

Научная статья

УДК 669.018.95

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-76-87

## ГИБРИДНЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ МЕДИ (обзор)

В.М. Серпова<sup>1</sup>, А.Н. Няфкин<sup>1</sup>, Е.И. Курбаткина<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация:** Представлены научно-технический литературный обзор гибридных композиционных материалов (КМ) на основе меди, а также распространенные сочетания армирующих компонентов для изготовления гибридных КМ. Кратко упомянуты основные методы изготовления гибридных КМ на основе меди. Рассмотрено влияние сочетания различных видов армирующих компонентов и их объемного или массового содержания на механические, теплофизические и трибологические свойства гибридных КМ на основе меди. Приведено сравнение характеристик гибридных КМ с матричными сплавами или металлическими КМ подобных систем.

**Ключевые слова:** композиционный материал, гибридный композиционный материал, армирующий компонент, нитевидные волокна, частицы, карбид кремния, оксид графита, борид титана, графен, нитрид алюминия

**Для цитирования:** Серпова В.М., Няфкин А.Н., Курбаткина Е.И. Гибридные металлические композиционные материалы на основе меди (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 1 (107). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-76-87.

Scientific article

## HYBRID METAL MATRIX COMPOSITES BASED ON COPPER (review)

Viktoriya M. Serpova<sup>1</sup>, Andrey N. Nyafkin<sup>1</sup>, Elena I. Kurbatkina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract:** The article presents a scientific and technical literature review of copper-based hybrid composite materials (CM). Common combinations of reinforcing components for the manufacture of hybrid composite materials are presented. The main methods for fabricating copper-based hybrid CMs are briefly mentioned. The influence of a combination of various types of reinforcing components and their volume or mass content on the mechanical, thermo-physical and tribological properties of hybrid CMs based on copper is considered. A comparison of the characteristics of hybrid CMs with matrix alloys or metallic CMs of similar systems is given.

**Keywords:** composite material, hybrid composite material, reinforcing component, whiskers, particles, silicon carbide, graphite oxide, titanium boride, graphene, aluminum nitride

**For citation:** Serpova V.M., Nyafkin A.N., Kurbatkina E.I. Hybrid metal matrix composites based on copper (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 1 (107), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-76-87.

### Введение

Разработка и производство перспективных изделий и техники различного назначения сопряжено с необходимостью создания новых материалов [1–4].

Медь и ее сплавы широко применяются в качестве конструкционных материалов в машиностроении из-за их высокой электропроводности, теплопроводности и химической

стойкости. Однако эти материалы не обладают высокой прочностью и износостойкостью. Повышение их характеристик все чаще требуется для разработки новых конструкционных материалов с целью расширения сферы их применения. В последнее время для решения вышеперечисленных задач зарубежные научно-исследовательские учреждения проводят материаловедческие изыскания в области разработки композиционных материалов (КМ). Одним из таких направлений являются гибридные КМ на основе меди. К гибридным (полиармированным) относятся КМ, содержащие два или более различных по составу армирующих компонентов, распределенных в матричном материале. За счет введения различных армирующих компонентов в матрицу получается требуемое сочетание таких характеристик, как теплопроводность, электропроводность, износостойкость и прочность [5–11].

Цель данной работы – анализ научно-технической литературы в области исследований гибридных металлических композиционных материалов на основе меди с применением различных технологий, а также исследование структуры и свойств гибридных КМ.

### Гибридные металлические композиционные материалы на основе меди

По способам формирования гибридные КМ разделяют на КМ, в которых армирующую фазу вводят искусственно в матрицу с применением различных технологий, и на КМ, в которых армирующую фазу синтезируют в матрице посредством химических реакций, протекающих в процессе изготовления. В настоящее время проводятся исследования формирования гибридных КМ на основе меди методами порошковой металлургии с последующей консолидацией искровым плазменным спеканием или горячим прессованием, а также синтезом армирующих компонентов непосредственно в расплаве (*in situ*) и сваркой трением с перемешиванием. В качестве армирующей фазы в гибридных КМ на основе меди применяют следующие компоненты и их смеси: AlN, BN, TiB, TiB<sub>2</sub>, оксид графена (ОГ), SiC, углеродные нанотрубки (УНТ), Ag [5–12].

В данной статье рассмотрены следующие системы гибридных КМ на основе меди: Cu/AlN + BN, Cu/TiB<sub>2</sub> (порошок) + TiB<sub>w</sub> (нитевидные волокна), Cu/SiC + УНТ, Cu/ОГ + SiO<sub>2</sub>, Cu/Mo<sub>2</sub>C + ОГ, Cu/ОГ + Ag, Cu/ОГ + SiO<sub>2</sub>.

В работе [13] исследовали влияние объемного содержания армирующих частиц нитрида алюминия и нитрида бора в гибридном КМ системы Cu/AlN + BN на скорость износа при испытаниях на сухое скольжение, а также на предел прочности при растяжении, модуль упругости и пластичности гибридного КМ на основе меди. Изготовление гибридного КМ осуществляли сваркой трением с перемешиванием. Перед технологической стадией сваркой трением с перемешиванием проводят перемешивание частиц нитрида алюминия дисперсностью 10 мкм с нитридом бора дисперсностью 1 мкм в среде аргона с использованием магнитной мешалки. После чего полученную смесь порошков сушат и укладывают в канавку, сделанную в медной подложке, и далее проводят непосредственно процесс обработки трением с перемешиванием. Микроструктура полученного гибридного КМ системы Cu/AlN + BN с различным объемным содержанием армирующих компонентов представлена на рис. 1.

Отмечается, что с увеличением объемной доли армирующих частиц с 5 до 15 % (объемн.) предел прочности при растяжении повышается на ~17 %, а модуль упругости – на 12 %, при этом пластичность снижается на ~40 %. Полученные результаты авторы работы [13] связывают с эффектом деформационного упрочнения.

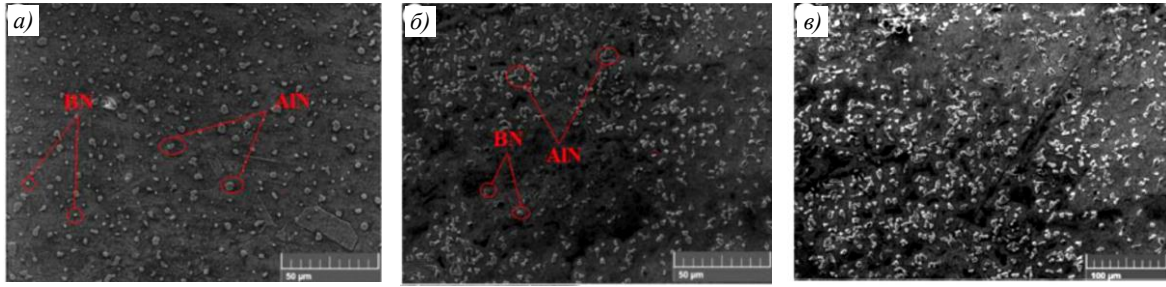


Рис. 1. Микроструктура гибридного композиционного материала на основе меди с объемным содержанием армирующих частиц 5 (а), 10 (б) и 15 % (объемн.) (в) [13]

Подобная зависимость прослеживается и при испытаниях на сухое скольжение, т. е. минимальному износу подвержен гибридный КМ с 15 % (объемн.) содержанием армирующих частиц (рис. 2). При этом скорость износа гибридного КМ меньше на 30 % по сравнению с матричным материалом.

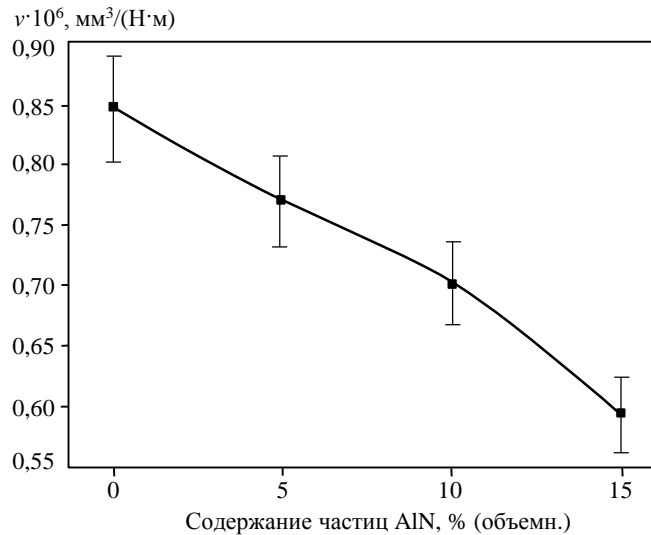


Рис. 2. Зависимость скорости износа от объемного содержания армирующих частиц в гибридном композиционном материале системы Cu/AlN + BN [13]

Медь, которая является пластичным материалом, при воздействии сухого скольжения в результате пластической деформации претерпевает адгезионный износ, а в гибридном КМ системы Cu/AlN + BN происходит сочетание адгезионного и абразивного износа. При этом за счет присутствия частиц нитрида бора на поверхности образуется самосмазывающийся слой, что способствует снижению скорости износа.

В работе [14] методом литья с перемешиванием получен гибридный КМ на основе меди, армированный частицами  $\text{TiB}_2$  и нитевидными кристаллами  $\text{TiB}$ , которые формируются в результате протекания химических реакций между  $\text{Ti}$  и  $\text{B}$  в процессе изготовления. Для получения однородной структуры и уменьшения пористости в материале, после литья применяли обработку давлением – прокатку, а также термическую обработку – отжиг. Типичная структура полученного гибридного КМ на основе меди в литом состоянии и после прокатки и отжига представлена на рис. 3.

Исследование влияния различного соотношения массовых долей армирующей фазы гибридного КМ системы  $\text{Cu}/\text{TiB}_2 + \text{TiB}_w$  на предел прочности при растяжении, модуль упругости и электрическое сопротивление проводили на трех соотношениях

армирующих фаз в материале, % (по массе): 0,7  $\text{TiB}_2$  + 0,6  $\text{TiB}_w$ , 1,0  $\text{TiB}_2$  + 0,9  $\text{TiB}_w$  и 1,4  $\text{TiB}_2$  + 1,2  $\text{TiB}_w$ .

Для сравнения механических характеристик также изготовлен КМ на основе меди, армированный частицами 1,4 % (по массе)  $\text{TiB}_2$ .

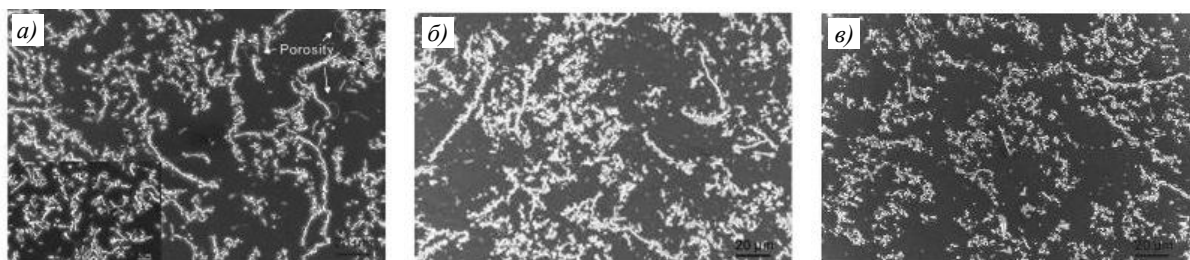


Рис. 3. Типичная структура гибридного композиционного материала на основе меди, армированного частицами  $\text{TiB}_2$  и нитевидными кристаллами  $\text{TiB}$  в литом состоянии (а), после прокатки (б) и отжига (в) [14]

После прокатки и отжига гибридные КМ имеют плотную и однородную микроструктуру. Степень микросегрегации в литом гибридном КМ на основе меди, армированном частицами  $\text{TiB}_2$  и нитевидными кристаллами  $\text{TiB}$ , меньше по сравнению с КМ на основе меди, армированным частицами 1,4 % (по массе)  $\text{TiB}_2$ . Это связано с ингибированием путем гетерогенного зарождения.

С увеличением массовой доли армирующих компонентов в гибридных КМ без термической обработки и обработки давлением предел прочности при растяжении и модуль упругости увеличиваются на 30 и 44 % соответственно. Предел прочности при растяжении гибридного КМ по сравнению с аналогичной характеристикой для матрицы увеличился на 54 %, а модуль упругости – в ~2 раза. Отметим, что КМ на основе меди, армированный частицами 1,4 % (по массе)  $\text{TiB}_2$ , как в литом состоянии, так и после прокатки и отжига обладает уменьшенными пределом прочности (на 7–13 %) и модулем упругости (на 15 %) по сравнению с гибридным КМ. Электрическое сопротивление КМ по сравнению с матрицей снижается в зависимости от массовой доли содержания армирующих фаз (с 5 до 33 %) как в литом гибридном КМ, так и после прокатки и отжига. Исходя из результатов приведенных исследований, авторы работы [14] делают вывод, что применение сочетания армирующих частиц диборида титана и нитевидных кристаллов борида титана в гибридном КМ на основе меди позволяет увеличить механические характеристики, а также электрическое сопротивление, по сравнению с КМ на основе меди, армированным частицами диборида титана.

Для формирования гибридных КМ на основе меди также применяют углеродные наполнители, такие как одномерные углеродные нанотрубки и двумерный графен. Известно, что графен представляет собой двумерную аллотропную модификацию углерода, образованную слоем атомов углерода толщиной в один атом. Использование графена в качестве армирующего компонента для КМ связано с возможностью повышения механических и теплофизических характеристик материала. Тем не менее как углеродные нанотрубки, так и графен склонны к агломерации в процессе изготовления КМ и обладают плохой смачиваемостью в медной матрице. Таким образом, для эффективного упрочнения КМ с применением углеродных наполнителей необходимо учитывать следующие факторы: формирование прочной межфазной связи между углеродными наполнителями и металлической матрице, а также предотвращение их агломерации. Кроме того, известно, что при содержании армирующего компонента в виде УНТ более 2 % (объемн.) проявляется склонность их к агломерации. Для решения этой проблемы,

помимо различных методов и способов изготовления КМ, применяют как методы порошковой металлургии с использованием шаровой мельницы, синтезирование армирующих компонентов в процессе изготовления (метод *in situ*), сварку трением с перемешиванием, так и добавление второго армирующего компонента.

Например, в работе [15] методом порошковой металлургии формировали гибридный КМ, армированный частицами карбида кремния и УНТ, и исследовали влияние объемного содержания армирующих компонентов на механические свойства и равномерность структуры. Способ изготовления заключался в следующем: чешуйки меди, частицы карбида кремния и УНТ смешивали и механически легировали в планетарной мельнице с использованием стеариновой кислоты, после чего консолидировали методом горячего прессования при температуре 700 °С и давлении 150 МПа с выдержкой 30 мин. Исследование пористости сформированного гибридного КМ на основе меди показало, что при увеличении содержания армирующего компонента УНТ с 2 до 6 % (объемн.) при постоянном объемном содержании частиц карбида кремния (2 % (объемн.)) увеличивается пористость – с 1,2 до 2,6 % соответственно, а также микротвердость – с 46 до 71 %. Модуль упругости увеличивается на 31 % при добавлении 2 % (объемн.) УНТ по сравнению с матричным материалом, при этом при добавлении 4 и 6 % (объемн.) УНТ модуль упругости увеличивается незначительно и находится на одинаковом уровне. Это объясняется тем, что гибридный композит с объемным армированием 2 % (объемн.) УНТ обладает более однородным распределением армирующего компонента в матрице, а при его большем содержании в структуре наблюдаются кластеры УНТ со слабой межфазной связью. С увеличением объемного содержания армирующих компонентов в гибридном КМ на основе меди предел текучести увеличивается в 3 раза по сравнению со значением для матричного материала.

Влияние объемного наполнения армирующих компонентов, таких как УНТ и ОГ, в гибридном КМ на основе меди на предел прочности изучали в работе [16]. Формирование данного гибридного КМ, проведенное как и в предыдущей работе, отличается тем, что консолидацию осуществляли с помощью искрового плазменного спекания. На рис. 4 представлены диаграммы растяжения «напряжение–деформация», полученные для гибридных КМ с различным объемным наполнением армирующих компонентов в сравнении с матричным сплавом; КМ на основе меди, армированных УНТ, и КМ на основе меди, армированного графеном.

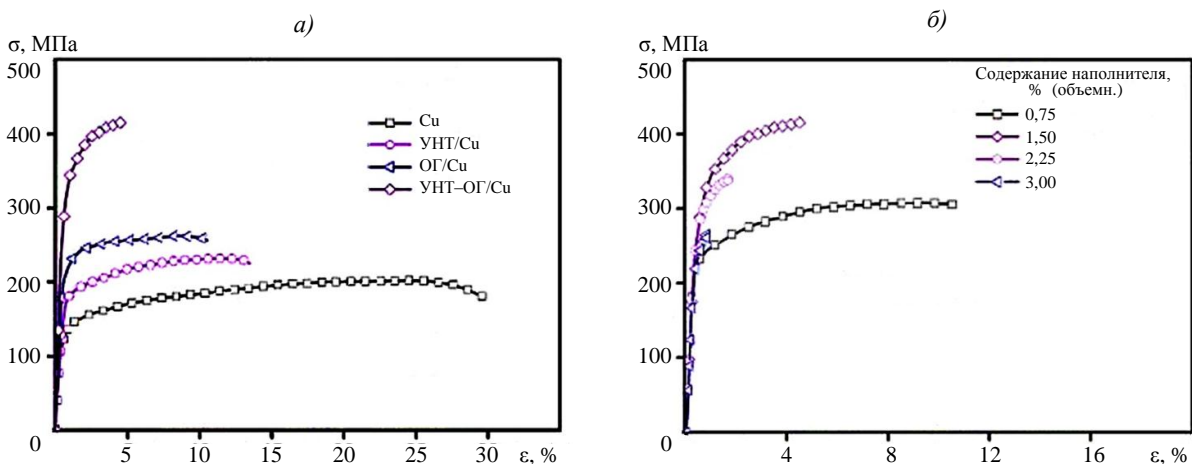


Рис. 4. Диаграммы растяжения «напряжение  $\sigma$ –деформация  $\epsilon$ » [16] материалов на основе чистой меди (а), армированной углеродными нанотрубками (УНТ) и оксидом графена (ОГ), а также гибридного материала (б) с различным объемным наполнением УНТ + ОГ

Как видно из данных рис. 4, предел прочности гибридного КМ составляет ~400 МПа, что на 43 и 35 % больше по сравнению с пределами прочности КМ на основе меди, армированного УНТ, и КМ на основе меди, армированного ОГ, соответственно и в ~1,5 раза больше по сравнению с пределом прочности матричного материала. Отмечено также, что с увеличением объемной доли армирующих компонентов в гибридном КМ пластичность снижается.

В работе [17] исследованы механические и теплофизические характеристики гибридного КМ на основе меди, армированного ОГ и наночастицами  $\text{Mo}_2\text{C}$ . Для изготовления такого гибридного КМ в качестве армирующего компонента использован ОГ размером 0,5–4 мкм толщиной 2–4,4 нм. При этом наночастицы  $\text{Mo}_2\text{C}$  синтезированы в процессе отжига с использованием молибдата аммония в качестве прекурсора молибдена. Технологический процесс заключался в следующем: получение суспензии ОГ в дистиллированной воде с применением ультразвуковой обработки; добавление в полученную суспензию молибдата аммония с последующей ультразвуковой обработкой; сушка полученной смеси и отжиг в атмосфере аргона, в процессе чего получили систему  $\text{Mo}_2\text{C} + \text{ОГ}$ ; получение суспензии в безводном этаноле из  $\text{Mo}_2\text{C} + \text{ОГ}$  и чешуек меди, а также гибридных композиционных гранул в шаровой мельнице в атмосфере аргона; фильтрацию и сушка в вакуумной печи; консолидация гибридного КМ методом искрового плазменного спекания с последующим вакуумным отжигом. Для сравнения механических характеристик по той же технологии изготовлен КМ на основе меди, армированный 1 % (объемн.) ОГ, и образцы меди. Технологическая схема получения данного гибридного материала представлена на рис. 5. Отмечено, что наночастицы  $\text{Mo}_2\text{C}$  позволили обеспечить прочную связь на границе разделов.

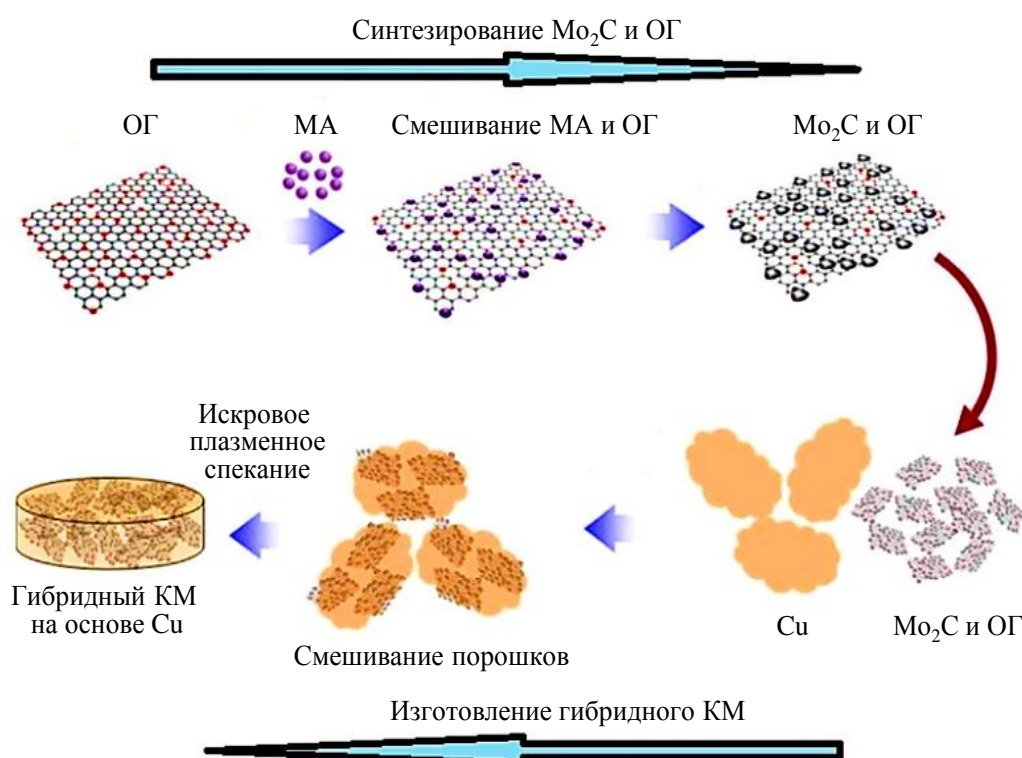


Рис. 5. Технологическая схема изготовления гибридного композиционного материала (КМ) на основе меди (МА – молибдат аммония), армированного углеродными нанотрубками и оксидом графена (ОГ) [17]

Исследования механических характеристик гибридного КМ на основе меди, армированного 1 % (объемн.)  $\text{Mo}_2\text{C}$  и ОГ, показали, что предел текучести составил 238 МПа, т. е. на 58 % и в 1,3 раза больше по сравнению с КМ на основе меди, армированным 1 % (объемн.) ОГ, и матричным материалом соответственно.

Результаты исследования теплофизических характеристик гибридного КМ на основе меди, армированного 1 % (объемн.)  $\text{Mo}_2\text{C}$  и ОГ, в сравнении с матричным материалом и КМ на основе меди, армированным 1 % (объемн.) ОГ, представлены на рис. 6.

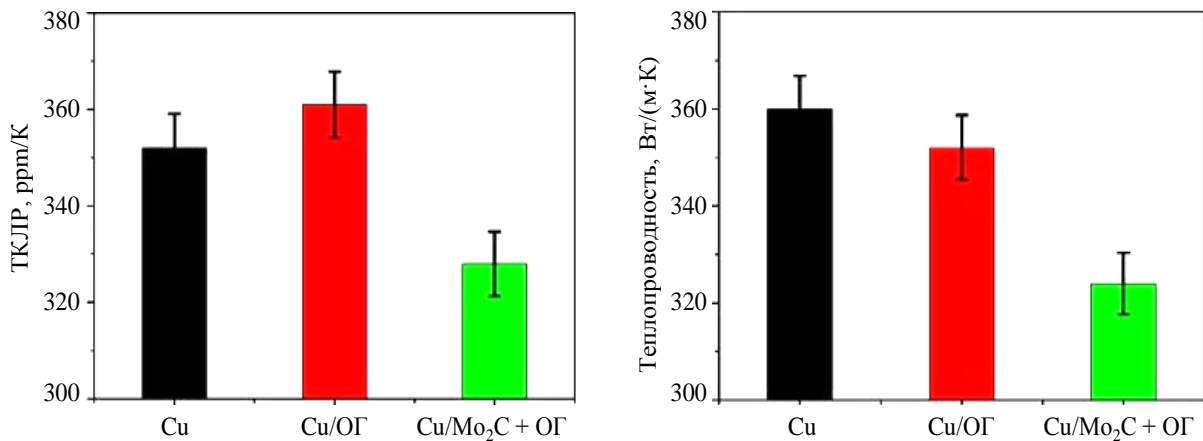


Рис. 6. Гистограммы температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) и теплопроводности для гибридного композиционного материала (КМ) на основе меди, армированного 1 % (объемн.)  $\text{Mo}_2\text{C}$  и оксидом графена (ОГ), в сравнении с матричным материалом и КМ на основе меди, армированным 1 % (объемн.) ОГ [17]

Видно, что гибридный КМ на основе меди, армированный 1 % (объемн.)  $\text{Mo}_2\text{C}$  и ОГ, обладает пониженными значениями ТКЛР и теплопроводности по сравнению с матричным материалом и КМ на основе меди, армированным 1 % (объемн.) ОГ.

Для предотвращения агломерации графена в работе [18] для изготовления гибридного КМ на основе меди использован восстановленный оксид графена, модифицированный наночастицами серебра. Данный гибридный КМ изготовлен с применением методов одностадийного восстановления ОГ и нитрата серебра с последующим получением композитных гранул в шаровой мельнице и консолидацией вакуумным горячим прессованием. Для сравнения теплопроводности и электрического сопротивления изготовлены образцы гибридного КМ при различных технологических параметрах – давлении вакуумного горячего прессования 30, 40, 50 и 60 МПа, а также образцы меди методом вакуумного горячего прессования из исходных чешуек меди. Полученные результаты представлены на рис. 7.

Видно, что гибридный КМ на основе меди, армированный ОГ и частицами Ag, изготовленный при давлении консолидации 50 МПа, обладает повышенными на 19 и 22 % теплопроводностью и электрическим сопротивлением по сравнению с чистой медью. При этом микротвердость достигла максимальных значений в гибридном материале, изготовленном при максимальном давлении консолидации, что на 27 % больше, чем у чистой меди. Повешение теплопроводности, электрического сопротивления и микротвердости авторы работы [18] объясняют образованием оптимальной связи на границе разделов Ag–Cu и Ag–ОГ.

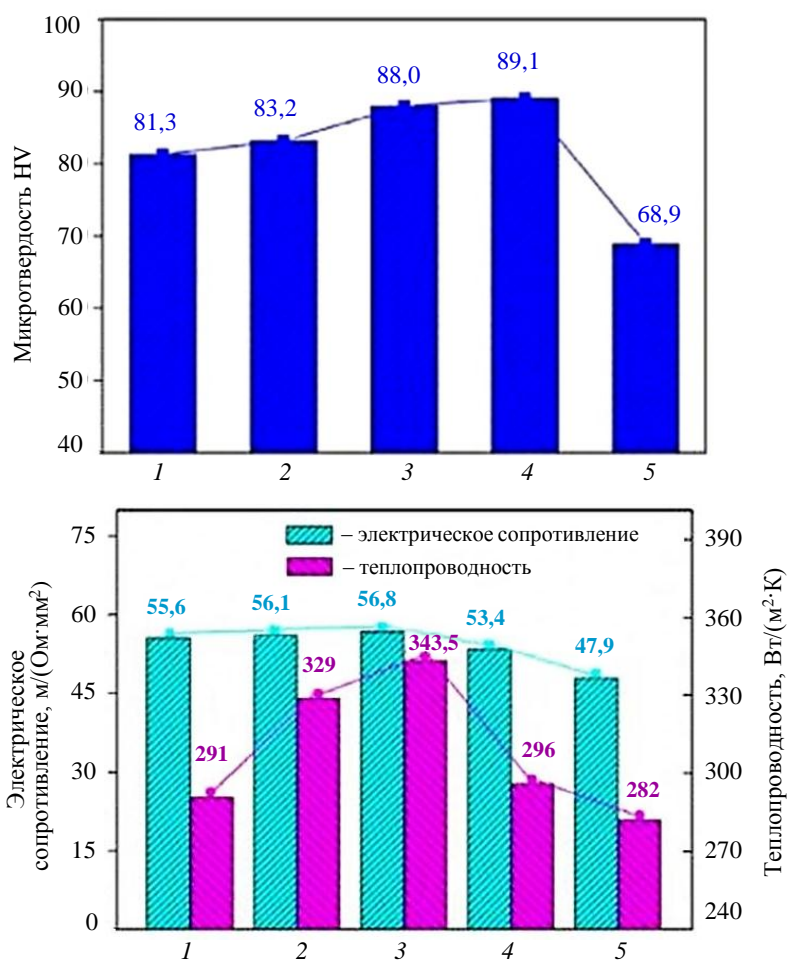


Рис. 7. Гистограммы микротвердости, теплопроводности и электрического сопротивления гибридного композиционного материала на основе меди, армированного оксидом графена и частицами серебра (1–4), при различных технологических параметрах изготовления (давление прессования: 30 (1), 40 (2), 50 (3) и 60 МПа (4)) в сравнении с матричным материалом (5 – чистая медь) [18]

В аналогичной работе [19] исследовали влияние армирующих наночастиц  $\text{SiO}_2$  в гибридном КМ на основе меди, армированном восстановленным ОГ и наночастицами диоксида кремния, на механические характеристики материала. Гибридный КМ получали по технологии, аналогичной описанной в работе [18], отличающейся использованием дополнительной технологической операции – холодного прессования до проведения искрового плазменного спекания. Отмечено, что увеличение массовой доли частиц диоксида кремния приводит к увеличению агломерации восстановленного ОГ в матричном материале. Для сравнения механических характеристик изготовили КМ на основе меди, армированный восстановленным ОГ с содержанием 2,5 % (по массе), и гибридный КМ на основе меди, армированный ОГ и наночастицами диоксида кремния, а также образцы из меди в литом состоянии. В гибридном КМ содержание диоксида кремния составляет от 0,5 до 2,5 % (по массе) при постоянном содержании восстановленного ОГ: 2,5 % (по массе). Определено, что предел текучести при сжатии повышается: в  $\sim 1,8$  раза при увеличении содержания частиц диоксида кремния, в  $\sim 2$  раза по сравнению с КМ без армирующих частиц диоксида кремния и в  $\sim 6$  раз по сравнению с чистой медью. При этом микротвердость незначительно увеличивается в зависимости

от содержания диоксида кремния в гибридном КМ, а по сравнению с КМ без содержания армирующего компонента диоксида кремния – на 30 % и в 2 раза по сравнению с чистой медью. Отмечено, что с увеличением содержания диоксида кремния пластичность снижается.

### Заключения

В настоящее время в зарубежной научно-технической литературе представлены исследования в области изучения, разработок и создания гибридных КМ на основе меди.

К наиболее распространенным методам формирования гибридных КМ на основе меди относят методы порошковой металлургии с последующей консолидацией искровым плазменным спеканием или горячим прессованием, синтезом армирующих компонентов непосредственно в расплаве (*in situ*), сваркой трением с перемешиванием. В качестве армирующей фазы в гибридных КМ на основе меди применяют следующие компоненты и их смеси: нитрид алюминия, нитрид бора, борид титана, диборид титана, оксид графена, карбид кремния, углеродные нанотрубки и серебро.

Сочетание различных видов армирующих компонентов позволяет получать гибридные КМ с повышенными механическими, теплофизическими и трибологическими характеристиками по сравнению с матричными материалами и металлическими КМ подобных систем.

По результатам анализа свойств гибридных КМ установлено, что скорость износа гибридного КМ системы Cu/AlN + BN уменьшается с увеличением объемного содержания армирующего компонента. По сравнению с матричным материалом гибридный КМ системы Cu/AlN + BN при содержании 15 % (объемн.) армирующих компонентов обладает уменьшенной на 30 % скоростью износа по сравнению с матричным материалом. Образование армирующих частиц TiB<sub>2</sub> и нитевидных кристаллов TiB в процессе изготовления гибридного КМ на основе меди позволяет увеличить предел прочности при растяжении на 54 %, модуль упругости – в ~2 раза по сравнению с матричным материалом. Композиционный материал подобной системы Cu–TiB<sub>2</sub> по сравнению с гибридным КМ системы Cu/TiB<sub>2</sub> + 0,6 TiB<sub>w</sub> обладает меньшим пределом прочности на 13 % и модулем упругости – на 15 %.

Исследование гибридного КМ системы Cu/УНТ + SiC с различным объемным наполнением армирующего компонента показало, что с увеличением содержания армирующего компонента УНТ с 2 до 6 % (объемн.) при постоянном объемном содержании частиц карбида кремния 2 % (объемн.) увеличивается пористость с 1,2 до 2,6 %. Гибридный КМ с объемным армированием 2 % (объемн.) УНТ обладает более однородным распределением армирующего компонента в матрице, а при его увеличении в структуре наблюдаются кластеры УНТ со слабой межфазной связью. При этом модуль упругости возрастает на 31 % при добавлении 2 % (объемн.) УНТ по сравнению с матричным материалом, а при добавлении 4 и 6 % (объемн.) УНТ увеличивается незначительно и находится на одинаковом уровне. Исследование гибридного КМ системы Cu/УНТ + ОГ показало, что его предел прочности составляет ~400 МПа, что на 43 и 35 % больше по сравнению с пределами прочности КМ систем Cu–УНТ и Cu–ОГ соответственно и в ~1,5 раза больше по сравнению с пределом прочности матричного материала. Применение наночастиц Mo<sub>2</sub>C в качестве армирующего компонента позволяет получить гибридный КМ системы Cu/Mo<sub>2</sub>C + ОГ, обладающий пределом текучести на 58 % и в 1,3 раза больше по сравнению с КМ системы Cu–ОГ и матричного материала соответственно, а также пониженными значениями ТКЛР и теплопроводности.

## Список источников

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // *Крылья Родины*. 2016. № 5. С. 8–18.
3. Каблов Е.Н., Валуева М.И., Зеленина И.В., Хмельницкий В.В., Алексакин В.М. Углепластики на основе бензоксазиновых олигомеров – перспективные материалы // *Труды ВИАМ*. 2020. № 1 (85). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.06.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
4. Имамединов Э.Ш., Валуева М.И. Композиционные материалы для поршневых двигателей (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 3 (60). С. 19–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-19-28.
5. Карашаев М.М., Базылева О.А., Шестаков А.В., Овсепян С.В. Технологические основы создания металлических композиционных материалов, армированных оксидными и интерметаллидными частицами // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 3 (60). С. 29–36. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-29-36.
6. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 5. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-5-186-194.
7. Серпова В.М., Сидоров Д.В., Няфкин А.Н., Курбаткина Е.И. Гибридные металлические композиционные материалы на основе алюминиевых сплавов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2021. № 3 (97). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.06.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-68-77.
8. Chawla N., Chawla K.K. *Metal Matrix Composites*. New York: Springer Science + Business Media, Inc., 2006. P. 351–379.
9. Chu K., Jia C.C., Jiang L.K., Li W.S. Thermal conductivity enhancement in carbon nanotube/Cu–Ti composites // *Applied Physics A*. 2013. Vol. 110. P. 269–273. DOI: 10.1007/s00339-012-7450-0.
10. Dong S.J., Zhou Y., Shi Y.W., Chang B.H. Formation of a TiB<sub>2</sub>-Reinforced Copper-Based Composite by Mechanical Alloying and Hot Pressing // *Metallurgical and materials transactions A*. 2002. Vol. 33A. P. 1275–1280. DOI: 10.1007/s11661-002-0228-9.
11. Jia L., Yang M., Lu Z. et al. Microstructure evolution and reaction behavior of Cu–Ni alloy and B<sub>4</sub>C powder system // *Progress in Natural Science: Materials International*. 2021. Vol. 31. P. 55–62. DOI: 10.1016/j.pnsc.2020.12.002.
12. Zhang X., Shi C., Liu E. In-situ space-confined synthesis of well-dispersed three-dimensional graphene/carbon nanotube hybrid reinforced copper nanocomposites with balanced strength and ductility // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2017. Vol. 103. P. 178–187. DOI: 10.1016/j.compositesa.2017.
13. Thankachan T., Prakash K., Kavimani S. Investigating the effects of hybrid reinforcement particles on the microstructural, mechanical and tribological properties of friction stir processed copper surface composites // *Composites. Part B: Engineering*. 2019. Vol. 174. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107057.
14. Liang S., Li W., Jiang Y. et al. Microstructures and properties of hybrid copper matrix composites reinforced by TiB whiskers and TiB<sub>2</sub> particles // *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 797. P. 589–594. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.05.1.
15. Akbarpour M.R., Salahi E., Alikhani H.F. et al. Fabrication, characterization and mechanical properties of hybrid composites of copper using the nanoparticulates of SiC and carbon nanotubes // *Materials Science and Engineering: A*. 2013. Vol. 572. P. 83–90. DOI: 10.1016/j.msea.2013.02.039.
16. Chen X., Tao J., Liu Y. et al. Interface interaction and synergistic strengthening behavior in pure copper matrix composites reinforced with functionalized carbon nanotube-graphene hybrids // *Carbon*. 2019. Vol. 146. P. 736–755. DOI: 10.1016/j.carbon.2019.02.048.

17. Chu K., Wang F., Li Y. et al. Interface and mechanical/thermal properties of graphene/copper composite with Mo<sub>2</sub>C nanoparticles grown on grapheme // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2018. Vol. 109. P. 267–279. DOI: 10.1016/j.compositesa.2018.
18. Luo H., Sui Y., Qi J. et al. Copper matrix composites enhanced by silver/reduced graphene oxide hybrids // *Materials Letters*. 2017. Vol. 196. P. 354–357. DOI: 10.1016/j.matlet.2017.03.08.
19. Zhang X., Dong P., Zhang B. et al. Preparation and characterization of reduced graphene oxide/copper composites incorporated with nano-SiO<sub>2</sub> particles // *Journal of Alloys and Compounds*. 2016. Vol. 671. P. 465–472. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.02.06.

### References

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Kablov E.N. What is the future to be made of? Materials of a new generation, technologies for their creation and processing - the basis of innovation. *Krylya Rodiny*, 2016, no. 5, pp. 8–18.
3. Kablov E.N., Valueva M.I., I.V. Zelenina, Khmel'nitskiy V.V., Aleksashin V.M. Carbon plastics based on benzoxazine oligomers – perspective materials. *Trudy VIAM*, 2020, no. 1, paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 2, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
4. Imametdinov E.S., Valueva M.I. Composites for piston engines (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 3 (60), pp. 19–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-19-28.
5. Karashaev M.M., Bazyleva O.A., Shestakov A.V., Ovsepyan S.V. Technological principles for the development of metal composite materials reinforced with oxide and intermetallic particles. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 3 (60), pp. 29–36. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-29-36.
6. Antipov V.V. Prospects for development of aluminium, magnesium and titanium alloys for aerospace engineering. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 186–194. DOI: 10.18577/2107-9140-2017-0-S-186-194.
7. Serpova V.M., Sidorov D.V., Nyafkin A.N., Kurbatkina E.I. Hybrid metal matrix composites based on aluminum alloys (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 3 (97), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 2, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-68-77.
8. Chawla N., Chawla K.K. *Metal Matrix Composites*. New York: Springer Science + Business Media, Inc., 2006, pp. 351–379.
9. Chu K., Jia C.C., Jiang L.K., Li W.S. Thermal conductivity enhancement in carbon nanotube/Cu–Ti composites. *Applied Physics A*, 2013, vol. 110, pp. 269–273. DOI: 10.1007/s00339-012-7450-0.
10. Dong S.J., Zhou Y., Shi Y.W., Chang B.H. Formation of a TiB<sub>2</sub>-Reinforced Copper-Based Composite by Mechanical Alloying and Hot Pressing. *Metallurgical and materials transactions A*, 2002, vol. 33A, pp. 1275–1280. DOI: 10.1007/s11661-002-0228-9.
11. Jia L., Yang M., Lu Z. et al. Microstructure evolution and reaction behavior of Cu–Ni alloy and B<sub>4</sub>C powder system. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2021, vol. 31, pp. 55–62. DOI: 10.1016/j.pnsc.2020.12.002.
12. Zhang X., Shi C., Liu E. In-situ space-confined synthesis of well-dispersed three-dimensional graphene/carbon nanotube hybrid reinforced copper nanocomposites with balanced strength and ductility. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, vol. 103, pp. 178–187. DOI: 10.1016/j.compositesa.2017.
13. Thankachan T., Prakash K., Kavimani S. Investigating the effects of hybrid reinforcement particles on the microstructural, mechanical and tribological properties of friction stir processed copper surface composites. *Composites, Part B: Engineering*, 2019, vol. 174. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107057.
14. Liang S., Li W., Jiang Y. et al. Microstructures and properties of hybrid copper matrix composites reinforced by TiB whiskers and TiB<sub>2</sub> particles. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 797, pp. 589–594. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.05.1.

15. Akbarpour M.R., Salahi E., Alikhani H.F. et al. Fabrication, characterization and mechanical properties of hybrid composites of copper using the nanoparticulates of SiC and carbon nanotubes. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, vol. 572, pp. 83–90. DOI: 10.1016/j.msea.2013.02.039.
16. Chen X., Tao J., Liu Y. et al. Interface interaction and synergistic strengthening behavior in pure copper matrix composites reinforced with functionalized carbon nanotube-graphene hybrids. *Carbon*, 2019, vol. 146, pp. 736–755. DOI: 10.1016/j.carbon.2019.02.048.
17. Chu K., Wang F., Li Y. et al. Interface and mechanical/thermal properties of graphene/copper composite with Mo<sub>2</sub>C nanoparticles grown on grapheme. *Composites, Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, vol. 109, pp. 267–279. DOI: 10.1016/j.compositesa.2018.
18. Luo H., Sui Y., Qi J. et al. Copper matrix composites enhanced by silver/reduced graphene oxide hybrids. *Materials Letters*, 2017, vol. 196, pp. 354–357. DOI: 10.1016/j.matlet.2017.03.08.
19. Zhang X., Dong P., Zhang B. et al. Preparation and characterization of reduced graphene oxide/copper composites incorporated with nano-SiO<sub>2</sub> particles. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, vol. 671, pp. 465–472. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.02.06.

#### *Информация об авторах*

**Серпова Виктория Михайловна**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Няфкин Андрей Николаевич**, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Курбаткина Елена Игоревна**, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

#### *Information about the authors*

**Viktoriya M. Serpova**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Andrey N. Nyafkin**, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Elena I. Kurbatkina**, Head of laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 24.09.2021; одобрена после рецензирования 09.11.2021; принята к публикации 09.11.2021.  
The article was submitted 24.09.2021; approved after reviewing 09.11.2021; accepted for publication 09.11.2021.