



УДК 669.017

Поступила 09.03.2016

## НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ МЕХАНИЧЕСКИ ЛЕГИРОВАННЫЕ МОДИФИЦИРУЮЩИЕ ЛИГАТУРЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ХРОМОВЫХ БРОНЗ

### NANOCRYSTALLINE MECHANICALLY ALLOWED MODIFYING LIGATURES FOR PRODUCTION OF CHROMIUM BRONZE

Ф. Г. ЛОВШЕНКО, ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет», г. Могилев, Беларусь, пр. Мира, 43,

Г. Ф. ЛОВШЕНКО, УО «Белорусская государственная академия авиации», г. Минск, Беларусь,

ул. Уборевича, 77. E-mail: lovshenko@mail.ru,

И. А. ЛОЗИКОВ, ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет», г. Могилев, Беларусь, пр. Мира, 43

F. G. LOVSHENKO, Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus, 43, Mira ave.,

G. F. LOVSHENKO, Belarusian State Academy of Aviation, Minsk, Belarus, 77, Uborevich str.

E-mail: lovshenko@mail.ru,

I. A. LOZIKOV, Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus, 43, Mira ave.

*Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена высокая эффективность применения технологии, основанной на реакционном механическом легировании, для получения нанокристаллических модифицирующих лигатур и модификаторов. Применение разработанных механически легированных модифицирующих лигатур позволяет упростить и удешевить технологический процесс производства, а также обеспечивает формирование дисперсно-упрочненных жаропрочных материалов с суб-,/микрокристаллическим типом структуры основы, что приводит к существенному повышению комплекса физико-механических свойств и эксплуатационных хромовых бронз.*

*Theoretically justified and experimentally confirmed the high efficiency of the technology, based on the reactive mechanical alloying to produce nanocrystalline modifying modifiers and ligatures. Application designed mechanically alloyed modifying ligatures allows to simplify and make cheaper manufacturing process and ensures the formation of dispersion strengthened heat-resistant material with a sub-,/microcrystalline structure type basis, which results in a significant improvement of the complex of physical and mechanical properties and performance properties of chromium bronze.*

**Ключевые слова.** Реакционное механическое легирование, лигатура, модификатор, хромовая бронза, технология, состав, структура, свойства.

**Keywords.** Reactive mechanical alloying, ligature, modifier, chrome bronze, technology, composition, structure, properties.

#### Введение

**Способы получения нанокристаллических модификаторов, реакционное механическое легирование.** Одним из перспективных способов повышения механических свойств металлических материалов является применение лигатур, содержащих ультрадисперсные включения, выполняющие роль своеобразных модификаторов первого рода. При этом эффект модифицирования возрастает с уменьшением величины частиц модификатора до наноразмерного. В последнее десятилетие этому научному направлению в мире, в том числе и в Республике Беларусь, уделяется достаточно большое внимание. Некоторые представления о состоянии вопроса дают результаты исследований, приведенные в работах [1–9]. Однако до последнего времени теория и технология получения этих лигатур, а также материалов с их применением не разработаны и, как следствие, промышленное производство, включая мелкосерийное, не освоено. Получение лигатур этого типа в лабораторных условиях базируется на прессовании, включая горячее, смеси порошков основы и дисперсного модификатора. Несмотря на кажущуюся простоту реализации процесса, способ имеет ряд недостатков. Основным фактором, ограничивающим его применение, является отсутствие универсальных, приемлемых для широкой практики модифицирования промышленных

технологий изготовления нанопорошков требуемого состава. При этом следует отметить, что к настоящему времени создано ряд способов их получения, основные из которых – газофазное испарение, конденсация, осаждение из коллоидных растворов. Краткое описание их приведено в [10]. Практически все способы основаны на применении специального, высокотемпературного, дорогостоящего оборудования, имеют низкую производительность и сложны в реализации, что определяет узкую номенклатуру, малый объем выпуска и высокую стоимость нанопорошков. За исключением материалов на основе углерода и бора производство их осуществляется в научных целях, в лабораторных условиях мелкими опытными партиями.

В связи с отсутствием широкой гаммы промышленно выпускаемых нанопорошков, а также высокой стоимостью и дефицитностью производимых в лабораторных условиях величина частиц применяемых модификаторов, как правило, на 1–2 порядка превышает наноразмерную. В большинстве случаев они не обосновано относятся к нанообъектам. По классификации, сделанной на основе анализа результатов работ [10–15], они относятся к субмикрорекристаллам или микрорекристаллам. Нанокристаллы имеют размер менее 40 нм и существенно отличаются от последних строением и физико-химическими свойствами.

К недостаткам данной технологии, заключающейся в механическом смешивании компонентов, существенно различающихся гранулометрическим составом и плотностью, следует отнести также отсутствие промышленно-выпускаемых порошков основы лигатуры и сложность достижения однородности распределения модификатора в ней. Приведенные проблемы ставят вопрос об экономической целесообразности применения этих лигатур для производства машиностроительных материалов.

Перспективным путем решения задачи является применение в качестве исходного материала для изготовления лигатуры композиционного порошка, одной из структурных составляющих которого служат наночастицы модификатора. Основными способами получения композиционных порошков, содержащими наночастицы и нашедшими некоторое применение в производстве, являются химическое смешивание, разложение смеси солей, водородное восстановление в растворах, химическое осаждение из растворов [16]. Согласно результатам проведенного анализа [17], базирующиеся на них технологии не отличаются универсальностью, являются сложными, дорогостоящими, экологически не безопасны и ряде случаев имеют низкую воспроизводимость.

Как следует из данных, представленных ниже, этих недостатков практически лишен способ, основанный на реакционном механическом легировании. При его реализации в процессе обработки в энергонапряженной мельнице-механореакторе шихты, состоящей из промышленно-выпускаемых порошков, и последующей термической обработке полученной гранулированной композиции имеет место взаимодействие между компонентами, включающее и образование наноразмерных фаз требуемого состава. Технология высокоэффективна, экологически безопасна; основана на использовании простого, надежного оборудования, дешевого и доступного исходного сырья; универсальна, позволяет получать широкую гамму материалов на основе металлов практически без ограничения их по составу и обеспечивает высокую воспроизводимость результатов [17–21]. Анализ результатов работ позволяет сделать однозначный вывод, что одной из наиболее перспективных областей применения реакционного механического легирования является производство модифицирующих лигатур. Однозначным подтверждением этому служат результаты исследования, направленного на создание теории и технологии производства хромовых и хромоциркониевых бронз с использованием механически легированных модифицирующих лигатур.

**Анализ классической технологии производства хромовых бронз.** При большом многообразии бронз электротехнического назначения наиболее широко используются хромсодержащие сплавы. Удельный объем их в общей номенклатуре низколегированных медных сплавов достигает 60%. При этом наибольшее применение нашли двойные сплавы системы Cu–Cr (БрХ и БрХ08) и тройные системы Cu–Cr–Zr (БрХЦр), выпуск которых составляет около 90% от всех хромосодержащих бронз. Как показано ниже, производство этих материалов является сложным, высокотемпературным, энергоемким, экологически вредным процессом, требующим применения дорогостоящего печного оборудования, включая вакуумное, что определяет их высокую стоимость. За последние 10–15 лет она многократно увеличилась и достигает 40–50 тыс. долл. США за 1 т. В то же время промышленный выпуск этих бронз в Республике Беларусь не освоен.

Плавка медных сплавов электротехнического назначения, которые с учетом требований, предъявляемых к их свойствам условно относят к хромовым бронзам, может осуществляться с использованием лигатур или введением легирующих компонентов в элементарном виде. Первый вариант основной. Он обеспечивает выигрыш в качестве получаемых материалов, но наиболее сложный и затратный [22].

Основной лигатур для производства хромовых бронз служит медь. Как двойные (Cu-Cr, Cu-Zr, Cu-V, Cu-Nb, Cu-Ti, Cu-Ca), так и многокомпонентные (Cu-Cr-Zr, Cu-Cr-Zr-Ti, Cu-Cr-Zr-Ni) лигатуры в принципе можно производить в открытых печах, принимая соответствующие меры защиты расплава от окисления. Однако с целью повышения их качества основным методом является плавка в вакуумных индукционных тигельных печах по следующей схеме: расплавление и перегрев меди до 1350–1400 °С, введение легирующего элемента в кусковом виде, выдержка расплава до его растворения с одновременным повышением температуры до 1550–1650 °С, захлаживание расплава до температуры литья, литье. Следует отметить, что применение лигатур, произведенных под вакуумом, целесообразно и при плавке бронзы в открытых печах. В противном случае при выплавке сплава вследствие повышенного содержания шлака в лигатуре имеет место зашлаковывание основной печи. При этом расход лигатуры на плавку увеличивается примерно вдвое.

Одна из проблем, ставящая под сомнение целесообразность применения лигатур, – относительно низкое содержание в них хрома, которое не превышает 10%. В этом случае при производстве классической бронзы БрХ каждая четвертая плавка – «лигатурная». Естественно, это снижает основные показатели производства в литейном переделе, приводит к ненормально большому объему лигатурной части шихты, а, следовательно, к усложнению процесса плавки, повышению энергетических затрат. Факторами, затрудняющими промышленное производство богатой хромом лигатуры, являются необходимость применения форсированного нагрева шихты до 1700 °С, низкая текучесть расплава, большая склонность к окислению и зашлакованность печи [23].

В работах [24–27], не принимая во внимание экономическую сторону вопроса, приводятся доводы в пользу легирования компонентами в элементарном виде с использованием приведенной выше технологии, применяемой для производства лигатур. В случае плавки бронз в вакуумных печах аргументация представляется вполне обоснованной.

Хромовые бронзы можно плавить практически в любых плавильных агрегатах, обеспечивающих необходимый температурный режим. Наиболее эффективным способом является плавка в канальных индукционных печах с отливкой слитков полунепрерывным методом. Причем процесс осуществляется с использованием комплекса плавильного оборудования, состоящего из двух агрегатов. В первом агрегате, обычно представляющем собой индукционную канальную или дуговую печь, медь расплавляют, перегревают расплав до температуры, соответствующей оптимальной для легирования (1350–1450 °С), и раскисляют. Затем расплав меди переливают во второй агрегат, где и производят легирование (получение сплава). Медный расплав обычно готовят под защитным покровом древесного угля, сажи или сажефлюсовой смеси для предотвращения его окисления.

В ряде случаев применяют специальные методы плавки, включающие электрошлаковый переплав (ЭШП), вакуумно-дуговой переплав (ВДП), вакуумно-индукционную плавку (ВИП), электронно-лучевую плавку (ЭЛП) и др. Некоторые из них нашли достаточно широкое промышленное применение [28–30].

Основной технологией производства бронз на основе системы «медь–хром», включая комплексно-легируемые, является двухстадийный способ выплавки, включающий производство лигатуры и конечного материала. Узким местом, сдерживающим процесс и определяющим их высокую стоимость, а также экологическую вредность производства, является изготовление лигатур. Следует отметить, что литературные данные о получении и применении модифицирующих лигатур при производстве бронз электротехнического назначения, направленном на упрощение технологии изготовления и повышения их физико-механических свойств, отсутствуют.

Одним из перспективных методов решения проблемы является применение реакционного механического легирования, исключаящего из технологического процесса производства лигатур высокотемпературную плавку. Кроме того, анализ структурно-фазовых превращений, протекающих в композициях при обработке шихты в механореакторе и последующем ее компактировании [17–21], позволяет сделать однозначный вывод о возможности получения высоколегированных материалов, имеющих нано-/субмикроструктурный тип структуры основы с наноразмерными включениями синтезированных в процессе реализации технологии термодинамически стабильных тугоплавких соединений оксидов, карбидов и нитридов, способных эффективно выполнять роль модификаторов.

В связи с этим целью данной работы – установление закономерностей формирования фазового состава, структуры и свойств механически легированных нанокристаллических модифицирующих лигатур для производства хромовых бронз.

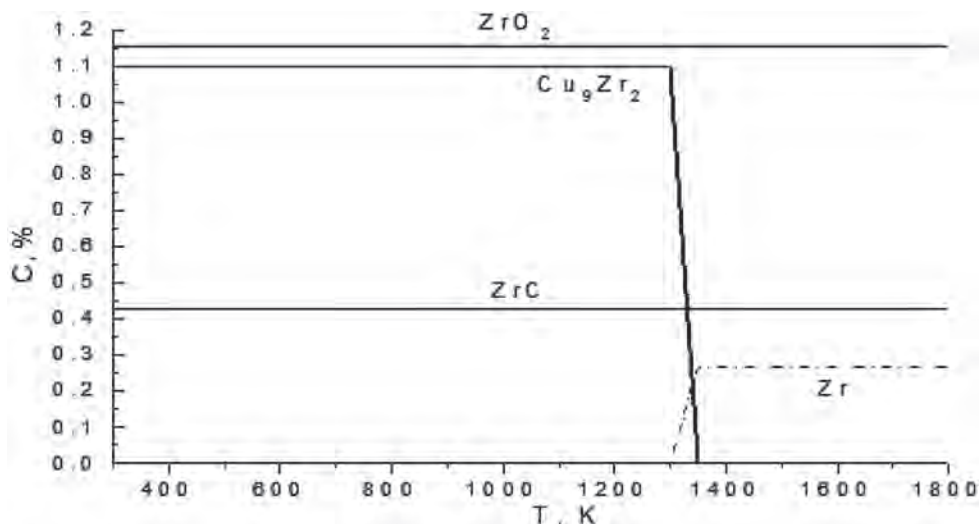


Рис 1. Влияние температуры на содержание модифицирующих фаз в механически легированной композиции «Cu – 10% Cr – 1,5% Zr – 0,3% O – 0,05% C»

### Результаты исследования

Исходными компонентами для лигатуры служили порошки меди ПМС-1 (ГОСТ 4960-75), хрома ПХ-1С (ТУ 14-1-1474-75), циркония ПЦрК-III (ТУ 48-4-234-84) и графита литейного (ГОСТ 5279-74). Размер частиц порошков меди и хрома составлял 45–63 мкм, а циркония – менее 45 мкм. Содержание компонентов в шихте изменялось в интервале: хром – 5–20%, цирконий – 0–5, графит литейный – 0–0,20%. Кроме того, во всех композициях в качестве примеси, в основном связанной в оксиды меди, присутствовал кислород в количестве 0,3–0,4%.

Процесс механического легирования проводили в защитных атмосферах  $H_2$  (ГОСТ 3022-80) или Ar (ГОСТ 10157-79).

Композиции являются реакционно-способными. Термодинамическое моделирование позволило определить адиабатическую температуру механически активируемого взаимодействия между компонентами ( $T_{ad}$ ), равновесный фазовый состав при  $T_{ad}$ , а также для изобарно-изотермических условий установить зависимость равновесного фазового состава от температуры, изменяющейся в интервале 350–1800 К [31].

В качестве примера в табл. 1 приведены значения двух первых параметров для двух базовых композиций систем «Cu–Cr–O–C» и «Cu–Cr–Zr–O–C».

Таблица 1. Результаты термодинамического расчета адиабатической температуры взаимодействия  $T_{ad}$  и равновесного состава реагирующих систем при адиабатической температуре

Химический состав композиции, %	Адиабатическая температура взаимодействия $T_{ad}$ , К	Равновесный фазовый состав при $T_{ad}$
Cu + 10% Cr + 0,3% O + 0,1% C	470	Cu(Cr) + 7,6% Cr + 0,95% Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 1,8% Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>
Cu + 10% Cr + 1,5% Zr + 0,3% O + 0,05% C	570	Cu(Cr, Zr) + 1,1% Cu <sub>9</sub> Zr <sub>2</sub> + 9,9% Cr + 1,16% ZrO <sub>2</sub> + 0,43% ZrC

Согласно результатам моделирования, в исследованных системах должны формироваться термодинамически стабильные, тугоплавкие оксиды Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub> и карбиды Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, ZrC, которые устойчивы в контакте с медной матрицей до температуры, равной 1800 К. Она существенно превышает максимальную температуру медного расплава, составляющую 1350–1450 °С. Интерметаллид Cu<sub>9</sub>Zr<sub>2</sub> сохраняется до 1350 К. Общее содержание приведенных фаз превышает 2% (рис. 1).

Лигатура, содержащая однородно распределенные нанокристаллы синтезированных фаз, должна обеспечить высокий модифицирующий эффект. Можно также обоснованно предположить, что на процесс модифицирования окажет положительное влияние наличие в структуре лигатуры субмикронных/микронных кристаллитов хрома, образующихся при механическом легировании.

Анализ результатов исследований [32–34] позволяет сделать вывод, что общие закономерности формирования фазового состава, структуры и свойств механически легированных гранулированных композиций, приведенные в [17–21], характерны и для рассматриваемых «лигатурных» систем.

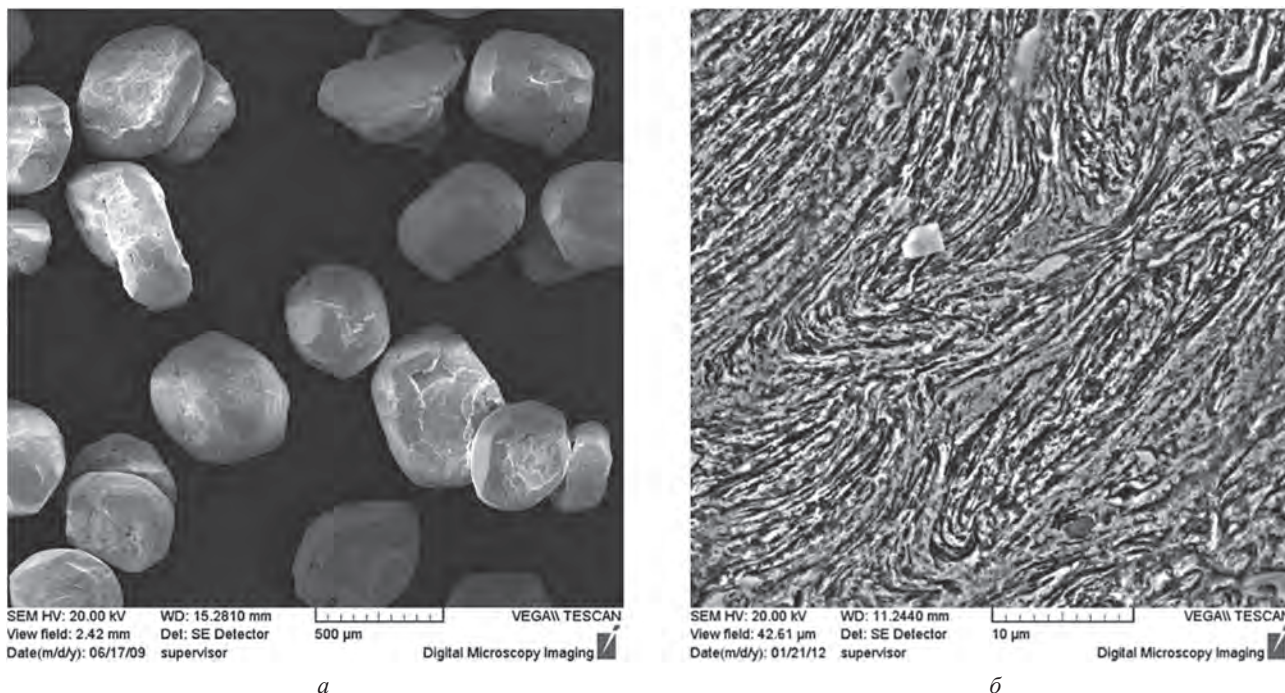


Рис. 2. Форма (а) и микроструктура (б) гранул механически легированной композиции «Cu – 10% Cr – 0,15% С»

**Исследование влияния состава шихты** на процесс механического легирования показало [32–34], что оптимальное содержание в ней хрома и графита составляет 10 и 0,15% соответственно. При производстве лигатуры для хромоциркониевой бронзы в шихту дополнительно вводили цирконий в количестве 1,5 мас.%. При увеличении содержания хрома в шихте более 10% проявляется адгезионная способность композиции по отношению к стали, что приводит к связыванию части композиции как с рабочими телами (шарами), так и стенками помольной камеры и нарушает протекание процесса механического легирования. Адгезионная способность шихты к стальным шарам и стенкам помольной камеры возрастает при дополнительном введении в нее циркония.

**Оптимальный фазовый состав, структура и свойства** механически легированных композиций приведенных выше систем формируются при следующих условиях обработки шихты в механореакторе: нормальное ускорение рабочих тел – 120–130 м·с<sup>-2</sup>; степень заполнения камеры рабочими – 70–80%; отношение объемов рабочих тел и шихты – 8–10; температура в рабочей камере – 40–50 °С; продолжительность процесса – 6–8 ч. При реализации этого процесса продуктом обработки шихты с таким содержанием компонентов является гранулированная лигатура с оптимальным размером частиц, находящемся в пределах 0,3–0,5 мм. Она имеет микрокристаллический тип структуры основы, сформировавшейся по механизму динамической возврата (рекристаллизации), стабилизированной субмикрокристаллическими включениями хрома и нанокристаллами механически синтезированных фаз.

Типичные форма и микроструктура гранул механически легированных композиций приведены на рис. 2.

Независимо от состава шихты обработка ее в механореакторе обеспечивает равномерное распределение компонентов в гранулированной композиции (рис. 3).

В механически легированных системах рентгенографическим методом и просвечивающей электронной микроскопией фиксируются исходные компоненты Cu, Cr и Zr. Анализ электронограммы и темнопольных изображений однозначно указывает на их субмикрокристаллическое строение. Электронная микроскопия не исключает также наличие таких фаз, как оксид ZrO<sub>2</sub> и карбонат ZrCO<sub>2</sub> циркония (рис. 4). Одним из возможных путей формирования их является механически активируемое взаимодействие между элементами, входящими в эти соединения.

Термодинамически обоснованные соединения ZrC и Cu<sub>3</sub>Zr в гранулированных композициях не выявляются, что указывает на незавершенность механически активированных фазовых превращений. В то же время высокая твердость гранул механически легированных лигатур (табл. 2), сохраняющаяся после отжига при температурах, достигающих 600 °С, позволяет сделать обоснованное предположение о формировании промежуточных соединений (типа зон Гинье-Престона), являющихся одними из продуктов

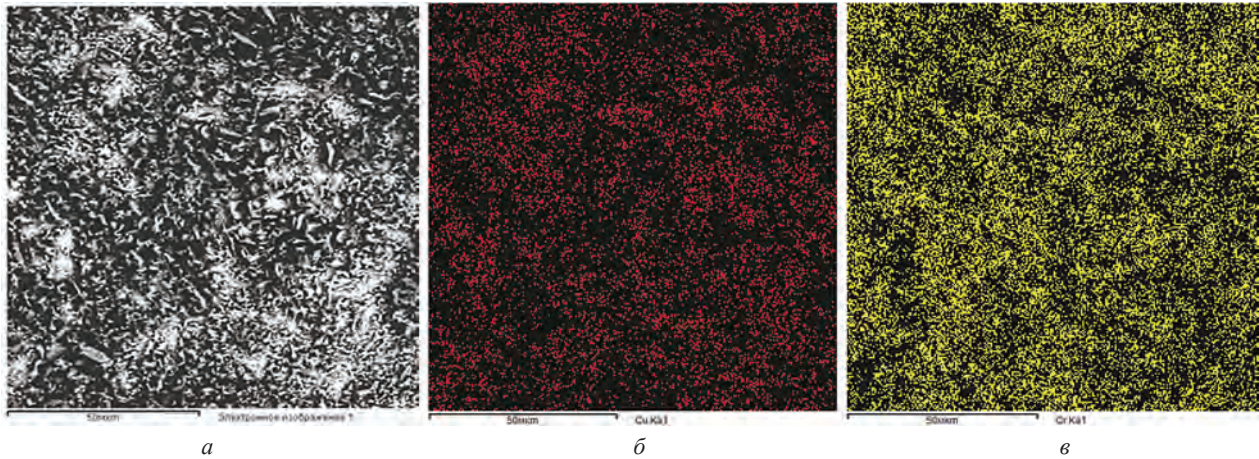


Рис. 3. Структура механически легированной композиции «Cu – 15% Cr – 0,15% C» (а) и распределение меди (б) и хрома в ней (в)

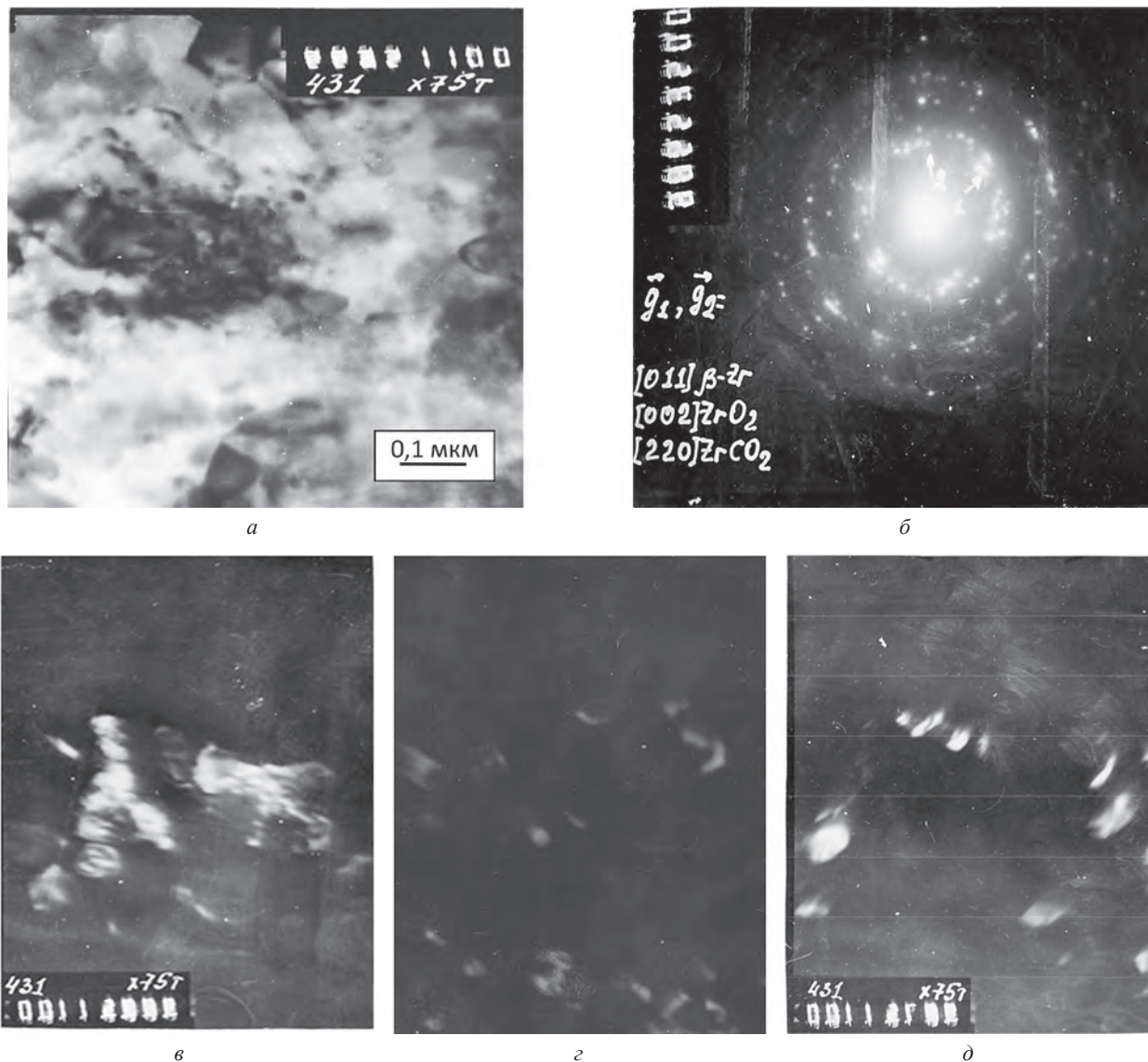


Рис. 4. Микроструктура гранул композиции «Cu – 10% Cr – 1,5% Zr – 0,15% C»: а – светлое поле; б – микроэлектроннограмма; в–д – темное поле в рефлексах фаз; в – [111] Cu; з – [111] Cr; д – [011] β-Zr, [002] ZrO<sub>2</sub>, [220] ZrCO<sub>2</sub>. (ПЭМ)

в процессе формирования термодинамически стабильных равновесных фаз. Эти соединения имеют нанокристаллическое строение и вызывают дисперсное упрочнение.

**Прогнозируемые химический состав и комплекс физико-механических свойств бронз** достигаются при введении в расплав меди лигатуры в виде прутков диаметром 10–20 мм, имеющих плотность, близкую к теоретической [35]. Наиболее эффективным способом получения их является горячая (те-

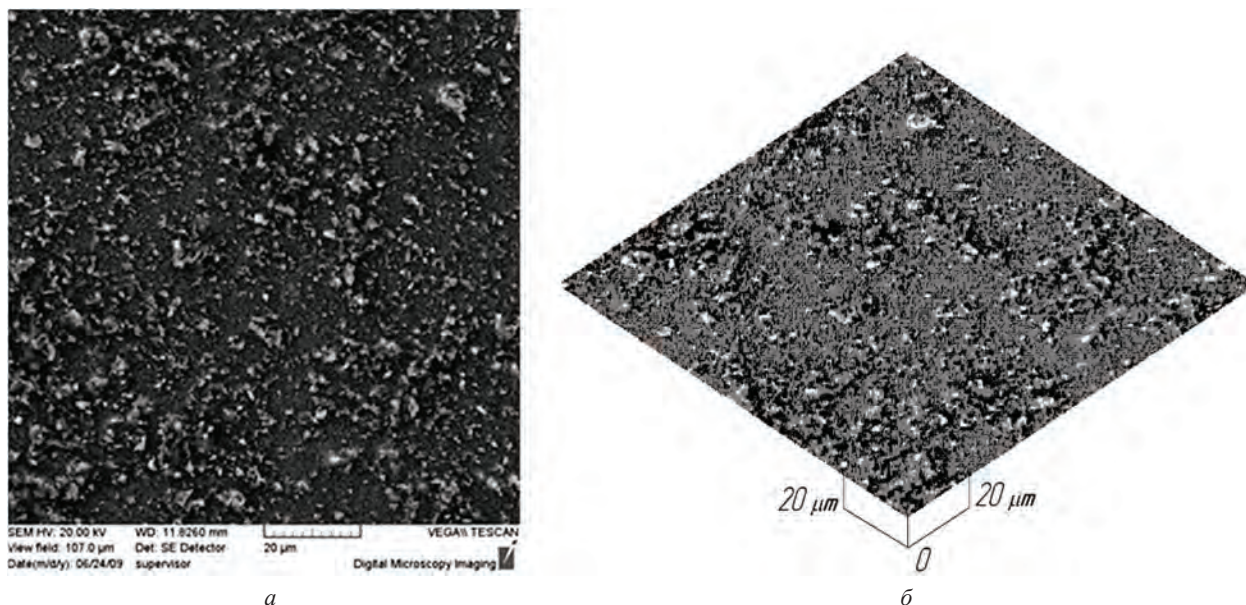


Рис. 5. Микроструктура прутка лигатуры из механически легированной композиции «Cu + 10% Cr + 0,15% C»: а – двумерное; б – 3D-изображения

Таблица 2. Микротвердость гранул механически легированной лигатуры

Состав, %	Твердость гранул HV	
	исходная	после отжига при 600 °С в течение 2 ч
Cu + 5%Cr + 0,15% C	170	120
Cu + 10% Cr + 0,15% C	260	200
Cu + 15% Cr + 0,15% C	290	240
Cu + 10% Cr + 1,5% Zr + 0,15% C	270	220

пая) экструзия холодно-прессованных брикетов плотностью 75%, подвергнутых отжигу при температуре 0,75–0,80  $T_{пл.меди}$ . Оптимальными условиями горячего прессования являются температура нагрева брикета – 750 °С, температура нагрева инструмента – 500 °С.

**Компактные материалы, полученные экструзией**, характеризуются гомогенным и дисперсным распределением элементов (рис. 5–7). Они сохраняют субмикроструктурный тип структуры гранулированных композиций. Размер зерен основы не превышает 1 мкм. Зерна, в свою очередь, разделены на блоки, величина которых составляет десятые доли микрометра. Основное количество хрома находится в виде частиц глобулярного типа размером менее 0,5 мкм. Кроме того, в структуре выявляются отдельные пластинчатые включения этого элемента длиной до 10 мкм и толщиной менее 1 мкм.

Согласно результатам ПЭМ (рис. 7), термическое воздействие, имеющее место при отжиге и горячей экструзии механически сплавленных лигатур, приводит к завершению фазовых превращений, направленных на уменьшение свободной энергии систем, продуктами которых являются нанокристаллы равновесных тугоплавких оксидов и карбидов Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, ZrC, Cr<sub>23</sub>C, а также интерметаллида Cu<sub>3</sub>Zr. Как показано выше, температура плавления оксидов и карбидов существенно превышает максимальную температуру медного расплава. Наличие указанных соединений в нанокристаллическом состоянии косвенно подтверждается также эффектом дисперсного упрочнения лигатур, определяющим их высокую жаропрочность. В зависимости от состава температура начала рекристаллизации этих материалов находится в пределах 550–700 °С. Нанокристаллы тугоплавких соединений, синтезированные в процессе получения лигатуры, эффективно выполняют роль модификаторов первого рода, обеспечивающих производство бронз с суб-/микроструктурным типом структуры основы.

Так, после полного цикла упрочняющей термомеханической обработки средний размер зерна основы бронзы БрХ, произведенной по классической технологии, находится в пределах 2,5–3,5 мкм. В то время как значение этого показателя у экспериментальной бронзы, легированной нанокристаллической механически сплавленной модифицирующей лигатурой, примерно в 15–25 раз меньше и составляет 0,1–0,2 мкм (рис. 8).

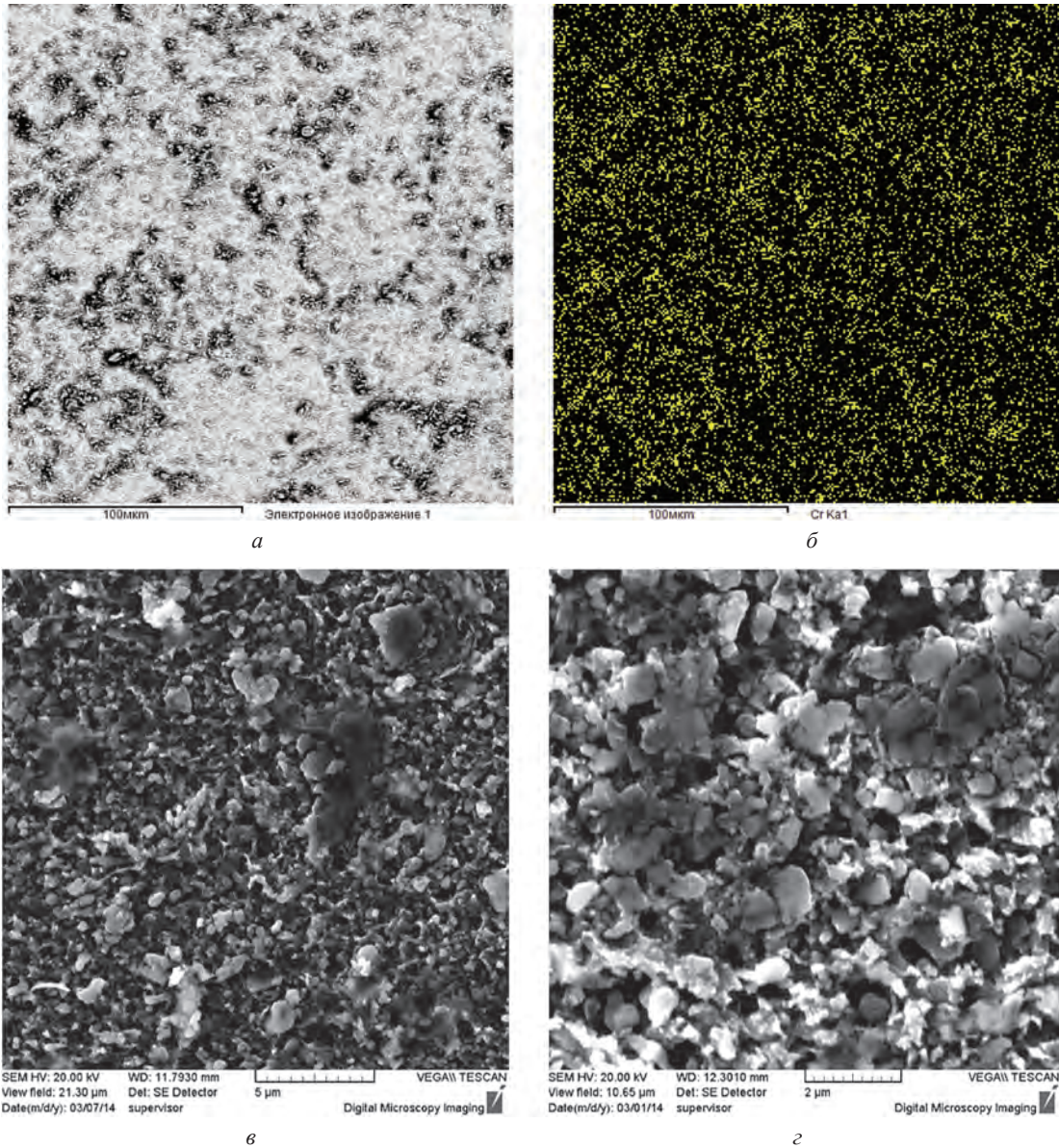


Рис. 6. Микроструктура (а, в, г) лигатуры из механически легированной композиции «Cu + 10% Cr + 0,15% C» и распределение хрома в ней (б)

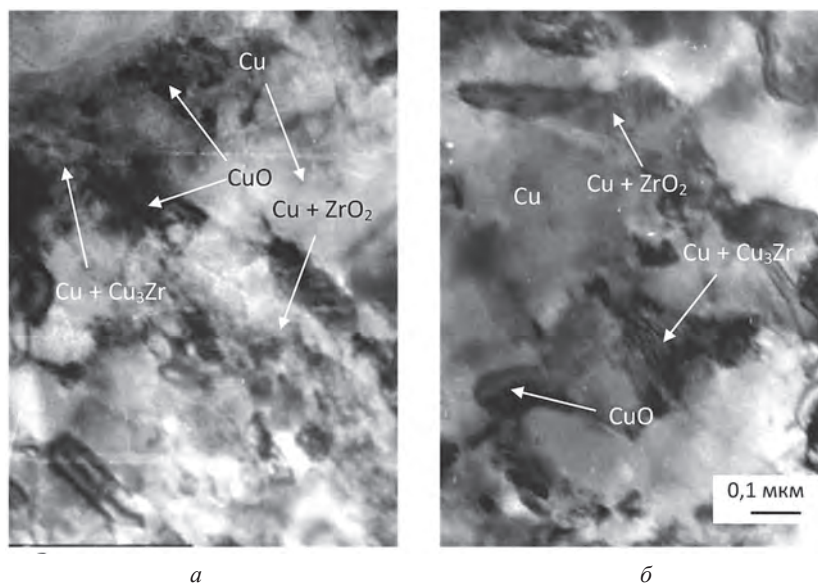


Рис. 7. Микроструктура материала из механически легированной композиции системы «Cu–Zr–O»



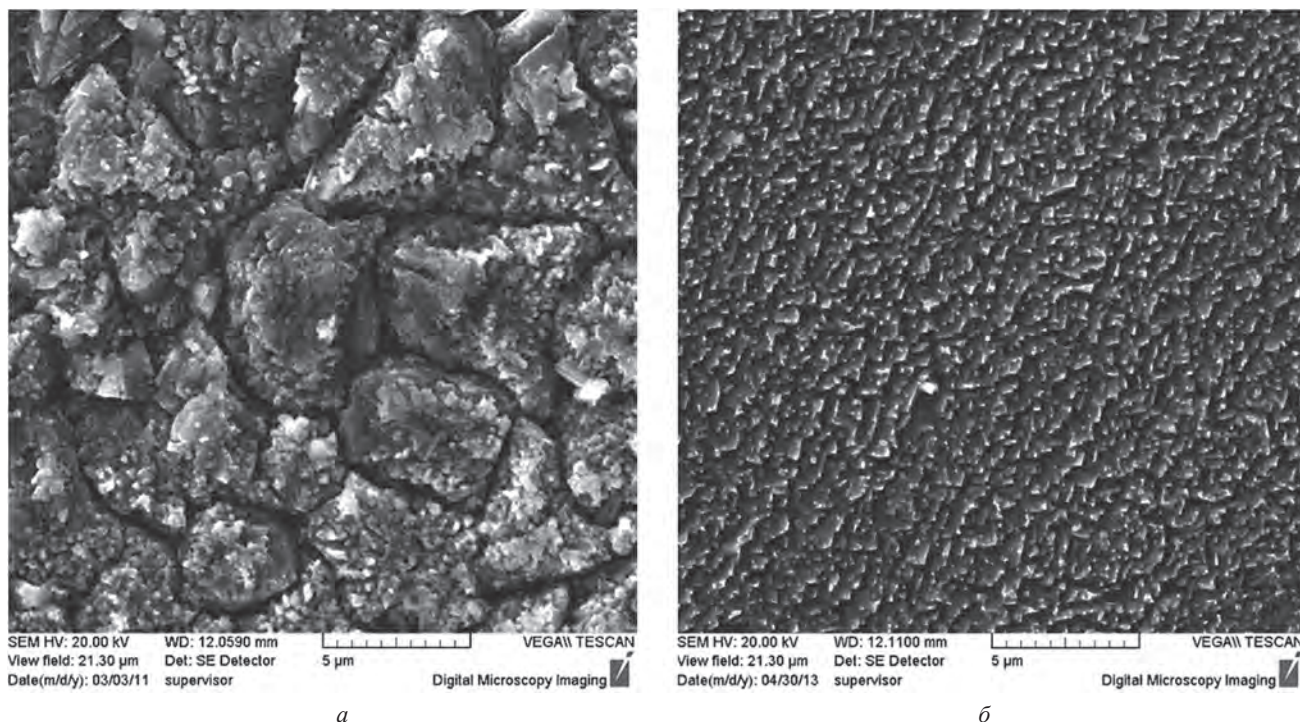


Рис. 8. Структура термически обработанной бронзы БрХ, полученной с применением классической (а) и механически легированной модифицирующей (б) лигатуры

Наряду с технологическими преимуществами, обусловленными применением механически легированных модифицирующих лигатур, формирование материалов с суб-/микроструктурным типом структуры основы приводит к существенному повышению комплекса физико-механических свойств и эксплуатационных хромовых бронз [36, 37].

### Выводы

Результаты проведенного исследования позволяют сделать вывод о высокой эффективности применения технологии, основанной на реакционном механическом легировании, для получения нанокристаллических модифицирующих лигатур и модификаторов.

При выплавке хромовых бронз применение механически легированных модифицирующих лигатур, изготовление которых отличается простотой, экологической безопасностью и универсальностью, позволяет исключить из технологии получения материалов высокотемпературный, требующий специального дорогостоящего печного оборудования, экологически опасный процесс производства литых лигатур, а также уменьшить температуру и продолжительность легирования расплава меди.

Механически легированные модифицирующие лигатуры обеспечивают формирование дисперсно-упрочненных жаропрочных материалов с суб-/микроструктурным типом структуры основы, что приводит к существенному повышению комплекса физико-механических свойств и эксплуатационных хромовых бронз.

### Литература

1. Крушенко Г. Г. Повышение качества чугунных отливок с помощью нанопорошков / Г. Г. Крушенко, И. С. Ямских, А. С. Бонченков // *Металлургия машиностроения*. 2002. № 2. С. 20–21.
2. Черепанов А. Н. Применение ультрадисперсных порошков для улучшения свойств металлов и сплавов / А. П. Черепанов, В. А. Полуобояров, А. П. Калинина // *Материаловедение*. 2000. № 10. С. 45–53.
3. Цивирко Э. И. Модифицирование наночастицами Ti(CN) отливок деталей из сплава ЖСЗДК-ВИ с пониженным содержанием углерода / Э. И. Цивирко, Н. А. Лысенко, В. В. Клочихин // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2010. № 3. С. 42–44.
4. Ловшенко Г. Ф. Повышение эффективности модифицирования серого чугуна за счет введения в состав модификатора углерода / Г. Ф. Ловшенко, О. С. Комаров, Н. И. Урбанович // *Литье и металлургия*. 2010. № 3. С. 47–50.
5. Зыкова А. П. Влияние модифицирования ультрадисперсными порошками оксидов тугоплавких металлов и криолита на структуру, механические свойства и разрушение чугуна СЧ 25 / А. П. Зыкова, Д. В. Лычагин, А. В. Чумаевский // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2014. № 11. С. 37–42.

6. **Калиниченко А. С.** Перспективы использования наноразмерных порошков для получения модифицирующих лигатур / А. С. Калиниченко, А. Г. Слуцкий, В. А. Шейнерт // *Литье и металлургия*. 2015. № 1. С. 65–73.
7. **Калиниченко А. С.** Использование модифицирующей лигатуры, содержащей нанодисперсные порошки активных элементов при получении высокопрочного чугуна с шаровидным графитом / А. С. Калиниченко, А. Г. Слуцкий, В. А. Шейнерт // *Литье и металлургия*. 2015. № 3. С. 101–106.
8. **Комаров О. С.** Наноразмерные и ультрадисперсные частицы в литейных технологиях / О. С. Комаров, В. И. Волосатиков, И. Б. Проворова // *Литье и металлургия*. 2014. № 2. С. 42–46.
9. **Марукович Е. И.** Модифицирование сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко. Минск: Беларуская навука, 2009. 217 с.
10. **Гуляев Б. Б.** Иерархия структур и механические свойства литой стали / Б. Б. Гуляев, Е. Н. Пряхин, В. М. Колокольцев // *Литейное производство*. 1986. № 10. С. 9–11.
11. **Манаков Н. А.** Доменная структура и гистерезисные свойства мелкозернистых сплавов высокоазотистых редкоземельных магнетиков / Н. А. Манаков, Г. В. Корзикова, В. В. Столяров // *Физика металлов и материаловедение*. 1992. № 2. С. 21–26.
12. **Модификация** структурных состояний в условиях интенсивного внешнего воздействия в никелиде титана / А. А. Клопотов [и др.] // *Изв. вузов. Физика*. 1992. № 12. С. 3–7.
13. **Иванов Ю. Ф.** Электронно-микроскопический анализ нанокристаллических материалов / Ю. Ф. Иванов, А. В. Пауль, Н. А. Конева // *Физика металлов и материаловедение*. 1991. № 7. С. 206–208.
14. **Порошковая** металлургия. Материалы, технология, свойства, применение: справ. / И. М. Федорченко [и др.]. Киев: Наукова думка, 1985. 624 с.
15. **Лиопо В. А.** Введение в физику наноразмерных частиц / В. А. Лиопо, В. А. Струк, С. В. Авдейчик // *Промышленность региона: проблемы и перспективы инновационного развития*. Гродно: ГГАУ, 2008. С. 223–272.
16. **Композиционные** материалы: справ. / Под ред. Д. М. Карпиноса. Киев: Наукова думка, 1985. 592 с.
17. **Витязь П. А.** Механически легированные сплавы на основе алюминия и меди / П. А. Витязь, Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко. Минск: Беларуская навука, 1998. 352 с.
18. **Ловшенко Г. Ф.** Наноструктурные механически легированные материалы на основе металлов / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко, Б. Б. Хина. Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2008. 679 с.
19. **Ловшенко Г. Ф.** Теоретические и технологические аспекты создания наноструктурных механически легированных материалов на основе металлов / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко. Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2005. 276 с.
20. **Ловшенко Ф. Г.** Наноструктурные механически легированные материалы на основе никеля / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко. Минск: БНТУ, 2012. 297 с.
21. **Ловшенко Ф. Г.** Композиционные наноструктурные механически легированные порошки для газотермических покрытий / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко. Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2013. 216 с.
22. **Николаев А. К.** Хромовые бронзы / А. К. Николаев, А. И. Новиков, В. М. Розенберг. М.: Металлургия, 1983. 175 с.
23. **Гофеншефер Л. И.** Получение сплава меди, содержащего до 25% хрома, методом открытой индукционной плавки / Л. И. Гофеншефер, В. М. Чурсин, В. И. Рыжов // *Цветные металлы*. 1981. № 9. С. 90–91.
24. **Головешка В. Ф.** Влияние условий плавки на растворение хрома в жидкой меди / Ф. Г. Головешка, Л. Н. Сергеев // *Цветные металлы*. 1972. № 10. С. 63–65.
25. **Стрельцов Ф. Н.** Пути снижения угара циркония и стабилизации состава цирконийсодержащих бронз при открытой плавке в канальных печах / Ф. Н. Стрельцов, Р. М. Фридлянский, В. И. Красных // *Плавка и литье цветных металлов и сплавов*. М.: Металлургия, 1980. № 63. С. 28–32.
26. **Вакуумная** плавка медных сплавов / Р. М. Фридлянский [и др.]. М.: Цветметинформация, 1974. 88 с.
27. **Белоусов Н. П.** Растворение хрома в жидкой меди / Н. П. Белоусов, Л. Н. Сергеев, Б. И. Хныжов // *Цветные металлы*. 1978. № 4. С. 61–62.
28. **Молдавский О. Д.** Влияние метода выплавки на технологичность, физико-механические и эксплуатационные свойства медных сплавов / О. Д. Молдавский // *Цветные металлы*. 1981. № 11. С. 33–35.
29. **Молдавский О. Д.** Электрошлаковый переплав тяжелых цветных металлов. М.: Металлургия, 1980. 200 с.
30. **Стрельцов Ф. Н.** Перспективы применения плазменных печей для выплавки медных сплавов / Ф. Н. Стрельцов, А. А. Клевцов // *Цветные металлы*. 1980. № 7. С. 101–104.
31. **Термодинамическое** моделирование гетерогенного взаимодействия при механическом легировании в системах на основе меди / Ф. Г. Ловшенко [и др.] // *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2012. № 1. С. 23–34.
32. **Ловшенко Ф. Г.** Закономерности формирования механически легированных гранулированных лигатур системы «медь-хром» / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, И. А. Лозиков // *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2014. № 2. С. 49–59.
33. **Ловшенко Ф. Г.** Получение механически легированных наноструктурных модифицирующих лигатур для производства высокопрочных субмикроструктурных бронз электротехнического назначения / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, И. А. Лозиков // *Литье и металлургия*. 2013. № 2. С. 115–126.
34. **Ловшенко Ф. Г.** Научные принципы создания высокостойких хромовых бронз электротехнического назначения с применением технологии, сочетающей реакционное механическое легирование и литье / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, И. А. Лозиков // *Перспективные технологии*. Витебск: УО «ВГТУ», 2011. Гл. 10. С. 214–233.
35. **Ловшенко, Ф. Г.** Оптимизация условий экструзии механически легированных композиций «медь-хром» и закономерности формирования структуры, фазового состава и свойств материалов из них / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, И. А. Лозиков // *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2014. № 2. С. 49–59.
36. **Ловшенко Ф. Г.** Бронзы электротехнического назначения и особенности их производства / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, И. А. Лозиков // *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2012. № 3. С. 36–52.
37. **Ловшенко Ф. Г.** Литье хромсодержащие бронзы, получаемые с применением механически легированных лигатур / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, И. А. Лозиков // *Литье и металлургия*. 2012. № 3. С. 131–135.

## References

1. **Krushenko G. G., Yamskikh I. S., Bonchenkov A. S.** Povyshenie kachestva chugunnykh otlivok s pomoshch'yu nanoporoshkov [Improving the quality of cast-iron foundries using nanopowders]. *Metallurgiya mashinostroeniya = Metallurgy Engineering*, 2002, no. 2, pp. 20–21.
2. **Cherepanov A. N., Poluboyarov V. A., Kalinina A. P.** Primenenie ul'tradispersnykh poroshkov dlya uluchsheniya svoystv metallov i splavov [Application of superdispersed powder to improve the properties of metals and alloys]. *Materialovedenie = Materials sciences*, 2000, no. 10, pp. 45–53.
3. **Tsivirko E. I., Lysenko N. A., Klachikhin V. V.** Modifitsirovanie nanochastitsami Ti(CN) otlivok detaley iz splava ZhS3DK-VI s ponizhennym sodержaniem ugleroda [Modification nanoparticles Ni (CN) alloy foundings parts ZhS3DK-VI with reduced carbon content]. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh technologiy = Eastern European Journal of advanced technologies*, 2010, no. 3, pp. 42–44.
4. **Lovshenko G. F., Komarov O. S., Urbanovich N. I.** Povyshenie effektivnosti modifitsirovaniya serogo chuguna za schet vvedeniya v sostav modifikatora ugleroda [Increase of effectiveness of modifying the cast iron due to the introduction of the carbon modifier]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2010, no. 3, pp. 47–50.
5. **Zykova A. P., Lychagin A. D., Chumaevesky A. V.** Vliyanie modifitsirovaniya ul'tradispersnymi poroshkami oksidov tugo-plavkikh metallov i kriolita na strukturu, mekhanicheskie svoystva i razrushenie chuguna SCh 25 [Influence of modifying ultradispersed powders of oxides of refractory metals and cryolite on the structure, mechanical properties and fracture iron MF 25]. *Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya = Math. Universities. Ferrous metallurgy*, 2014, no. 11, pp. 37–42.
6. **Kalinichenko A. S., Slutsky A. G., Sheynert V. A.** Perspektivy ispol'zovaniya nanorazmernykh poroshkov dlya polucheniya modifitsiruyushchikh ligatur [Prospects for the use of nanodimension powders for receiving of modifying ligatures]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2015, no. 1, pp. 65–73.
7. **Kalinichenko A. S., Slutsky A. G., Sheynert V. A.** Ispol'zovanie modifitsiruyushchey ligatury, sodержashchey nanodispersnye poroshki aktivnykh elementov pri poluchenii vysokoprochnogo chuguna s sharovidnym grafitom [Using modifying ligatures containing nanodispersed, powders of active elements in the receiving of high-strength globular graphite]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2015, no. 3, pp. 101–106.
8. **Komarov O. S., Volosatikov V. I., Provorova I. B.** Nanorazmernye i ul'tradispersnye chastitsy v liteynykh tekhnologiyakh [Nanodimension and ultradispersed particles in the foundry technologies]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2014, no. 2, pp. 42–46.
9. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu.** Modifitsirovanie splavov [Modifying alloys]. Minsk, Belarusian Navuka Publ., 2009, 217 p.
10. **Gulyaev B. B., Pryahin E. N., Kolokoltsov V. M.** Ierarkhiya struktur i mekhanicheskie svoystva litoi stali [The hierarchy of structures and mechanical properties of cast steel]. *Liteynoe proizvodstvo = Foundry*, 1986, no. 10, pp. 9–11.
11. **Manakov N. A., Korzikova G. V., Stolyarov V. V.** Domennaya struktura i gisterezisnye svoystva melkozernistykh splavov vysokoazotistykh redkozemel'nykh magnetikov [Domain structure and hysteresis properties of High-grained alloys of rare-earth magnets]. *Fizika metallov i materialovedenie = Physics of Metals and Materials*, 1992, no. 2, pp. 21–26.
12. **Klopotov A. A. et al.** Modifikatsiya strukturnykh sostoyaniy v usloviyakh intensivnogo vneshnego vozdeystviya v nikelide titana [Modification of structural states in the intensive external influence in the NiTi]. *Izv. vuzov. Fizika = Math. Universities. Physics*, 1992, no. 12, pp. 3–7.
13. **Ivanov Yu. F., Paul A. V., Koneva N. A.** Elektronno-mikroskopicheskiy analiz nanokristallicheskiykh materialov [Electron microscopic analysis of nanocrystalline materials]. *Fizika metallov i materialovedenie = Physics of Metals and Metallography*, 1991, no. 7, pp. 206–208.
14. **Poroshkovaya metallurgiya. Materialy, tekhnologiya, svoystva, primenenie** [Powder metallurgy. Materials, technology, properties and application]. Kiev, Navukova Dumka Publ., 1985, 624 p.
15. **Liopo V. A., Struk V. A., Avdeychik S. V.** *Vvedenie v fiziku nanorazmernykh chastits* [Leading in to the physics of nanodimension elements]. Industry Region: Problems and perspectives of innovation development. Grodno, 2008, pp. 223–272.
16. **Kompozitsionnye materialy. Spravochnik. Pod red. D. M. Karpinosa** [Composite materials]. A handbook. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1985, 592 P.
17. **Vityaz' P. A., Lovshenko F. G., Lovshenko G. F.** *Mekhanicheski legirovannye splavy na osnove alyuminiya i medi* [The mechanically alloyed aluminum-based alloys and copper]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 1998, 352 p.
18. **Lovshenko G. F., Lovshenko F. G., Khina B. B.** *Nanostrukturnye mekhanicheski legirovannye materialy na osnove metallov* [Nanostructured mechanically alloyed materials metals-based]. Mogilev, Belarus.-Ros. University Publ., 2008, 679 p.
19. **Lovshenko G. F., Lovshenko F. G.** *Teoreticheskie i tekhnologicheskie aspekty sozdaniya nanostrukturnykh mekhanicheski legirovannykh materialov na osnove metallov* [Theoretical and technological aspects of nanostructured mechanically alloyed materials metals-based]. Mogilev, Belarus.-Ros. University Publ., 2005, 276 p.
20. **Lovshenko F. G., Lovshenko G. F.** *Nanostrukturnye mekhanicheski legirovannye materialy na osnove nikelya* [Nanostructured materials are mechanically alloyed nickel-based]. Minsk, National Technical University Publ., 2012, 297 p.
21. **Lovshenko F. G., Lovshenko G. F.** *Kompozitsionnye nanostrukturnye mekhanicheski legirovannye poroshki dlya gazotermicheskikh pokrytiy* [Composite nanostructured mechanically alloyed powders for gas-thermal coverings]. Mogilev, Belarus.-Ros. University Publ., 2013, 216 p.
22. **Nikolaev A. K., Novikov A. I., Rozenberg V. M.** *Khromovye bronzy* [Chrome Bronze]. Moscow, Metallurgy Publ., 1983, 175 p.
23. **Gofenshefer L. I., Chursin V. M., Ryzhov V. I.** Poluchenie splava medi, sodержashchego do 25% khroma, metodom otkrytoy induktsionnoy plavki [Receiving of copper alloy containing up to 25% chromium, the open method of induction melting]. *Zvetnye metally = Nonferrous metals*, 1981, no. 9, pp. 90–91.
24. **Goloveshka V. F., Sergeev L. N.** Vliyanie usloviy plavki na rastvorenje khroma v zhidkoy medi [Influence of smelting conditions of the dissolution of chromium in liquid copper]. *Zvetnye metally = Nonferrous metals*, 1972, no. 10, pp. 63–65.

25. **Strel'tsov F. N., Fridlyansky P. M., Krashykh V. I.** Puti snizheniya ugara tsirkoniya i stabilizatsii sostava tsirkoniysoderzhashchikh bronz pri otkrytoy plavke v kanal'nykh pechakh [Ways to reduce wastes of zirconium and zirconium-containing stabilizing composition bronze at open smelting furnaces in the channel]. *Sb. trudov «Plavka i lit'e tsvetnykh metallov i splavov» = Melting and casting of non-ferrous metals and alloys*, Moscow, Metallurgy Publ., 1980, no. 63, pp. 28–32.
26. **Vakuumnaya plavka mednykh splavov** [Vacuum melting copper alloys]. R. M. Fridlyansky [et al.]. Moscow, Tsvetmetinformatsiya Publ., 1974, 88 p.
27. **Belousov N. P., Sergeev L. N., Hnyzhov B. I.** Rastvorenienie khroma v zhidkoy medi [Dissolution of chromium in liquid copper]. *Tsvetnye metally = Nonferrous metals*, 1978, no. 4, pp. 61–62.
28. **Moldavskiy O. D.** Vliyanie metoda vyplavki na tekhnologichnost', fiziko-mekhanicheskie i ekspluatatsionnye svoystva mednykh splavov [The impact of the method of smelting on manufacturability, physical, mechanical and performance properties of copper alloys]. *Tsvetnye metally = Nonferrous metals*, 1981, no. 11, pp. 33–35.
29. **Moldavskiy O. D.** *Elektroshlakovyy pereplav tyazhelykh tsvetnykh metallov* [Electroslag remelting of heavy non-ferrous metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1980, 200 p.
30. **Strel'tsov F. N., Klevtsov A. A.** Perspektivy primeneniya plazmennyykh pechey dlya vyplavki mednykh splavov [Prospects for the use of plasma furnaces for melting copper alloys]. *Tsvetnye metally = Nonferrous metals*, 1980, no. 7, pp. 101–104.
31. **Lovshenko F. G. et al.** Termodinamicheskoe modelirovanie geterogennogo vzaimodeystviya pri mekhanicheskom legirovanii v sistemakh na osnove medi [Thermodynamic modeling of heterogeneous interaction during mechanical at mechanical alloyage in the copper-based systems]. *Vestnik Bel.-Ros. Universiteta = Bulletin of the Belarusian-Russian University*, 2012, no. 1, pp. 23–34.
32. **Lovshenko F. G., Lovshenko G. F., Lozikov I. A.** Zakonomernosti formirovaniya mekhanicheski legirovannykh granulirovannykh ligatur sistema «med'-khrom» [Regularities of formation of mechanically alloyed granular ligatures system «copper-chrome»]. *Vestnik Bel.-Ros. Universiteta = Bulletin of the Belarusian-Russian University*, 2014, no. 2, pp. 49–59.
33. **Lovshenko F. G., Lovshenko G. F., Lozikov I. A.** Poluchenie mekhanicheski legirovannykh nanostrukturnykh modifitsiruyushchikh ligatur dlya proizvodstva vysokoprochnykh submikrokristallicheskiykh bronz elektrotekhnicheskogo naznacheniya [Getting mechanically alloyed nanostructure modifying alloys for the production of high-strength bronzes submicrocrystalline electrotechnical designation]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2013, no. 2, pp. 115–126.
34. **Lovshenko F. G., Lovshenko G. F., Lozikov I. A.** Nauchnye printsipy sozdaniya vysokostoykikh khromovykh bronz elektrotekhnicheskogo naznacheniya s primeneniem tekhnologii, sochetayushchey reaktsionnoe mekhanicheskoe legirovanie i lit'ye [Scientific principles of creating highly resistant chrome bronze for electrical purposes with the use of technology, combining reactionary mechanical alloying and casting]. *Perspektivnye tehnologii = Advanced technologies*, Vitebsk, 2011, pp. 214–233.
35. **Lovshenko F. G., Lovshenko G. F., Lozikov I. A.** Optimizatsiya usloviy ekstruzii mekhanicheski legirovannykh kompozitsiy «med'-khrom» i zakonomernosti formirovaniya struktury, fazovogo sostava i svoystv materialov iz nikh [Optimization of conditions for the extrusion of mechanically alloyed compositions «copper-chrome» and the laws of formation of the structure, phase composition and properties of these materials]. *Vestnik Bel.-Ros. Universiteta = Bulletin of the Belarusian-Russian University*, 2014, no. 2, pp. 49–59.
36. **Lovshenko F. G., Lovshenko G. F., Lozikov I. A.** Bronzy elektrotekhnicheskogo naznacheniya i osobennosti ikh proizvodstva [Bronzes of electrical devices and the characteristics of their production]. *Vestnik Bel.-Ros. Universiteta = Bulletin of the Belarusian-Russian University*, 2012, no. 3, pp. 36–52.
37. **Lovshenko F. G., Lovshenko G. F., Lozikov I. A.** Litye khromsoderzhashchie bronzy, poluchaemye s primeneniem mekhanicheski legirovannykh ligatur [Chromium alloy of bronze, obtained through the use of mechanically alloyed ligatures]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2012, no. 3, pp. 131–135.