

Научная статья

УДК 621.762:669.3

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-28-38

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОКСИДНОГО СЛОЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ЧАСТИЦ МЕТАЛЛОПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ МЕДНО-ХРОМИСТЫХ СПЛАВОВ НА ИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

А.В. Пескова<sup>1</sup>, М.М. Бакрадзе<sup>1</sup>, М.М. Тихонов<sup>1</sup>, И.С. Куко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Проведено исследование металлопорошковых композиций сплава на основе меди и 0,5–1,0 % (по массе) хрома, полученных методом газовой атомизации. Изучено влияние образовавшегося оксидного слоя на поверхности частиц на технологические свойства порошка. После выполнения селективного лазерного сплавления обнаружено изменение цвета порошка (от медного до фиолетового), а также образование конгломератов, что привело к снижению значений его свойств. Исследованы текучесть и насыпная плотность порошка, а также проведена оценка морфологии частиц металлопорошковых композиций до и после селективного лазерного сплавления.

**Ключевые слова:** медные сплавы, порошок, атомизация, технологические свойства, насыпная плотность, текучесть, окисление порошков, аддитивные технологии

**Для цитирования:** Пескова А.В., Бакрадзе М.М., Тихонов М.М., Куко И.С. Исследование влияния оксидного слоя на поверхности частиц металлопорошковых композиций медно-хромистых сплавов на их технологические свойства // Труды ВИАМ. 2023. № 1 (119). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-28-38.

Scientific article

## INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE OXIDE LAYER ON THE SURFACE OF PARTICLES METAL-POWDER COMPOSITIONS OF COPPER-CHROMIUM ALLOYS ON THEIR TECHNOLOGICAL PROPERTIES

A. V. Peskova<sup>1</sup>, M. M. Bakradze<sup>1</sup>, M. M. Tikhonov<sup>1</sup>, I. S. Kuko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** Researches were carried out metal-powder compositions of the copper-chromium alloy system Cu-(0,5–1,0 %)Cr, obtained by the method of gas atomization. The influence of the formed oxide layer on the surface of particles on the technological properties of the powder has been researched. After the selective laser fusion, a change in the color of the powder from copper to violet was detected, as well as a formation of conglomerates, which led to a decrease in properties. Researches were carried out of fluidity, bulk density, as well as an assessment of the particle morphology were carried out metal-powder compositions before and after selective laser fusion.

**Keywords:** copper alloys, powder, atomization, technological properties, bulk density, fluidity, powder oxidation, additive manufacturing

**For citation:** Peskova A.V., Bakradze M.M., Tikhonov M.M., Kuko I.S. Investigation of the influence of the oxide layer on the surface of particles metal-powder compositions of copper-chromium alloys on their technological properties. *Trudy VIAM*, 2023, no. 1 (119), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-28-38.

## Введение

В настоящее время одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений в промышленном производстве изделий авиационной техники являются аддитивные технологии. Они представляют особый интерес с той точки зрения, что позволяют изготавливать сложнопрофильные изделия за меньший срок и являются менее трудозатратными по сравнению с традиционными технологиями. Кроме того, благодаря топологической оптимизации электронных моделей изделий, получаемых с применением аддитивных технологий, возможно уменьшение массы конечного продукта с сохранением требуемого уровня его эксплуатационных свойств [1–5].

Одним из наиболее востребованных металлов в аддитивном производстве является медь, а также сплавы на ее основе. Изделия, изготавливаемые из сплавов на основе меди и 0,5–1,0 % (по массе) хрома, нашли широкое применение во многих отраслях промышленности [6–9] благодаря высоким показателям теплопроводности ( $\lambda \approx 314$  Вт/(м·К)), электропроводности (удельное электросопротивление  $\rho \approx 2 \cdot 10^{-6}$  Ом·м), пластичности и прочности.

Большинство деталей из сплавов на основе системы Cu–Cr производят методами литья,ковки и обработкой давлением листового полуфабриката. Однако изготовление сварных сложнопрофильных деталей (например, теплообменных аппаратов с внутренними проточными каналами охлаждения) чрезвычайно дорогостоящий процесс и затруднен из-за особенностей теплофизических и химических свойств медных сплавов [10]. По этой причине перспектива применения аддитивной технологии селективного лазерного сплавления (СЛС) для производства деталей и элементов конструкций со сложными внутренними каналами из порошков медных сплавов вызывает особый интерес в современной промышленности [10–13].

В настоящее время основными способами получения порошков медных сплавов являются восстановление оксидов, электролитический метод и распыление расплава меди потоком воды или газа [14–16].

В процессе восстановления меди из оксидов исходное сырье предварительно измельчают до необходимого размера частиц и восстанавливают в среде угарного газа или водорода. Порошки, получаемые этим методом, имеют остаточную пористость и неправильную форму частиц, что может привести к их неоднородному сплавлению в процессе синтеза.

С помощью электролитического метода медь получают за счет реакции электролиза ее раствора. Недостатками данного метода являются дендритная форма порошков и высокая стоимость их изготовления из-за низкой производительности процесса и больших затрат энергии. Электролитический метод позволяет получать высокочистые по химическому составу порошки, однако с низкими показателями технологических свойств, что не применимо для аддитивных технологий.

Распыление расплава потоком инертного газа – один из наиболее распространенных способов производства металлических порошков. Более 90 % всех металлических порошковых материалов для аддитивных технологий производят именно этим методом. Основными преимуществами данной технологии являются высокий выход годного по порошкам (размер фракций составляет <40 мкм), низкое содержание газовых примесей (O, N), высокий показатель сферичности частиц (>80 % частиц сферической формы), а также возможность варьирования размера фракции получаемых частиц [17, 18].

Металлопорошковые композиции (МПК) на основе сплавов меди в основном изготавливают с помощью технологии распыления расплава потоком инертного газа в вакуумной установке, что позволяет снизить степень загрязнения такими газовыми примесями, как азот и кислород, уменьшить количество газовых пор, а также обеспечить необходимую степень сферичности порошков.

Как известно, из-за технологических особенностей оборудования для аддитивных технологий порошки, применяемые в 3D-печати, должны обладать высокими показателями технологических свойств, таких как текучесть и насыпная плотность. В связи с тем, что наибольшее влияние на значения данных параметров оказывают форма и размер частиц порошка, наибольшее распространение получили МПК, имеющие нормальное распределение частиц (по Гауссу) и обладающие высокими показателями сферичности. Данные параметры в основном зависят от гранулометрического состава и формы частиц порошка, поэтому для аддитивных технологий применяются порошки однородного гранулометрического состава, имеющие сферическую форму. Это обусловлено тем, что при наличии частиц неправильной формы происходит комкование в подающих устройствах принтеров, и показатели текучести ухудшаются. Наблюдается также неравномерное распределение плотности материала по объему и, следовательно, образование усадочных пор в процессе его синтеза. При наличии пор небольшого размера, не выходящих на поверхность синтезированной заготовки, возможно их удаление при помощи горячего изостатического прессования, однако данный способ не позволяет полностью удалить поры размером  $>40$  мкм. При образовании большого количества пор показатели механических свойств снижаются.

В данной работе представлены результаты изучения возможности повторного использования порошков сплава на основе меди и 0,5–1,0 % (по массе) хрома после процессов синтеза заготовок деталей. Проведено исследование изменения технологических свойств порошков в зависимости от степени окисления поверхности частиц, полученной при термическом воздействии на порошок в процессе синтеза материала и его взаимодействии с внешней средой.

### Материалы и методы

Материалом данного исследования являлись образцы МПК низколегированного сплава на основе меди и 0,5–1,0 % (по массе) хрома, полученные методом газовой атомизации на установке Hermiga 10/100 VI. После проведения процесса атомизации выполнено отделение мелкодисперсной составляющей порошка ( $<10$  мкм) на установке LNCST-180A, а для отсева порошка с частицами  $>63$  мкм использовали ультразвуковую просеивающую герметичную установку UCSV-V600BS. Образцы порошка отобраны после процесса синтеза заготовок деталей методом СЛС в среде аргона на установке DMP Flex 350 (3DSystems, Бельгия). Данная установка оснащена системой предварительного трехступенчатого вакуумирования и YLR-волоконным лазером мощностью 500 Вт. Далее на виброгрохоте от образцов повторно отделили частицы размером  $>63$  мкм для оценки возможности их повторного использования.

После процесса синтеза заготовок деталей порошок, подвергшийся термическому воздействию в непосредственной близости от мест прохождения лазера, приобрел характерные фиолетовые и красные оттенки. На рис. 1 представлена МПК после синтеза. Следует отметить, что по мере отдаления от мест термического влияния лазера порошок меняет цвет от фиолетового до стандартного цвета порошка меди.



Рис. 1. Фотографии порошка сплава на основе меди и 0,5–1,0 % (по массе) хрома в камере установки DMP Flex 350 (3DSystems, Бельгия) после процесса синтеза

Появление красного и фиолетового оттенков у частиц меди свидетельствует об образовании оксида меди (I)  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Данный оксид обычно имеет красный цвет и образуется по реакции  $4\text{Cu} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{Cu}_2\text{O}$  (температура начала реакции  $200\text{ }^\circ\text{C}$ ) при недостатке кислорода; фиолетовый оттенок, в свою очередь, обусловлен увеличением толщины оксидной пленки. Вследствие нахождения порошка в зоне термического воздействия и недостатка кислорода (процесс проходил в инертной атмосфере аргона со степенью чистоты 99,8 %) началась химическая реакция образования оксида меди. Мелкодисперсные порошки имеют более высокую степень химической активности, чем литой материал, благодаря большей площади поверхности, что объясняет образование оксидов на поверхности частиц при сравнительно небольших энергетических затратах.

В данном исследовании рассматривается влияние величины степени окисления порошка сплава на основе меди и 0,5–1,0 % (по массе) хрома на такие показатели его технологических свойств, как насыпная плотность и текучесть. Использовались порошки фракционного состава размером 10–63 мкм (применяемые в дальнейшем для процессов СЛС), имеющие различные степени окисления поверхности частиц.

Внешний вид порошков представлен на рис. 2. Три образца имеют разную степень окисления в зависимости от их расположения на платформе построения и расстояния от места сплавления лазером заготовок деталей.

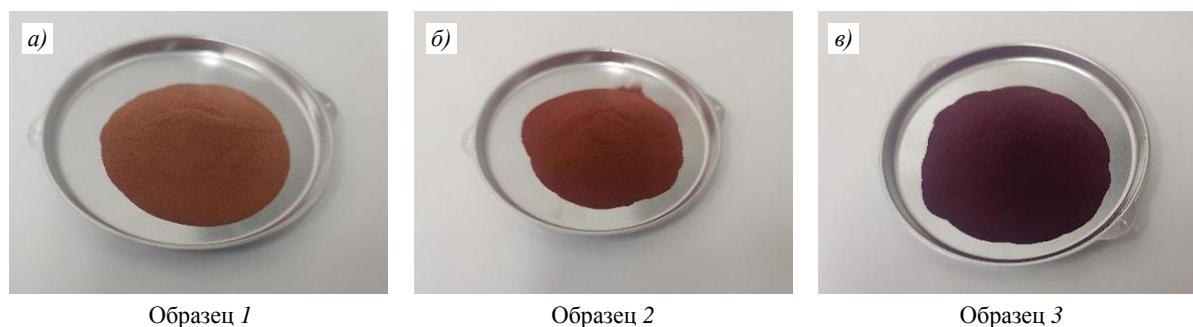


Рис. 2. Внешний вид образцов металлопорошковой композиции сплава на основе меди до процесса синтеза (а) и после него (б, в) на установке DMP Flex 350

Фактическое содержание кислорода в образцах порошка определяли на установке LECO TC600. Изображения структуры частиц МПК получали методом растровой электронной микроскопии на микроскопе Hitachi SU8010 [19]. Определение текучести и насыпной плотности порошка проводили при помощи калиброванной воронки (прибора Холла) по методу, установленному в ГОСТ 20899–98 и ГОСТ 19440–94. Рассев производили на виброгрохоте в соответствии с ГОСТ 18318–94. Гранулометрический состав образцов МПК определяли на установке лазерной дифракции Mastersizer 3000E. Определение количества влаги на поверхности частиц осуществляли гравиметрическим методом на установке MS-70 по ГОСТ 18317–94.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### Результаты и обсуждение

Для оценки влияния степени окисления поверхности частиц МПК на уровень технологических свойств определены показатели текучести и насыпной плотности порошков гранулометрического состава размером 10–63 мкм. На рис. 3 представлены гистограммы распределения размеров частиц по объемным долям, а также показатели диаметра частиц  $D_{10}$ ,  $D_{50}$  и  $D_{90}$  образцов порошка до и после синтеза.

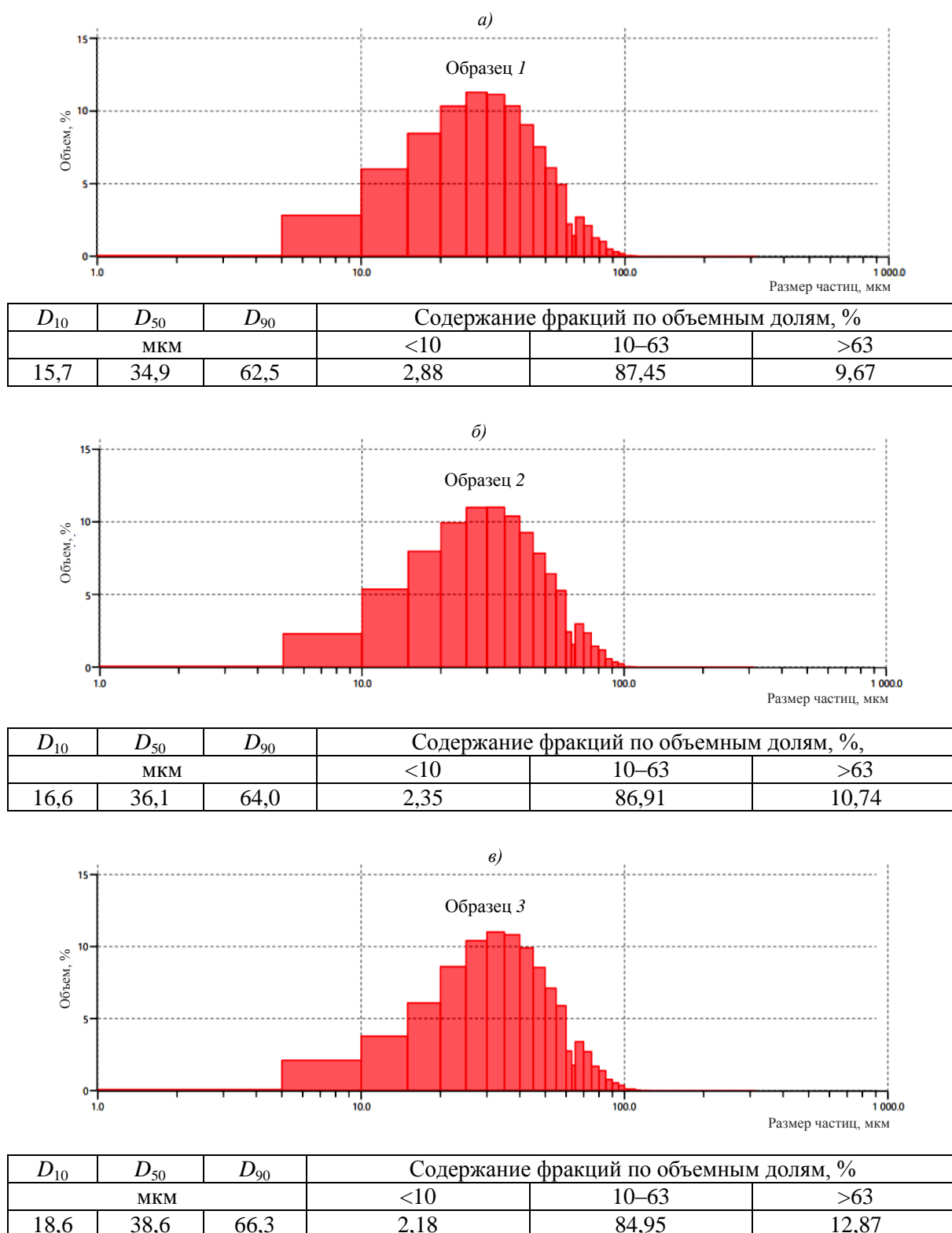


Рис. 3. Гистограммы и таблицы распределения по объемным долям размеров частиц порошка до процесса синтеза (а) и после него (б, в)

Полученные данные показывают, что произошло незначительное увеличение среднего размера частиц ( $D_{50}$ ) с 34,9 до 38,6 мкм. Это связано со сплавлением некоторых частиц порошка в зоне непосредственного контакта с лазером.

В процессе синтеза за счет микровзрывов в зоне сплавления порошка некоторые частицы из ванны расплава выбрасывает в соседний порошок слой [20]. Такие частицы, как правило, имеют неправильную форму, так как при синтезе не успевают получить необходимое количество энергии для расплавления и спекания с соседними частицами. Морфология таких частиц приведена на рис. 4, а. Кроме того, увеличение их среднего размера характеризуется образованием сателлитов при реакции окисления между частицами среднего размера и частицами, имеющими размер <20 мкм (рис. 4, б).

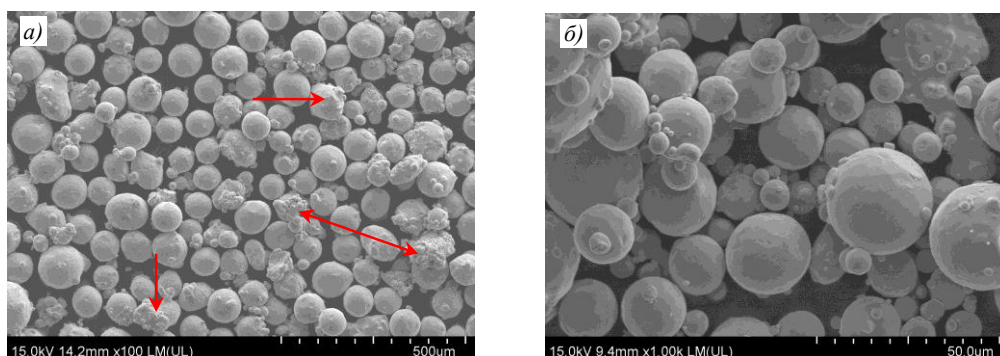


Рис. 4. Морфология частиц порошка сплава на основе меди и 0,5–1,0 % (по массе) хрома после процесса синтеза (образец 3)

Проведена количественная оценка свободной влаги на поверхности порошка с целью определения ее влияния на технологические свойства до и после проведения СЛС. Результаты определения данного параметра представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Количество свободной поверхностной влаги на поверхности образцов металлопорошковой композиции сплава на основе меди и 0,5–1,0 % (по массе) хрома до и после проведения селективного лазерного сплавления (СЛС)**

Образцы	Показатель свободной влаги, %
1 (до проведения СЛС)	0,030
2 (после проведения СЛС)	0,025
3 (после проведения СЛС)	0,025

По результатам исследования выявлено снижение количества свободной влаги на поверхности порошка за счет уменьшения химического потенциала частиц, что вызвано увеличением количества образовавшегося оксидного слоя и снижением количества несвязанной меди на поверхности частиц. После образования оксидного слоя на поверхности частиц существенного изменения количества свободной влаги не происходит.

Для оценки количества кислорода, образовавшего оксиды на поверхности частиц, использовали метод плавления в потоке инертного газа на установке LECO TC600. Результаты определения содержания кислорода в порошке представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Содержание кислорода в образцах металлопорошковой композиции сплава на основе меди и 0,5–1,0 % (по массе) хрома до и после проведения селективного лазерного сплавления (СЛС)**

Образцы	Содержание кислорода, % (по массе)
1 (до проведения СЛС)	0,035
2 (после проведения СЛС)	0,060
3 (после проведения СЛС)	0,250

Видно, что изменение цвета порошка также связано с увеличением количества кислорода. Повышение его содержания приводит к увеличению толщины оксидной пленки на поверхности частиц и, соответственно, к изменению цвета. Таким образом, наблюдается зависимость степени окисления порошка от его непосредственного контакта с лазером (от расстояния между ними). Это свидетельствует об инициации реакции окисления частиц за счет энергии, поступившей от лазера.

На рис. 5 представлены изображения морфологии частиц исследуемых МПК, полученные на растровом электронном микроскопе.

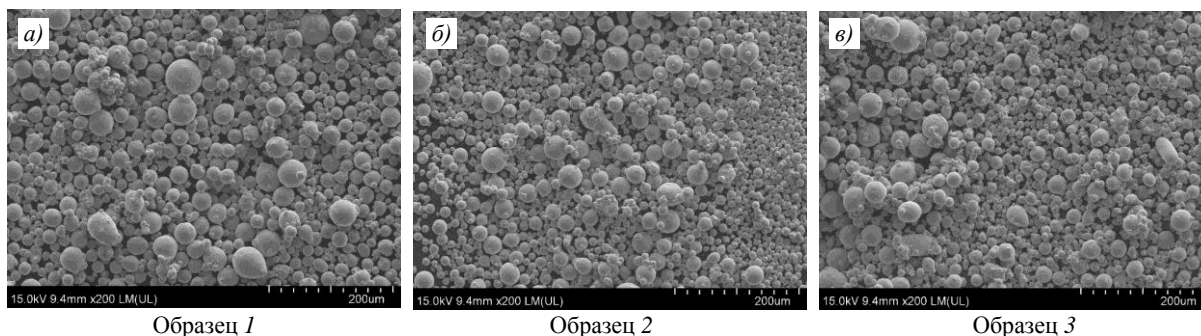


Рис. 5. Морфология частиц образцов порошка сплава на основе меди и 0,5–1,0 % (по массе) хрома до процесса синтеза (а) и после него (б, в)

Видно, что у образцов порошка после процесса синтеза увеличивается количество конгломератов. Это вызвано образованием химических связей между частицами в виде оксидных менисков. Такие конгломераты за счет своей неправильной формы и больших размеров приводят к снижению показателей текучести и повышению значений насыпной плотности, что подтверждается данными, представленными на рис. 1 и в табл. 3, где приведены результаты данных видов испытаний.

Таблица 3

**Результаты определения показателей текучести и насыпной плотности в образцах металлопорошковой композиции сплава на основе меди и 0,5–1,0 % (по массе) хрома до и после проведения селективного лазерного сплавления (СЛС)**

Образцы	Текучесть, с	Насыпная плотность г/см <sup>3</sup>
1 (до проведения СЛС)	15,0	4,53
	15,2	4,51
	15,2	4,52
2 (после проведения СЛС)	16,4	4,42
	16,2	4,41
	16,4	4,42
3 (после проведения СЛС)	17,2	4,35
	17,2	4,29
	17,2	4,30

Как известно, на технологические свойства порошка существенное влияние оказывает свободная поверхностная влага. Для исключения данного фактора проведена сушка исследуемых образцов в вакуумном шкафу при температуре 110 °С в течение 8 ч. Такая температура выбрана для исключения протекания реакции образования оксидов меди на поверхности частиц.

После проведения сушки измерены показатели текучести и насыпной плотности. Результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты определения показателей текучести и насыпной плотности в образцах металлопорошковой композиции сплава на основе меди и 0,5–1,0 % (по массе) хрома после процесса сушки

Образцы	Текучесть, с	Насыпная плотность г/см <sup>3</sup>
1 (до процесса синтеза)	15,6	4,53
	15,6	4,51
	15,4	4,52
2 (после процесса синтеза)	17,2	4,42
	17,0	4,41
	17,0	4,42
3 (после процесса синтеза)	18,0	4,35
	17,8	4,29
	18,0	4,30

По результатам исследований наблюдается незначительное увеличение показателей текучести. Это значит, что даже при сравнительно низких температурах (110 °С) происходит реакция последующего окисления, но с гораздо меньшей интенсивностью. Из полученных данных также следует, что присутствующая свободная влага на поверхности частиц в малых количествах не оказывает существенного влияния на показатели текучести и насыпной плотности, но способствует продолжению реакций окисления на поверхности частиц.

Результаты проведенных исследований показывают, что наблюдается деградация технологических характеристик порошка в зависимости от степени окисления поверхностного слоя, а также за счет формирования конгломератов. На рис. 6 представлены зависимости насыпной плотности и текучести от содержания кислорода на поверхности частиц.

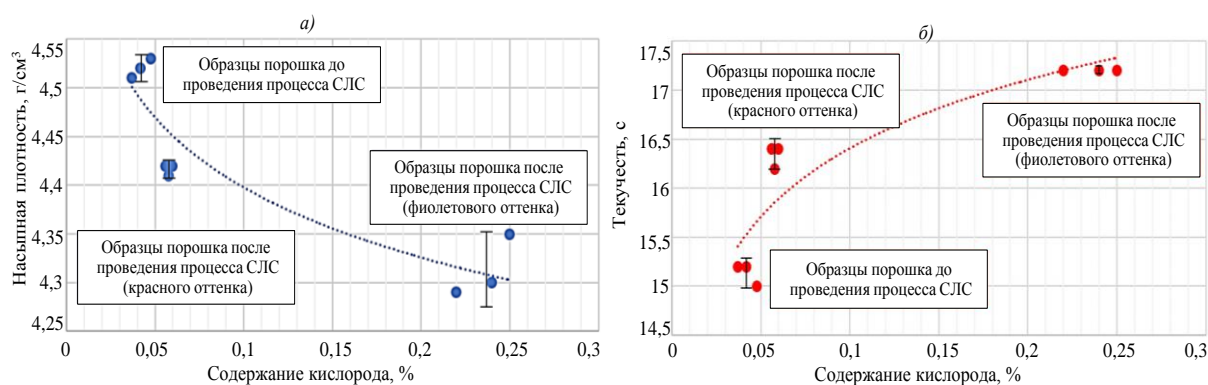


Рис. 6. Зависимость насыпной плотности (а) и текучести (б) металлопорошковой композиции сплава на основе меди и 0,5–1,0 % (по массе) хрома от содержания кислорода на поверхности частиц

### Заключения

Увеличение содержания кислорода в порошке сплава на основе меди и 0,5–1,0 % (по массе) хрома после проведения СЛС приводит к увеличению значений текучести и к снижению показателей насыпной плотности.

После процесса синтеза в порошках данного сплава происходит увеличение среднего размера частиц  $D_{50}$  в МПК с фракциями размером 10–63 мкм с 34,9 до 38,6 мкм.

При поверхностном окислении частиц образуется большое количество конгломератов, что приводит к снижению показателей текучести и повышению значений насыпной плотности.

Воздействие температуры (~110 °С) приводит к дальнейшей реакции окисления порошков и ухудшению их технологических свойств, однако процесс окисления происходит менее интенсивно по сравнению с температурами, возникающими в процессе синтеза.

Дальнейшие работы по исследованию технологических свойств окисленных порошков сплава на основе меди и 0,5–1,0 % (по массе) хрома после проведения СЛС будут направлены на изучение их влияния на механические и физические свойства синтезируемых деталей.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение № 075-11-2021-085 от 22.12.2021).*

### 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. Аддитивные технологии – доминанта национальной технологической инициативы // *Интеллект и технологии*. 2015. № 2 (11). С. 52–55.
3. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения // *Защита и безопасность*. 2014. № 4. С. 28–29.
4. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 19–36.
5. Каблов Е.Н. Материалы и технологии ВИАМ для «Авиадвигателя» // *Пермские авиационные двигатели: информ. бюл.* 2014. № 31. С. 43–47.
6. Wan X., Xie W., Chen H. et al. First-principles study of phase transformations in Cu–Cr alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. Vol. 862. Art. 158531.
7. Fu H., Xu S., Li W. Effect of rolling and aging processes on microstructure and properties of Cu–Cr–Zr alloy // *Materials Science and Engineering A*. 2017. Vol. 700. P. 107–115.
8. Shan L., Wang X., Chang Y., Wang Y. Improving the mechanical performance of Cu[сbnd]Cr alloy by dissolving Cu in the Cr second phase // *Materials Characterization*. 2021. Vol. 176. Art. 111104.
9. Xia C., Zhang W., Kang Zh. et al. High strength and high electrical conductivity Cu–Cr system alloys manufactured by hot rolling-quenching process and thermomechanical treatments // *Materials Science and Engineering A*. 2012. Vol. 538. P. 295–301.
10. Jha K., Neogy S., Kumar S. et al. Correlation between microstructure and mechanical properties in the age-hardenable Cu–Cr–Zr alloy // *Journal of Nuclear Materials*. 2021. Vol. 546. Art. 152775.
11. Zhang Y., Volinsky A., Train H. et al. Aging behavior and precipitates analysis of the Cu–Cr–Zr–Ce alloy // *Materials Science and Engineering A*. 2016. Vol. 650. P. 248–253.
12. Chbihi A., Sauvage X., Blavette D. Atomic scale investigation of Cr precipitation in copper // *Acta Materialia*. 2012. No. 11. Vol. 60. P. 4575–4585.
13. Бакрадзе М.М., Пескова А.В., Капланский Ю.Ю. Влияние термической пост-обработки на текстуру и анизотропию свойств конструкционного сплава системы Cu–Cr, полученного с помощью селективного лазерного сплавления // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 1 (66). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.08.2022). DOI: 10.108577/2713-0193-2022-0-1-3-16.
14. Кипарисов С.С., Либенсон Г.А. Порошковая металлургия. М.: Металлургия, 1980. 496 с.
15. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения: справочник. Киев: Наукова думка, 1985. 624 с.
16. Порошки цветных металлов: справочник / под ред. С.С. Набойченко. М.: Металлургия, 1997. 542 с.

17. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Исследование мелко-дисперсных порошков припоев для диффузионной вакуумной пайки, полученных методом атомизации расплава // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2011. № SP2. С. 79–87.
18. Волков А.М., Шестакова А.А., Бакрадзе М.М. Сравнение гранул, полученных методами газовой атомизации и центробежного распыления литых заготовок, с точки зрения применения их для изготовления дисков ГТД из жаропрочных никелевых сплавов // Труды ВИАМ. 2018. № 11 (71). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.08.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-12-19.
19. Денисова В.С., Лонский С.Л., Куршев Е.В., Малинина Г.А. Исследование структурообразования реакционноотверждаемых покрытий методом сканирующей электронной микроскопии // Труды ВИАМ. 2019. № 4 (76). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.08.22). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-76-87.
20. Евгенов А.Г., Шуртаков С.В., Прагер С.М., Малинин Р.Ю. К вопросу о разработке универсальной расчетной методики оценки деградации оборотных металлических порошковых материалов в зависимости от цикличности использования в процессе селективного лазерного сплавления // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4 (61). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-3-11.

### 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. Additive technologies – the dominant of the national technological initiative. *Intellekt i tekhnologii*, 2015, no. 2 (11), pp. 52–55.
3. Kablov E.N. New generation materials. *Zashchita i bezopasnost*, 2014, no. 4, pp. 28–29.
4. Ospennikova O.G. Strategy of development of hot strength alloys and steels special purpose, protective and heat-protective coverings. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 19–36.
5. Kablov E.N. VIAM materials and technologies for Aviadvigatel. *Permskiye aviatsionnye dvigateli*, 2014, no. 31, pp. 43–47.
6. Wan X., Xie W., Chen H. et al. First-principles study of phase transformations in Cu–Cr alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, vol. 862, art. 158531.
7. Fu H., Xu S., Li W. Effect of rolling and aging processes on microstructure and properties of Cu–Cr–Zr alloy. *Materials Science and Engineering A*, 2017, vol. 700, pp. 107–115.
8. Shan L., Wang X., Chang Y., Wang Y. Improving the mechanical performance of Cu[сbnd]Cr alloy by dissolving Cu in the Cr second phase. *Materials Characterization*, 2021, vol. 176, art. 111104.
9. Xia C., Zhang W., Kang Zh. et al. High strength and high electrical conductivity Cu–Cr system alloys manufactured by hot rolling-quenching process and thermomechanical treatments. *Materials Science and Engineering A*, 2012, vol. 538, pp. 295–301.
10. Jha K., Neogy S., Kumar S. et al. Correlation between microstructure and mechanical properties in the age-hardenable Cu–Cr–Zr alloy. *Journal of Nuclear Materials*, 2021, vol. 546, art. 152775.
11. Zhang Y., Volinsky A., Train H. et al. Aging behavior and precipitates analysis of the Cu–Cr–Zr–Ce alloy. *Materials Science and Engineering A*, 2016, vol. 650, pp. 248–253.
12. Chbihi A., Sauvage X., Blavette D. Atomic scale investigation of Cr precipitation in copper. *Acta Materialia*, 2012, no. 11, vol. 60, pp. 4575–4585.
13. Bakradze M.M., Peskova A.V., Kaplansky Yu.Yu. Influence of thermal post-treatment on the texture and anisotropy of mechanical properties in the Cu–Cr construction alloy manufactured by laser powder bed fusion. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 15, 2022). DOI: 10.18577/2071-9140-2022-0-1-3-16.
14. Kiparisov S.S., Libenson G.A. *Powder metallurgy*. Moscow: Metallurgiya, 1980, 496 p.

15. *Powder metallurgy. Materials, technology, properties, applications: a reference book.* Kyiv: Naukova dumka, 1985, 624 p.
16. *Powders of non-ferrous metals: reference book.* Ed. S.S. Naboychenko. Moscow: Metallurgiya, 1997, 542 p.
17. Kablov E.N., Evgenov A.G., Ryl'nikov V.S., Afanasiev-Khodykin A.N. Investigation of fine-dispersed solder powders for diffusion vacuum soldering, obtained by melt atomization. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser.: Mashinostroyeniye*, 2011, no. SP2, pp. 79–87.
18. Volkov A. M., Shestakova A. A., Bakradze M. M. The comparison of powder produced by gas atomization and by plasma rotate electrode process in the point of production disk billets from Ni-base superalloys. *Trudy VIAM*, 2018, no. 11 (71), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 08, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-12-19.
19. Denisova V.S., Lonskii S.L., Kurshev E.V., Malinina G.A. Investigation of structure formation of reaction cured coatings by scanning electron microscopy. *Trudy VIAM*, 2019, no. 4 (76), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 07, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-76-87.
20. Evgenov A.G., Shurtakov S.V., Prager S.M., Malinin R.Yu. On the development of a universal calculation method for assessing the degradation of recycled metal powder materials, depending on the cyclicity of use in the selective laser melting process. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-3-11.

*Информация об авторах*

**Пескова Анастасия Васильевна**, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Бакрадзе Михаил Михайлович**, заместитель генерального директора по металлическим материалам, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Тихонов Михаил Максимович**, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Куко Иван Сергеевич**, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

*Information about the authors*

**Anastasia V. Peskova**, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Mikhail M. Bakradze**, Deputy Director General for metallic materials, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Mikhail M. Tikhonov**, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Ivan S. Kuko**, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 06.10.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 17.11.2022.

The article was submitted 06.10.2022; approved and accepted for publication after reviewing 17.11.2022.