



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-96-105>
УДК 621.762

Поступила 19.12.2022
Received 19.12.2022

ПОЛУЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИ СПЛАВЛЕННЫХ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ЛИГАТУР С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ЛЕГИРУЮЩЕГО КОМПОНЕНТА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ХРОМОВЫХ БРОНЗ

Ф. Г. ЛОВШЕНКО, И. А. ЛОЗИКОВ, Белорусско-Российский университет,
г. Могилев, Беларусь, пр. Мира, 43. E-mail: lozikkoff@yandex.by

В работе приведены результаты исследования закономерностей формирования гранулометрического состава, структуры и свойств модифицирующих лигатур с высоким содержанием легирующего компонента для производства хромовых бронз. Изучена кинетика изменений физико-механических свойств гранулированных композиций в зависимости от температуры в помольной камере и отношения объема рабочих тел к объему шихты. Представлены результаты топографии гранул и их структуры, показывающие, что полученные по оптимальному режиму механического сплавления гранулы представляют собою плотные тела с микровключениями хрома, максимальный размер которых не превышает 15-20 мкм.

По результатам проведенного термодинамического моделирования установлены термодинамически обоснованные тугоплавкие соединения, синтезированные в процессе получения лигатуры, которые должны эффективно выполнять роль модификаторов первого рода, обеспечивая производство бронз с суб-/микроструктурным типом структуры основы.

Осуществлена оптимизация процессов компактирования механически сплавленных композиций и исследовано влияние основных технологических факторов – температуры нагрева холоднопрессованных брикетов и коэффициента вытяжки при горячем прессовании на физико-механические свойства компактных материалов. Представлены результаты изучения структуры и свойств наиболее перспективной композиции Си – 20%Cr, позволяющие выявить ее микроструктурный тип, сохраняющийся после длительного высокотемпературного воздействия при переработке гранулированной композиции в полуфабрикат, и сделать вывод о дисперсном характере ее упрочнения, что дополнительно подтверждает данные термодинамического моделирования о возможности механического синтеза нанокристаллов тугоплавких соединений для выполнения роли модификаторов.

По результатам исследований выполнен сравнительный анализ свойств разработанной лигатуры и бериллиевой бронзы, устанавливающие возможность ее применения в качестве самостоятельного материала электротехнического назначения.

Ключевые слова. Получение, состав, структура, свойства, субмикроструктурные модифицирующие лигатуры, хромовые бронзы.

Для цитирования. Ловшенко, Ф. Г. Получение механически сплавленных модифицирующих лигатур с высоким содержанием легирующего компонента для производства хромовых бронз / Ф. Г. Ловшенко, И. А. Лозиков // *Литье и металлургия*. 2023. № 1. С. 96–105. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-96-105>.

OBTAINING MECHANICALLY FUSED MODIFYING LIGATURES WITH A HIGH CONTENT OF ALLOYING COMPONENT FOR THE PRODUCTION OF CHROME BRONZES

F. G. LOVSHENKO, I. A. LOZIKOV, Belarusian-Russian University,
Mogilev, Belarus, 43, Mira ave. E-mail: lozikkoff@yandex.by

The paper presents the results of a study of the regularities of the formation of granulometric composition, structure and properties of modifying ligatures with a high content of alloying component for the production of chrome bronzes. The kinetics of changes in the physico-mechanical properties of granular compositions depending on the temperature in the grinding chamber and the ratio of the volume of working bodies to the volume of the charge has been studied. The results of the topography of granules and their structure are presented, showing that the granules obtained according to the optimal mode of mechanical fusion are dense bodies with microinclusions of chromium, the maximum size of which does not exceed 15–20 microns.

Based on the results of thermodynamic modeling, thermodynamically justified refractory compounds synthesized in the process of obtaining a ligature have been established, which should effectively perform the role of modifiers of the first kind, ensuring the production of bronzes with a sub-/microcrystalline type of base structure.

The processes of compacting mechanically fused compositions were optimized and the influence of the main technological factors – the heating temperature of cold-pressed briquettes and the extraction coefficient during hot pressing on the physical and mechanical properties of compact materials was investigated. The results of studying the structure and properties of the most promising Cu – 20%Cr composition are presented, which make it possible to identify its microcrystalline type, which persists after prolonged high-temperature exposure during the processing of the granular composition into a semi-finished product, and to conclude about the dispersed nature of its hardening, which additionally confirms the data of thermodynamic modeling on the possibility of mechanical synthesis of nanocrystals of refractory compounds to perform the role of modifiers.

According to the results of the research, a comparative analysis of the properties of the developed ligature and beryllium bronze was performed, establishing the possibility of its use as an independent material for electrical purposes. Keywords. Production, composition, properties, submicrocrystalline modifying ligatures, chrome bronzes.

For citation. Lovshenko F. G., Lozikov I. A. Obtaining mechanically fused modifying ligatures with a high content of alloying component for the production of chrome bronzes. *Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 1, pp. 96-105. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-96-105>.

Введение

На сегодняшний день в Республике Беларусь остро стоит задача получения специальных жаропрочных низколегированных медных сплавов электротехнического назначения, предназначенных для изготовления рабочего инструмента для всех видов машин контактной точечной, рельефной и шовной сварки. При достаточно большом выборе бронз этого типа наиболее применяемыми являются хромовые и хромоциркониевые бронзы: БрХ и БрХЦр [1–4]. В качестве базовой технологии их производства служит двухстадийный способ плавки, состоящий из подготовки лигатуры и выплавки конечного материала. Проблемным местом, усложняющим процесс и определяющим высокую стоимость сплавов, а также экологическую безопасность производства, является изготовление лигатуры. Кроме того, классические бронзы обладают ограниченным комплексом физико-механических свойств, повысить который существующими методами термической и термомеханической обработки не представляется возможным.

Одним из перспективных методов решения проблемы является применение разработанного в Белорусско-Российском университете метода реакционного механического сплавления, исключаящего из технологического процесса производства лигатур высокотемпературную плавку и обеспечивающего высокий модифицирующий эффект, позволяющий повысить свойства, в первую очередь жаропрочность получаемых бронз [5–13].

Однако применяемая в настоящее время технология позволяет уверенно получать модифицирующие лигатуры с содержанием базового легирующего компонента – хрома до 10%. Для повышения эффективности процесса и снижения себестоимости производства изделий электротехнического назначения требуется довести концентрацию хрома в промышленной лигатуре минимум до 20%.

Целью работы являлось исследование влияния условий обработки шихты в механореакторе и последующего компактирования на морфологию, структуру, фазовый состав и свойства механически сплавленных модифицирующих лигатур с 20%-ным содержанием основного легирующего компонента.

Материалы, оборудование, приборы и методы исследования

Синтез материалов осуществляли с применением порошка меди ПМС-1 (ГОСТ 4960-75, хрома ПХ-1С (ТУ 14-1-1474-75) и циркония ПЦрК-III (ТУ 48-4-234-84). Размер частиц порошков меди и хрома составлял 45–63 мкм, а циркония – менее 45 мкм. Кроме перечисленных элементов, во всех композициях в качестве примеси в основном связанной в оксиды меди, присутствовал кислород в количестве 0,3–0,4%. Содержание компонентов в шихте доводили до оптимального и составляло: хрома – 20%, циркония – до 0,5%. Цирконий вводили как вспомогательный элемент – протектор, повышающий усвоение хрома при плавке бронз. В качестве поставщика углерода для протекания механохимических реакций применяли 0,1–0,3% изопропилового спирта. На этапе компактирования добавляли бор с целью последующего дополнительного раскисления расплава медной основы.

Реакционное механическое сплавление выполняли в механореакторе – вибротельнице с четырьмя водоохлаждаемыми рабочими камерами объемом 2 дм³ каждая. Процесс осуществляли во внутреннем пространстве герметичной камеры из низкоуглеродистой стали. Размалывающими телами служили стальные шары твердостью 62–64 HRC и диаметром 9–10 мм. Продуктом механического сплавления являлась гранулированная композиция.

Ситовой анализ осуществляли стандартным набором сит от 0,045 до 1,000 мм. Микротвердость исследовали на микротвердомере «Micromer-2» при нагрузках на пирамиду 0,49 и 0,98 Н.

Металлографический анализ и исследование элементного состава проводили на микроскопе «Tescan VEGA II SBH» (Чехия) с системой энергодисперсионного микроанализа «INCA ENERGY 350/XT» с безазотным детектором X-Act ADD (OXFORD Instruments NanoAnalysis, Великобритания) при линейном непрерывном и шаговом сканировании, а также сканировании по площади.

Результаты исследований

Ранее проведенные исследования [5–13] показывают, что в процессе обработки порошковой смеси в вибрационно-инерционном механореакторе одновременно протекают два противоположных процесса: разрушение частиц за счет накопления дефектов кристаллического строения, возникающих при пластической деформации, и соединение образующихся осколков вследствие действия ван-дер-ваальсовых и электростатических сил, получающих развитие при контакте свежих неокисленных поверхностей. Механическое ударное воздействие рабочих тел на агломерированные частицы композиции приводит к сварке, сопровождающейся взаимной диффузией и химическим взаимодействием между компонентами. При многократно повторяющихся процессах разрушения и сварки формируется новый вид материала – гранулированная композиция, в которой исходные компоненты или продукты их взаимодействия связаны и равномерно распределены между собой.

При этом необходимо учитывать, что механохимические реакции при механическом сплавлении протекают только в поверхностном слое гранул, глубина которого не превышает 0,2 мм. В гранулах диаметром более 0,4 мм во внутренней зоне механически активируемые реакции развития не получают, и с увеличением размера частиц полнота превращений в обрабатываемой композиции в целом уменьшается. В то же время недостатком мелкогранулированных лигатур является повышенная окисляемость поверхности при хранении. Введение такой лигатуры в расплав для формирования сплава приводит к восстановлению оксида меди с выделением кислорода, который, взаимодействуя с легирующими элементами – хромом и цирконием, окисляет их. Для предотвращения высоких потерь вводимых элементов на угар и переход в шлак размер гранул механически сплавленной лигатуры должен быть как можно большим. Установлено, что оптимальный диаметр гранул находится в пределах 0,4–0,5 мм для того, чтобы, с одной стороны, в достаточной степени могли протекать механохимические процессы для образования модифицирующих фаз, а с другой – частицы имели минимальную поверхность для окисления.

Исходя из этого, на первом этапе проводили исследование влияния ускорения рабочих тел, степени заполнения помольной камеры рабочими телами, соотношения между объемами, занимаемыми рабочими телами и шихтой, времени обработки шихты, температуры помольной камеры на процесс гранулирования композиций при максимальном содержании легирующего компонента. Критерием оценки достигаемых результатов были вид получаемых гранул и их свойства. Установлено, что наиболее действенными факторами, оказывающими влияние на формирование механически сплавленных гранул, являются химический состав композиции, ее температура, а также отношение рабочих тел к объему шихты.

Результаты исследований изменения свойств гранулированной композиции Cu + 20% Cr в зависимости от температуры в помольной камере и отношения объема рабочих тел к объему шихты приведены на рис. 1.

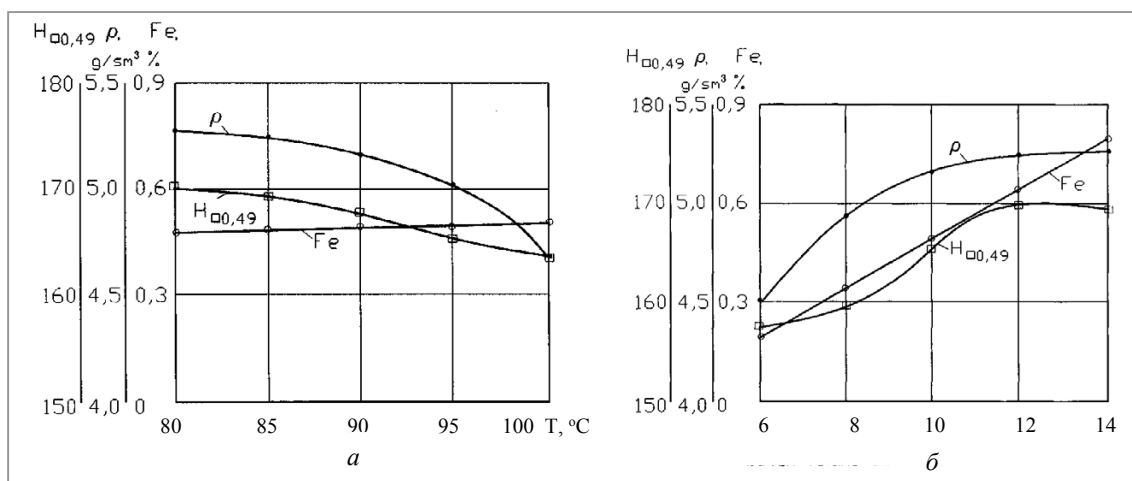


Рис. 1. Зависимость свойств гранулированной композиции Cu + 20% Cr от температуры в помольной камере (а) и отношения объема рабочих тел к объему шихты (б)

С повышением содержания Cr склонность порошковых материалов к грануляции резко снижается. Это обусловлено меньшей пластичностью хрома по отношению к медной основе и его высокой наклепываемостью. В то же время рост температуры в помольной камере данный процесс улучшает. Снижение объема загрузки в рабочую камеру способствует более жесткому воздействию размалывающих тел на шихту, что также приводит к росту температуры смеси и способствует процессу сварки частиц, но подъем температуры более 80 °С вызывает налипание порошковой смеси на шары и стенки камеры, что резко нарушает процесс механического сплавления.

Согласно результатам исследований (рис. 1), оптимальное отношение объема рабочих тел к объему шихты должно быть не менее 12, а температура в помольной камере не должна превышать 80 °С.

Форма и топография гранул, полученная по оптимальному режиму и исследованная на фракции 450–630 мкм, показана на рис. 2.

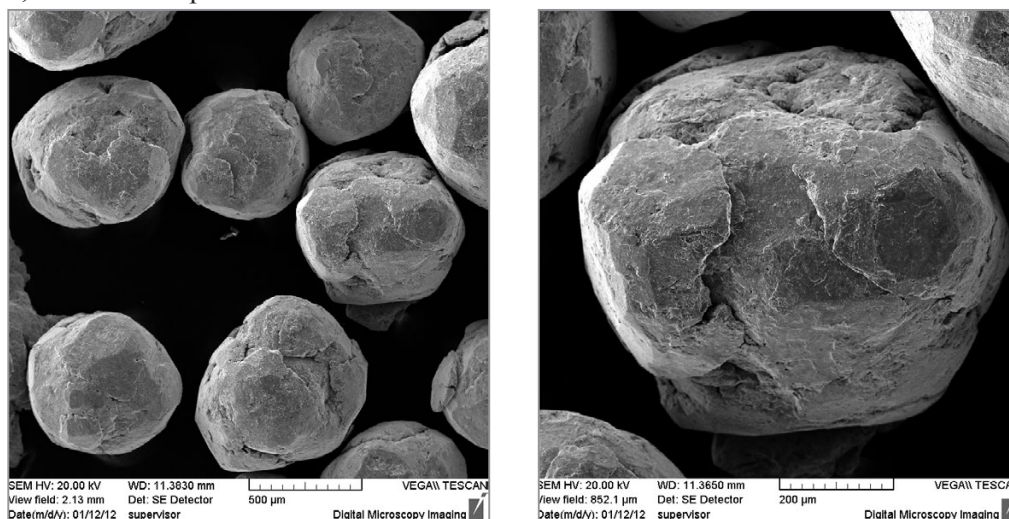


Рис. 2. Форма и топография поверхности гранул композиции Cu + 20% Cr

Гранулы имеют округлую форму, являются плотными телами практически без пор. В то же время их слоистое строение показывает, что они являются сложными образованиями и представляют собой композиционные частицы, сваренные из нескольких более мелких гранул.

Изучение структуры гранул подтвердило их слоистое строение. С ростом содержания хрома и соответственно увеличения размера гранул происходит снижение степени проработки основы при механическом сплавлении, в строении выявляются микропоры и самостоятельные включения частичек хрома.

Исследование микроструктуры сканирующей электронной микроскопией на шлифах гранул, подвергнутых травлению раствором хлорида железа, показало, что размер зерен основы не превышает 5–6 мкм. В свою очередь зерна разделены на блоки размером десятые доли микрометра. В структуре гранул травлением выявляются вытянутые включения частиц легирующего элемента хрома – светлые включения неравноосной формы размером в большем направлении до 20 мкм, шириной 2–5 мкм (рис. 3).

Ранее выполненное термодинамическое моделирование [14] на композициях близкого состава позволило определить адиабатическую температуру механически активируемого взаимодействия между компонентами (T_{ad}), равновесный фазовый состав при T_{ad} , а также установить для изобарно-изотермических условий зависимость равновесного фазового состава от температуры, изменяющейся в интервале 350–1800 К (рис. 4). В табл.1 для базовых композиций систем «Cu-Cr-O-C» и «Cu-Cr-Zr-O-C» приведены значения двух первых параметров.

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

Номер композиции	Химический состав композиции, %	Адиабатическая температура взаимодействия (T_{ad}), К	Равновесный фазовый состав при T_{ad}
1	Cu + 10% Cr + 0,3% O + 0,1% C	470	89,7 Cu + 9,35 Cr + 0,95 Cr ₂ O ₃
2	Cu + 10 Cr + 1 Zr + 0,3 O	550	88,25 Cu + 0,60 Cu ₉ Zr ₂ + 1,16 ZrO ₂
3	Cu + 10 Cr + 1 Zr + 0,1 B + 0,3 O	570	88,6 Cu + 9,68 Cr + 0,38 CrB ₂ + 1,16 ZrO ₂ + 0,18 ZrB ₂
4	Cu + 10 Cr + 1 Zr + 0,1 P + 0,3 O	560	87,52 Cu + 0,72 Cu ₃ P + 0,60 Cu ₉ Zr ₂ + 10,0 Cr + 1,16 ZrO ₂

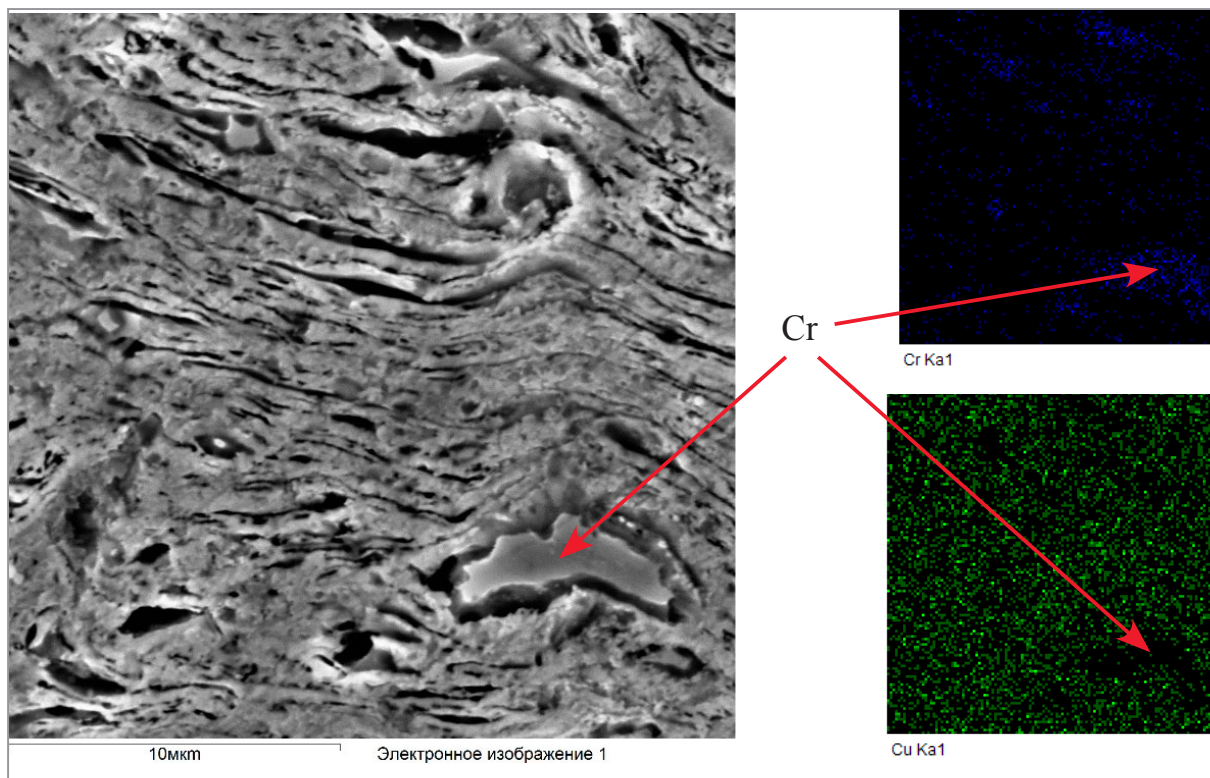


Рис. 3. Структура гранулированной композиции Cu + 20% Cr

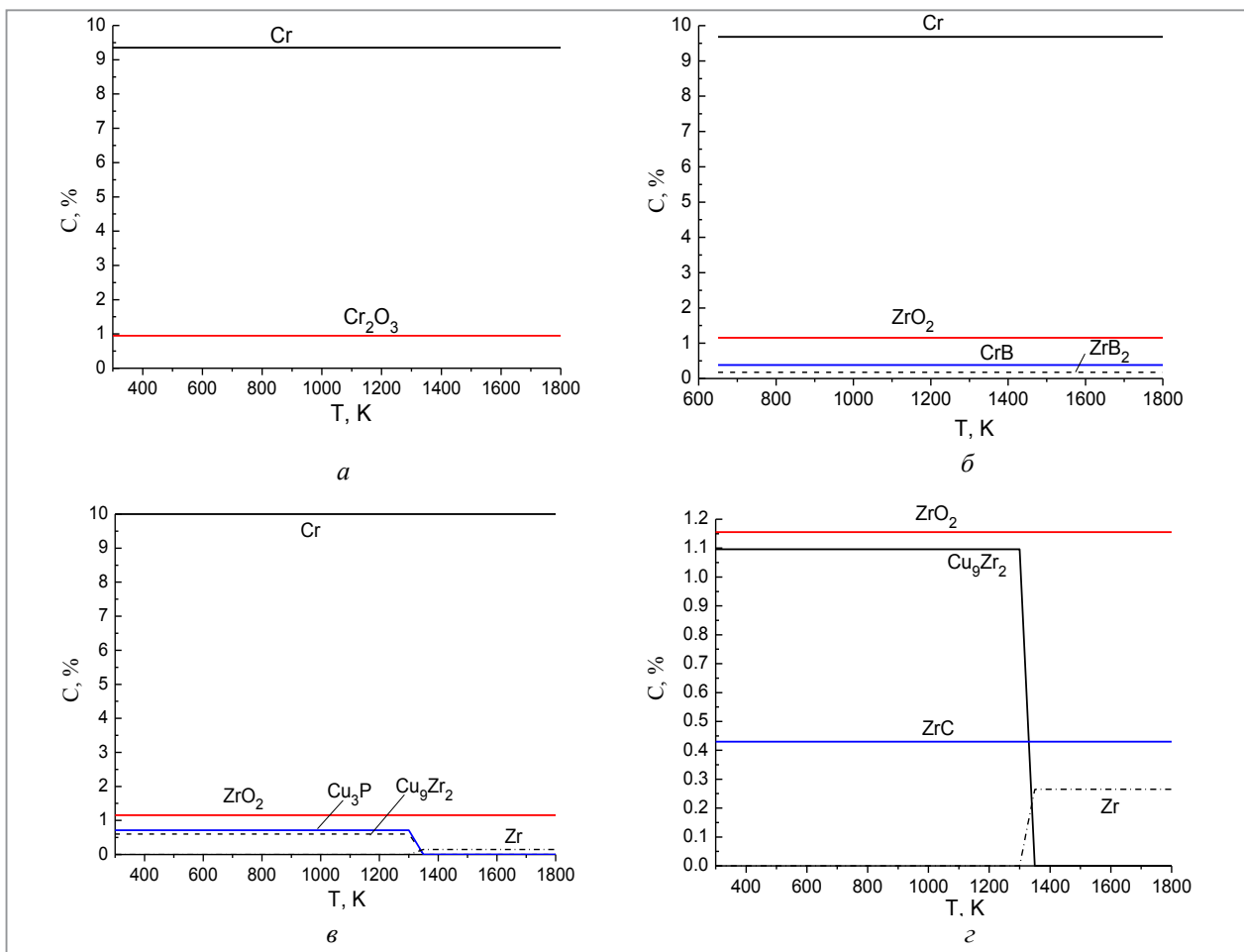


Рис. 4. Зависимость равновесного фазового состава от температуры по данным ТМ в изобарно-изотермических условиях композиций 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г)

Согласно результатам моделирования, в исследованных системах наряду с исходными компонентами – медью и хромом должны формироваться термодинамически стабильные, тугоплавкие оксиды Cr_2O_3 , ZrO_2 и карбиды Cr_{23}C_6 , ZrC , а также интерметаллид Cu_9Zr_2 . Приведенные оксиды и карбиды устойчивы в контакте с медной «матрицей» до 1800 К, которая существенно превышает максимальную температуру нагрева медного расплава, составляющую 1350–1450 °С. Интерметаллид Cu_9Zr_2 сохраняется до 1350 К. Общее содержание приведенных фаз превышает 2%. Нанокристаллы тугоплавких соединений, синтезированные в процессе получения лигатуры, должны эффективно выполнять роль модификаторов первого рода, обеспечивающих производство бронз с субмикроструктурным типом структуры основы. Но фактический фазовый состав исследованных механически сплавленных систем существенно отличается от равновесного. Рентгенографическим методом и просвечивающей электронной микроскопией в них фиксируются только исходные компоненты Cu , Cr и Zr , а также отдельные включения оксида меди CuO . Анализ электронограмм и темнопольных изображений однозначно указывает на их субмикроструктурное строение. Электронная микроскопия не исключает также наличие таких фаз, как оксид ZrO_2 и карбонат ZrCO_2 . Одним из возможных путей формирования их является механически активируемое взаимодействие между элементами, входящими в эти соединения. Термодинамически обоснованные соединения Cr_2O_3 , ZrO_2 , Cr_{23}C_6 , ZrC и Cu_3Zr в гранулированных композициях не выявляются, что обусловлено незавершенностью механически активированных фазовых превращений [13]. В то же время высокая твердость гранул механически сплавленных лигатур (HV 280–290), практически сохраняющаяся (HV 240–250) после отжига при температурах, достигающих 600 °С, позволяет сделать обоснованное предположение о формировании промежуточных соединений (типа зон Гинье-Престона), являющихся одним из продуктов в процессе формирования термодинамически стабильных равновесных фаз. Эти соединения имеют нанокристаллическое строение и вызывают дисперсное упрочнение.

В качестве способа компактирования применяли горячее прессование, позволяющее образовать на гранулах ювенильные поверхности, лишённые оксидных плёнок, и активировать взаимодействия, вызывающих формирование сплошного металлического контакта между ними. Это обеспечивает получение прессовок с плотностью, близкой к 100%. Для установления возможно допустимых интервалов изменения технологии получения модифицирующих лигатур определяли влияние температуры нагрева брикетированной заготовки и коэффициента вытяжки на твердость, прочность и электропроводность компактного материала.

Ранее выполненные исследования дают возможность предположить, что температура заготовок для горячего прессования должна приближаться к 800 °С, что позволило бы совместить операцию нагрева с дегазирующим отжигом (рис. 5).

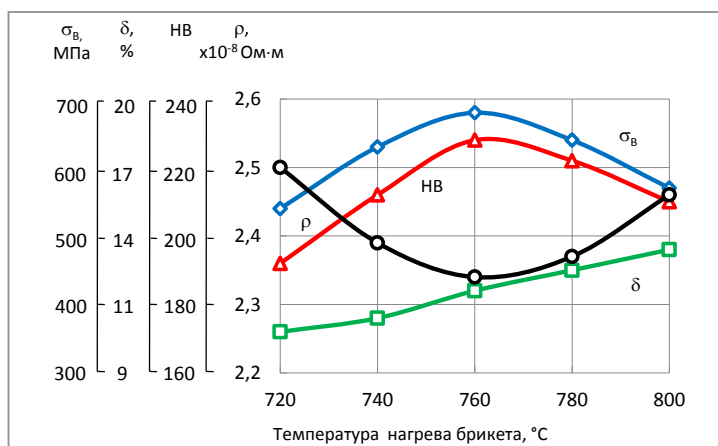


Рис. 5. Влияние температуры нагрева брикетов на физико-механические свойства компактированной композиции $\text{Cu} + 20\% \text{Cr}$

Оптимальные характеристики прочности получены при горячем прессовании в интервале 760–780 °С. Снижение температуры нагрева заготовок приводит к формированию волокнистой структуры с низкой прочностью связи между волокнами. Кроме того, возрастает удельное давление прессования. При температурах, превышающих верхнее значение указанного предела, резко уменьшается величина внутренней энергии, накапливаемой материалом при термомеханической обработке, что также отрицательно сказывается на прочности связи по границам бывших гранул.

Физико-механические свойства материалов в значительной мере определяются образованием надежного металлического контакта по границам гранул и формированием структуры без пор, что в свою очередь зависит от степени деформации при прессовании. Для достижения плотности, близкой к 100%, необходимо, чтобы минимальный коэффициент вытяжки находился в пределах 4–8. Увеличение коэффициента вытяжки приводит к возрастанию предела прочности, твердости и пластичности и снижению электрического сопротивления (рис. 6) и для обеспечения максимума физико-механических свойств он должен быть не менее 15.

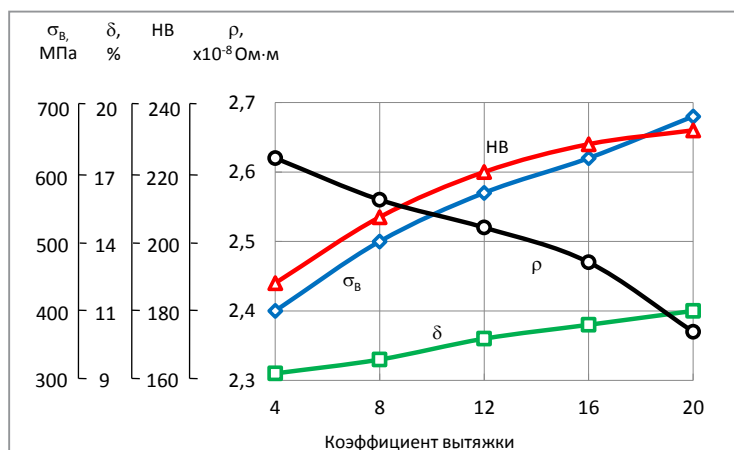


Рис. 6. Влияние коэффициента вытяжки на физико-механические свойства скомпактированной композиции Cu + 20% Cr

Немаловажным фактором, определяющим технологичность процесса компактирования гранулированных композиций, является температура рабочего инструмента. Оптимальное усилие прессования достигнуто при его нагреве до 500 °С.

Исследования структуры компактных материалов, полученных горячим прессованием, показывают, что они характеризуются гомогенным и дисперсным распределением элементов и сохраняют микрокристаллический 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. В то же время термическое воздействие, имеющее место при горячей экструзии механически легированных композиций, приводит к завершению фазовых превращений, направленных на уменьшение свободной энергии систем, в результате которых образуются нанокристаллы равновесных фаз Cu_3Zr , Cr_2O_3 , ZrO_2 , ZrC , Cr_{23}C . Кроме того, в структуре сохраняются неравновесные субмикрокристаллические включения CuO .

Представление о тонкой структуре, скомпактированной горячим прессованием модифицирующей лигатуры на основе композиции Cu + 20% Cr, дают результаты СЭМ, приведенные на рис. 7, 8.

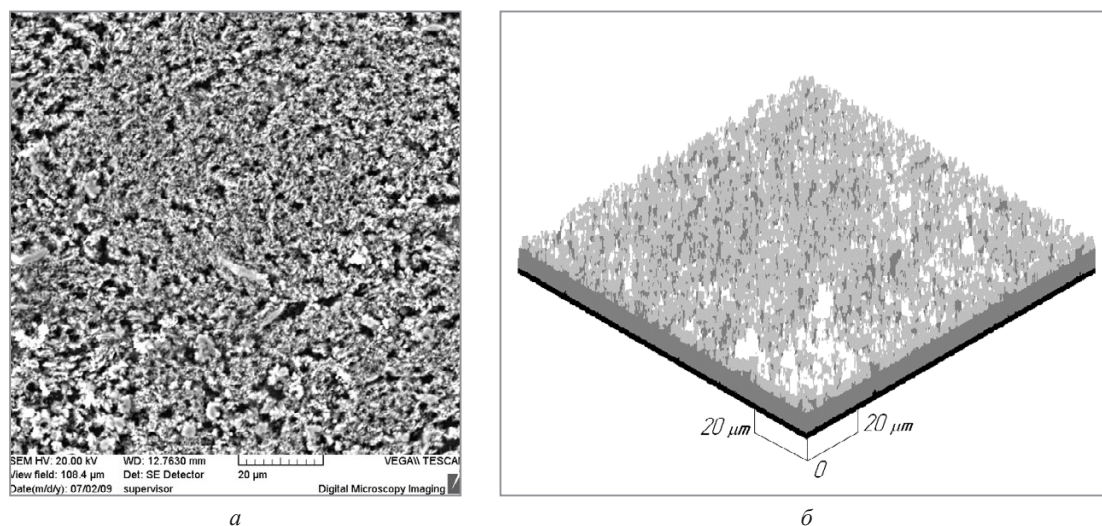


Рис. 7. Микроструктура композиции состава Cu + 20% Cr: а – двухмерное изображение; б – 3D-изображение

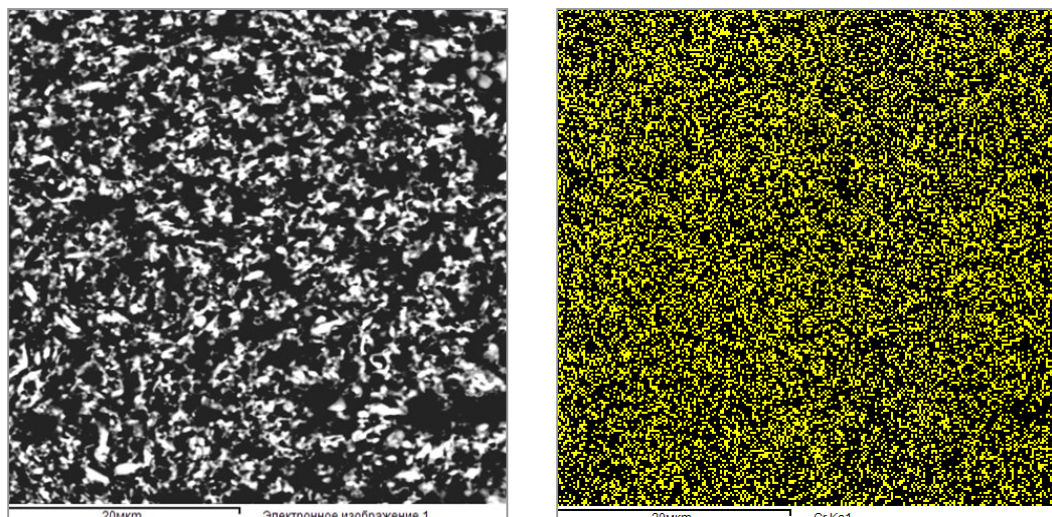


Рис. 8. Распределение Cr в композиции Cu + 20% Cr

Микроструктурный тип структуры, сохраняющийся после длительного высокотемпературного воздействия, имеющего место при переработке гранулированной композиции в полуфабрикат в виде прутка, указывает на жаропрочность механически сплавленного материала. В зависимости от состава температура рекристаллизации находится в пределах 700–750 °С. Основным упрочнением их является дисперсное, обусловленное наличием в структуре нанокристаллов вышеприведенных соединений, которые должны эффективно выполнять и роль модификаторов.

Для сравнения были проведены дюриметрические исследования материалов, легированных хромом, находившихся в гранулированном и скомпактированном состояниях (табл. 2), и исследованы их механические свойства в компактном состоянии (табл. 3).

Таблица 2. Результаты дюриметрических исследований

Состав, %	Твердость НВ	
	гранул	компактного материала
Cu + 20% Cr	296	238

Таблица 3. Физико-механические свойства компактного материала

Состав, %	Физико-механические свойства			
	σ_B , МПа	δ , %	твёрдость НВ	$\rho \cdot 10^{-8}$, Ом·м
Cu + 20% Cr	705	2,6	238	3,27

Анализ данных показывает, что разработанные для использования в качестве модифицирующей лигатуры высоколегированные хромовые композиции при низкой пластичности и удовлетворительной электропроводности обладают высокой твердостью и прочностью. Кроме того, согласно проведенным исследованиям, температура рекристаллизации их превышает 700 °С и они являются жаропрочными.

Это позволило сделать вывод о возможности использования созданных лигатур в качестве заменителей дорогостоящих и дефицитных бериллиевых бронз для изготовления изделий электротехнического назначения, работающих в жестких температурно-силовых условиях.

Сравнительные физико-механические свойства обеих групп сплавов приведены в табл. 4.

Таблица 4. Физико-механические свойства бронзы БрНБТ (ГОСТ 48-12-92) и разработанных модифицирующих лигатур

Материал	Физико-механические свойства				
	σ_B , МПа	δ , %	твёрдость НВ	$\rho \cdot 10^{-8}$, Ом·м	$T_{рек.}$, °С
Бронза БрНБТ	750–850	10–14	150–210	3,52–3,92	550
Cu + 20% Cr	705	2,6	238	3,27	750

Выводы

1. Негативной особенностью формирования механически сплавленных модифицирующих лигатур с высоким содержанием основного компонента для производства модифицированных хромовых бронз является низкая способность к грануляции.

2. Основное воздействие на процесс образования гранулированных композиций с высоким содержанием хрома оказывают температура помольной камеры и соотношение между объемами, занимаемыми рабочими телами и шихтой.

3. Оптимальный размер гранул находится в пределах 0,3–0,5 мм. При формировании композиций с диаметром менее 0,2 мм возникает проблема предотвращения их от окисления, образование гранул размером более 0,6 мкм приводит к снижению скорости протекания механически активируемых структурных и фазовых превращений, обеспечивающих формирование нано-/субмикроструктур.

4. Оптимальный гранулометрический состав механически легированных композиций «медь-хром» формируется при следующих условиях обработки шихты в механореакторе: нормальное ускорение рабочих тел – $120 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$; степень заполнения камеры рабочими телами – 75%; отношение объемов рабочих тел и обрабатываемой шихты – 14; $\tau_{\text{обр.}} = 8 \text{ ч}$; температура в рабочей камере – $80 \text{ }^\circ\text{C}$.

5. Механическое легирование по оптимальному режиму обеспечивает получение гранулированных лигатур, имеющей микроструктурный тип структуры основы, формирующейся по механизму динамической рекристаллизации, стабилизированной субмикроструктурными включениями хрома.

6. Механически легированная композиция имеет комплексное упрочнение, сочетающее зернограничное и дисперсное, и является жаропрочной.

7. Разработанные для использования в качестве модифицирующих лигатур высоколегированные хромовые композиции могут быть использованы как самостоятельные материалы электротехнического назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Николаев, А. К.** Сплавы для электродов контактной сварки / А. К. Николаев, В. М. Розенберг. М.: Metallurgiya, 1978. 96 с.
2. **Николаев, А. К.** Хромовые бронзы / А. К. Николаев, А. И. Новиков, В. М. Розенберг. М.: Metallurgiya, 1983. 175 с.
3. **Розенберг, В. М.** Сплавы на медной основе, упрочняемые дисперсными частицами / В. М. Розенберг [и др.] // Литейное производство. 1987. № 10. С. 53–65.
4. **Розенберг, В. М.** Особенности упрочнения сплавов на медной основе / В. М. Розенберг, М. Д. Теплицкий, А. А. Фридман // ФМИ. 1972. Т. 34. Вып. 2. С. 326–329.
5. **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.
6. **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.
7. **Ловшенко, Ф. Г.** Наноструктурные механически легированные материалы на основе никеля / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко. Мн.: БНТУ, 2012. 297 с.
8. **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.
9. **Ловшенко, Ф. Г.** Закономерности формирования механически легированных гранулированных лигатур системы «медь – хром» / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, И. А. Лозиков // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. 2014. № 2. С. 49–59
10. **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.
11. **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.
12. **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 // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. 2014. № 2. С. 49–59.
13. **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.
14. **Ловшенко, Г. Ф.** Термодинамическое моделирование гетерогенного взаимодействия при механическом легировании в системах на основе меди / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, Б. Б. Хина, З. М. Ловшенко, И. А. Лозиков // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. 2012. № 1. С. 23–35.

REFERENCES

1. **Nikolayev A. K., Rozenberg V. M.** *Splavy dlya elektrodov kontaktnoy svarki* [Alloys for resistance welding electrodes]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978, 96 p.
2. **Nikolayev A. K., Novikov A. I., Rozenberg V. M.** *Khromovyye bronzy* [Chrome bronzes]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983, 175 p.

3. **Rozenberg V.M.** Splavy na mednoy osnove, uprochnyayemyye dispersnymi chastitsami [Copper-Based Alloys Hardened by Dispersed Particles]. *Liteynoe proizvodstvo = Foundry*, 1987, no. 10, pp. 53–65.
4. **Rozenberg V.M., Teplitskiy M.D., Fridman A.A.** Osobennosti uprochneniya splavov na mednoy osnove [Features of hardening copper-based alloys]. *FMI = FMI*, 1972, vol. 34, vyp. 2, pp. 326–329.
5. **Lovshenko G.F., Lovshenko F.G., Khina B.B.** Nanostrukturnye mekhanicheski legirovannye materialy na osnove metallov [Nanostructural mechanically alloyed materials based on metals]. Mogilev, Belarus.-Ros. un-t Publ., 2008, 679 p.
6. **Lovshenko G.F., Lovshenko F.G.** *Teoreticheskie i tekhnologicheskie aspekty sozdaniya nanostrukturnykh mekhanicheski legirovannykh materialov na osnove metallov* [Theoretical and technological aspects of creating nanostructured mechanically alloyed materials based on metals]. Mogilev, Belarus.-Ros. un-t Publ., 2005, 276 p.
7. **Lovshenko F.G., Lovshenko F.G.** *Nanostrukturnye mekhanicheski legirovannye materialy na osnove nikelya* [Nanostructured Mechanically Alloyed Nickel-Based Materials]. Minsk, BNTU Publ., 2012, 297 p.
8. **Lovshenko F.G., Lovshenko F.G.** *Kompozitsionnye nanostrukturnye mekhanicheski legirovannye poroshki dlya gazotermicheskikh pokrytiy* [Composite nanostructured mechanically alloyed powders for gas-thermal coatings]. Mogilev, Belarus.-Ros. un-t Publ., 2013, 216 p.
9. **Lovshenko F.G., Lovshenko G.F., Lozikov I.A.** Zakonomernosti formirovaniya mekhanicheski legirovannykh granulirovannykh ligatur sistemy «med' – khrom» [Patterns of the formation of mechanically alloyed granular master alloys of the “copper – chromium” system]. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta = Bulletin of the Belarusian-Russian University*, 2014, no. 2, pp. 49–59.
10. **Lovshenko F.G., Lovshenko G.F., Lozikov I.A.** Polucheniye mekhanicheski legirovannykh nanostrukturnykh modifitsiruyushchikh ligatur dlya proizvodstva vysokoprochnykh submikrokristallicheskikh bronz elektrotekhnicheskogo naznacheniya [Obtaining mechanically alloyed nanostructured modifying alloys for the production of high-strength submicrocrystalline bronzes for electrical purposes]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2013, no. 2, pp. 115–126.
11. **Lovshenko F.G., Lovshenko G.F., Lozikov I.A.** *Nauchnye printsipy sozdaniya vysokostoykikh khromovykh bronz elektrotekhnicheskogo naznacheniya s primeneniym tekhnologii, sochetayushchey reaktivnoy mekhanicheskoy legirovaniye i lit'e* [Scientific principles for the creation of highly resistant chromium bronzes for electrical purposes using a technology that combines reactive mechanical alloying and casting]. *Perspektivnyye tekhnologii, Vitebsk, UO «VGTU» Publ.*, 2011, pp. 214–233.
12. **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 extrusion conditions for mechanically alloyed compositions “copper-chromium” and patterns of structure formation, phase composition and properties of materials from them]. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta = Bulletin of the Belarusian-Russian University*, 2014, no.2, pp. 49–59.
13. **Lovshenko G.F., Lovshenko F.G., Khina B.B.** *Nanostrukturnye mekhanicheski legirovannye materialy na osnove metallov* [Nanostructural mechanically alloyed materials based on metals]. Mogilev, Belarus.-Ros. un-t Publ., 2008, 679 p.
14. **Lovshenko G.F., Lovshenko G.F., Khina B.B., Lovshenko Z.M., Lozikov I.A.** Termodinamicheskoye modelirovaniye geterogennogo vzaimodeystviya pri mekhanicheskom legirovanii v sistemakh na osnove medi [Thermodynamic modeling of heterogeneous interaction during mechanical alloying in copper-based systems]. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta = Bulletin of the Belarusian-Russian University*, 2012, no. 1, pp. 23–35.