

## ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И СТРУКТУРА ПОРОШКА ХРОМОВОЙ БРОНЗЫ БрХ

Б.Е. Винтайкин

vintaikb@bmstu.ru

А.Е. Смирнов

smirnoff@bmstu.ru

С.Ю. Шевченко

shevchenko@bmstu.ru

А.А. Дренин

drenin@bmstu.ru

В.И. Шейкина

vi.she@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Методами рентгеновского фазового анализа, оптической и сканирующей электронной микроскопии, дополненной построением карт распределения таких химических элементов, как кислород и медь, показано наличие в структуре порошка марки ПР-БрХ, изготовленного из бронзы с ГЦК-решеткой, кислородсодержащих фаз — оксидов меди ( $\text{CuO}$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$ ), которые располагаются по границам зерен и на поверхности частиц порошка. С использованием указанных методов показано, что отжиг в аммиаке при температуре 450 °С способствует восстановлению оксидных фаз до однофазной структуры исходного твердого раствора. Установлено, что наличие оксидов на поверхности частиц порошка и границах зерен внутри этих частиц приводит к непригодности окисленного порошка к использованию в технологии селективного лазерного плавления. Это связано с восстановлением оксидов в процессе лазерной 3D-печати и, как следствие, с газовыделением и чрезмерной пористостью объектов. Доказано, что восстановительный отжиг в аммиаке формирует однофазную структуру частиц порошка на основе ГЦК-меди, что дает возможность выращивать на различных режимах лазерной обработки объекты с небольшой пористостью, не превышающей 2,5 %

### Ключевые слова

*Селективное лазерное плавление, рентгеновский фазовый анализ, сканирующая электронная микроскопия, порошковый материал, бронза БрХ, 3D-печать, выращивание*

Поступила 29.12.2021

Принята 14.11.2022

© Автор(ы), 2023

---

**Введение.** Медь и сплавы на ее основе широко используются в современной промышленности [1–3]. Благодаря уникальным теплофизическим свойствам они оказались незаменимы для изделий, работающих в области высоких температурных нагрузок. При производстве сложно-

профильных теплообменников, особо нагруженных в тепловом отношении, традиционно применяют жаропрочные медные сплавы, легированные хромом [1, 2]. Такие изделия отличаются способностью работать под нагрузкой в условиях повышенных температур без заметных остаточных деформаций и разрушения конструкции.

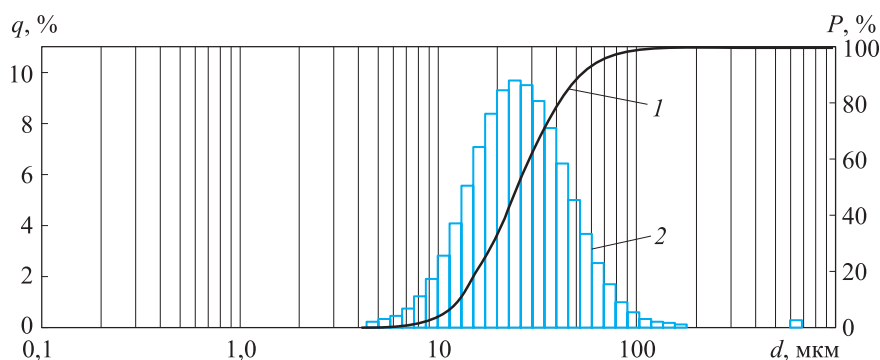
Особо актуально применение медных сплавов в технологии, которая позволяет в кратчайшие сроки получать изделия с развитыми внутренними каналами и скрытыми полостями — селективное лазерное плавление (СЛП) [4]. Номенклатура коммерчески доступных медных сплавов для СЛП ограничена, а имеющиеся сплавы нередко не отвечают заданным свойствам. Усилия исследователей в этой области направлены на адаптацию и интеграцию необходимых материалов в аддитивные процессы.

Преобладающим типом дефектов в технологии СЛП являются несплавления и поры [5]. Наряду с основными параметрами режима выращивания (мощность лазерного излучения, диаметр пятна нагрева, скорость сканирования, толщина порошкового слоя и т. п.) важную роль играет качество порошкового материала. Зачастую характерные дефекты СЛП возникают вследствие ярко выраженного эффекта сфероидизации. Как отмечено в [6], под действием сил поверхностного натяжения расплавленный металл стремится уменьшить свободную поверхностную энергию путем образования формы с минимальной площадью поверхности — формы шара. Возникновение этого эффекта при СЛП интенсифицируется наличием оксидной пленки на поверхности отдельных порошковых частиц. В медных сплавах она имеет температуру плавления выше температуры плавления основного материала и оказывает существенное влияние на стабильное формирование ванны расплава при лазерной обработке.

*Цель работы* — получить данные о структуре и фазовом составе порошкового материала БрХ, оценить влияние окисления материала на качество выращиваемых методом СЛП изделий, а также рассмотреть способы устранения оксидной пленки с поверхности порошковых частиц.

**Материалы и методы исследований.** В качестве объекта исследований использован порошок бронзы марки ПР-БрХ, произведенный компанией АО «Полема» (Тула, Россия).

Для проведения входного контроля порошкового материала использовали анализатор размера частиц HORIBA LA-350. Результаты измерения гранулометрического состава в виде интегрального ( $P$ ) и дифференциального ( $q$ ) распределений по диаметру  $d$  частиц порошка ПР-БрХ показаны на рис. 1.



**Рис. 1.** Интегральная кривая распределения  $P$  (1) и гистограмма дифференциального распределения  $q$  (2) по диаметру  $d$  частиц порошка ПР-БрХ

Средний диаметр частиц порошка составлял  $32 \pm 2$  мкм, 95 % фракционного состава порошка располагалось в диапазоне значений 10...75 мкм. Для технологии СЛП предпочтительно использование порошкового материала с размером частиц 20...50 мкм [4, 7–9], поэтому порошок ПР-БрХ просеивали для исключения несоответствующих фракций.

Состав порошка в соответствии с ГОСТ 18175–78: 0,4...1,2 % хрома; не более 0,3 % примесей; остальное медь. Для уточнения химического состава порошка использовали атомно-эмиссионный спектрометр *SPECS LAES MATRIX* с лазерным возбуждением спектров. Результаты анализа состава показали содержание хрома 0,7 %.

Исследования микроструктуры и фазового состава порошка проводили для двух структурных состояний: 1) исходное (состояние поставки); 2) после отжига в аммиаке.

Восстановительный отжиг порошка выполняли в вакуумной камере при температуре 450 °С в атмосфере аммиака при давлении 800 Па в течение 1 ч с последующей дополнительной выдержкой 20 мин в вакууме при остаточном давлении около 50 Па для устранения возможного насыщения водородом. Для отжига использовали керамические (алундовые) тигли.

Металлографические исследования проводили с использованием оптического микроскопа *Olympus GX-51* при увеличении от 12 до 500 крат в светлом и темном полях. Электронно-микроскопические исследования и локальный микрорентгеноспектральный анализ осуществляли на сканирующем электронном микроскопе *Phenom ProX* с энергодисперсионным спектрометром. Для исследований готовили шлифы порошка с использованием электропроводящей смолы холодного отверждения.

По ранее установленным в [10, 11] режимам для исследования пористости выращивали образцы размерами  $8 \times 8 \times 8$  мм. Использовали установку СЛП-110 [12], спроектированную в ООО «МЦЛТ» — научно-инжиниринговом центре при МГТУ им. Н.Э. Баумана.

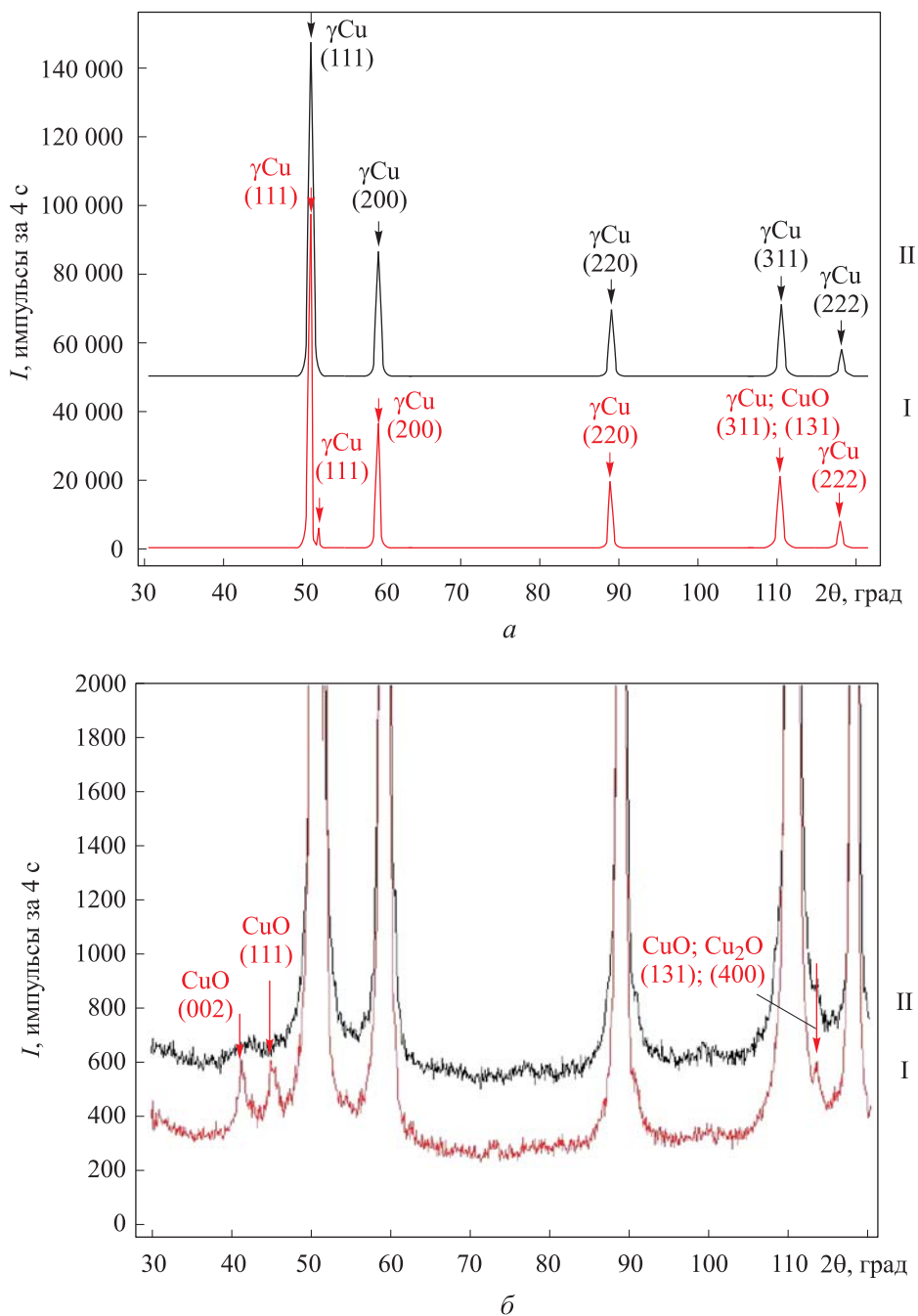
Измерение пористости выполняли на поперечных шлифах образцов без металлографического травления при увеличении в 100 крат следующим образом: рассчитывали площадь всех видимых пор  $S_p$  в сечении образца на площади  $S_f$  и пористость  $P$  как отношение величин  $S_p$  и  $S_f$ , умноженное на 100 %. Измерение пористости проводили по трем сечениям.

Рентгеновские исследования порошка осуществляли на дифрактометре ДРОН-4 в  $\text{Co-K}\alpha$ -излучении при фокусировке методом Брэгга — Brentano [13–15], при этом монохроматор был установлен между образцом и детектором. Измеряли число импульсов детектора за 4 с по точкам с шагом  $0,1^\circ$  в режиме  $\theta/2\theta$ -сканирования в диапазоне значений угла  $20 \dots 120^\circ$ . Рентгеновский фазовый анализ (РФА) выполняли с использованием базы данных *Powder Diffraction File-2*.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Порошок в исходном состоянии характеризуется черно-коричневым цветом. Можно предположить, что при хранении поверхность порошка покрывается тонким слоем кислородсодержащих соединений меди. В процессе отжига в аммиаке кислородсодержащие соединения восстанавливаются до металла и порошок бронзы приобретает характерный желто-розовый цвет.

Рентгенограммы образцов порошка бронзы представлены на рис. 2. Как в исходном, так и в отожженном состоянии доминирующей фазой является фаза на основе твердого раствора хрома в меди  $\text{Cu}(\text{Cr})$  с кристаллической ГЦК-решеткой. Параметр решетки этой фазы близок к параметру решетки чистой меди  $\gamma\text{-Cu}$ , что определяется малым содержанием хрома. Кроме интенсивных линий меди, в рентгенограмме исходного (окисленного) состояния наблюдаются дифракционные максимумы небольшой интенсивности таких кислородсодержащих фаз, как  $\text{CuO}$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$  (рис. 2, а), при этом некоторые из линий оксидов накладываются на интенсивные линии меди.

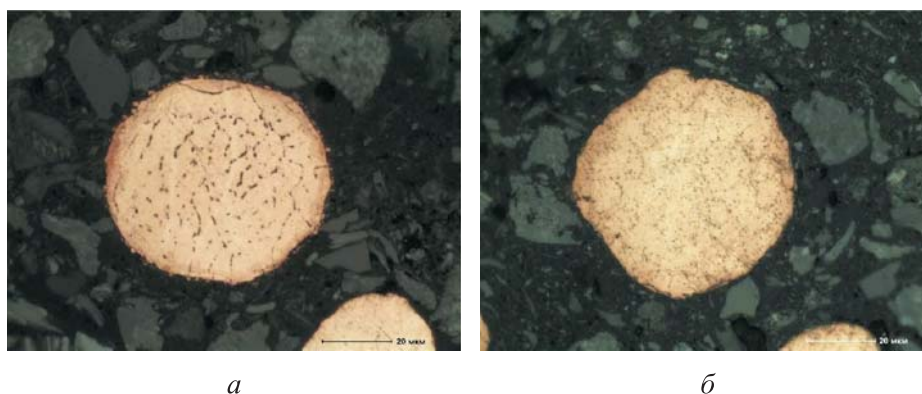
Следует отметить, что после восстановительного отжига интенсивность дифракционных максимумов кислородсодержащих фаз становится существенно меньше, при этом две линии на углах дифракции  $41,3^\circ$  и  $45,3^\circ$  трансформировались в диффузное гало (рис. 2, б), что может свидетельствовать о сохранении небольшого числа дисперсных частиц оксидов.



**Рис. 2.** Рентгенограммы (а) и увеличенные рентгенограммы (б) порошка бронзы ПР-БрХ в исходном (окисленном) состоянии (I) и после отжига в аммиаке (II)

Результаты РФА показывают, что восстановительный отжиг в аммиаке дает возможность существенно уменьшить долю оксидных фаз и отклонение фазового состава порошка от однофазной структуры.

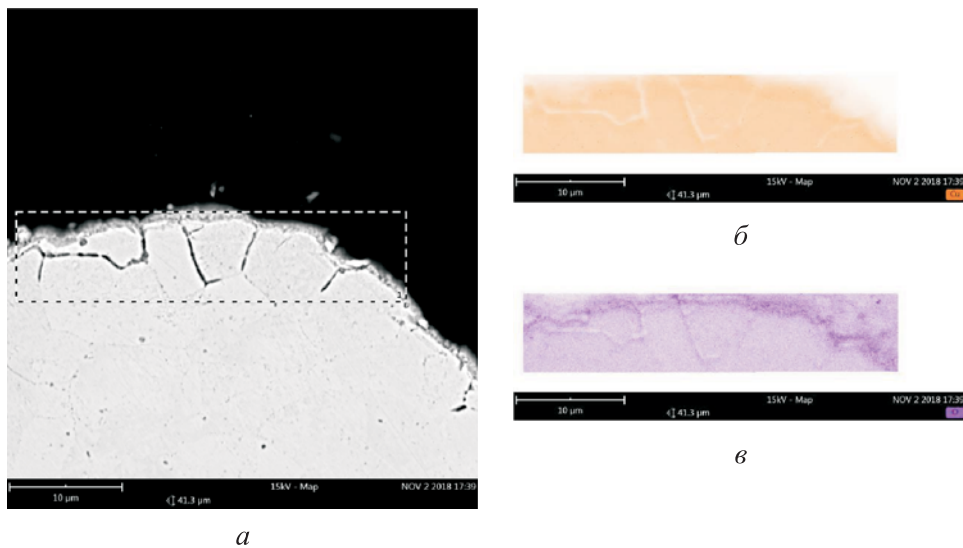
Установлено [16], что при взаимодействии меди и сплавов на ее основе с кислородом оксиды меди располагаются не только на поверхности, но и на границах зерна. Структура поперечного сечения порошка до и после восстановительного отжига наглядно иллюстрирует описанный в литературе эффект. Оксиды меди формируют преимущественно разорванную сетку, декорирующую границы зерна (рис. 3, *а*). Отжиг в аммиаке устраняет эффект окисления границ зерна (рис. 3, *б*), в структуре фиксируется небольшое число дисперсных частиц оксидов меди, которые формируют диффузное гало на углах дифракции около  $43^\circ$  (см. рис. 2, *б*, II).



**Рис. 3.** Микроструктуры порошка бронзы в исходном (окисленном) состоянии (*а*) и после отжига (*б*);  $\times 1000$

Электронно-микроскопические исследования с локальным микро-рентгеноспектральным анализом химического состава порошка, как и исследования с использованием светового микроскопа, показали следующее: в исходном (окисленном) состоянии на границах зерен наблюдаются частицы оксидов. Картирование участка поверхности шлифа (рис. 4) показало, что на границах повышено содержание кислорода, что подтверждает наличие оксидов.

При использовании окисленного порошка для выращивания образцов не удалось получить удовлетворительную плотность и пористость при любых режимах СЛП (рис. 5). При отделении от подложки образец не сохранил целостность, что свидетельствует о непригодности такого порошка к использованию в 3D-печати ввиду интенсивного порообразования в процессе изготовления образцов. Наиболее вероятная причина порообразования — восстановление оксидов и газовыделение в процессе печати, что препятствует получению образцов с удовлетворительной плотностью и пористостью не более 2,5 %.



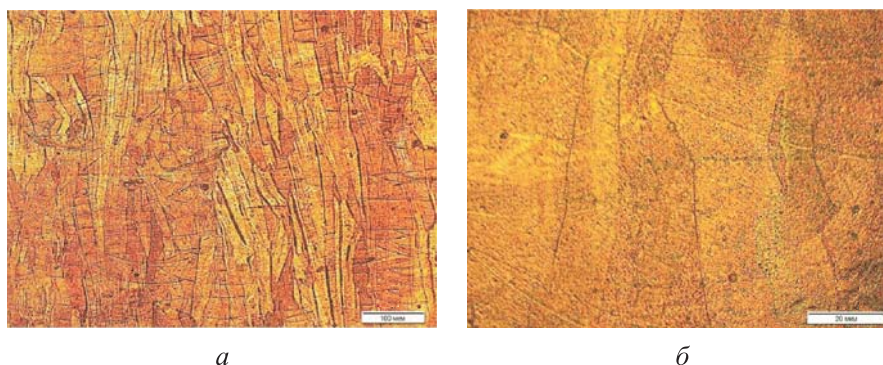
**Рис. 4.** Изображения приповерхностной зоны частицы порошка бронзы в исходном (окисленном) состоянии во вторичных электронах (а), в характеристическом излучении меди (б) и кислорода (в)



**Рис. 5.** Микроструктура образца, выращенного из окисленного порошка ПР-БрХ, при удельной мощности 360 Дж/мм<sup>3</sup>; ×12, темное поле

После восстановительного отжига в аммиаке порошка ПР-БрХ и оптимизации режимов выращивания, рассмотренной в [10], технологией СЛП получена серия образцов размером 8 × 8 × 8 мм. Варьировали скорость сканирования 455...770 мм/с и удельную мощность 100...360 Дж/мм<sup>3</sup>.

В качестве примера (рис. 6) представлены микроструктуры образцов, выращенных при скорости сканирования 770 мм/с и удельной мощности 360 Дж/мм<sup>3</sup>. Выращенные образцы имели пористость менее 2,5 %, что является приемлемым результатом для аддитивных процессов [4, 17].



**Рис. 6.** Микроструктуры образцов, выращенных при скорости сканирования 770 мм/с и удельной мощности 360 Дж/мм<sup>3</sup> из порошка ПР-БрХ после восстановительного отжига; увеличение  $\times 200$  (а) и  $\times 500$  (б)

**Выводы.** Методами РФА, оптической и сканирующей электронной микроскопии с локальным микрорентгеноспектральным анализом порошка бронзы ПР-БрХ установлено наличие в структуре материала кислородсодержащих фаз на основе меди и восстановление названных фаз до однофазной структуры твердого раствора при отжиге в аммиаке.

Наличие оксидов на поверхности и границах зерен частиц порошка приводит к неудовлетворительной плотности и пористости выращенных образцов, что свидетельствует о непригодности окисленного порошка к использованию в технологии 3D-печати ввиду восстановления оксидов и газовой выделению в процессе печати.

Выращенные из порошка бронзы ПР-БрХ после восстановительного отжига образцы, полученные по различным режимам лазерной обработки со скоростью сканирования 455...770 мм/с и при удельной мощности 100...360 Дж/мм<sup>3</sup>, показали пористость менее 2,5 %, что является допустимым результатом для аддитивных процессов.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Мысик Р.К., Логинов Ю.Н., Брусницын С.В. и др. Перспективы применения хромовых и хромциркониевых бронз. *Цветные металлы*, 2004, № 2, с. 38–41.
- [2] Islamgaliev R.K., Nesterov K.M., Bourgon J., et al. Nanostructured Cu–Cr alloy with high strength and electrical conductivity. *J. Appl. Phys.*, 2014, vol. 115, iss. 19, art. 194301. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4874655>
- [3] Смирнов А.Е., Шевченко С.Ю., Шевчуков А.П. и др. Исследование структуры и свойств бериллиевой бронзы после закалки в азоте высокого давления. *Технология металлов*, 2018, № 4, с. 25–30.
- [4] Григорьянц А.Г., ред. Лазерные аддитивные технологии в машиностроении. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018.



- [5] Колчанов Д.С., Пересторонин А.В., Бинков И.И. и др. Влияние режимов выращивания деталей из алюминиевого порошка методом селективного лазерного плавления на пористость, микротвердость и микроструктуру. *Научные технологии в машиностроении*, 2020, № 10 (112), с. 40–48.  
DOI: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-10-40-48>
- [6] Григорьянц А.Г., Колчанов Д.С., Третьяков Р.С. и др. Селективное лазерное плавление металлических порошков, выращивание тонкостенных и сетчатых структур. *Технология машиностроения*, 2015, № 10, с. 6–11.
- [7] Александрова А.А., Базалеева К.О., Балакирев Э.В. и др. Прямое лазерное выращивание композиционного материала инконель 625/ТИС: влияние структурного состояния исходного порошка. *Физика металлов и металловедение*, 2019, т. 120, № 5, с. 498–504. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0015323019020013>
- [8] Панченко В.Я., Васильцов В.В., Егоров Э. и др. Аддитивные технологии спекания металлических порошков для получения изделий авиационной и машиностроительной промышленности. *Фотоника*, 2016, № 6, с. 36–47.  
DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-7296.2016.60.6.36.47>
- [9] Колчанова А.В., Григорьянц А.Г., Колчанов Д.С. и др. Получение композиционных изделий с металлической матрицей методом селективного лазерного плавления. *Технология машиностроения*, 2020, № 12, с. 5–11.
- [10] Колчанов Д.С., Дренин А.А., Денежкин А.О. и др. Исследование влияния режимов выращивания методом селективного лазерного плавления на пористость в изделиях из медных сплавов. *Фотоника*, 2019, т. 13, № 2, с. 160–168.  
DOI: <https://doi.org/10.22184/FRos.2019.13.2.160.168>
- [11] Григорьянц А.Г., Колчанов Д.С., Дренин А.А. и др. Влияние основных параметров процесса селективного лазерного плавления на стабильность формирования единичных дорожек при выращивании изделий из медных сплавов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 6 (711), с. 20–29.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2019-6-20-29>
- [12] Григорьянц А.Г., Колчанов Д.С., Дренин А.А. Установка для селективного лазерного плавления металлических порошков. *Аддитивные технологии: настоящее и будущее. Матер. IV Междунар. конф.* М., ВИАМ, 2018, с. 221–234.
- [13] Гинье А. Рентгенография кристаллов. М., ФИЗМАТГИЗ, 1961.
- [14] Винтайкин Б.Е., Камынин А.В., Смирнов А.Е. и др. Фазовые превращения в прецизионном никелевом сплаве 40ХНЮ-ВИ в процессе термической обработки и азотирования. *Металлы*, 2019, № 4, с. 25–32.
- [15] Винтайкин Б.Е., Кузьмин Р.Н. Отделение аппаратурных уширений и Ка2 составляющей и Ка-дублета на двумерных картах распределения интенсивности рассеяния рентгеновских лучей прямыми вариационными методами на ЭВМ. *Кристаллография*, 1986, т. 31, № 4, с. 656–660.
- [16] Дриц М.Е., ред. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди. М., Наука, 1979.

[17] Мельникова М.А., Колчанов Д.С., Мельников Д.М. Селективное лазерное плавление: применение и особенности формирования трехмерных конструктивных технологических элементов. *Фотоника*, 2017, № 2, с. 42–49.

DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-7296.2017.62.2.42.49>

**Винтайкин Борис Евгеньевич** — д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Смирнов Андрей Евгеньевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Материаловедение» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Шевченко Светлана Юрьевна** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Материаловедение» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Дренин Алексей Анатольевич** — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры «Лазерные технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Шейкина Виктория Игоревна** — ассистент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Винтайкин Б.Е., Смирнов А.Е., Шевченко С.Ю. и др. Фазовый состав и структура порошка хромовой бронзы BrX. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2023, № 1 (106), с. 82–94.

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2023-1-82-94>

**PHASE COMPOSITION AND STRUCTURE  
OF THE BrX CHROMIUM BRONZE POWDER**

**B.E. Vintaikin**

[vintaikb@bmstu.ru](mailto:vintaikb@bmstu.ru)

**A.E. Smirnov**

[smirnoff@bmstu.ru](mailto:smirnoff@bmstu.ru)

**S.Yu. Shevchenko**

[shevchenko@bmstu.ru](mailto:shevchenko@bmstu.ru)

**A.A. Drenin**

[drenin@bmstu.ru](mailto:drenin@bmstu.ru)

**V.I. Sheykina**

[vi.she@bmstu.ru](mailto:vi.she@bmstu.ru)

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

---

**Abstract**

Methods of the X-ray phase analysis, as well as optical and scanning electron microscopy supplemented by construction of the distribution maps for such chemical elements as oxygen and copper demonstrated presence in the structure of the PR-BrX brand powder made

**Keywords**

*Selective laser melting, X-ray phase analysis, scanning electron microscopy, powder material, BrX bronze, 3D printing, growth*

of bronze with the FCC lattice of oxygen-containing phases, i.e., copper oxides (CuO, Cu<sub>2</sub>O) located along the grain boundaries and on the powder particle surface. Using these methods demonstrated that annealing in the ammonia at a temperature of 450 °C promoted reduction of the oxide phases to the single-phase structure of the initial solid solution. It was found out that the presence of oxides on the powder particles surface and grain boundaries inside these particles made the oxidized powder unsuitable for use in the selective laser melting technology. This is due to reduction of the oxides, and, consequently, to the outgassing and excessive porosity of objects during the laser 3D printing. It was proved that reductive annealing in ammonia formed a single-phase structure of powder particles based on the FCC copper, which made it possible to grow objects with small porosity not exceeding 2.5 % using various laser processing modes

Received 29.12.2021

Accepted 14.11.2022

© Author(s), 2023

## REFERENCES

- [1] Mysik R.K., Loginov Yu.N., Brusnitsyn S.V., et al. Prospects for the application of chromium and chromium-zirconium bronzes. *Tsvetnye metally*, 2004, no. 2, pp. 38–41 (in Russ.).
- [2] Islamgaliev R.K., Nesterov K.M., Bourgon J., et al. Nanostructured Cu–Cr alloy with high strength and electrical conductivity. *J. Appl. Phys.*, 2014, vol. 115, iss. 19, art. 194301. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4874655>
- [3] Smirnov A.E., Shevchenko S.Yu., Shevchukov A.P., et al. Study of structure and properties of beryllium bronze after high pressure nitrogen quenching. *Tekhnologiya metallov*, 2018, no. 4, pp. 25–30 (in Russ.).
- [4] Grigoryants A.G., ed. *Lazernye additivnye tekhnologii v mashinostroenii* [Laser additive technologies in machine building]. Moscow, BMSTU Publ., 2018.
- [5] Kolchanov D.S., Perestoronin A.V., Binkov I.I., et al. Impact of aluminum powder parts growth by method of selective laser melting upon porosity, micro-hardness and micro-structure. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering], 2020, no. 10 (112), pp. 40–48 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-10-40-48>
- [6] Grigoryants A.G., Kolchanov D.S., Tretyakov R.S., et al. Selective laser melting of metallic powders, growing thin-walled and mesh structures. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2015, no. 10, pp. 6–11 (in Russ.).
- [7] Aleksandrova A.A., Bazaleeva K.O., Balakirev E.V., et al. Direct laser growth of inconel 625/TiC composite: effect of structural state of initial powder. *Phys. Metals Metallogr.*, 2019, vol. 120, no. 5, pp. 459–464. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0031918X19020017>

- [8] Panchenko V.Ya., Vasil'tsov V.V., Egorov E., et al. Metal powder sintering additive technologies for aviation and engineering industries. *Fotonika* [Photonics Russia], 2016, no. 6, pp. 36–47 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-7296.2016.60.6.36.47>
- [9] Kolchanova A.V., Grigoryants A.G., Kolchanov D.S., et al. Obtaining composite products with a metal matrix by selective laser melting. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2020, no. 12, pp. 5–11 (in Russ.).
- [10] Kolchanov D.S., Drenin A.A., Denezhkin A.O., et al. Study of the effect of growing modes by selective laser melting method on porosity in copper alloy products. *Fotonika* [Photonics Russia], 2019, vol. 13, no. 2, pp. 160–168 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22184/FRos.2019.13.2.160.168>
- [11] Grigoryants A.G., Kolchanov D.S., Drenin A.A., et al. Influence of the main parameters of selective laser melting on stability of single-track formation when ‘growing’ parts from copper alloys. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2019, no. 6 (711), pp. 20–29 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2019-6-20-29>
- [12] Grigoryants A.G., Kolchanov D.S., Drenin A.A. [Installation for selective laser melting of metal powders] *Additivnye tekhnologii: nastoyashchee i budushchee. Mater. IV Mezhdunar. konf.* [Additive Technologies: the Present and the Future. Proc. IV Int. Conf.]. Moscow, VIAM, 2018, pp. 221–234 (in Russ.).
- [13] Guinier A. *Theorie et technique de la radiocristallographie*. Paris, Dunod, 1956.
- [14] Vintaykin B.E., Kamynin A.V., Smirnov A.E., et al. Phase transformations in a precision 40KhNYu-VI nickel alloy during heat treatment and nitriding. *Metally*, 2019, no. 4, pp. 25–32 (in Russ.).
- [15] Vintaykin B.E., Kuzmin R.N. Separation of hardware broadening and Ka<sub>2</sub> component and Ka-doublet on two-dimensional maps of X-ray scattering intensity distribution by direct variational methods on the computer. *Kristallografiya*, 1986, vol. 31, no. 4, pp. 656–660 (in Russ.).
- [16] Drits M.E., ed. *Dvoynye i mnogokomponentnye sistemy na osnove medi* [Dual and multi-component copper-based systems]. Moscow, Nauka Publ., 1979.
- [17] Melnikova M.A., Kolchanov D.S., Melnikov D.M. Selective laser melting: application and formation features of three-dimensional structural engineering elements. *Fotonika* [Photonics Russia], 2017, no. 2, pp. 42–49 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-7296.2017.62.2.42.49>

**Vintaikin B.E.** — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Smirnov A.E.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Materials Science, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Shevchenko S.Yu.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Materials Science, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Drenin A.A.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Sheykina V.I.** — Assistant, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Vintaikin B.E., Smirnov A.E., Shevchenko S.Yu., et al. Phase composition and structure of the BrX chromium bronze powder. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2023, no. 1 (106), pp. 82–94 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2023-1-82-94>