



УДК 669.017

Поступила 16.04.2013

Ф. Г. ЛОВШЕНКО, ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет»,
Г. Ф. ЛОВШЕНКО, БНТУ, И. А. ЛОЗИКОВ, ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет»

ПОЛУЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИ ЛЕГИРОВАННЫХ НАНОСТРУКТУРНЫХ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ЛИГАТУР ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОПРОЧНЫХ СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ БРОНЗ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Показана перспективность применения механически легированных лигатур для производства хромовых и хромоциркониевых бронз. Изучены состав, структура и свойства хромовых и хромоциркониевых бронз, получаемых с применением механически легированных лигатур.

The prospects of application of mechanically alloyed ligatures for the production of chromium and chromium-zirconium bronze is shown. The composition, structure and properties of chromium and chromium-zirconium bronzes produced with the use of mechanically alloyed ligatures are studied.

Введение

В производстве низколегированных медных материалов удельный объем хромосодержащих бронз составляет 60%. Из них около 90% приходится на сплавы систем «Cu–Cr» и «Cu–Cr–Zr». Они широко применяются для изготовления многотоннажных конструкций, например, теплообменных агрегатов, включая кристаллизаторы, электродов контактной сварки и арматуры машин сварки сопротивлением, а также разрывных контактов. Хромовые бронзы являются типичными дисперсионно-твердеющими сплавами и для них характерны общие закономерности формирования фазового состава, структуры и свойств последних. При этом они отличаются от других низколегированных медных материалов оптимальным сочетанием физических, механических и эксплуатационных свойств, формирующимся в процессе термомеханической обработки, включающей закалку и старение. Промежуточной операцией является холодная пластическая деформация, определяющая образование оптимальной структуры при старении [1], что приводит к существенному повышению прочностных свойств в результате выделения из пересыщенного твердого раствора дисперсных включений хрома или хромосодержащих соединений [2].

Краткий обзор основных промышленных технологий производства хромосодержащих бронз, ос-

нованный на данных [3–5, 7], приведен в [8, 9]. Особенности изготовления хромосодержащих бронз относятся прежде всего к их плавке и литью и обусловлены следующими факторами: наличием в сплавах элементов, имеющих большое сродство к кислороду (Zr, Ti, V, Nb, Cr, Si), малыми допусками на легирование (иногда $\pm 0,003\%$), сравнительно высокими требованиями к чистоте материала. Это ставит перед необходимостью применения в качестве шихты отдельно приготовленных двойных или комплексных лигатур [2, 3]. Применение их позволяет с большей надежностью воспроизвести заданный состава сплава, снизить температуру перегрева медной основы, уменьшить продолжительность плавки, а следовательно, увеличить производительность плавильных агрегатов, сократить угар дорогостоящих легирующих компонентов и зашлакованность плавильной ванны.

Принимая меры защиты расплава от окисления, лигатуры для хромовых бронз получают плавкой в открытых печах. При использовании легирующей добавки, изготовленной этим способом, ее расход по сравнению с расчетным возрастает вдвое. Кроме того, это увеличивает зашлаковывание основной печи [10]. В случае производства многокомпонентных бронз, например, БрХЦр, БрХНб с использованием лигатуры Cu–Cr, полу-

ченной плавкой в открытых печах, потери циркония или ниобия достигают 90%, что ставит под сомнение экономическую целесообразность приведенного выше способа изготовления [11].

Качество лигатуры повышается, а угар хрома снижается при плавке в вакуумных индукционных тигельных печах. В этом случае технологический процесс включает в себя следующие этапы: расплавление и перегрев меди до 1350–1400 °С, введение кускового хрома, выдержку расплава до растворения хрома с одновременным повышением его температуры до 1550–1650 °С, охлаждение расплава до температуры литья, литье. Оптимальное содержание хрома в лигатуре Cu–Cr составляет 8–10%. Такие сплавы склонны к ликвации и их следует отливать в водоохлаждаемую изложницу слитками массой 15–25 кг. Эти материалы пластичны и относительно легко прокатываются как в горячем, так и в холодном состоянии.

Таким образом, проведенный анализ позволяет сделать однозначный вывод, что наиболее узким местом, во многом сдерживающим выпуск хромовых бронз и определяющим их высокую стоимость, а также экологическую вредность производства, является изготовление лигатур. Широкие исследования, выполненные авторами работы, некоторые результаты которых представлены в [12–14], показывают, что одним из перспективных методов решения проблемы является применение реакционного механического легирования, исключаяющего из технологического процесса производства лигатур высокотемпературную плавку. Механическое легирование заключается в обработке порошковой шихты заданного состава в энергонапряженной мельнице-механореакторе, продуктом которой служит гранулированная композиция с суб-/микроструктурной основой, упрочненной, как правило, нано-, субмикро-/размерными включениями. Приведенная структура является устойчивой и в большинстве случаев наследуется компактными материалами, получаемыми из механически легированных композиций [12–14], что позволяет сделать вывод о перспективности их применения в качестве модификаторов.

Таким образом, использование технологии механического легирования наряду с упрощением и удешевлением производства как лигатур, так и хромосодержащих бронз создает предпосылки для повышения ряда физико-механических свойств последних. Исходя из этого, целью работы являлось исследование влияния состава шихты на морфологию, фазовый состав и свойства механически легированных хромосодержащих гранулированных композиций и установление закономерностей их

формирования, а также исследование фазового состава структуры и свойств хромовых и хромово-циркониевых бронз, получаемых с применением механически легированных лигатур.

Материалы, оборудование и методика исследования

В качестве исходных компонентов для получения материалов применяли стандартный порошок меди ПМС-1 (ГОСТ 4960-75) с размером частиц 63–45 мкм и порошки технически чистых металлов – хрома и циркония с размером частиц менее 45 мкм. Реакционное механическое легирование проводили в энергонапряженной вибромельнице гирационного типа с четырьмя водоохлаждаемыми помольными камерами объемом 2 дм³ каждая. Режим обработки, использованный в данном исследовании, является оптимальным для большинства систем на основе металлов, включая и медь. Радиус и частота круговых колебаний, совершаемых помольными камерами, составляли 5 мм и 25 с⁻¹ соответственно. Размалывающими телами служили шары из стали ШХ15СГ, подвергнутые типовой термической обработке и имеющие твердость 62 HRC. Размол проводили в камерах из аустенитной стали 12Х18Н9Т с изолированным рабочим пространством. Степень заполнения помольной камеры шарами – 70%, время обработки – 8 ч, отношение объемов размалывающих тел и шихты – 10. Температура в помольной камере составляла 50 °С.

Ситовой анализ осуществляли с использованием следующего набора сит: 0,045, 0,063, 0,071, 0,100, 0,200, 0,250, 0,315, 0,400, 0,500, 0,630, 0,800, 1,000, 1,250, 1,600, 2,500, 3,150, 4,000 мм. Разделение по фракциям проводили с помощью машины для сухого просеивания NTS-1 (Германия). Микротвердость исследовали на микротвердомере «Micromer-2» (Швейцария) при нагрузках на пирамиду 0,49 и 0,98 Н.

Металлографический анализ выполняли на металлографическом комплексе МКИ-2М (Беларусь), сканирующем электронном микроскопе «Tescan VEGA II SBH» (Чехия). Исследование элементного состава проводили на микроскопе «Tescan VEGA II SBH» (Чехия) с системой энергодисперсионного микроанализа «INCA ENERGY 350/XT» с беззотным детектором X-Act ADD (OXFORD Instruments NanoAnalysis, Великобритания) при линейном непрерывном и шаговом сканировании, а также сканировании по площади. Субструктуру и фазовый состав материалов изучали на просвечивающем электронном микроскопе Tesla BS-540 с использованием гониометрических приставок. При этом исследование структуры гранулирован-

ной композиции проводили путем осаждения мелких осколков гранул на угольные реплики.

Результаты исследований

Основные закономерности формирования механически легированных нано-, субмикро-/ структурных металлических композиций, представленные в [1–5], справедливы и для хромсодержащих медных систем. При обработке порошковых смесей в механореакторе имеют место многообразные эффекты, изменяющие морфологию частиц. Основными из них являются пластическая деформация, разрушение и сварка осколков по ювенильным поверхностям. Процесс разрушения определяется скоростью накопления дефектов кристаллического строения, возникающих при пластической деформации частиц. С увеличением частоты силового воздействия размалывающих тел на обрабатываемую композицию вероятность разрушения частиц возрастает. Параллельно с разрушением частиц в результате адгезии протекают агломерация и грануляция. Ударное воздействие рабочих тел на агломерированные частицы композиции приводит к сварке, сопровождающейся взаимодиффузией и химическим взаимодействием между компонентами. В результате многократно повторяющихся разрушений и сварки формируется гранулированная композиция, в которой исходные компоненты или продукты их взаимодействия связаны и равномерно распределены между собой.

Соотношение между скоростями измельчения и грануляции зависит от суммарного воздействия ряда взаимосвязанных факторов, выделить количественный вклад каждого из которых практически невозможно. Основными факторами, оказывающими влияние на процесс, являются природа обрабатываемых материалов и энергонапряженность режима обработки. Они определяют характер и развитие механически активируемых превращений, влияющих как на кинетику упрочнения композиционных частиц, так и на его предельное значение. Способность к пластической деформации – величина, обратная упрочнению и является одним из основных свойств, определяющих интенсивность протекания адгезии и сварки осколков, а следовательно, и кинетику изменения размера гранул.

На начальном этапе обработки, как правило, превалирует разрушение, в последующем – процессы агломерации и сварки, в результате протекания которых средний размер гранул непрерывно увеличивается. На первой стадии грануляции структура характеризуется ярко выраженной слоистостью, указывающей на то, что рост гранул про-

исходит путем послойного наваривания осколков с их последующей пластической деформацией. При дальнейшей обработке толщина слоев непрерывно уменьшается и происходит гомогенизация композиции. На этапе образования гранулы достаточно рыхлые со значительным количеством пор и несплошностей. В дальнейшем поры практически исчезают. На определенном этапе между сваркой и разрушением устанавливается динамическое равновесие, размер гранул стабилизируется и сохраняется достаточно долго. На этой стадии в большей или меньшей мере получает развитие собирательная грануляция, которая приводит к формированию относительно крупных композиционных частиц, образующихся путем сварки между собой нескольких гранул, каждая из которых сохраняет свою текстуру. Размер композиционных частиц в 2–4 раза превышает средний размер гранул. С увеличением продолжительности обработки объемная доля их возрастает.

Определенное представление о формировании гранулированных композиций при обработке в механореакторе дает исследование характера распределения микротвердости по сечению гранул, выполненное на алюминиевых, медных, никелевых и железных композициях [12–14]. В общем случае периферийный слой имеет большую твердость, чем центральная зона гранулы. Данная закономерность указывает на то, что после агломерации и холодной сварки осколков, имеющих место на первом этапе грануляции, возникшие композиционные частицы являются устойчивыми образованиями. В связи с тем что при дальнейшей обработке в механореакторе энергия размалывающих тел поглощается и рассеивается прежде всего периферийным слоем гранулы, в этой области наиболее полно протекают механохимические превращения, что приводит к их большему упрочнению, чем сердцевины. Монотонное изменение твердости по сечению, наблюдаемое у элементарных гранул, в композиционных гранулах, сформировавшихся в процессе собирательной грануляции, нарушается. Независимо от исходного состава медных и алюминиевой композиций с уменьшением размера гранул разница в твердости поверхности и центральной области снижается и при их диаметре менее 0,5 мм практически отсутствует. Это позволяет сделать вывод, что при оптимальном режиме обработки механохимические превращения протекают в основном в поверхностном слое толщиной до 0,2 мм. В центральной зоне гранул, имеющих диаметр более 0,5 мм, превращения затруднены. Образование крупных гранул приводит к снижению скорости механического легирования.

В то же время при разгрузке, хранении и переработке мелкогранульных композиций с диаметром менее 0,1–0,2 мм, имеющих большую поверхность, в ряде случаев возникают проблемы, основной из которых является предотвращение их окисления. Это полностью относится и к разрабатываемым композициям. Кислород, содержащийся в лигатуре, по меньшей мере, будет увеличивать угар легирующих элементов при основной плавке. Исходя из приведенного выше, оптимальный размер гранул механически легированных нано-, субмикро-/ кристаллических лигатур находится в пределах 0,2–0,5 мм. С учетом того, что обработка порошковой композиции в механореакторе осуществляется по оптимальному режиму, единственным способом регулирования механически активируемых процессов, включая и грануляцию, является изменение состава шихты. Большой недостаток применяющихся лигатур – сравнительная их бедность по содержанию основного легирующего компонента – хрома. При расчете на средний состав хрома в основной массе выпускаемой в настоящее время лигатуры «Cu–Cr» и средний состав хрома в хромовых бронзах получается, что «лигатурной» является каждая четвертая плавка. 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. В связи с этим оптимальной по составу является лигатура с максимальным содержанием легирующих элементов.

На первом этапе работы исследованы размер, морфология и механизм формирования частиц ме-

ханически легированных композиций, содержащих 5, 10, 15, 20% хрома. Форма и топография гранул (фракции 450–630 мкм) приведены на рис. 1.

Для определения характера распределения частиц по размеру применяли ситовой анализ, по результатам которого строили дифференциальные кривые (рис. 2).

Функцией служила величина $F(d)$, определяемая из выражения: $F(d) = \Delta m / (m \Delta d)$, где m – общая масса анализируемого порошка; Δm – масса порошка на сите; Δd – разность размера ячеек сит, следующих друг за другом.

Анализ дифференциальных кривых показывает, что в композициях, содержащих 5 и 10% хрома, характер распределения гранул по размеру практически одинаков и близок к нормальному. Примерно у 70% от общей массы композиции размер гранул является оптимальным. При его среднем значении, примерно равным 400 мкм, он находится в пределах 250–550 мкм. Результаты исследования топографии поверхности и структуры гранул (рис. 1, 3, 4) показывают, что их формирование происходит по приведенному выше «классическому» механизму. Гранулы имеют форму, близкую к равноосной и являются достаточно плотными и устойчивыми образованиями. На нано/субмикроскопическом уровнях они характеризуются однородным распределением компонентов. Согласно данным сканирующей электронной микроскопии, размер включений хрома не превышает 200 нм.

По результатам исследования процесса механического легирования с увеличением концентрации хрома адгезионная способность шихты, обрабатываемой в механореакторе, по отношению

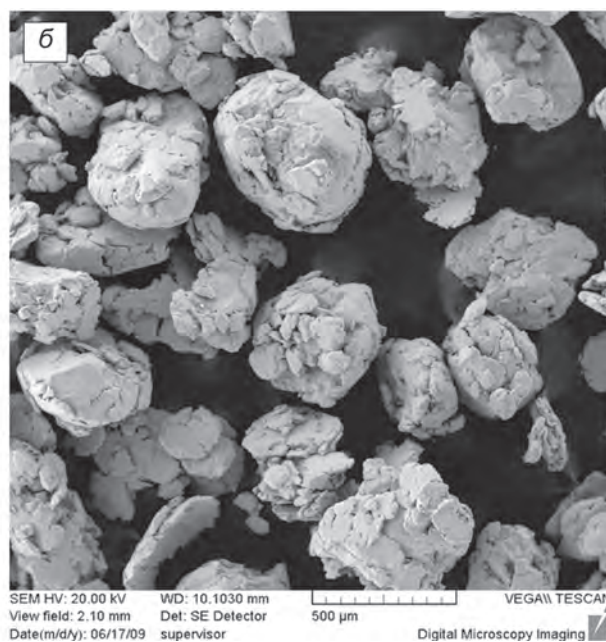


Рис. 1. Форма и топография поверхности гранул композиций, содержащих 10% (а), 20% (б) хрома

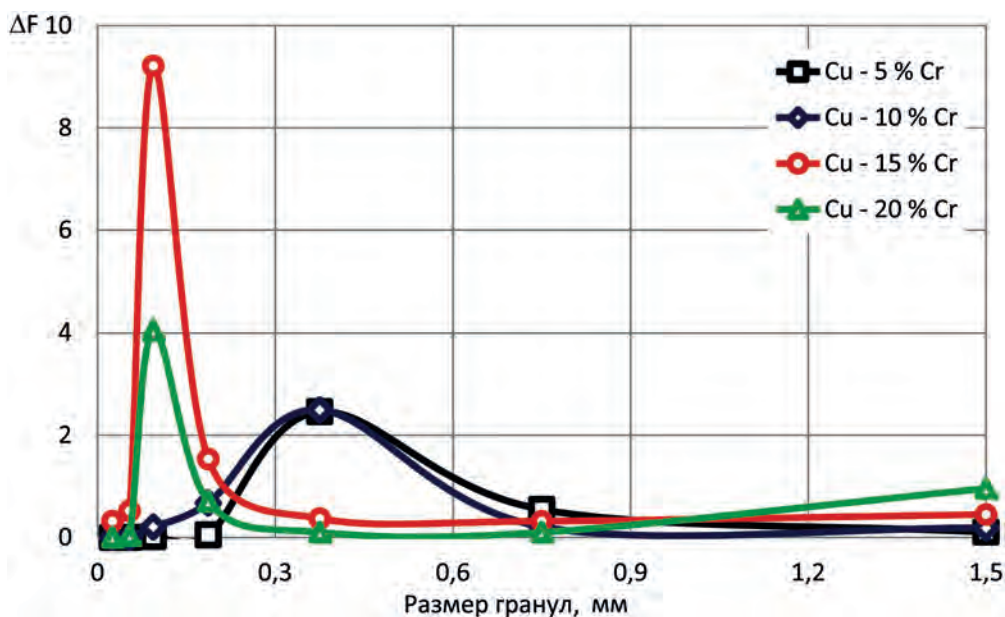


Рис. 2. Дифференциальные кривые распределения по размеру гранул механически легированных композиций системы «медь–хром»

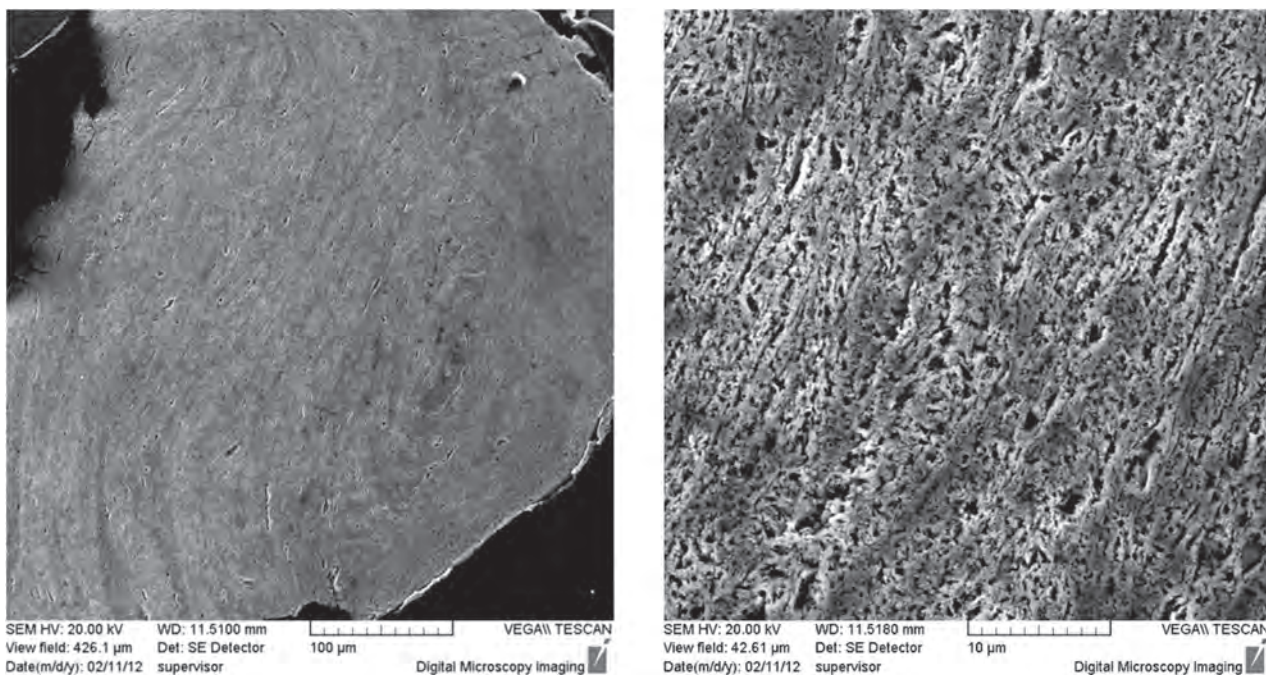


Рис. 3. Структура гранулированной композиции Cu – 10% Cr

к стали возрастает, что находит очевидное проявление в композициях, содержащих более 10% этого элемента. В этом случае адгезионные процессы наряду с агломерацией композиции приводят также к схватыванию осколков частиц с рабочими телами (шарами) и стенкой помольной камеры, что вызывает образование на них шиповидных наростов. С этого времени шары и стенка помольной камеры являются не только источником динамического воздействия на обрабатываемую смесь, но и их поверхность становится местом формирования гранул. Под действием нормальной составля-

ющей силы, возникающей в результате соударения шаров, происходит послойное наваривание частиц композиции на образовавшиеся на поверхности наросты, что приводит к увеличению размера рабочих тел и изменению условий обработки. При связывании с шарами и стенкой помольной камеры более 10% шихты процесс механического легирования нарушается. В системе «медь – хром» количество связанной шихты увеличивается с повышением концентрации второго компонента и при 20% его содержания выход механически легированной композиции не превышает 50%. Од-

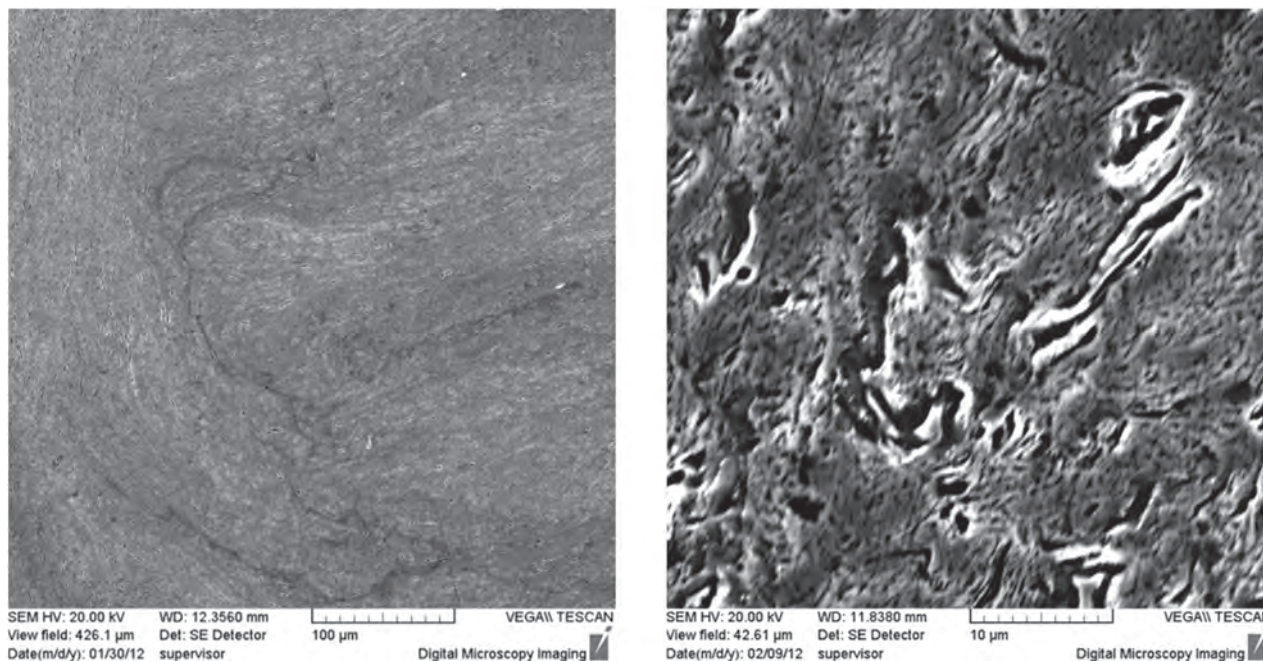


Рис. 4. Структура гранулированной композиции Cu – 20% Cr

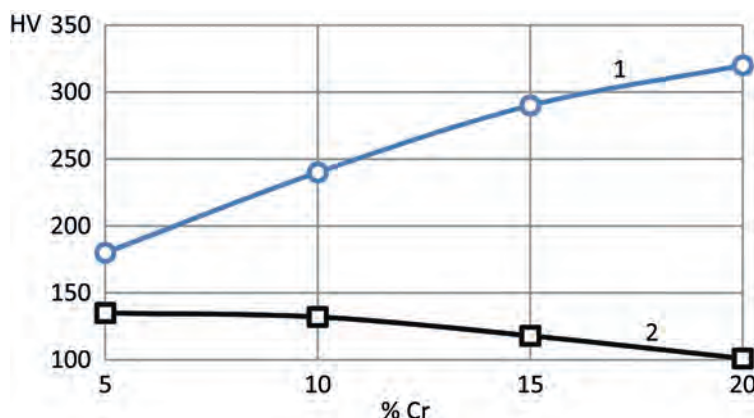


Рис. 5. Зависимость микротвердости гранулированной (2) и компактированной (1) лигатуры от содержания хрома

ним из факторов возрастания адгезионной способности в этом случае может являться рафинирование основы – меди в результате более полного восстановления ее оксидов, покрывавших частицы исходного порошка.

При содержании хрома в шихте в количестве 15% и более механически легированные композиции состоят из двух основных типов гранул. Первые – мелкие, имеют осколочно-пластинчатую форму. Их размер находится в пределах 0,05–0,20 мм при средней величине 100 мкм. Вторые – крупные, с формой, близкой к глобулярной, характеризуются широким интервалом изменения размера, равным 0,3–2,0 мм (см. рис. 1). Первые являются осколками частичного разрушения связанной с шарами и стенками помольной камеры композиции и обладают высокой плотностью и твердостью. Они служат в качестве элементов формирования крупных частиц. Процесс реализуется по

механизму собирательной грануляции путем частичной сварки мелких гранул. Низкая пластичность последних, обусловленная наклепом и высоким содержанием дисперсной упрочняющей фазы – хрома, затрудняет протекание процесса. Крупные гранулы отличаются повышенной пористостью, возрастающей с увеличением количества хрома в композиции, что приводит к снижению твердости гранулы в целом. В то же время влияние хрома на твердость плотных элементарных частиц, из которых сформирована композиционная гранула, обратное. На это указывает увеличение твердости компактных материалов, полученных горячим прессованием механически легированных композиций, с повышением содержания в них хрома (рис. 5).

Механически активируемая адгезионная способность шихты к стальным шарам и стенкам помольной камеры возрастает при дополнительном

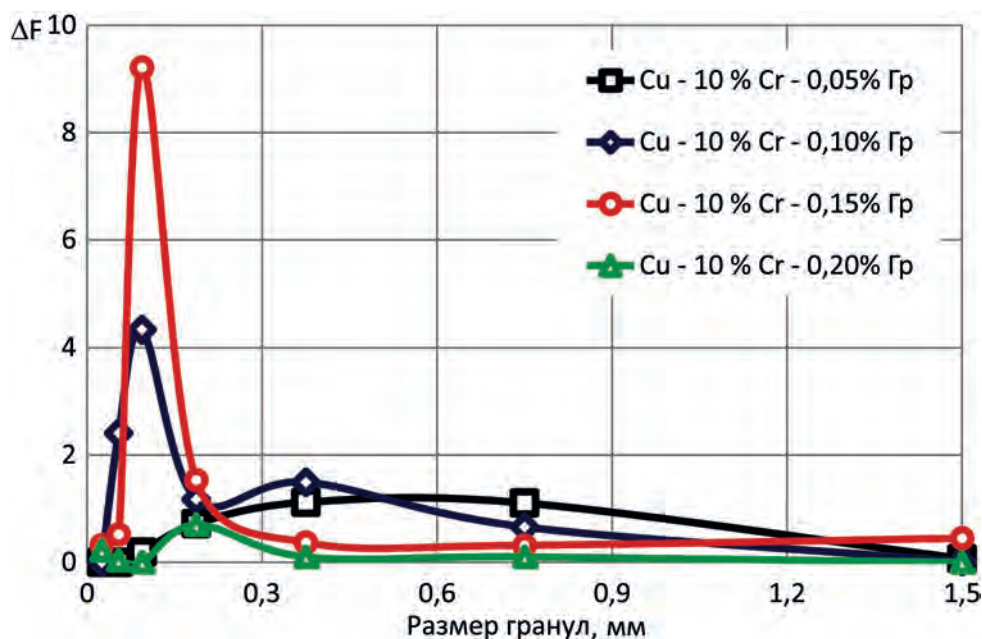


Рис. 6. Дифференциальные кривые распределения по размеру гранул механически легированных систем Cu – 10% Cr – C

легировании композиции цирконием, которое направлено на получение хромоциркониевой лигатуры. Так, введение 1,5% циркония в шихту, содержащую 10% Cr, снижает выход механически легированной композиции до 70%. Этот элемент имеет высокое сродство к кислороду и способствует более полному рафинированию меди, что подтверждает правомерность ранее приведенного предположения о роли механически активируемых окислительно-восстановительных превращений на адгезионную способность шихты.

Таким образом, анализ полученных данных позволяет сделать однозначный вывод, что для нормального протекания процесса механического легирования максимальное содержание хрома в шихте не должно превышать 10%.

Согласно результатам более ранних исследований авторов [12–14], увеличение продолжительности стадии и степени измельчения порошковых частиц при обработке шихты в механореакторе повышает степень завершения механически активируемых структурно-фазовых превращений, устойчивость процесса механического легирования и воспроизводимость его результатов. Наиболее простым и эффективным методом достижения этого является введение в шихту поверхностно-активного вещества (ПАВ). В качестве последнего в данной работе использован графит, содержание которого изменялось в пределах 0,05–0,20%. При этом изучено влияние ПАВ на процесс формирования, морфологию, структуру и свойства механически легированных гранулированных композиций. Базовой являлась композиция, содержащая 10% хрома.

Введение графита существенно снижает склонность к адгезии как между частицами обрабатываемой композиции, так и с рабочими телами и стенками помольной камеры, что задерживает процесс грануляции и уменьшает количество связанной шихты. Как следует из анализа дифференциальных кривых распределения по размеру гранул механически легированных систем (рис. 6), увеличение содержания ПАВ в композиции приводит к снижению размера частиц гранулированной композиции. Так, при введении 0,15% графита средний размер гранул уменьшается примерно в 2 раза и составляет около 200 мкм.

Увеличение содержания графита до 0,25% практически прекращает процесс образования гранул, размер которых не превышает 0,045 мм. Смесь начинает налипать на рабочие тела и особенно на дно помольной камеры в виде рыхлой «шубы». Выход снижается до 70% от массы навески.

Гранулы имеют округлую форму и гладкую поверхность (рис. 7). Применение ПАВ увеличивает их плотность. В этом случае они практически не содержат пор и характеризуются однородным распределением компонентов (рис. 7–9). Структура материала относится к суб-/микроструктурному типу. 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 включений глобулярного типа размером менее 0,5 мкм. Кроме того, в структуре выявляются пластинчатые включения легирующего элемента длиной до 10 мкм и толщиной менее 1 мкм.

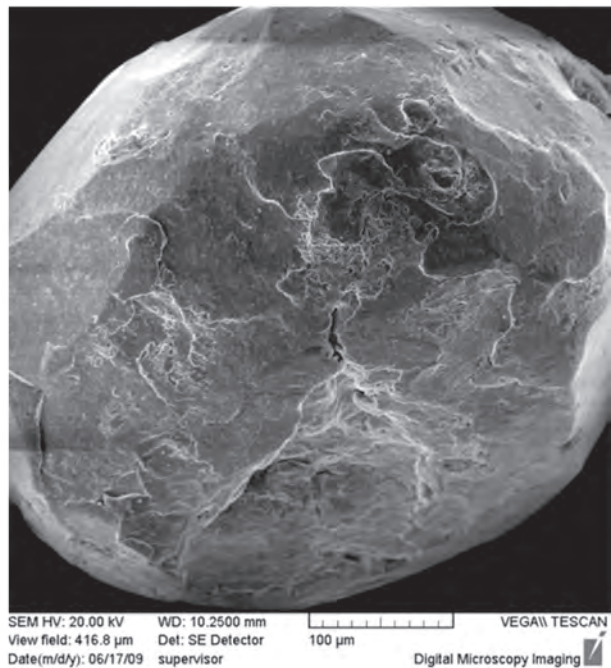
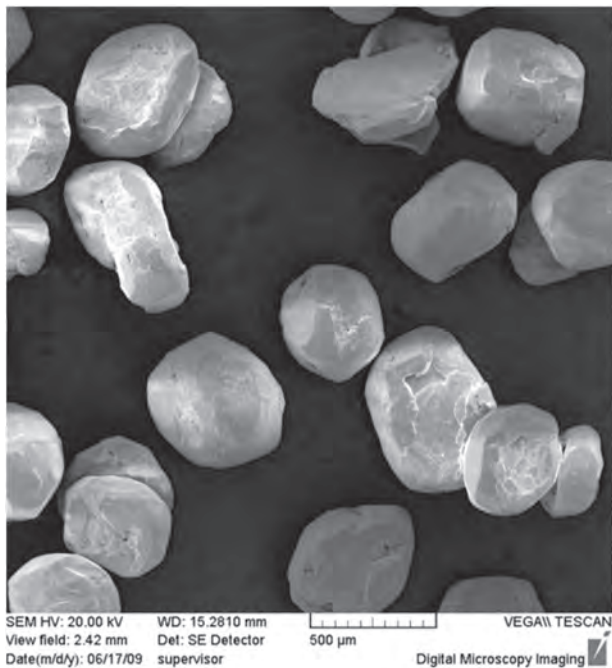


Рис. 7. Форма и топография поверхности гранул композиции Cu – 10% Cr – 0,15% C

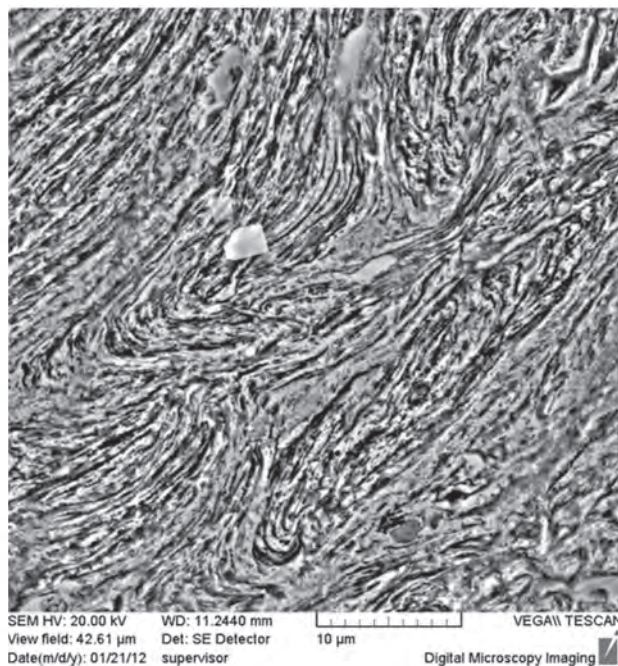
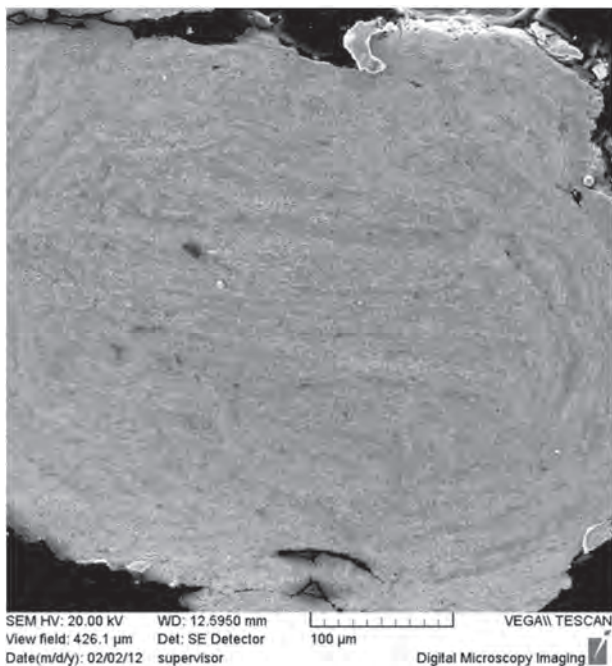


Рис. 8. Структура гранулированной композиции Cu – 10% Cr – 0,15% C

Как следует из рис. 10, зависимость микротвердости гранулированных композиций от содержания графита в исходной шихте описывается кривой с максимумом. Наибольшее значение этого параметра, равное HV 300, достигается при введении 0,15% ПАВ.

Исходя из полученных результатов, при производстве механически легированной хромовой лигатуры оптимальная концентрация легирующего компонента составляет ~10%. При этом в исходную смесь в качестве ПАВ следует вводить 0,15% графита. В то же время из-за большей склонности

к грануляции шихты для хромоциркониевой лигатуры (Cu – 10% Cr – 1,5% Zr) оптимальное содержание графита в исходной смеси составляет 0,20%.

Оптимальным способом компактирования механически легированных гранулированных лигатур является горячее прессование. Типовая структура прутков, полученных по этой технологии, приведена на рис. 11.

Анализ полученных данных показывает, что горячее прессование обеспечивает получение беспористого материала, плотность которого близка

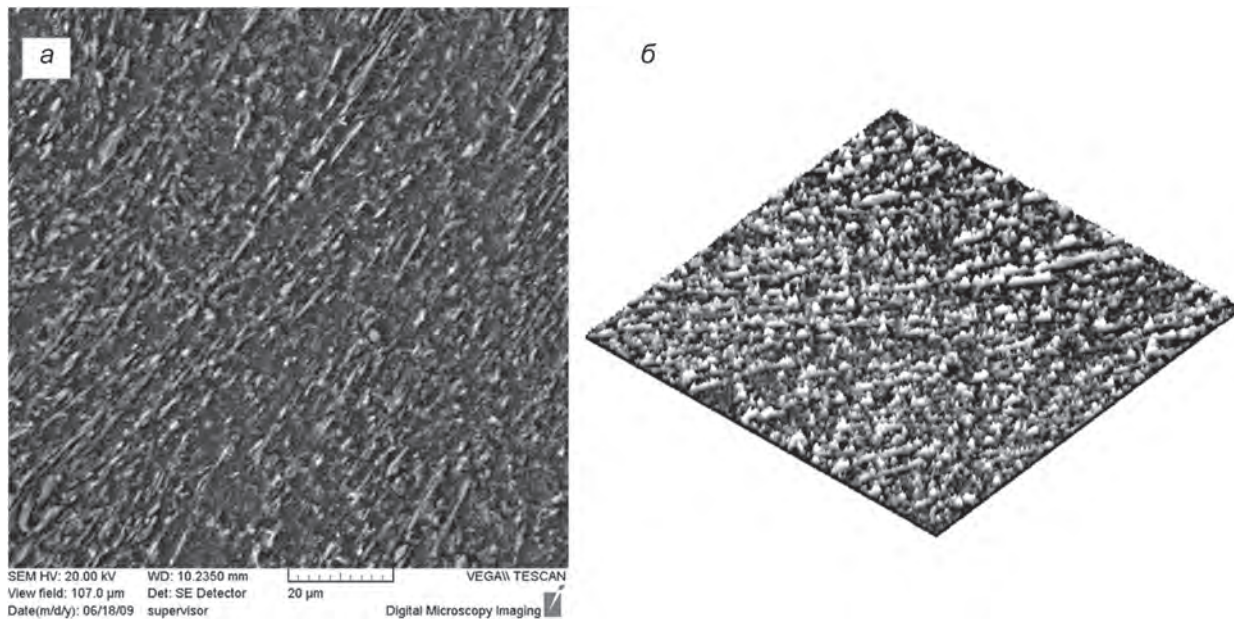


Рис. 9. Микроструктура гранул композиции состава Cu – 10% Cr – 0,15% C: а – двухмерное изображение; б – 3D-изображение

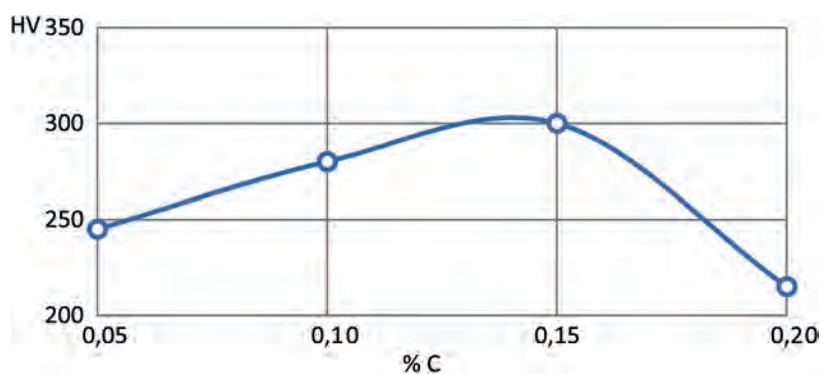


Рис. 10. Зависимость микротвердости гранулированных композиций Cu – 10% Cr от содержания графита

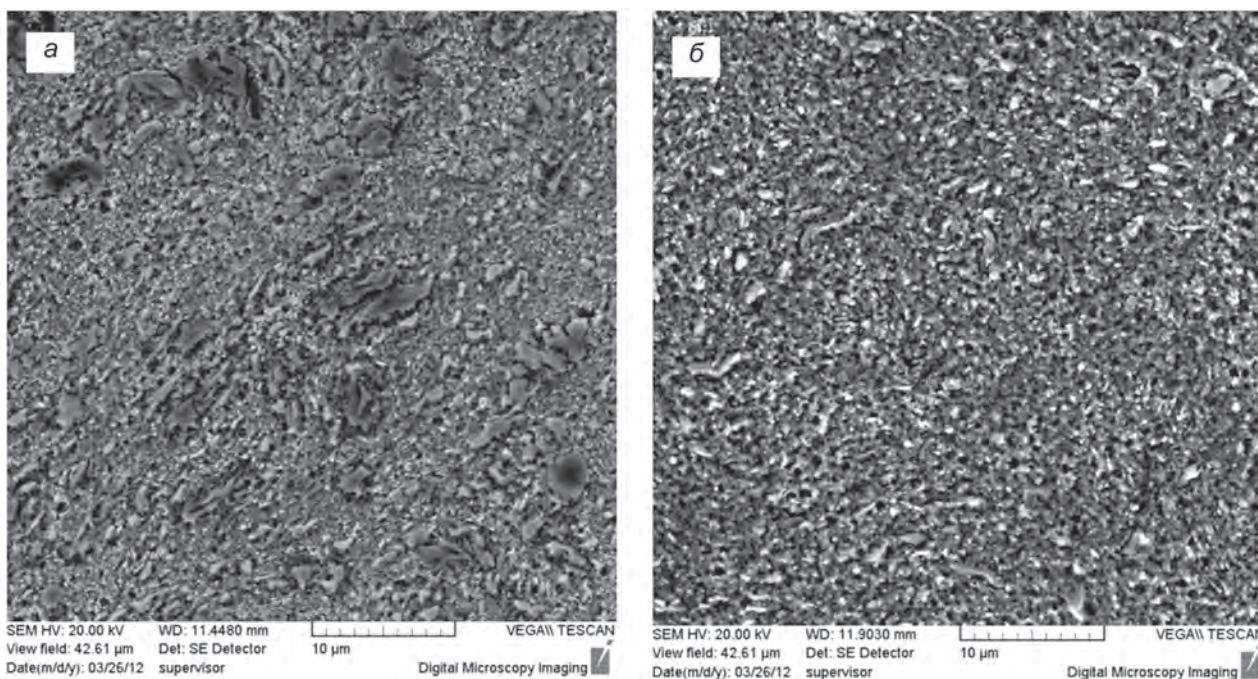


Рис. 11. Микроструктура горячепрессованных механически легированных лигатур: а – Cu – 10% Cr – 1,5% Zr; б – Cu – 10% Cr – 1,5% Zr – 0,15% C

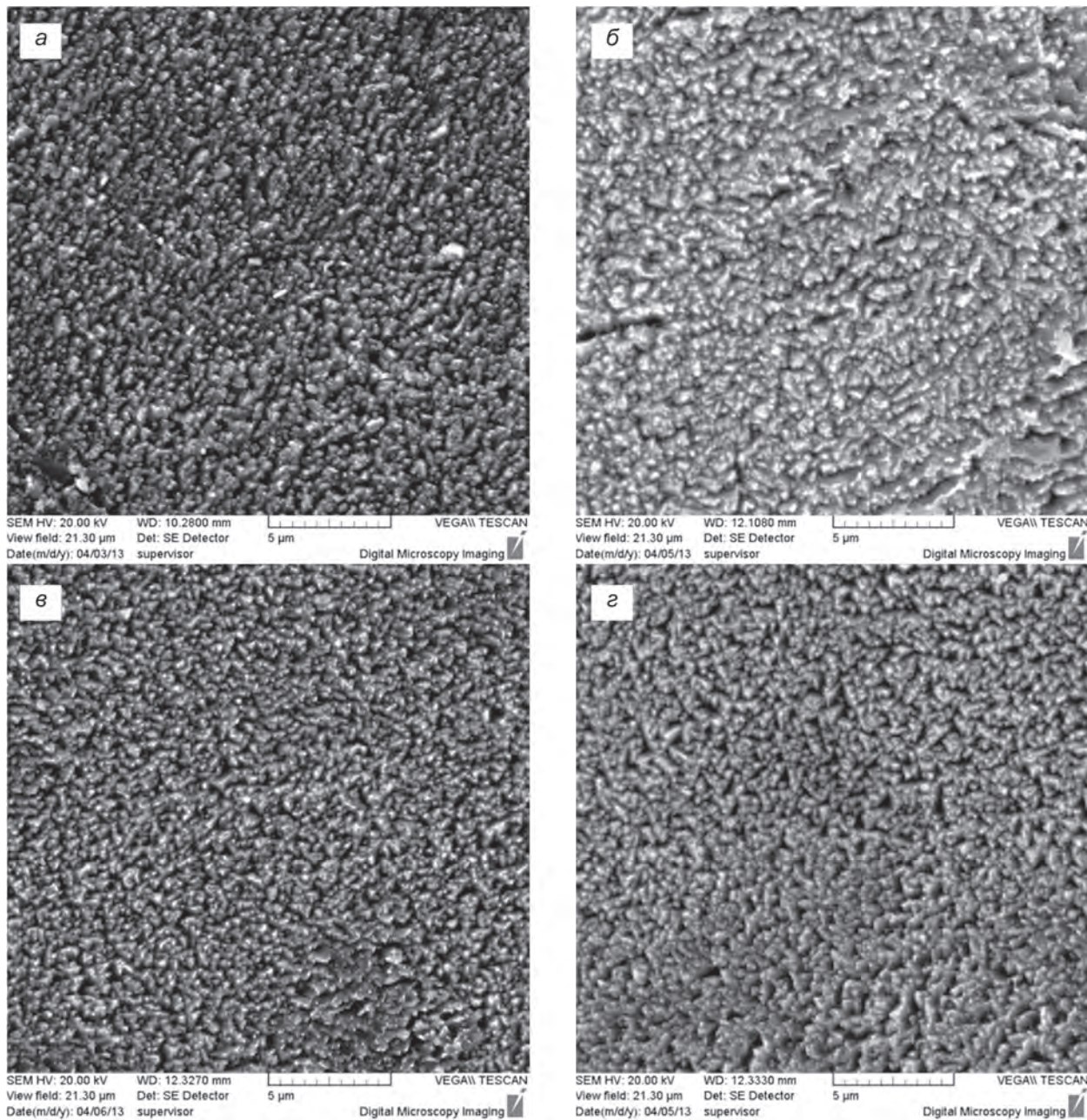


Рис. 12. Микроструктура хромоциркониевой бронзы $\text{Cu} - 0,55\% \text{Cr} - 0,006\% \text{Zr}$, полученной с применением механически легированной лигатуры оптимального состава, после обработки: *a* – закалка; *б* – закалка + старение; *в*, *з* – закалка + пластическая деформация + старение; охлаждение после старения: *б*, *в* – на воздухе

к теоретической. Структура материала относится к субмикроструктурному типу. Размер зерен основы составляет десятые доли микрометра. Основная масса хрома находится в виде включений, имеющих форму, близкую к глобулярной, величиной менее 0,3 мкм. Для материалов из механически легированных композиций, полученных без ПАВ, характерно наличие отдельных лепестковых включений хрома, максимальная длина которых достигает 3 мкм. Толщина их не превышает 1 мкм.

Большим достоинством опытной технологии является то, что применение механически легированных лигатур с субмикроструктурным распределением легирующих компонентов приводит

к их последующему быстрому растворению в расплаве меди. Это позволяет снизить температуру основной плавки на 150–200 °С и сократить ее продолжительность в 2–4 раза, уменьшить угар легирующих элементов не менее чем 1,8 раз, а также повысить экологичность процесса в целом. Кроме того, технология позволяет выплавлять хромовые бронзы на практически любых плавильных агрегатах, обеспечивающих необходимый температурный режим. Последующая обработка давлением и термомеханическая обработка опытных бронз осуществляются по стандартной технологии. Типичные структуры литой хромоциркониевой бронзы приведены на рис. 12.

Бронзы, полученные с использованием механически легированной лигатуры, отличаются высокой плотностью, отсутствием пор и микровключений. Наряду со своим основным назначением – легированием разработанные лигатуры выполняют также роль модификатора. Их тонкая структура наследуется литыми бронзами. Средний размер зерен основы бронз менее 1 мкм и их структура относится к субмикроструктурному типу. Легирующие элементы равномерно распределены в основе. Упрочняющими фазами после термической обработки являются Cr, Zr, и, вероятно, Cu₃Zr. Размер упрочняющих фаз не превышает 0,1 мкм и они относятся к нанокристаллическим. Изменение структуры оказывает положительное влияние на свойства материалов. Так, например, бронза, содержащая 0,55% Cr и 0,006% Zr, имеет следующий комплекс физико-механических свойств: твердость – 160 НВ, предел прочности при растяжении – 500 МПа, относительное удлинение – 16%, электропроводность – 82% от электропроводности меди, температурный интервал рекристаллизации – 600–700 °С.

Разработка «Технология получения механически легированных наноструктурных модифицирующих лигатур для производства высокопрочных субмикроструктурных бронз электротехнического назначения» в 2013 г. представлялась на Петербургской технической ярмарке и в номинации «Лучший инновационный проект в области передовых технологий машиностроения и металлургии» отмечена дипломом первой степени (с вручением золотой медали).

Выводы

1. Узким местом, сдерживающим выпуск хромовых бронз и определяющим их высокую стоимость, а также экологическую вредность производства, является изготовление лигатур. Один из перспективных методов решения проблемы – применение реакционного механического легирования, исключаящего из технологического процесса производства лигатур высокотемпературную плавку.

2. При обработке в механореакторе шихты на основе порошков «медь – хром» имеют место многообразные эффекты, изменяющие морфологию частиц. Основными из них являются пластическая деформация и разрушение исходных частиц, адгезия, агломерация, сварка осколков и формирование

гранулированной композиции, в которой исходные компоненты и продукты их механически активированного взаимодействия связаны и равномерно распределены между собой.

3. Оптимальный размер гранул находится в пределах 0,3–0,5 мм; при формировании композиций диаметром менее 0,2 мм возникает проблема предотвращения их окисления, в то же время образование крупных гранул величиной более 0,6 мкм приводит к снижению скорости протекания механически активируемых структурных и фазовых превращений, обеспечивающих образование nano-/субмикроструктурных лигатур.

4. Шихта, содержащая более 10% хрома, обладает высокой адгезионной способностью по отношению к стали, что приводит к связыванию части ее как с рабочими телами (шарами), так и стенками помольной камеры и нарушает протекание процесса механического легирования.

5. Механически активируемая адгезионная способность шихты к стальным шарам и стенкам помольной камеры возрастает при дополнительном легировании композиции цирконием. Одним из факторов, способствующих адгезии, является рафинирование основы – меди в результате более полного восстановления ее оксидов, покрывавших частицы исходного порошка.

6. Эффективным способом снижения склонности шихты к адгезии как между частицами обрабатываемой композиции, так и с рабочими телами, повышения стабильности процесса механического легирования и получения лигатуры, имеющей оптимальную структуру и гранулометрический состав, является применение ПАВ (серебристый графит) в количестве 0,15–0,20%.

7. Структура лигатур оптимального состава относится к nano- / субмикроструктурному типу с размером зерен основы менее 1 мкм, разделенных на блоки величиной не более 100 нм. Основное количество хрома находится в виде включений глобулярного типа размером менее 0,3 мкм.

8. Разработанные лигатуры наряду со своим основным назначением – легированием выполняют роль модификатора и их тонкая структура наследуется бронзами, имеющими субмикроструктурный тип структуры основы, стабилизированной наноразмерными упрочняющими фазами (Cr, Zr, и Cu₃Zr), что определяет высокий комплекс их физико-механических свойств.

Литература

- Новиков И. И. Теория термической обработки / И. И. Новиков. М.: Металлургия, 1978.
- Николаев А. К. Хромовые бронзы / А. К. Николаев, А. И. Новиков, В. М. Розенберг. М.: Металлургия, 1983.
- Николаев А. К. Сплавы для электродов контактной сварки / А. К. Николаев, В. М. Розенберг. М.: Металлургия, 1978.

4. Р о з е н б е р г В. М. Совершенствование технологии производства полуфабрикатов из цветных металлов и сплавов / В. М. Розенберг, А. К. Николаев // Плавка и литье цветных металлов и сплавов: науч. тр. М.: Metallurgia, 1977. № 50. С. 50–67.
5. Р о з е н б е р г В. М. Литейные свойства малолегированной меди / В. М. Розенберг, А. К. Николаев // Цветные металлы. 1972. № 8. С. 65–70.
6. З а х а р о в М. В. Жаропрочные сплавы / М. В. Захаров, А. М. Захаров. М.: Metallurgia, 1972.
7. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди: справ. / М. Е. Дриц [и др.]. М.: Наука, 1979.
8. Л о в ш е н к о Ф. Г. Бронзы электротехнического назначения и особенности их производства / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, И. А. Лозиков // Вест. Бел.-Росс. ун-та. 2012. № 3. С. 36–52.
9. Л о в ш е н к о Ф. Г. Литые хромосодержащие бронзы, получаемые с применением механически легируемых лигатур / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, И. А. Лозиков // Литье и металлургия. 2012. № 3. Спецвыпуск. С. 131–135.
10. Г о л о в е ш к а В. Ф. Производство меднохромовой лигатуры и влияние некоторых условий плавки и литья на ее качество / В. Ф. Головешка, В. И. Соколов // Плавка и литье цветных металлов и сплавов: науч. тр. М.: Metallurgia, 1969. № 32. С. 105–112.
11. Т е л и с М. Я. Фасонное литье медных сплавов / М. Я. Телис. М.: Машгиз, 1957. С. 75–84.
12. В и т я з ь П. А. Механически легированные сплавы на основе алюминия и меди / П. А. Витязь, Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко. Мн.: Беларуская навука, 1998.
13. Л о в ш е н к о Г. Ф. Теоретические и технологические аспекты создания наноструктурных механически легированных материалов на основе металлов / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко. Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2005.
14. Л о в ш е н к о Г. Ф. Наноструктурные механически легированные материалы на основе металлов / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко, Б. Б. Хина; под ред. Ф. Г. Ловшенко. Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2008.