

УДК 669.017

Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, И. А. Лозиков

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИ ЛЕГИРОВАННЫХ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ЛИГАТУР СИСТЕМЫ «МЕДЬ–ХРОМ»

UDC 669.017

F. G. Lovshenko, G. F. Lovshenko, I. A. Lozikov

FORMATION OF MECHANICALLY ALLOYED GRANULAR LIGATURES OF THE «COPPER–CHROME» SYSTEM

Аннотация

Приведены основные закономерности формирования морфологии, структуры и свойств механически легированных композиций системы «медь–хром» с высоким содержанием второго компонента, применяемых в качестве лигатур при производстве хромовых бронз, а также результаты оптимизации технологического процесса их получения.

Ключевые слова:

лигатура, система «медь–хром», механическое легирование, гранулированная композиция, морфология, структура, свойства.

Abstract

The paper presents the main mechanisms of the formation of morphology, structure and properties of mechanically alloyed compositions of the «copper–chrome» system, which have a high content of the second component and are used as ligatures to produce chrome bronzes. It also gives the results of the optimization of the technological process for their production.

Key words:

ligature, «copper–chrome» system, mechanical alloying, granular composition, morphology, structure, properties.

Введение

Одной из задач, стоящих перед научно-техническими организациями, работающими в области материаловедения, является создание новых прогрессивных технологических процессов и освоение производства импортозамещающих конкурентоспособных сплавов с особыми свойствами для различных отраслей промышленности и, прежде всего, машиностроения. Решение ее уменьшает внешнюю экономическую зависимость страны и позволяет улучшить наиболее важные параметры машин, повысить их надежность и долго-

вечность и снизить материалоемкость. В этой связи остро стоит проблема со специальными электродными жаропрочными низколегированными медными сплавами, предназначенными для изготовления всех видов рабочего инструмента различных контактных электро-сварочных машин. При большом многообразии бронз наиболее применяемыми для этой цели являются хромовые и хромоциркониевые бронзы типов БрХ и БрХЦр. В качестве основной технологии их производства служит двухстадийный способ выплавки, включающий изготовление лигатуры и конечного ма-

териала. Изготовление лигатур – сдерживающий процесс, определяющий высокую стоимость сплавов, а также экологическую вредность производства [1]. Одним из перспективных методов решения проблемы является применение реакционного механического легирования, исключаящего из технологического процесса производства лигатур высокотемпературную плавку [2–4].

Целью работы является установление закономерностей формирования механически легированных гранулированных композиций системы «медь–хром» с предельно высоким содержанием второго компонента. Основой для достижения поставленной цели могут служить результаты исследований морфологических и структурно-фазовых превращений, имеющих место в системе на всех этапах получения гранулированной композиции, и влияния на их протекание технологических факторов механического легирования.

Методика исследования

В качестве исходных компонентов для получения материалов применялись порошки меди ПМС-1 (ГОСТ 4960-75), хрома ПХ-1С (ТУ 14-1-1474-75) с размером частиц 63...45 мкм.

Реакционное механическое легирование проводилось в механореакторе, основой которого являлась вибромельница гирационного типа с четырьмя водоохлаждаемыми помольными камерами объемом 2 дм³ каждая. Процесс осуществлялся в изолированном рабочем пространстве камер из низкоуглеродистой стали 12X18H9T. Размалывающими телами служили стальные шары твердостью HRC 62. Продуктом механического легирования стала гранулированная композиция.

Ситовой анализ осуществлялся 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 проводилось с применением машины для сухого просеивания NTS-1 (Германия).

Микротвердость исследовалась на микротвердомере «Micromer-2» (Швейцария) при нагрузках на пирамиду 0,49 и 0,98 Н.

Металлографический анализ проводился на оптических микроскопах «Unimet» (Япония), «Reichert» (Австрия), сканирующем электронном микроскопе «Tescan VEGA II SBH» (Чехия). Исследование элементного состава осуществлялось 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. Субструктура и фазовый состав материалов изучались на просвечивающем электронном микроскопе «Tesla BS-540» с использованием гониометрических приставок. При этом исследование структуры гранулированной композиции проводилось путем осаждения мелких осколков гранул на угольные реплики.

Рентгеноструктурный анализ осуществлялся с применением монохроматизированного излучения $Co_{K\alpha}$ и $Cu_{K\alpha}$ на дифрактометре «ДРОН-3», оснащенном системой автоматизации, включающей: аппаратную часть, предназначенную для автономной реализации на базе компьютера IBM PC всех функций управления гониометром и обслуживания процесса сбора данных; программную часть, содержащую пакет программ «WinDif» по обработке и анализу полученных данных.

Результаты исследований и их обсуждение

При обработке порошковых смесей в механореакторе имеют место многообразные эффекты, изменяющие морфологию частиц. Основными из них являются: пластическая деформация, разру-

шение и сварка осколков по ювенильным поверхностям. Процесс разрушения определяется скоростью накопления дефектов кристаллического строения, возникающих при пластической деформации частиц. С увеличением частоты силового воздействия размалываемых тел на обрабатываемую композицию вероятность разрушения частиц возрастает. Параллельно с разрушением частиц в результате адгезии протекает 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 процессов разрушения и сварки формируется гранулированная композиция, в которой исходные компоненты или продукты их взаимодействия связаны и равномерно распределены между собой [2].

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 формирование механически легированной композиции, 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 [2].

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 происходит 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. Характерная структура механически легированной композиции «медь–хром (15 %)» и распределение элементов в ней приведены на рис. 1.

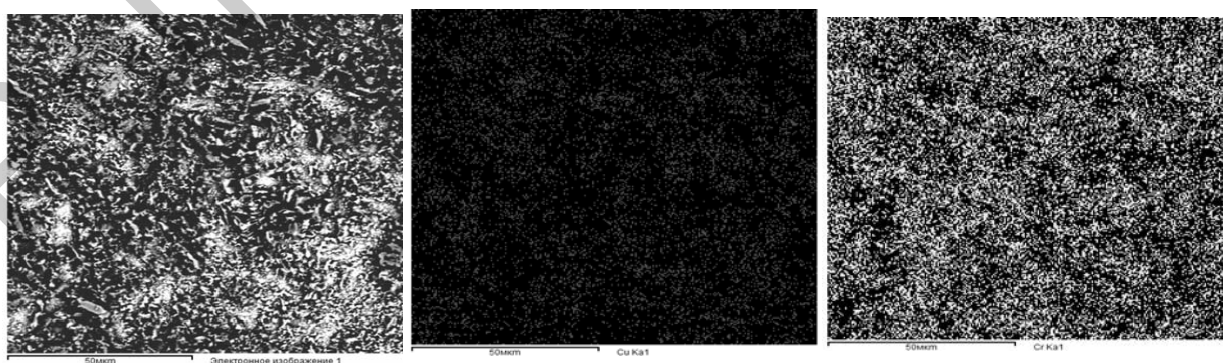


Рис. 1. Структура механически легированной композиции «медь–хром (15 %)» и распределение элементов в ней

На этой стадии в большей или меньшей мере получает развитие также 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 [2, 3, 5].

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 композиций, основой которых являются мягкие и пластичные металлы, например, медь или алюминий, 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, будет увеличивать угар легирующих элементов при основной плавке. Исходя из вышеприведенного, оптимальный размер гранул механически легированных нано-/субмикроструктурных лигатур находится в пределах 0,2...0,5 мм.

Кинетика формирования гранулированных композиций и размер частиц, а также их механические свойства зависят от энергонапряженности режима механического легирования, под которой понимается мощность, затрачиваемая на единицу массы обрабатываемой шихты. Для ряда систем в определенном интервале значений энергонапряженности режима обработки в механореакторе вибрационного типа установлена прямо пропорциональная зависимость между этим фактором и скоростью механохимических превращений [2, 6]. В свою очередь, основными факторами, влияющими на энергонапряженность вибромельницы, являются амплитуда и частота колебаний помольной камеры, степень заполнения помольной камеры рабочими телами и отношение объемов рабочих тел и обрабатываемой шихты. Мощность, потребляемая вибрационным механореактором, выражается уравнением

$$N = aM_c\omega^3r,$$

где a – величина, характеризующая положение центра тяжести размалывающей нагрузки; M_c – полная масса шаровой загрузки; ω – частота круговых колебаний; r – амплитуда колебаний [7].

Скорость протекания механохимических превращений определяется частотой и усилием ударного воздействия на обрабатываемую композицию. Эти показатели, в свою очередь, являются функцией ряда факторов, основные из которых – ускорение размалывающих тел a_n и степень заполнения помольной камеры рабочими телами ε . Величина первого фактора, в зависимости от природы обрабатываемой композиции, находится в пределах $80 \dots 160 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$. При оптимальном значе-

нии амплитуды колебаний помольной камеры, равном $4 \dots 6 \text{ мм}$, для обеспечения этого ускорения круговая частота, рассчитанная по уравнению $a_n = (2\pi\omega)^2r$, изменяется в интервале $18 \dots 27 \text{ с}^{-1}$. Экспериментально установленная зависимость силы F и частоты ударного воздействия на 1 мм^2 п помольной камеры от ускорения размалывающих тел a_n и степени заполнения помольной камеры рабочими телами ε приведена на рис. 2. При исследовании влияния первого фактора a_n на вышеприведенные параметры значение второго ε составляло 70% , а влияние второго ε изучено при величине первого a_n , равной $125 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$. При этом амплитуда колебаний помольной камеры r во всех случаях – 5 мм .

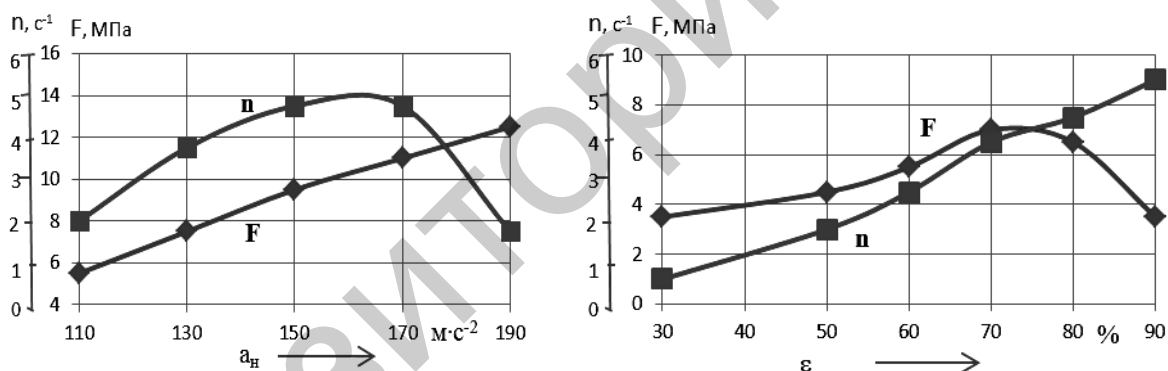


Рис. 2. Влияние ускорения размалывающих тел a_n и степени заполнения помольной камеры рабочими телами ε на силу F и частоту ударного воздействия n на 1 мм^2 стенки помольной камеры

Анализ полученных данных показывает, что зависимость F от a_n близка линейной, а изменение этого параметра от ε описывается кривой с максимумом, имеющим место при степени заполнения помольной камеры шарами, равном 70% . Зависимости частоты ударного воздействия n от a_n и ε качественно обратны вышеприведенным.

Кинетика формирования гранулированных композиций, размер частиц и их механические свойства обусловлены

развитием процессов адгезии и сварки, с одной стороны, и протеканием механохимических превращений, определяющих твердость, прочность и пластичность гранул, с другой. Как показано выше, первые два процесса способствуют, а последний препятствует грануляции. Между средним размером частиц гранулированной композиции и их микротвердостью имеется обратная зависимость: с возрастанием значения второго показателя, вызванным изме-

нением условий обработки в механореакторе, величина первого уменьшается, и наоборот.

Наряду с ускорением рабочих тел и степенью заполнения ими помольной камеры технологическими факторами, оказывающими существенное влияние на морфологию и свойства гранулированной композиции, являются отношение объемов рабочих тел и обрабатываемой шихты k , температура в помольной камере t и продолжительность обработки шихты τ [2]. С целью оптимизации процесса механического легирования в работе факторы варьировались в пределах: $a_n = 80 \dots 140 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$, $\varepsilon = 60 \dots 90 \%$, $k = 6 \dots 9$, $\tau = 2 \dots 8 \text{ ч}$, $t = 50 \dots 150 \text{ }^\circ\text{C}$.

Согласно проведенному исследованию, результаты которого представлены на рис. 3, изменение значений a_n и ε , направленное на увеличение энергонапряженности процесса механического легирования, на начальном этапе приводит к росту твердости гранул, который в дальнейшем сменяется ее падением (см. рис. 3). Тенденция к снижению твердости отмечается при $a_n \geq 120 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$, $\varepsilon \geq 75 \%$. Увеличение отношения объемов рабочих тел и обрабатываемой шихты с 6 до 8 приводит к повышению твердости гранулированной композиции. Дальнейшее уменьшение количества шихты в рабочей камере заметного влияния на твердость не оказывает.

Снижение твердости из-за варьирования факторов относительно оптимального значения обусловлено отрицательным влиянием его на скорость механохимических превращений, имеющих место в грануле и обеспечивающих формирование упрочняющих фаз. Активация их на начальном этапе увеличения a_n , ε , и k определена повышением энергонапряженности режима обработки, вызывающим возрастание усилия и частоты ударного воздействия на обрабатываемую композицию (см. рис. 2). В то же время при энергонапряженности выше оптимальной на этом этапе формирования механически легированной

композиции, имеющей низкое упрочнение, адгезия и сварка значительно преобладают над разрушением, что приводит к активному протеканию процессов первичной и собирательной грануляции и формированию крупных частиц размером более 1,5 мм. Как показано выше, механохимические превращения получают развитие только в поверхностном слое гранул, глубина которого не превышает 0,2 мм, и во внутренней зоне гранул диаметром более 0,4 мм скорость протекания механически активируемых превращений низка. В результате полнота превращений в обрабатываемой композиции в целом уменьшается. Это влечет за собой снижение твердости и способствует грануляции.

Внешней стороной, отражающей сложные физико-химические процессы, протекающие при механическом легировании, является изменение морфологии и размера частиц обрабатываемой композиции. Для определения последнего применялся ситовой анализ, по результатам которого строили дифференциальные кривые распределения частиц по размерам. Функцией служила величина $F(d)$, которую находили из выражения

$$F(d) = \Delta m / (m \cdot \Delta d),$$

где m – общая масса анализируемого порошка; Δm – масса порошка на сите; Δd – разность размера ячеек сит, следующих друг за другом.

Исходя из анализа данных (рис. 4), показывающих распределение механически легированных гранулированных композиций по величине, зависимость среднего размера гранул от факторов a_n , ε , и k , оказывающих влияние на энергонапряженность обработки, описывается кривой с минимумом. Минимальное значение этого параметра имеют гранулированные композиции, режим получения которых близок к режиму, обеспечивающему их максимальное упрочнение.

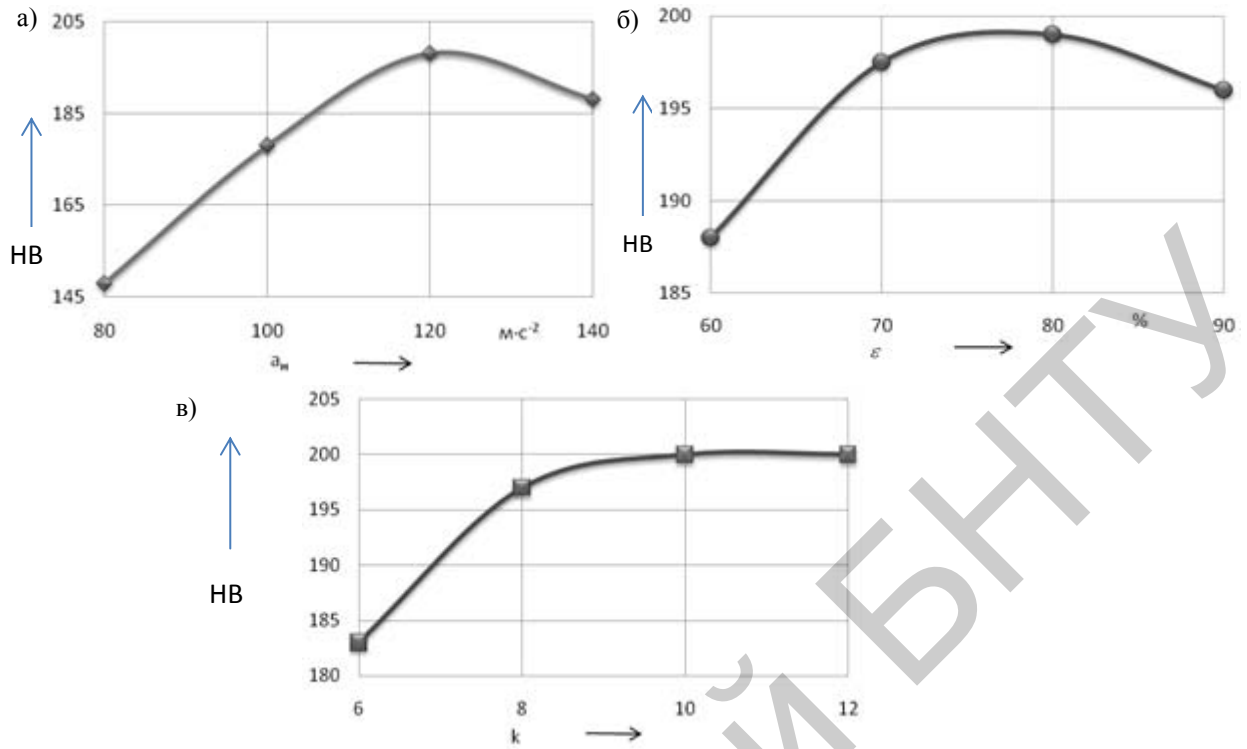


Рис. 3. Зависимость твердости гранулированных композиций от ускорения размалывающих тел (а); степени заполнения помольной камеры рабочими телами (б); отношения объема рабочих тел к объему шихты (в)

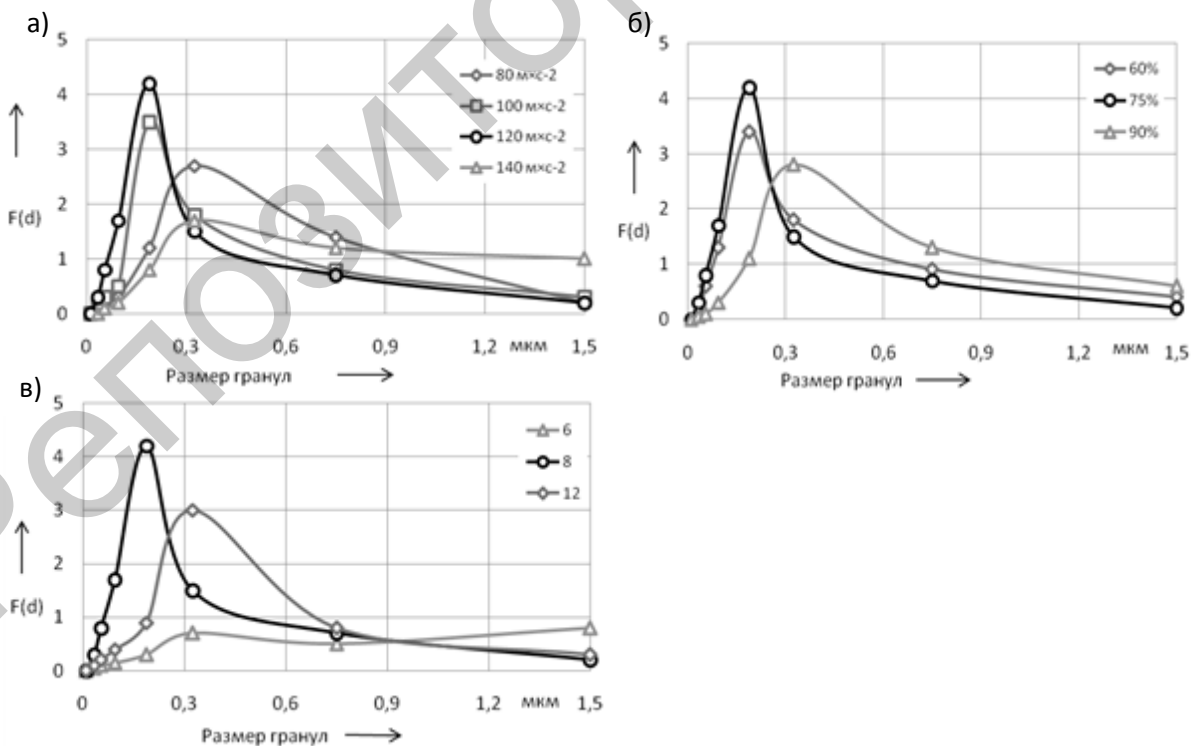


Рис. 4. Зависимость распределения частиц механически легированной композиции 85 % Cu + 15 % Cr от: а – a_n ; б – ϵ ; в – k

Согласно теоретическим оценкам, при механическом легировании в вибромельнице имеют место лобовой и скользящий удары. Результаты исследования, приведенные в [8], позволяют сделать следующие выводы:

- порошковая композиция, обрабатываемая в энергонапряженной вибромельнице (механореакторе), испытывает многократное механическое воздействие вследствие упругого лобового и скользящего ударов рабочих тел (шаров), активирующее разнообразные механохимические превращения, вызывающие протекание процесса механического легирования (сплавления);

- упругий лобовой удар обеспечивает высокие значения степени и скорости пластической деформации в микрообъемах, определяющие большую скорость генерации дефектов кристаллического строения и, как следствие, ускоренную диффузию компонентов, гомогенизирующих композицию, и создает условия для протекания механически активируемых химических реакций по дислокационному механизму и механизму, обусловленному образованием короткоживущих активных центров;

- скользящий удар, в отличие от упругого, вызывает дополнительный кратковременный ($10^{-4} \dots 10^{-3}$ с) локальный ($10^{-1} \dots 10$ мкм) разогрев обрабатываемой композиции до значений 1200...1400 К, достаточный для активации механохимических превращений по тепловому механизму;

- в механически легируемых композициях, имеющих низкую концентрацию реагирующих компонентов, наиболее вероятным случаем протекания механохимических реакций является периодически возобновляющееся взаимодействие между компонентами – угасание реакции из-за теплопотерь и последующее инициирование ее импульсным механическим воздействием на композиционную частицу; тепловой взрыв (СВС) возможен в сильно экзотермических системах с высокой концентрацией

реагирующих компонентов.

Тепловой режим в помольной камере влияет на размер локальных зон разогрева, величину температурных пиков в них и скорость теплоотвода. Повышение температуры в помольной камере оказывает положительное влияние на первые два параметра и отрицательное – на третий. Это интенсифицирует диффузионные процессы, снижает пороговое значение механического воздействия, вызывающего химическую реакцию, что активизирует взаимодействие между компонентами. В то же время оно интенсифицирует процесс грануляции (рис. 5), уменьшающий контактную поверхность реагирующих компонентов и, как следствие, затрудняет взаимодействие между ними, что негативно влияет на интенсивность механохимических процессов и приводит к заметному снижению твердости (рис. 6). Кроме этого, увеличивается склонность к навариванию обрабатываемой шихты на рабочие тела и стенки помольной камеры, отрицательно влияющая на воспроизводимость результатов. Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что максимальное значение температуры в помольной камере не должно превышать 80 °С.

Установлено, что увеличение времени обработки приводит к уменьшению среднего размера гранул и количества крупных (рис. 7). Оптимальной, с точки зрения среднего размера гранул и затрат электроэнергии на получение гранулированной композиции, является продолжительность механического легирования в течение 6 ч.

Развитие механохимических превращений, включая фазовые, вызывает диспергирование зерен и субзерен. Процесс при механическом легировании происходит в результате протекания процесса динамической рекристаллизации [2]. Увеличение продолжительности обработки смеси в механореакторе более 1 ч приводит к непрерывному уменьшению областей когерентного

рассеивания, плотности дислокаций, искажения кристаллической решетки (рис. 8). Наибольшее изменение этих характеристик отмечается при механическом легировании в интервале

0,5...1,5 ч. Фрагментирование приводит к уменьшению размера кристаллитов до значений, не превышающих десятых долей микрометров (см. рис. 1).

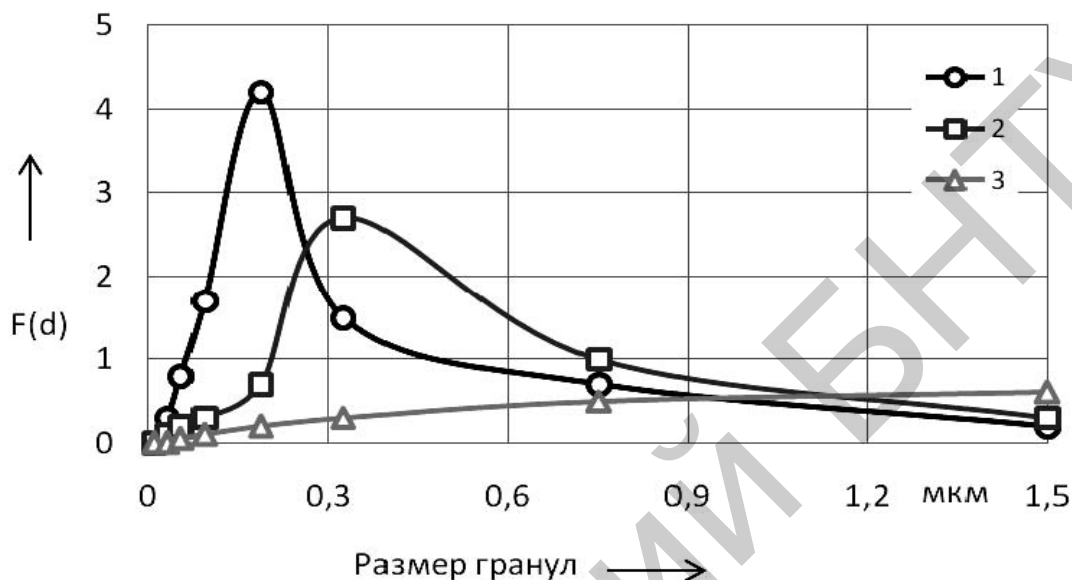


Рис. 5. Распределение частиц гранулированной композиции 85 % Cu + 15 % Cr: условия механического легирования: $a_n = 120 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$, $\varepsilon = 75 \%$, $k = 8$, $\tau = 6 \text{ ч}$; температура в помольной камере: 1 – 50 °C; 2 – 100 °C; 3 – 150 °C

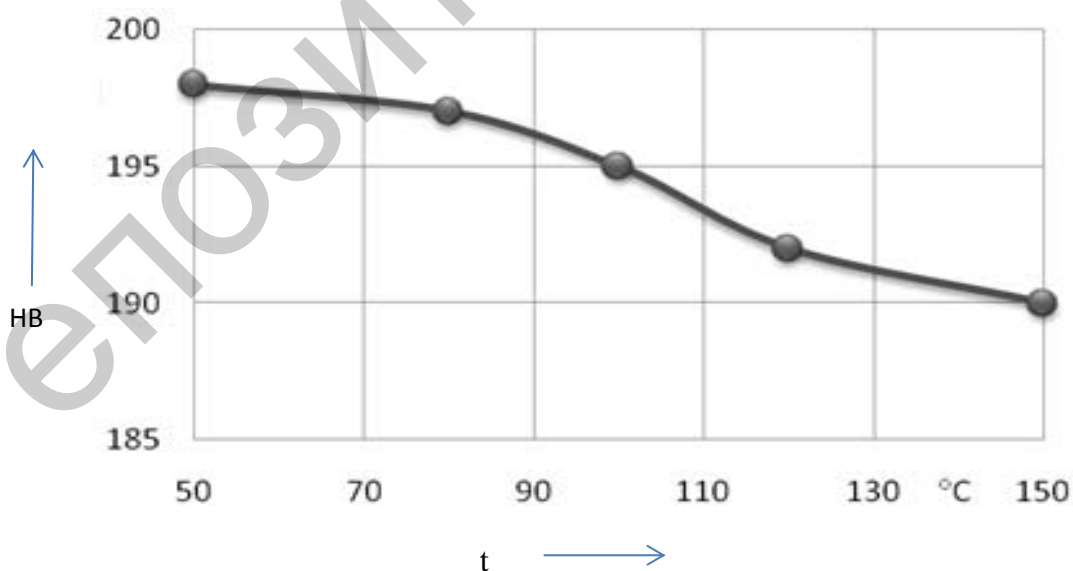


Рис. 6. Влияние температуры в помольной камере на твердость механически легированной композиции 85 % Cu + 15 % Cr

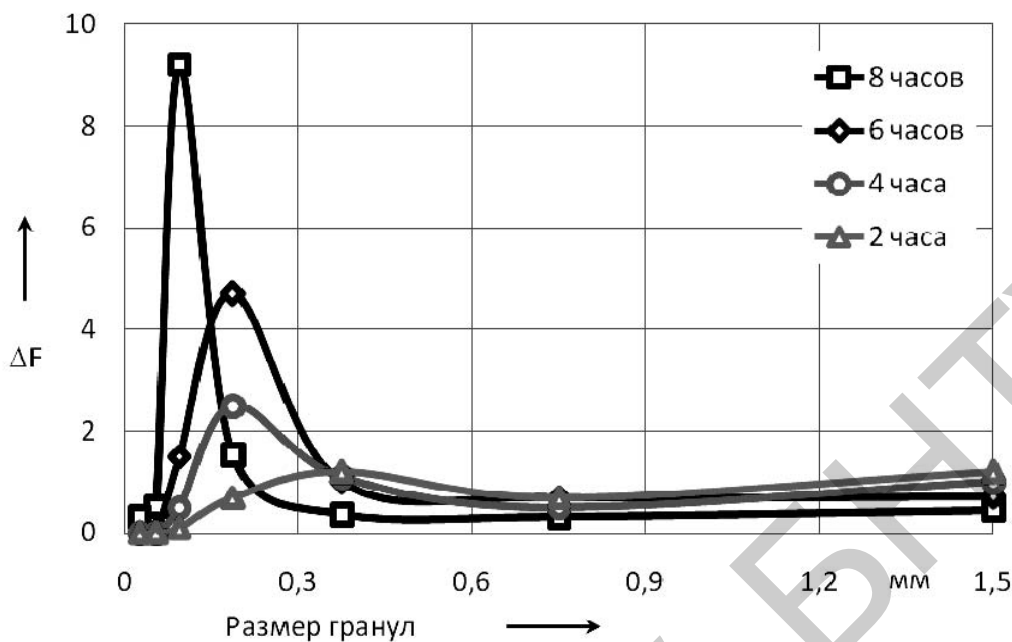


Рис. 7. Влияние времени обработки в механореакторе композиции Cu – 15 % Cr на средний размер гранул

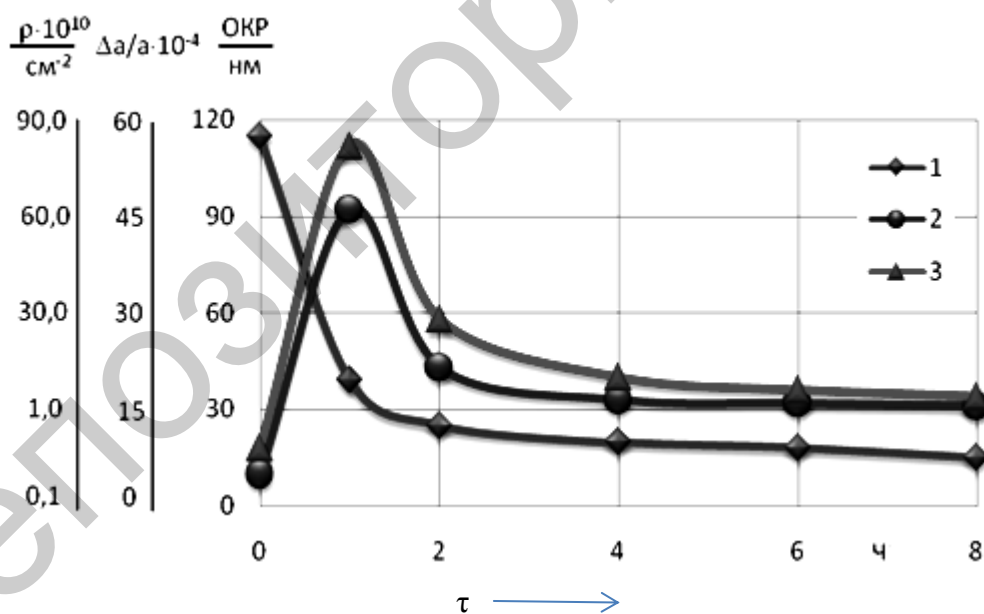


Рис. 8. Влияние продолжительности механического легирования на параметры тонкой структуры композиции 85 % Cu + 15 % Cr: 1 – ОКР; 2 – ρ; 3 – Δa/a

Формирование наноразмерной структуры основы с большой протяженностью поверхности раздела между компонентами способствует образова-

нию центров кристаллизации новых фаз и ускоряет процесс формирования твердого раствора.

Согласно диаграмме состояния

«Cu-Cr», в системе отсутствуют соединения и хром имеет ограниченную переменную растворимость в меди, максимальное значение которой при температуре эвтектики составляет 0,65 %, а при комнатной – близко к нулю.

В работе электронографическим методом установлено наличие в механически легированной композиции Cu, Cr и Fe. Присутствие железа связано с намолотом в процессе обработки шихты основного компонента сталей, из которых изготовлены помольные камеры и рабочие тела (шары) механореактора. Высокая твердость гранул механически легированных лигатур (см. рис. 3), сохраняющаяся при нагреве до 650 °С, обусловлена их комплексным упрочнением, сочетающим зернограничное и дисперсное и вызванным высокоразвитой поверхностью границ зерен и субзерен основы, стабилизированных субмикроструктурными включениями хрома.

Выводы

1. Закономерности формирования, морфология и структура механически легированных композиций «медь-хром» и дисперсно-упрочненных медных систем подобны.

2. При обработке в механореакторе шихты «медь-хром» имеют место сложные физико-химические процессы, изменяющие морфологию, структуру и свойства композиции. Основными из них являются: пластическая деформация, накопление дефектов 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 с диаметром менее 0,2 мм возникает проблема предотвращения их окисления. Образование

гранул величиной более 0,6 мкм приводит к снижению скорости протекания механически активируемых структурных и фазовых превращений, обеспечивающих получение нано-/субмикроструктурных лигатур.

4. Особенность медных композиций – высокая склонность к грануляции, протекание которой регулируется изменением энергонапряженности процесса механического легирования. Основными факторами, влияющими на этот параметр, являются амплитуда и частота колебаний помольной камеры, определяющие нормальное ускорение рабочих тел, степень заполнения камеры рабочими телами и отношение объемов рабочих тел и обрабатываемой шихты.

5. Оптимальный размер гранул находится в пределах 0,3...0,5 мм. При получении 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-/субмикроструктурных структур.

6. Оптимальный гранулометрический состав механически легированных композиций «медь-хром» формируется при следующих условиях обработки шихты в механореакторе: нормальное ускорение рабочих тел – 120...130 м·с⁻²; степень заполнения камеры рабочими телами – 70...80 %; отношение объемов рабочих тел и обрабатываемой шихты – 8...10; $\tau_{обр.}$ = 6...8 ч; температура в рабочей камере – 40...50 °С; продолжительность обработки шихты в механореакторе – 6...8 ч.

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

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Николаев, А. К. Хромовые бронзы / А. К. Николаев, А. И. Новиков, В. М. Розенберг. – М. : Металлургия, 1983. – 176 с.
2. Ловшенко, Г. Ф. Наноструктурные механически легированные материалы на основе металлов : монография / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко, Б. Б. Хина ; под ред. Ф. Г. Ловшенко. – Могилев : Беларус.- Рос. ун-т, 2008. – 679 с. : ил.
3. Ловшенко, Ф. Г. Перспективные технологии : монография / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, И. А. Лозиков ; под ред. В. В. Клубовича. – Витебск : ВГТУ, 2011. – Гл. 10. – С. 214–233.
4. 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.
5. Ловшенко, Ф. Г. Наноструктурные механически легированные материалы на основе никеля : монография / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко. – Минск : БНТУ, 2012. – 297 с.
6. Хайнике, Г. Трибохимия : пер. с англ. / Г. Хайнике. – М. : Мир, 1987. – 584 с.
7. Роуз, Г. Е. Новые результаты исследований вибрационных мельниц и вибрационного помола / Г. Е. Роуз // Сб. тр. Европейского совещания по измельчению. – М. : Изд-во литературы по строительству. – 1966. – С. 394–426.
8. Ловшенко, Г. Ф. Оценка факторов, активирующих механохимические превращения при механическом легировании в вибромельнице / Г. Ф. Ловшенко, Б. Б. Хина // Трение и износ. – 2005. – Т. 26, № 4. – С. 434–445.
9. Ловшенко, Г. Ф. Закономерности формирования дисперсно-упрочненных механически легированных композиций на основе металлов / Г. Ф. Ловшенко // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. – 2008. – № 4. – С. 85–95.
10. Ловшенко, Ф. Г. Получение, состав, структура и свойства механически легированных композиций систем Cu–Cr, Cu–Zr, Cu–Cr–Zr / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, А. И. Хабибуллин // Литье и металлургия. – 2008. – № 3. – С. 82–88.
11. Ловшенко, Ф. Г. Литые 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.
12. Ловшенко, Ф. Г. Бронзы электротехнического назначения и особенности их производства / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, И. А. Лозиков // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. – 2012. – № 3. – С. 36–52.

Статья сдана в редакцию 4 марта 2014 года

Федор Григорьевич Ловшенко, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-296-25-21-26.

Григорий Федорович Ловшенко, д-р техн. наук, проф., Белорусский национальный технический университет. E-mail: Greg-lovshenko@mail.ru.

Игорь Александрович Лозиков, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет.

Fedor Grigoryevich Lovshenko, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Phone +375-296-25-21-26.

Grigory Fedorovich Lovshenko, DSc (Engineering), Prof., Belarusian National Technical University. E-mail: Greg-lovshenko@mail.ru.

Igor Aleksandrovich Lozikov, senior lecturer, Belarusian-Russian University.