
- б* – р-р $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Cu}$ без ПАВ ($\theta = 110^\circ$)
- в* – р-р CuSO_4 с добавкой ПАВ ($\theta = 34^\circ$)
- з* – р-р $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Cu}$ с добавкой ПАВ ($\theta = 98^\circ$)

Fig. 1. Determination of the contact angle of wetting with aqueous solutions of $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Cu}$ and CuSO_4 salts on the surface of pressed graphite powder

- a* – solution CuSO_4 without surfactant ($\theta = 70^\circ$)
- б* – solution $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Cu}$ without surfactant ($\theta = 110^\circ$)
- в* – solution CuSO_4 with surfactant ($\theta = 34^\circ$)
- з* – solution $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Cu}$ with surfactant ($\theta = 98^\circ$)

Исследован фазовый состав после восстановления солей меди в смесях с графитом в водороде (табл. 1). Установлено, что ацетат меди восстанавливается до чистой меди уже при $t = 750^\circ\text{C}$ с образованием небольшого количества куприта Cu_2O (табл. 1). При повышении температуры до 1000°C оксид меди уже не обнаруживается, что согласуется с данными о восстановлении меди в водороде при $t = 200\div 400^\circ\text{C}$ [23]. Сульфат меди при $t = 750^\circ\text{C}$ превращается в сульфид меди, повышение температуры до 1000°C приводит к восстановлению сульфида до меди, что согласуется с термодинамическими расчетами [24].

Из СЭМ-изображений смесей графита после восстановления с солями меди видно, что в образце, обработанном сульфатом меди, частицы меди расположены как на поверхностях, так и внутри частиц графита, распределение достаточно равномерное (рис. 2, *a*, *б*). Доля поверхностных частиц занимает около 20 %, максимальная – 50 % (рис. 2, *a*, табл. 1). Размеры частиц меди, восстановленных из сульфата, составляют 0,2–1,0 мкм (рис. 2, *б*, табл. 1).

В образце графита, обработанного водным раствором ацетата меди, пропитка которого произошла только на небольшую глубину, восстановленные частицы меди расположены преимущественно на поверхностях графитовых частиц (рис. 2, *в*, *з*) в виде крупных кристаллов с концентрацией на поверхности около 60 % (максимально 78 %, табл. 1). Размеры частиц меди, восстановленной из ацетата, составили 0,1–3,0 мкм. Так как среднее содержание меди в обоих образцах составило около 10 мас. % по отношению к массе графита, то очевидно, что основная доля восстановленной меди из ацетата сосредоточена на поверхностях частиц графита, а обработанного сульфатом меди – в межслоевых пространствах чешуек графита. Результаты этого эксперимента позволили предположить аналогичное восстановление меди из солей при спекании КМ с их добавлением.

После окончательного спекания композиционных материалов, содержащих 99–95 % порошка меди ПМС-1 и 1–5 % порошка коллоидного графита (как с добавками солей, так и без них), на СЭМ-

Таблица 1. Фазовый состав графита, пропитанного солью, после восстановления

Table 1. Phase composition of graphite impregnated with salt after reduction

Фазовый состав	Концентрация меди, мас. %		Размер частиц меди, мкм			
	до восстановления	после восстановления		среднее в смеси (РФА)	на поверхности графита (среднее/максимальное (EDX-анализ))	
Смесь порошков С + $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Cu}$	после восстановления	750 °С	1000 °С	~10	60/78	0,1–3,0
Смесь порошков С + CuSO_4	после восстановления	750 °С	1000 °С	~10	20/50	0,2–1,0

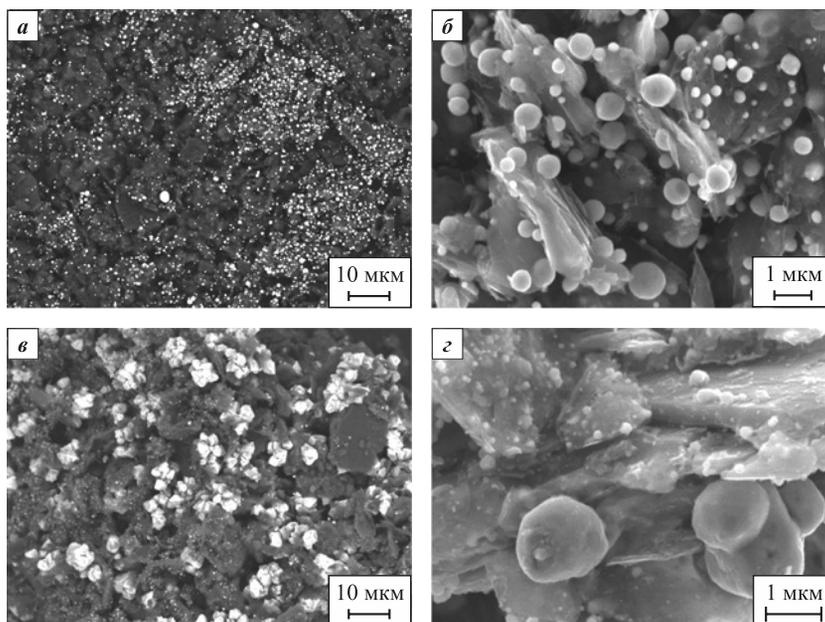


Рис. 2. СЭМ-изображения порошка графита С-1 после пропитки водными растворами солей и восстановления
a – CuSO_4 , размер области исследования $S = 100$ мкм, *б* – CuSO_4 , $S = 11$ мкм, *в* – $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Cu}$, $S = 80$ мкм, *з* – $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Cu}$, $S = 7$ мкм

Fig. 2. SEM image of S-1 graphite powder after impregnation with aqueous salt solutions and reduction

a – CuSO_4 , size of research area $S = 100$ μm , *б* – CuSO_4 , $S = 11$ μm , *в* – $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Cu}$, $S = 80$ μm , *з* – $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Cu}$, $S = 7$ μm

изображениях видно, что медь в виде сфер различного диаметра достаточно равномерно распределена в графитовых включениях (рис. 3–5).

На изломе спеченного образца КМ с 5 % С без добавления солей (рис. 3, *a*) наблюдаются дисперсные частицы меди размером 0,1–0,5 мкм в небольшой концентрации, которые расположены внутри и на поверхностях частиц графита (рис. 3, *б*).

На СЭМ-изображениях спеченного образца, содержащего 1 % графита, с добавлением сульфата меди (рис. 4) видно, что частицы меди размером 5–10 мкм в большом количестве равномерно распределены как по поверхностям чешуек графита, так и между слоями частиц (рис. 4, *б*).

Так как раствор ацетата меди не смачивает графит и пропитка раствором происходила поверхностно, то частицы меди на рис. 5, *a* наблюдаются в виде скоплений и сростков на поверхностях частиц графита, а в пространствах между его слоями их немного (рис. 5, *б*). Размеры частиц меди на чешуйках графита около 10–20 мкм – это намного больше, чем в материалах без добавления солей и с обработкой сульфатом меди.

У образцов с содержанием графита 1 % меньше пористость (Π) и, соответственно, удельное электросопротивление (ρ), а прочность на изгиб ($\sigma_{\text{изг}}$) выше, чем у КМ с 5 % (табл. 2). Очевидно, упругость графита и отсутствие его взаимодействия с медью не позволяют достичь высоких плотности и прочности (некоторые образцы с большим содержанием

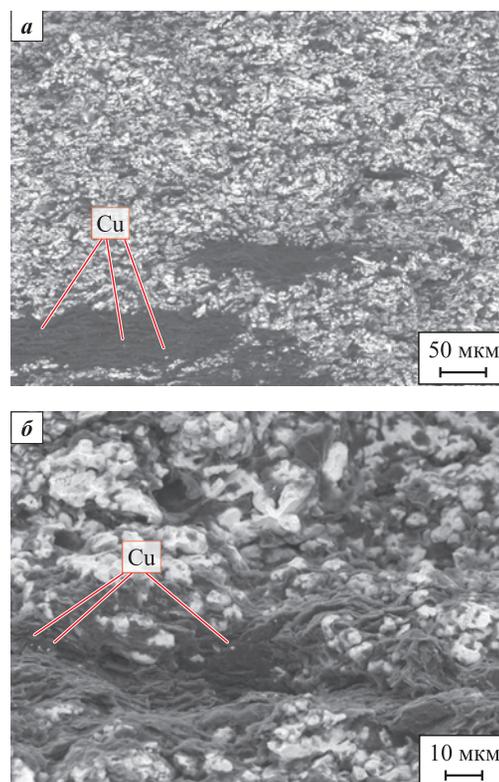


Рис. 3. СЭМ-изображения образца КМ на основе меди с 5 % графита без добавки солей

a – излом КМ, *б* – фаза графита в КМ

Fig. 3. SEM images of a copper-based CM sample with 5 % graphite without salts

a – CM fracture, *б* – graphite phase in CM

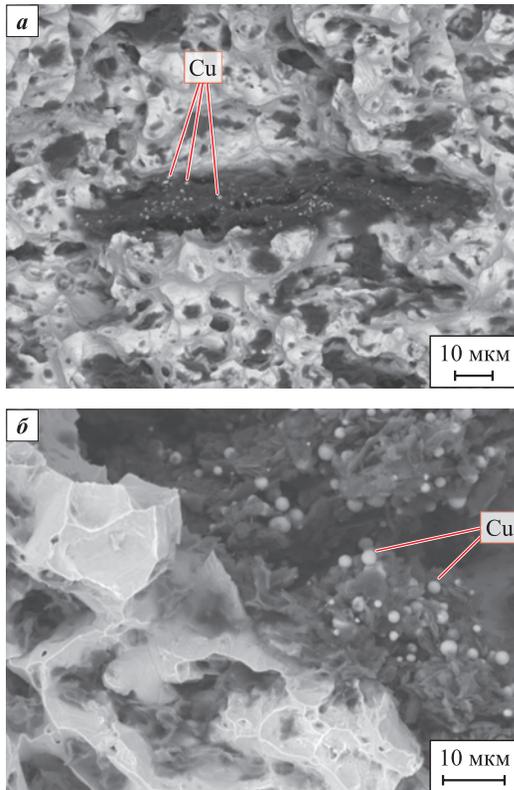


Рис. 4. СЭМ-изображение образца КМ на основе меди с 1 % графита и добавлением сульфата меди
a – излом КМ, *б* – фаза графита в КМ

Fig. 4. SEM images of a copper-based CM sample with 1 % graphite and addition of copper sulfate
a – CM fracture, *b* – graphite phase in CM

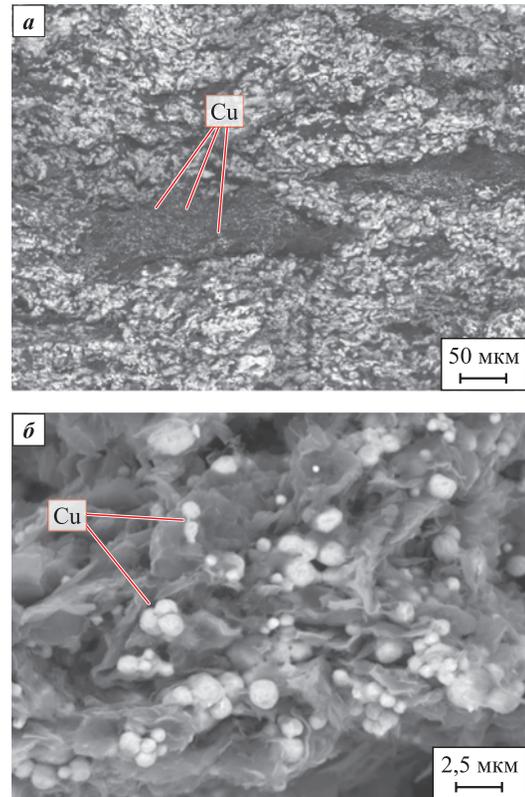


Рис. 5. СЭМ-изображение образца КМ на основе меди с 5 % графита и добавлением ацетата меди
a – излом КМ, *б* – фаза графита в КМ

Fig. 5. SEM images of a copper-based CM sample with 5 % graphite and addition of copper acetate
a – CM fracture, *b* – graphite phase in CM

графита разрушались либо после прессования, либо после спекания).

Обработка графита солями меди оказывает влияние на структуру и физико-механические свойства исследованных КМ, что хорошо прослеживается на образцах с 1 % графита. В материалах с графитом без обработки наблюдается образование нанодис-

персных частиц меди в небольшой концентрации, которые несущественно нарушают кристаллическую структуру графита, поэтому прочность этих образцов КМ самая высокая.

В структуре графита, обработанного сульфатом меди, частицы восстановленной меди более крупные, их концентрация в межслоевых пространствах чешуек графита больше. Кроме того, после окончательного спекания несколько увеличивается пористость, свидетельствующая о терморасширении графита [24; 25] (возможно также и завершение восстановления меди из сульфата), поэтому в данном материале нарушаются связи в кристаллической решетке графита, образуются дефекты и увеличиваются межплоскостные расстояния. Следствием формирования такой структуры являются закономерное повышение пористости и понижение прочности по сравнению с КМ без добавления солей. Но этот же материал, имеющий самую высокую пористость, обладает и более низким удельным электросопротивлением, чем у чистой меди ($\rho = (1,75 \div 1,80) \cdot 10^{-8}$ мОм·мм) за счет наличия высокой концентрации проводящих медных частиц внутри частиц графита.

Таблица 2. Физико-механические свойства композиционных материалов медь–графит

Table 2. Physical and mechanical properties of copper–graphite composite materials

Содержание графита, мас. %	Добавка соли	P , %	$\rho \cdot 10^{-8}$, мОм·мм	$\sigma_{изг}$, МПа
1	–	2	$1,94 \pm 0,15$	270 ± 19
5	–	8	$3,48 \pm 0,23$	90 ± 11
1	Ацетат меди	2	$1,71 \pm 0,13$	230 ± 20
5	Ацетат меди	8	$3,30 \pm 0,20$	75 ± 9
1	Сульфат меди	7	$1,69 \pm 0,13$	200 ± 22

После обработки ацетатом меди количество восстановленных медных частиц внутри частиц графита меньше, чем после обработки сульфатом, поэтому удельное электросопротивление несколько больше, как и прочность. Однако по сравнению с материалом, содержащим необработанный графит, при равной пористости удельное сопротивление меньше у КМ с ацетатом меди, что обусловлено наличием медных частиц внутри графита, а более низкое значение прочности этих образцов – следствие некоторого нарушения кристаллического строения графита.

Выводы

По результатам проведенных исследований установлено следующее.

1. С увеличением содержания графита от 1 до 5 % в композиционных материалах на основе меди как с добавками солей, так и без них возрастает пористость.

2. Ацетат меди при термообработке в водороде восстанавливается при температуре 750 °С, сульфат меди – при 1000 °С.

3. Восстановленная медь из соли ацетата меди в виде крупных частиц наблюдается в основном на поверхностях графитовых чешуек.

4. При спекании КМ даже без обработки графита солями меди происходят испарение меди и проникновение ее внутрь частиц графита.

5. Образцы с добавками солей меди после спекания обладают несколько меньшей прочностью и пониженным значением удельного электросопротивления по сравнению с КМ без солей. Снижение электросопротивления может быть обусловлено возможным интеркалированием графита медью, а понижение прочности – формированием при этом дефектов структуры графита.

Список литературы / References

- Allabergenov B., Kim S. Investigation of electrophysical and mechanical characteristics of porous copper-carbon composite materials prepared by spark plasma sintering. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2013;14(7):1177–1183. <https://doi.org/10.1007/s12541-013-0160-5>
- Боднар Д.М. Металлические и композитные теплопроводящие материалы для мощных полупроводниковых корпусов. *Компоненты и технологии*. 2014;12:155–160.
Bodnar D.M. Metallic and composite thermal conductive materials for powerful semiconductor packages. *Компоненты и технологии*. 2014;12:155–160. (In Russ.).
- Наночастицы, наносистемы и их применение. Ч. II. Углеродные и родственные слоистые материалы для современной нанoeлектроники: Учеб. пос. в 2 ч. Под ред. В.А. Мошникова, О.А. Александровой. Уфа: Аэтерна, 2016. 330 с.
- Савич В.В., Оглезнева С.А. Порошковая металлургия: современное состояние и перспективы развития: Монография. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2021. 695 с.
- Emery N., Hérold C., d’Astuto M., Garcia V., Bellin Ch., Marèché J. F., Lagrange P., Loupias G. Superconductivity of Bulk CaC₆. *Physical Review Letters*. 2005.95(8):087003. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.087003>
- Dunaev A.V., Arkhangelsky I.V., Zubavichus Ya.V., Avdeev V.V. Preparation, structure and reduction of graphite intercalation compounds with hexachloroplatinic acid. *Carbon*. 2008;46(5):788–795. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2008.02.003>
- Kyle Kalbus. Copper intercalation into graphite: Theses and Dissertations. Milwaukee (USA), University of Wisconsin Milwaukee, 2012. 34 p. <https://dc.uwm.edu/etd/34>.
- Bin X., Chen Jiazang, Cao Hong, Ma Enbao, Wang Xuehua, Yuan Jizhu. Preparation and structural investigation of CuCl₂ graphite intercalation compounds. *Acta Geologica Sinica: English Edition*. 2008.82(5):1056–1060. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2008.tb00663.x>
- Мищенко С.В., Ткачев А.Г. Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.
- Козлов В.В., Кожитов Л.В., Крапухин В.В., Карпачева Г.П., Павлов С.А. Высокоселективный низкотемпературный нанокompозитный катализатор Cu/C реакции окисления метанола. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2006;3:73–76.
Kozlov V.V., Kozhitov L.V., Krapukhin V.V., Karpacheva G.P., Pavlov S.A. Highly selective low-temperature nanocomposite Cu/C catalyst for methanol oxidation reaction *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Materialy elektronnoi tekhniki*. 2006;3:73–76. (In Russ.).
- Брандт Н.Б., Кульбачинский В.А., Никитина О.М., Авдеев В.В., Аким В.Я., Ионов С.Г. Суперметаллическая проводимость и энергетический спектр у соединения внедрения в графит хлорида меди третьей ступени. *Письма в ЖТФ*. 1987;13(5):302–305.
Brandt N.B., Kulbachinsky V.A., Nikitina O.M., Avdeev V.V., Akim V.Ya., Ionov S.G. Supermetallic conductivity and energy spectrum of the third-stage copper chloride intercalation compound in graphite. *Pis'ma v ZhTF*. 1987;13(5):302–305. (In Russ.).
- Wang Z., Xu L., Peng J., Tang Z., Han Z., Liu J.. Effect of the microstructure and properties of graphite/copper composites fabricated by microwave sintering. *Journal of Materials Science*. 2021;56(15):9183–9195. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-05891-5>
- Оганян Р.А., Жариков О.В., Оганян Я.Н., Осипьян Ю.А. Спеченный композиционный материал: Патент 2087575С1 (РФ), 1997.
- Jia S.Q., Yang F. High thermal conductive copper/diamond composites: State of the art. *Journal of Materials Science*. 2021;56(3):2241–2274. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05443-3>
- Wang J., Ding X., Zhang J., Zhang H., Zhang F., Liu Y., Fan T. Synthesis and properties of surface-modified car-

- bon nanotube/copper composites. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2019;50(3):1448–1459. <https://doi.org/10.1007/s11661-018-05105-9>
16. Ерошенко В.Д., Овчинников А.Н. Повышение трибологических и электротехнических свойств изделий из углеродного композиционного материала путем пропитки водными растворами солей меди. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский Регион. Серия: Технические науки*. 2017;2(194):122–126.
 Eroshenko V.D., Ovchinnikov A.N. Improving the tribological and electrical properties of products from a carbon composite material by impregnation with aqueous solutions of copper salts. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Severo-Kavkazskij Region. Serija: Tehnicheskie nauki*. 2017;2(194):122–126. (In Russ.).
 17. Wenhui Zh. Copper-plating graphite composite material and preparation method thereof: Patent CN 101230456 (China). 2008.
 18. Йосихито И., Кенити О. Медный сплав и способ получения медного сплава: Патент 2510420 (РФ). 2010.
 19. Андреева В. Д., Степанова Т. Р. Влияние атомов меди на структуру графита. *Письма в ЖТФ*. 2002;28(18):18–23.
 Andreeva V.D., Stepanova T.R. The effect of copper atoms on the graphite structure. *Technical Physics Letters*. 2002;28(9):759–761. <https://doi.org/10.1134/1.1511776>
 20. Оглезнева С.А., Оглезнев Н.Д., Сиротенко Л.Д. Исследование взаимосвязи между структурой и свойствами электродов-инструментов для электроэрозионной резки систем «медь – металл» и «медь – графит». *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. 2016;16(1):63–71. <https://doi.org/10.14529/engin160105>
 Oglezneva S.A., Ogleznev N.D., Sirotenko L.D. Study of the relationship between structure and properties of electrodes for EDM tools cutting systems “copper – metal” and “copper – graphite”. *Vestnik Uzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya “Mashinostroenie”*. 2016;16(1):63–71. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/engin160105>
 21. Оглезнева С.А., Порозова С.Е., Оглезнев Н.Д., Гилев В.Г., Торсунов М.Ф. Исследование взаимодействия в порошковых материалах системы «медь–углеродные фазы» для электродов-инструментов. *Металлообработка*. 2015;3(87):35–45.
 Oglezneva S.A., Porozova S.E., Ogleznev N.D., Gilev V.G., Torsunov M.F. Investigation of the interaction in powder materials of the “copper–carbon phases” system for electrode-tools. *Metallrobrabotka*. 2015;3(87):35–45. (In Russ.).
 22. Оглезнева С.А., Порозова С.Е., Оглезнев Н.Д., Каченюк М.Н. Взаимодействие меди и терморасширенного графита при механическом легировании и искровом плазменном спекании. *Цветные металлы*. 2021; (10):86–93. <https://doi.org/10.17580/tsm.2021.10.12>
 Oglezneva S.A., Porozova S.E., Ogleznev N.D., Kachenjuk M.N. Interaction between copper and thermally expanded graphite during mechanical alloying and spark plasma sintering. *Tsvetnye Metally*. 2021;(10):86–93. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2021.10.12>
 23. Евстифеев Е.Н., Новикова А.А. Получение наночастиц меди термическим разложением комплекса формиата меди с триэтиламином. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2017;9:135–139.
 Evstifeev E.N., Novikova A.A. Obtaining copper nanoparticles by thermal decomposition of copper formate complex with triethylamine. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 2017;9:135–139. (In Russ.).
 24. Сорокина Н.Е., Авдеев В.В., Тихомиров А.С., Лутфуллин М.А., Саидаминов М.И. Композиционные наноматериалы на основе интеркалированного графита: Учеб. пос. М.: МГУ, 2010. 50 с.
 25. Белова М.Ю. От «черного мела» к уплотнениям из ТРГ. *Арматуростроение*. 2008;1(52):36–43.
 Belova M.Yu. From black chalk to TRG seals. *Armaturostroenie*. 2008;1(52):36–43. (In Russ.).

Сведения об авторах



Information about the Authors

Никита Дмитриевич Оглезнев – к.т.н., вед. инженер кафедры маркшейдерского дела, геодезии и геоинформационных систем, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)
 **ORCID:** 0000-0002-9785-5405
 **E-mail:** fastrex@mail.ru

Илья Иванович Якубаев – аспирант кафедры механики композиционных материалов и конструкций, ПНИПУ
 **ORCID:** 0009-0008-7078-6420
 **E-mail:** iakubaev.ilya@gmail.com

Светлана Аркадьевна Оглезнева – д.т.н., профессор кафедры механики композиционных материалов и конструкций, ПНИПУ
 **ORCID:** 0000-0002-5529-4259
 **E-mail:** ogleznevasa@pstu.ru

Светлана Евгеньевна Порозова – д.т.н., профессор кафедры механики композиционных материалов и конструкций, ПНИПУ
 **ORCID:** 0000-0001-5835-9727
 **E-mail:** porozovase@pstu.ru

Nikita D. Ogleznev – Cand. Sci. (Eng.), Engineer at the Department of Mine Survey, Geodesy, and Geoinformation Systems, Perm National Research Polytechnic University (PNRPU)
 **ORCID:** 0000-0002-9785-5405
 **E-mail:** fastrex@mail.ru

Ilya I. Yakubaev – Graduate Student at the Department of Mechanics of Composite Materials and Structures, PNRPU
 **ORCID:** 0009-0008-7078-6420
 **E-mail:** iakubaev.ilya@gmail.com

Svetlana A. Oglezneva – Dr. Sci. (Eng.), Professor at the Department of Mechanics of Composite Materials and Structures, PNRPU
 **ORCID:** 0000-0002-5529-4259
 **E-mail:** ogleznevasa@pstu.ru

Svetlana E. Porozova – Dr. Sci. (Eng.), Professor at the Department of Mechanics of Composite Materials and Structures, PNRPU
 **ORCID:** 0000-0001-5835-9727
 **E-mail:** porozovase@pstu.ru

Вклад авторов**Contribution of the Authors**

Н. Д. Оглезнев – определение цели работы, проведение экспериментов по определению свойств, написание текста статьи.

И. И. Якубаев – подготовка смеси композиционных материалов и исходных образцов, участие в обсуждении результатов.

С. А. Оглезнева – проведение экспериментов по исследованию структуры, участие в обсуждении результатов.

С. Е. Порозова – проведение экспериментов по смачиваемости, участие в обсуждении результатов.

N. D. Ogleznev – determining the purpose of the work, conducting experiments to define the properties, and writing the article.

I. I. Yakubaev – preparing the mixture and initial samples, participating in the discussion of the results.

S. A. Oglezneva – conducting experiments to investigate the structure, participating in the discussions of the results.

S. E. Porozova – conducting wetting experiments, participating in the discussions of the results.

Статья поступила 04.09.2023 г.

Доработана 14.11.2023 г.

Принята к публикации 16.11.2023 г.

Received 04.09.2023

Revised 14.11.2023

Accepted 16.11.2023