



УДК 669.017

Поступила 11.03.2016

## ПОЛУЧЕНИЕ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ХРОМОВЫХ БРОНЗ, ЛЕГИРОВАННЫХ МЕХАНИЧЕСКИ СПЛАВЛЕННЫМИ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ МОДИФИЦИРУЮЩИМИ ЛИГАТУРАМИ

## PRODUCTION, STRUCTURE AND PROPERTIES OF CHROMIUM BRONZE ALLOYED MECHANICALLY WITH THE MELTING OF NANOCRYSTALLINE MODIFYING LIGATURES

Ф. Г. ЛОВШЕНКО, ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет», г. Могилев, Беларусь, пр. Мира, 43,  
Г. Ф. ЛОВШЕНКО, УО «Белорусская государственная академия авиации», г. Минск, Беларусь,  
ул. Уборевича, 77. E-mail: lovshenko@mail.ru,

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

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

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

E-mail: lovshenko@mail.ru,

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

*Реакционное механическое легирование является эффективной технологией получения нанокристаллических модифицирующих лигатур и модификаторов. При выплавке хромовых бронз применение механически легированных модифицирующих лигатур позволяет исключить из технологии получения материалов высокотемпературный, требующий специального дорогостоящего печного оборудования, экологически опасный процесс производства литых лигатур, а также снизить оптимальную температуру процесса легирования расплава меди на 50–100 °С при уменьшении его продолжительности в 2,5–3,5 раза. Механически легированные модифицирующие лигатуры обеспечивают формирование дисперсно-упрочненных жаропрочных материалов с суб-/микроструктурным типом структуры основы, которые по прочности, твердости, электропроводности и температуре начала рекристаллизации примерно на 15–20% превосходят базовые, что увеличивает стойкость электродов контактной сварки 1,8–2,2 раза.*

*The reactive mechanical alloying is an effective technology for production of nanocrystalline modifying modifiers and ligatures. During smelting chromium bronzes use of mechanically alloyed modifying ligatures allow to exclude from the technology the environmentally hazardous high-temperature process of production of cast ligatures and to reduce the optimum temperature of the melt alloying process copper at 50–100 °C by reducing its duration 2, 5–3,5 times. This excluded process requires expensive furnace equipment.*

*Mechanically alloyed modifying ligatures allow the formation of dispersion-strengthened heat-resistant materials with sub-/microcrystalline structure type bases, which are strength, hardness, conductivity and temperature of the onset of recrystallization about 15–20% superior to the base, which increases the resistance of the welding electrodes by 1.8–2.2 times.*

**Ключевые слова.** Механически легированные нанокристаллические модифицирующие лигатуры, эффективность применения, хромовые бронзы, технология получения, фазовый состав, структура, свойства.

**Keywords.** Mechanically alloyed nanocrystalline modifying the ligatures, the effectiveness of use, chrome bronze, producing technology, phase composition, structure, properties.

### Введение

Основной технологией производства хромовых бронз, включая комплексно-легируемые, являющихся одним из распространенных материалов электротехнического назначения, служит двухстадийный способ выплавки, включающий производство лигатуры и конечного сплава. Наиболее известные из них – хромовые и хромоциркониевые бронзы. Оптимальная концентрация хрома в лигатуре для первых и вторых составляет 10%. Лигатура вторых дополнительно содержит 1,0–1,5% циркония. Узким местом, сдерживающим процесс и определяющим высокую стоимость этих бронз, а также экологическую вред-

ность производства, является изготовление лигатур [1]. Общеизвестно, что перспективным способом повышения свойств литых материалов служит модифицирование. При этом наиболее эффективно применение модифицирующих лигатур. Однако литературные сведения о получении и применении модификаторов и модифицирующих лигатур для производства бронз электротехнического назначения, направленном на упрощение технологии изготовления и повышения их физико-механических свойств, отсутствуют. Одним из перспективных методов решения проблемы является применение реакционного механического легирования, обеспечивающего получение модифицирующих лигатур и исключаящего из технологического процесса их производства высокотемпературную плавку [2].

Цель данной работы – исследовать влияние механически легированных нанокристаллических модифицирующих лигатур на процесс получения, структуру и свойства хромовых бронз.

### Материалы, оборудование и методика исследования

Механически легированные лигатуры получены по классической технологии производства механически легированных материалов [3–5].

**Исходные компоненты для лигатуры** – порошки меди ПМС-1 (ГОСТ 4960-2009), хрома ПХ-1С (ТУ 14-1-1474-75), циркония ПЦрК-III (ТУ 48-4-234-84) и графита литейного (ГОСТ 5279-74). Размер частиц порошков меди и хрома находился в пределах 45–63 мкм, а циркония составлял менее 45 мкм. Содержание компонентов в шихте соответствовало оптимальному и составляло: хром – 10%, цирконий – 1,5, графит литейный – 0,15%. Кроме этих элементов, во всех композициях в качестве примеси, в основном связанной в оксиды меди, присутствовал кислород в количестве 0,3–0,4%.

Реакционное механическое легирование проводили в механореакторе, основой которого являлась вибромельница гирационного типа с четырьмя водоохлаждаемыми помольными камерами объемом 2 дм<sup>3</sup> каждая. Процесс осуществляли в атмосфере аргона (ГОСТ 10157-79). Продуктом механического легирования служила гранулированная композиция. Композиции являются реакционно-способными. Выполненное термодинамическое моделирование 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 [6]. В табл. 1 для двух 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

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

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

Компактные лигатуры в виде прутков диаметром 10 и 12 мм получали методом экструзии холоднопрессованных брикетов из гранулированных композиций. Они сохраняют субмикрокристаллический тип структуры гранулированных композиций. Размер зерен основы не превышает 1 мкм. Зерна, в свою очередь, разделены на блоки, величина которых не более 50 нм. Для лигатур характерно гомогенное и ультрадисперсное распределение элементов. Основное количество хрома находится в виде частиц глобулярного типа размером менее 0,5 мкм. Кроме того, в структуре выявляются отдельные пластинчатые включения этого элемента длиной до 10 мкм и толщиной менее 1 мкм. Исследования фазового состава лигатур, выполненные методами просвечивающей электронной микроскопии, полностью подтвердили результаты термодинамического моделирования. Протекание в композициях в процессе реализации технологии получения лигатур механически и термически активируемых превращений, направленных на уменьшение свободной энергии систем, приводит к формированию нанокристаллов термодинамически стабильных, тугоплавких оксидов Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub> и карбидов Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, ZrC, которые наряду с дисперсными включениями

хрома должны эффективно выполнять роль модификаторов. Материалы являются жаропрочными. В зависимости от состава температура рекристаллизации находится в пределах 550–700 °С. Основное упрочнение их – дисперсное, обусловленное наличием в структуре нанокристаллов вышеприведенных соединений.

Плавку бронз проводили с использованием графитовых тиглей в высокочастотной индукционной печи, питаемой от генератора ВЧГ 1/60–0,066. Основой служила чистая медь М1 (ГОСТ 859-2001).

### Результаты исследования и их обсуждение

В работе изучено влияние условий плавки, легирования и последующих процессов термической и термомеханической обработок на химический и фазовый составы, структуру и свойства бронз.

Согласно результатам исследования, влияния природы защитных атмосфер и раскислителей, используемых при плавке, на химический состав и свойства литых бронз (табл. 2), минимальный угар легирующих элементов, не превышающий 3–4% от их исходного количества, достигается в случае комбинированной защиты поверхности расплава системой «криолит (К) + аргон (А)».

Таблица 2. Степень усвоения расплавом хрома и физико-механические свойства бронз

Защитная атмосфера	Раскислитель	Химический состав, %			Физико-механические свойства			
		Cr	$P_{\text{ост}}$	$B_{\text{ост}}$	$\sigma_B$ , МПа	НВ	$\delta$ , %	$\rho \cdot 10^{-8}$ , Ом·м
К	Р	0,67	0,032	–	406	141	22	2,22
А	Р	0,70	0,025	–	412	144	23,5	2,21
К+А	Р	0,76	0,019	–	424	148	26	2,23
К	В	0,71	–	0,0018	414	144	24	2,07
А	В	0,74	–	0,0012	420	147	24,5	2,06
К+А	В	0,79	–	0,0009	438	152	28	2,02

В качестве раскислителей использовали бор или фосфор, которые вводили в количестве 0,05% от массы плавки. Легирование проводили при температуре 1200–1220 °С. Продолжительность процесса составляла 10 мин. Наиболее эффективным раскислителем является бор. Использование его оказывает положительное влияние на все исследованные физико-механические свойства и прежде всего на электропроводность хромовых бронз. Так, применение бора вместо фосфора увеличивает этот показатель примерно на 3% и его значение достигает 85% от электропроводности меди.

Исследования, направленные на установление влияния температуры расплава меди и продолжительности изотермической выдержки на процесс легирования, выполнены с использованием лигатур, оптимальных по составу и условиям получения. При этом применяли комбинированную защиту поверхности расплава системой «криолит (К) + аргон (А)», а в качестве раскислителя использовали бор.

Представляется очевидным, что размер структурных составляющих лигатуры оказывает существенное влияние на кинетику растворения ее в расплаве меди. В рассматриваемых системах упрощенный, но отражающий реальную ситуацию, процесс состоит из двух этапов. Первый – растворение основы лигатуры, практически представляющей собой медь, и второй – растворение частиц хрома. Методика и результаты оценки продолжительности протекания этих процессов представлены в работе [7].

Согласно расчетам, выполненным по приближенной формуле Померанцева, продолжительность ( $t_m$ ) расплавления сферических кусков лигатуры  $r_0 = 10–25$  мм, введенных в расплав меди, имеющий температуру  $T_0 = 1200–1600$  °С, происходит практически мгновенно и находится в пределах 1–12 с (рис. 1).

Второй этап легирования – растворение хрома в расплаве меди описан математически путем решения задачи Стефана диффузионного типа в сферической симметрии. Результаты расчетов времени ( $t_d$ ) полного растворения частиц хрома в расплаве меди при температурах 1200–1500 °С с типичными размерами ( $r_0$ ), которые используются при выплавке хромовых бронз, приведены в табл. 3.

Таблица 3. Время полного растворения  $t_d$  частиц Cr в расплаве меди

Состояние легирующего элемента	$r_0$ , мм	$t_d$ , с, при температуре, К			
		1200	1300	1400	1500
Включения Cr в механически сплавленном композите	0,0005	$6,4 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$0,7 \cdot 10^{-2}$	$0,18 \cdot 10^{-2}$
	0,01	$25,5 \cdot 10^{-2}$	$8,2 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$0,74 \cdot 10^{-2}$
Включения Cr в литом гетерогенном сплаве Cu–Cr	0,5	$6,36 \cdot 10^2$	$2,04 \cdot 10^2$	$0,672 \cdot 10^2$	$0,186 \cdot 10^2$
	2,5	$15,98 \cdot 10^3$	$5,11 \cdot 10^3$	$1,69 \cdot 10^3$	$0,462 \cdot 10^3$
	15	$57,49 \cdot 10^4$	$18,22 \cdot 10^4$	$6,084 \cdot 10^4$	$1,656 \cdot 10^4$

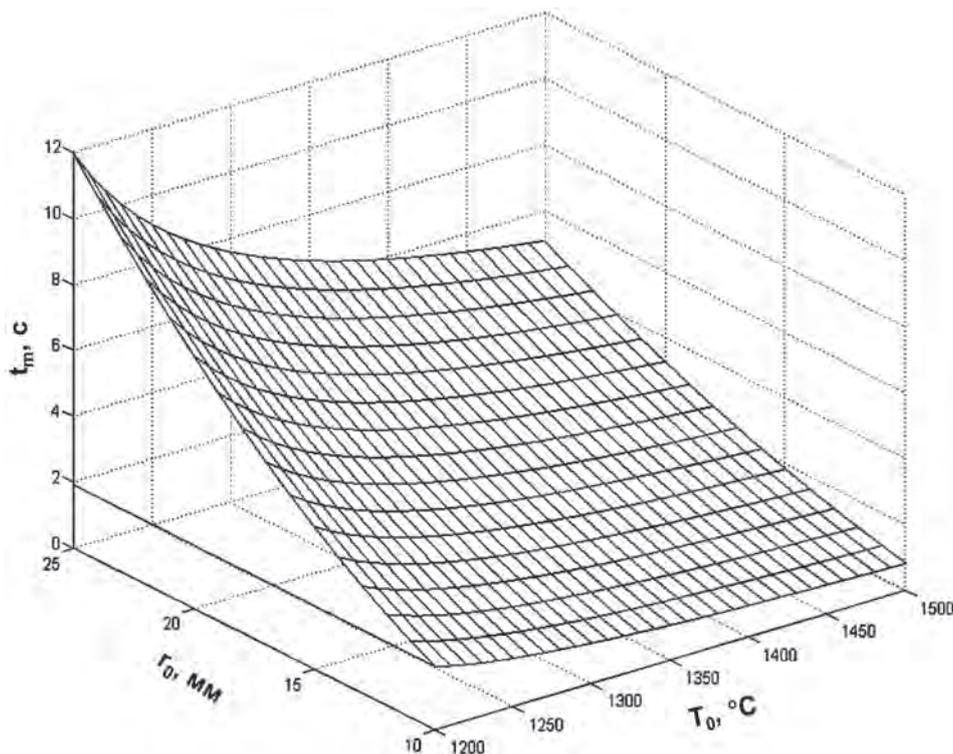


Рис. 1. Диаграмма времени плавления лигатуры в расплаве меди

Согласно полученным результатам, включения хрома в механически легированной лигатуре, имеющие размер 0,5–10 мкм, растворяются в жидкой меди мгновенно ( $t_d \sim 10^{-2}–10^{-3}$  с), что исключает необходимость выдержки расплава для легирования. В то же время продолжительность растворения частиц радиусом  $r_0 = 0,5–2,5$  мм, характерных для литых лигатур, на 5–6 порядков выше. Так, при 1400 °С в зависимости от размера частиц, находящихся в этом интервале, она составляет от 1 до 30 мин. При снижении температуры расплава меди до значения 1300 °С, являющегося нижним пределом при легировании литыми лигатурами, время растворения включений хрома увеличивается примерно в 3 раза. Адекватность полученных математических зависимостей качественно подтверждается экспериментальными данными. Так, установлено, что при температуре расплава меди, равной 1200–1250 °С, оптимальная продолжительность легирования механически сплавленной лигатурой, составляет 9–10 мин. При этом достигается равномерное распределение легирующих компонентов и их максимальное содержание в литых бронзах. Снижение продолжительности процесса до значения менее 4 мин вызывает образование ликваций в виде микрообластей размером до 50 мкм, обогащенных хромом и представляющих собой эвтектику «Cu – Cr» (рис. 2, 3).

Анализ структуры материалов, полученных по оптимальному режиму, показывает, что размер зерен основы разработанных литых бронз составляет примерно 1,0 мкм и ее структура относится к микрокристаллическому типу. Это однозначно указывает на высокий модифицирующий эффект, обусловленный применением механически сплавленных лигатур. Можно с высокой достоверностью утверждать, что основную роль в модифицировании в хромовых бронзах играют нанокристаллы оксидов и карбидов хрома, а в хромоциркониевых бронзах – нанокристаллы оксидов и карбидов циркония. При этом и в первом, и во втором случаях не исключается модифицирующая роль субмикро- и нанокристаллов хрома.

Для сравнения на рис. 4 показана структура литой бронзы БрХ, полученной по базовой технологии завода «Красный Выборжец» (РФ), согласно которой легирование осуществлялось литой лигатурой при 1300–1350 °С в течение 30–40 мин.

Средний размер зерна данного материала равен 20 мкм, что в 20 раз превышает этот параметр для экспериментальной бронзы.

Литые бронзы, полученные с применением механически легированной лигатуры, отличаются высокой плотностью, отсутствием пор и однородны по химическому составу. Результаты сканирования по площади указывают на равномерность распределения хрома (см. рис. 3). В то же время хром, а также цирконий структурно не выявляются. Большую информацию о фазовом составе и морфологии фаз дают

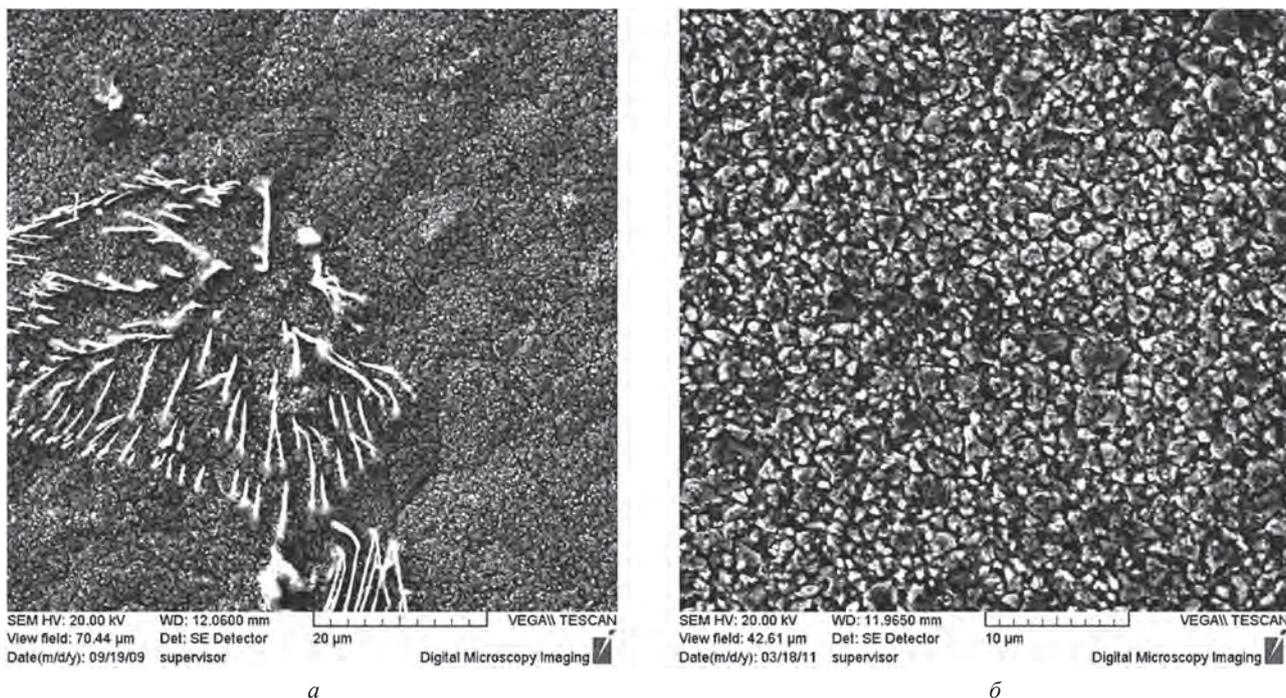


Рис. 2. Структура литой бронзы БрХ: *a* – выдержка расплава 3 мин; *б* – выдержка расплава 9 мин

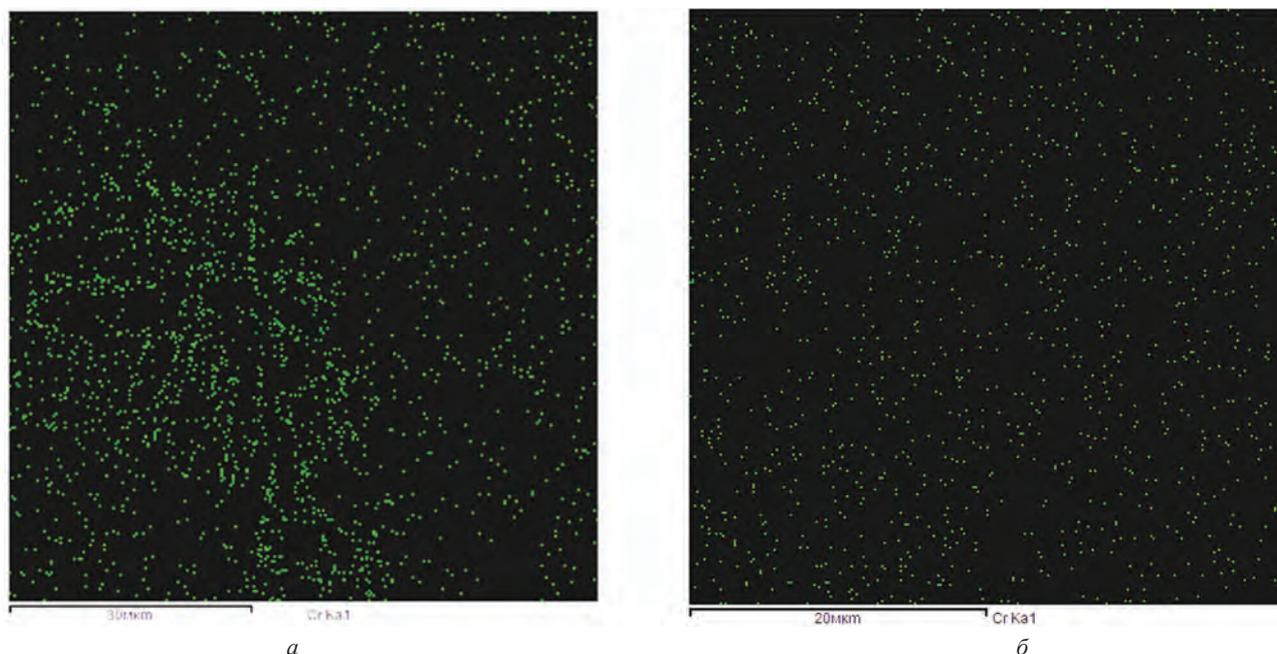


Рис. 3. Распределение хрома в литой бронзе БрХ по площади сканирования: *a* – выдержка расплава 3 мин; *б* – выдержка расплава 9 мин

результаты сравнительного анализа механических свойств (табл. 4) литых бронз, не подвергавшихся термической обработке.

Таблица 4. Состав и свойства литой хромовой бронзы производства завода «Красный Выборжец» (РФ) и полученной по разработанной технологии

Сплав	Химический состав, %			Литье			Отжиг, $t = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$		
	Cr	Fe	P	НВ	$\sigma_B$ , МПа	$\rho \cdot 10^{-8}$ , Ом·м	НВ	$\sigma_B$ , МПа	$\rho \cdot 10^{-8}$ , Ом·м
БрХ (з-д «Красный Выборжец»)	0,71	0,044	0,038	60	180	2,00	55	185	1,94
БрХ (экспериментальная)	0,77	0,041	0,002	105	315	1,94	105	305	1,91

По электропроводности базовая и экспериментальная бронзы близки к меди. Это однозначно, что хром не растворен в основе и находится в элементарном виде или частично связан в химические соеди-



Рис. 4. Структура литой классической бронзы БрХ

нения. Следует отметить, что экспериментальная бронза имеет высокие для литого материала значения твердости и прочности и по этим показателям в 1,7–1,8 раза превосходит аналог. При этом материал является жаропрочным. Отжиг при 700 °С не оказывает заметного влияния на его твердость и прочность. Сочетание этих свойств объясняется комплексным упрочнением, включающем зернограничное и дисперсное [3]. Последнее указывает на наличие в структуре субмикроструктур и/или нанокристаллов термодинамически стабильных упрочняющих фаз, стабилизирующих границы зерен и субзерен основы, которыми являются хром, а также его карбиды и оксиды.

Высокие свойства экспериментальных бронз (табл. 4) позволяют в ряде случаев их применение непосредственно после литья, исключив термомеханическую обработку. Тем не менее, этот процесс, состоящий из закалки, холодной пластической деформации со степенью, достигающей 60%, и старения, является заключительным этапом типовой технологии, при реализации которого формируется опти-

мальный комплекс физико-механических свойств бронз, необходимый для электротехнических материалов.

### Влияние термической обработки на структуру, фазовый состав и свойства бронз, легированных механически сплавленными модифицирующими лигатурами

Установлено [8], что в связи с одинаковой природой протекающих фазовых превращений оптимальные значения параметров закалки и старения базовых и экспериментальных бронз близки. В обоих случаях, как для хромовых, так и хромоциркониевых бронз, оптимальными режимами закалки являются температура нагрева – 1000 °С, продолжительность изотермической выдержки – 1 ч, охлаждающая среда – вода. Оптимальные значения температуры и продолжительности старения равны соответственно 470 °С и 5 ч.

Согласно результатам исследования (рис. 5), положительное влияние холодной пластической деформации, являющейся промежуточной операцией между закалкой и старением, на физико-механические свойства экспериментальных бронз по сравнению с классическими, существенно ниже. Пластическая

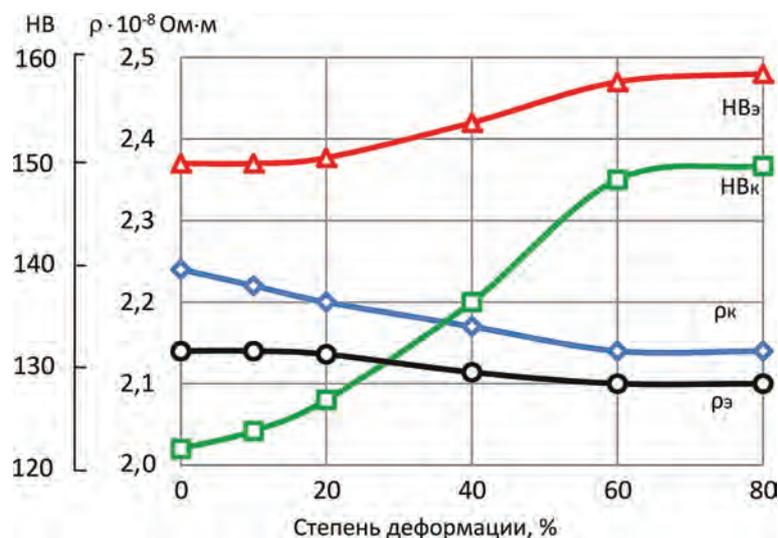
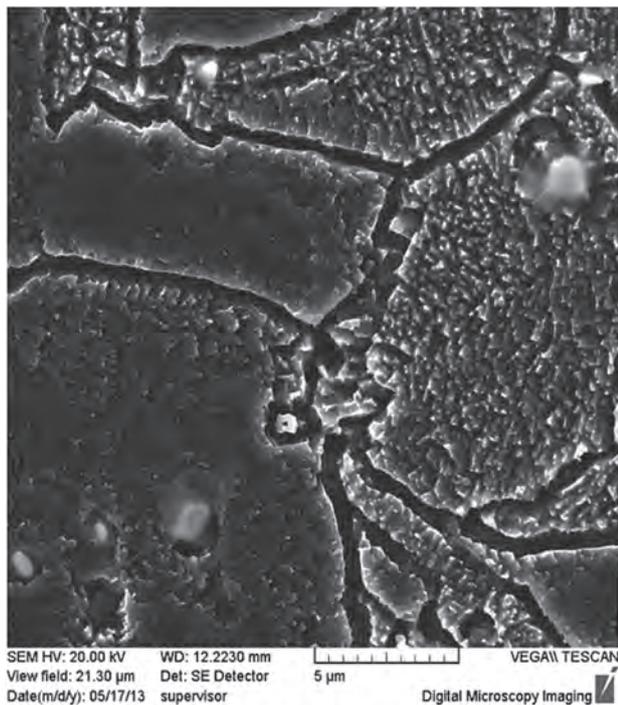
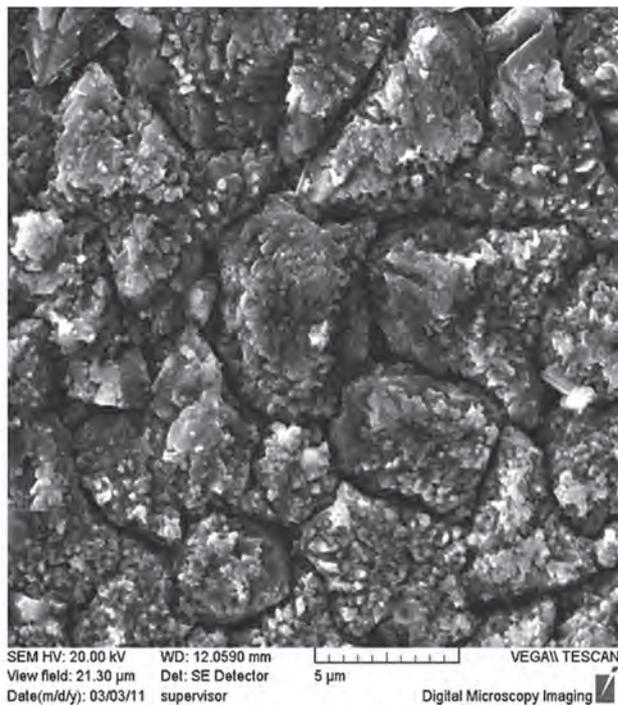


Рис. 5. Влияние степени холодной пластической деформации на электрические сопротивления ( $\rho_{\text{э}}$ ,  $\rho_{\text{к}}$ ) и твердость ( $HV_{\text{э}}$ ,  $HV_{\text{к}}$ ) экспериментальной (э) и классической (к) бронзы БрХ

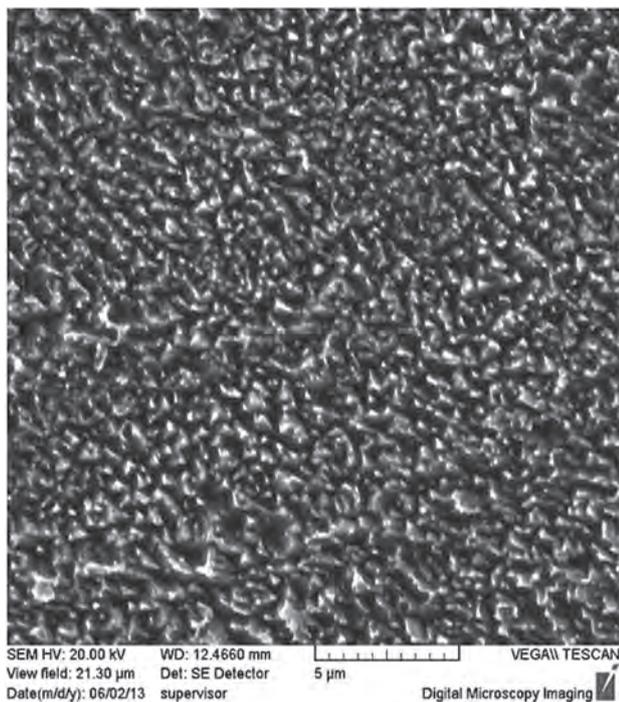


*a*

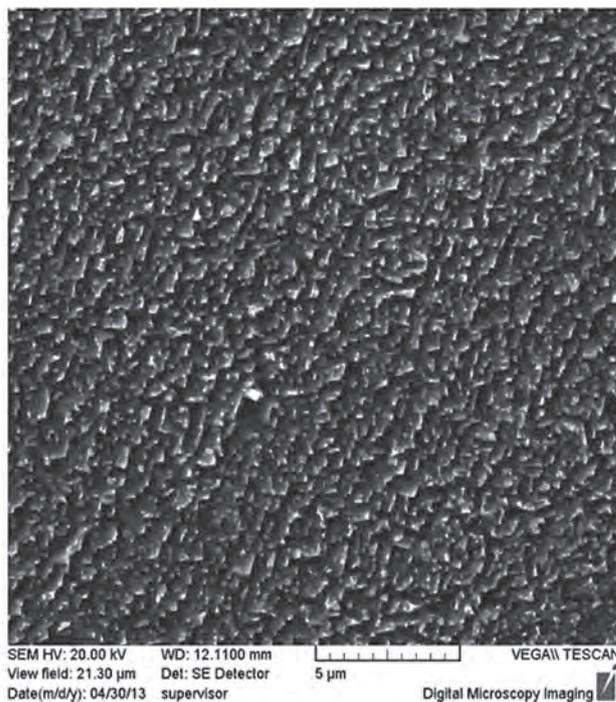


*б*

Рис. 6. Структура литой классической бронзы БрХ: *a* – закалка + старение; *б* – закалка + пластическая деформация,  $\epsilon = 60\%$  + старение



*a*



*б*

Рис. 7. Структура литой экспериментальной бронзы БрХ: *a* – закалка + старение; *б* – закалка + пластическая деформация,  $\epsilon = 60\%$  + старение

деформация со степенью менее 30% практически не оказывает влияния на твердость и прочность экспериментальных хромовых и хромоциркониевых сплавов. Увеличение ее до 60% приводит к приросту значений этих свойств на 5–6%. В то время как оптимальная степень деформации (60%) классических бронз повышает эти свойства на 25–30%. При этом электрическое сопротивление у первых уменьшается на 2,3–2,4%, а у вторых – на 4,2–4,5% [8].

Термическая (термомеханическая) обработка оказывает существенное влияние на структуру основы как классических, так и экспериментальных хромовых бронз. Согласно результатам СЭМ, закалка

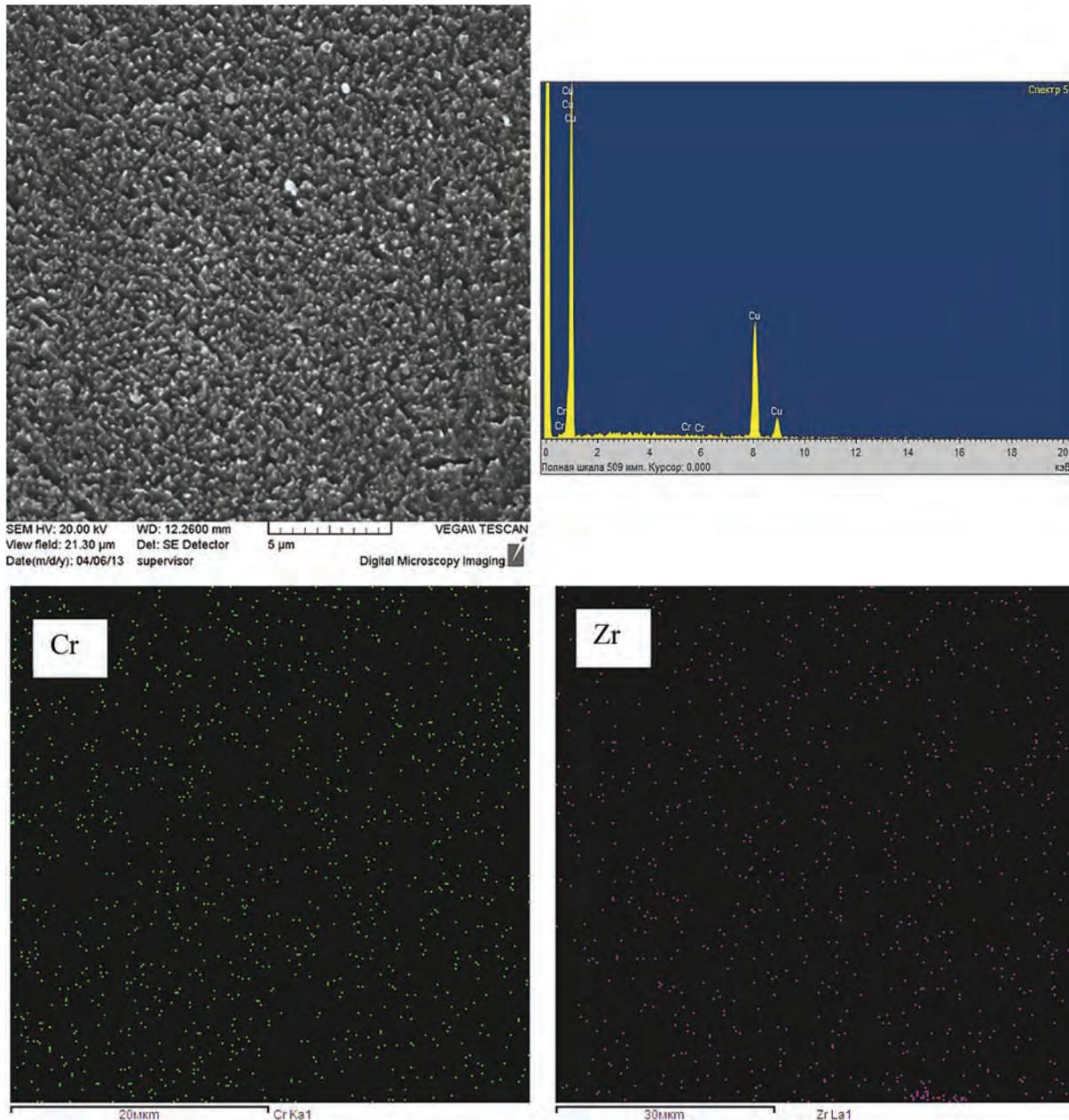


Рис. 8. Структура и результаты микрорентгеноспектрального анализа экспериментальной бронзы БрХЦр, подвергнутой закалке и старению

материалов приводит к измельчению зерен основы. Причем реализованное непосредственно после закалки последующее старение по оптимальному режиму не оказывает заметного влияния на их величину (см. рис. 2, 4, 6–8).

После закалки и старения размер зерен основы классической бронзы уменьшается примерно в 2 раза и составляет 10 мкм (см. рис. 4, 6). Влияние указанных операций на данный параметр экспериментальных бронз существенно выше (см. рис. 2, 7). В этом случае зерно уменьшается в 5–10 раз и снижается до величины 0,1–0,2 мкм. Закалка и старение не оказывают влияния на характер распределения легирующих компонентов, но заметно улучшают однородность структуры основы (см. рис. 3, 8).

Приведенные зависимости характерны как для хромовых, так и для хромоциркониевых бронз. При этом следует отметить, что легирование цирконием во всех случаях способствует измельчению структуры основы исследуемых бронз.

Влияние холодной пластической деформации на структурно-фазовые превращения, как и на приведенные выше свойства классических и экспериментальных бронз, различно, что объясняется разными механизмами протекания как пластической деформации, так и фазовых превращений, обусловленными различием в размере зерен основы и фазовом составе материалов.

В первых материалах, имеющих мелкозернистую структуру основы ( $d = 10$  мкм), деформация реализуется по дислокационному механизму, вызывающему рост плотности дислокаций и внутренних напряжений. При последующем старении ( $t = 470$  °С,  $\tau = 5$  ч) это создает условия, во-первых, для распада пересыщенного твердого раствора с выделением кристаллов хрома, имеющих оптимальную морфологию и вызывающих дисперсионное упрочнение, и, во-вторых, для протекания процессов возврата, измельчающих зерно до  $d = 2,5$  мкм (см. рис. 6).

В отличие от классических в экспериментальных бронзах холодная деформация происходит путем скольжения зерен основы, являющихся суб-/микрочастицами ( $d = 0,1-0,2$  мкм), по границам [9, 10], что не приводит к наклепу и не оказывает заметного влияния на размер зерен. Фактором, способствующим распаду при старении пересыщенного твердого раствора с выделением субмикрочастиц хрома, вызывающих дисперсионное упрочнение, в этом случае является наличие в структуре нанокристаллов термодинамически стабильных фаз оксидов и карбидов хрома и циркония.

Межзеренным скольжением и отсутствием наклепа объясняется низкое влияние обработки давлением литых заготовок из экспериментальных бронз на свойства холодно-деформированных полуфабрикатов. Данный процесс приводит к увеличению твердости и прочности, а также снижению пластичности и электропроводности материалов на 3–5%. В связи с этим в общем случае является обоснованным исключение холодной пластической деформации из технологического процесса производства и упрочнения хромовых бронз.

Установленные закономерности послужили научной базой для создания нового процесса получения хромовых бронз, основанного на использовании механически легированных модифицирующих лигатур. Основные этапы производства этих материалов по базовой и разработанной технологии показаны на рис. 9. Из сравнения вариантов однозначно видим очевидные преимущества второго процесса.

Применение механически легированных модифицирующих лигатур приводит также к повышению физико-механических свойств хромовых и хромоциркониевых бронз. Так, анализ результатов исследований (табл. 5) показывает, что экспериментальные бронзы по таким показателям, как прочность, твердость, электропроводность, температура начала рекристаллизации, примерно на 15–20% превосходят базовые. В то же время примерно на такую величину они уступают последним по пластичности.

Таблица 5. Физико-механические свойства классических и экспериментальных бронз

Материал	$\sigma_B$ , МПа	НВ	$\delta$ , %	$T_{нач. рек.}$ , °С	$\rho \cdot 10^{-8}$ , Ом·м
БрХ (базовая)	440	125	30	400	2,23
БрХЦр (базовая)	460	145	37	450	2,18
БрХ (экспериментальная)	460	155	25	500	2,08
БрХЦр (экспериментальная)	490	170	27	550	1,98

Приведенное сочетание свойств обусловлено комплексным упрочнением материалов, включающем зернограничное, дисперсионное и дисперсное. Наличие последнего является решающим фактором, определяющим высокую жаропрочность экспериментальных бронз.

Результаты исследований [11, 12] послужили научной основой для разработки технологических процессов получения модифицированных субмикрочастицами хромовых и хромоциркониевых бронз и электродов контактной точечной сварки типов С1 16–60, Д1 25–54, а также позволили создать и зарегистрировать технические условия (ТУ ВУ 700008843.003-2014) «Электроды прямые электросварочных контактных точечных машин».

Согласно производственным испытаниям, электроды контактной сварки, изготовленные из экспериментальных хромовых и хромоциркониевых бронз, по стойкости в 1,8–2,2 раза превосходят аналоги и рекомендованы к применению на предприятиях Республики Беларусь.

В конкурсе работ, представленных на Петербургской технической ярмарке, разработка «Технология получения механически легированных наноструктурных лигатур для производства высокопрочных субмикрочастицами бронз электротехнического назначения» в номинации «Лучший инновационный проект в области передовых технологий в машиностроении и металлургии» отмечена дипломом I степени (с вручением золотой медали).

Высокая эффективность применения механически легированных наноструктурных модифицирующих лигатур для измельчения структуры и повышения физико-механических свойств литых материалов подтверждается также результатами исследований, выполненных на серых чугунах [13]. Так, модифи-

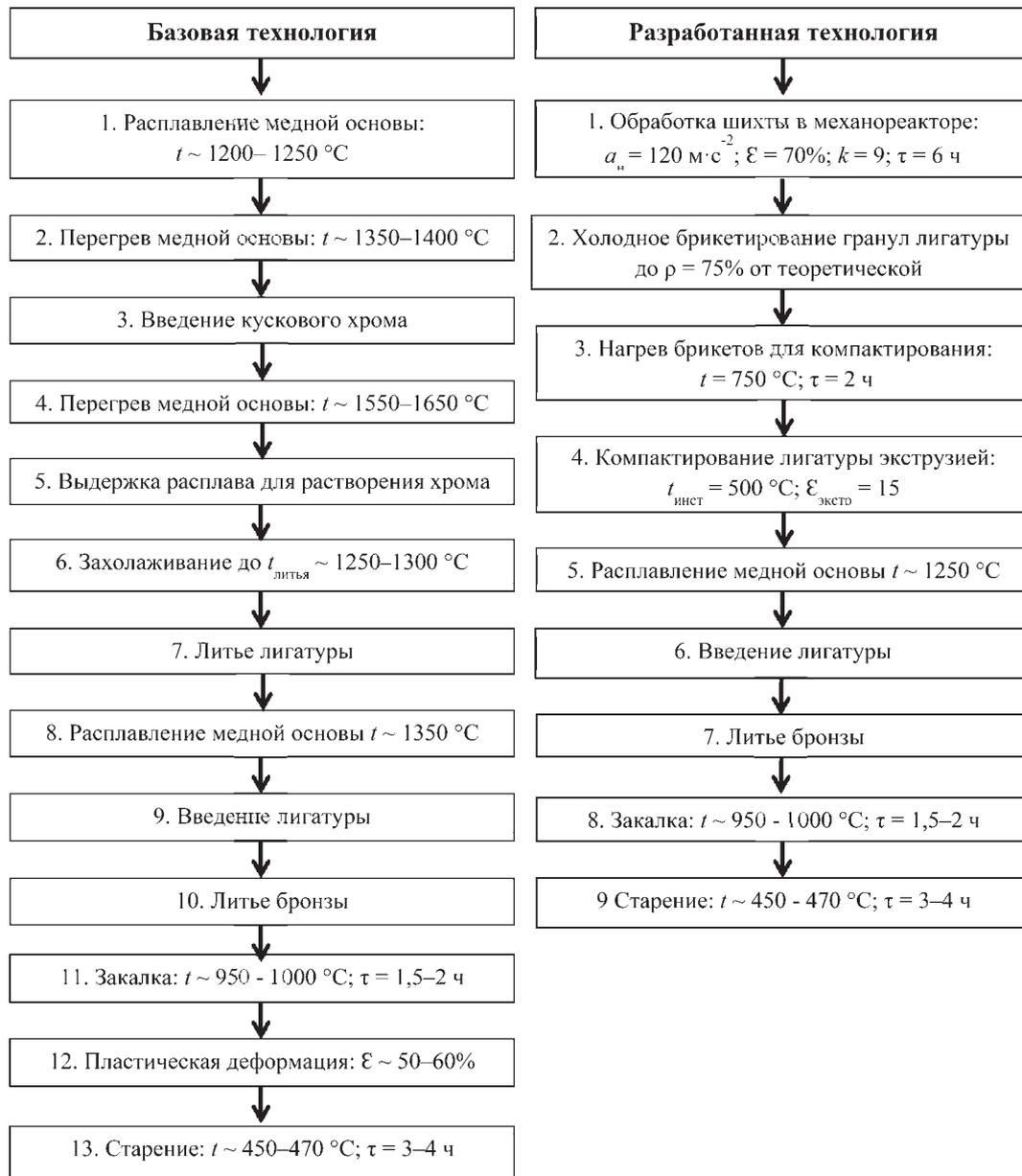


Рис. 9. Схема производства хромовых бронз по базовой и разработанной технологиям

цирование чугуна сплавом, полученным из механически синтезированной композиции «алюминий – углерод (6%)», приводит к уменьшению длины и увеличению толщины графитовых включений. Причем по сравнению с модифицированием алюминием количество эвтектических ячеек в единице поверхности в этом случае повышается в 1,65 раза, что оказывает существенное влияние на механические свойства материала. Роль модификатора в механически легированном материале выполняли нанодисперсные включения карбида алюминия ( $\text{Al}_4\text{C}_3$ ).

### Выводы

1. Реакционное механическое легирование является эффективной технологией получения нанокристаллических модифицирующих лигатур и модификаторов.

2. При выплавке хромовых бронз применение механически легированных модифицирующих лигатур позволяет исключить из технологии получения материалов высокотемпературный, требующий специального дорогостоящего печного оборудования, экологически опасный процесс производства литых лигатур, а также снизить оптимальную температуру процесса легирования расплава меди на 50–100 °C при уменьшении его продолжительности в 2,5–3,5 раза.

3. Механически легированные модифицирующие лигатуры обеспечивают формирование дисперсно-упрочненных жаропрочных материалов с суб-/микрокристаллическим типом структуры основы, что

приводит к существенному повышению комплекса физико-механических и эксплуатационных свойств хромовых бронз. Бронзы, полученные по разработанной технологии, по прочности, твердости, электропроводности и температуре начала рекристаллизации примерно на 15–20% превосходят базовые, что увеличивает стойкость электродов контактной сварки 1,8–2,2 раза.

### Литература

1. Николаев А. К. Хромовые бронзы / А. К. Николаев, А. И. Новиков, В. М. Розенберг. М.: Металлургия, 1983. 175 с.
2. 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.
3. 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.
4. Витязь П. А. Механически легированные сплавы на основе алюминия и меди / П. А. Витязь, Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко. Минск: Беларуская навука, 1998. 352 с.
5. 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.
6. Термодинамическое моделирование гетерогенного взаимодействия при механическом легировании в системах на основе меди / Ф. Г. Ловшенко [и др.]. // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. 2012. № 1. С. 23–34.
7. Ловшенко Ф. Г. Моделирование растворения лигатуры в расплаве меди при выплавке хромовых бронз и оптимизация процесса их производства / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, И. А. Лозиков // Литье и металлургия. 2013. № 4. С. 125–133.
8. Ловшенко Ф. Г. Термомеханическая обработка субмикроструктурных хромовых бронз, модифицированных механически легированными лигатурами / Ф. Г. Ловшенко, Н. Н. Ловшенко, И. А. Лозиков // Современные методы и технологии создания и обработки материалов. Минск, 2013. Кн. 2. С. 343–354.
9. Ловшенко Ф. Г. Получение, структура и свойства; механизмы упрочнения и разрушения механически легированных материалов / Ф. Г. Ловшенко, А. И. Хабибуллин // Перспективные материалы и технологии. В 2-х т. Т. 1. Витебск: УО «ВГТУ», 2010. С. 199–237.
10. Перспективные материалы и технологии. В 2-х т. Т. 1. Витебск: УО «ВГТУ», 2015. 398 с.
11. 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.
12. 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.
13. Ловшенко Г. Ф. Повышение эффективности модифицирования серого чугуна за счет введения в состав модификатора углерода / Г. Ф. Ловшенко, О. С. Комаров, Н. И. Урбанович // Литье и металлургия. 2010. № 3. С. 47–50.

### References

1. Nikolaev A. K., Novikov A. I., Rosenberg V. M. *Khromovye bronzy* [Chrome Bronze]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983. 175 p.
2. Lovshenko F. G., Lovshenko G. F., Lozиков I. A. Nauchnye printsipy sozdaniya vysokostoykikh khromovykh bronz elektrotekhnicheskogo naznacheniya s primeneniem tekhnologii, sochetayushchey reaktivnoye mekhanicheskoe legirovanie i lit'ye [Scientific principles of creating highly resistant chrome bronze for electrical purposes with the use of technology, combining reactionary mechanical alloying and casting]. *Perspektivnye tekhnologii = Advanced technologies*. Vitebsk, «VGTU» Publ., 2011, Ch. 10, pp. 214–233.
3. Lovshenko G. F., Lovshenko F. G., Khina B. B. *Nanostrukturnye mekhanicheski legirovannye materialy na osnove metallov* [Nanostructured mechanically alloyed materials metals-based]. Mogilev, Belarus.-Ros. University Publ., 2008, 679 p.
4. Vityaz' P. A., Lovshenko F. G., Lovshenko G. F. *Mekhanicheski legirovannye splavy na osnove alyuminiya i medi* [The mechanically alloyed aluminum-based alloys and copper]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 1998. 352 p.
5. Lovshenko G. F., Lovshenko F. G. *Teoreticheskie i tekhnologicheskie aspekty sozdaniya nanostrukturnykh mekhanicheski legirovannykh materialov na osnove metallov* [Theoretical and technological aspects of nanostructured mechanically alloyed materials metals-based]. Mogilev, Belarus.-Ros. University Publ., 2005. 276 p.
6. Lovshenko F. G et al. *Termodinamicheskoe modelirovanie geterogennogo vzaimodeystviya pri mekhanicheskom legirovanii v sistemakh na osnove medi* [Thermodynamic modeling of heterogeneous interaction during mechanical at mechanical alloyage in the copper-based systems]. *Vestnik Belarusko-Rossiyskogo Universiteta = Bulletin of the Belarusian-Russian University*, 2012, no. 1, pp. 23–34.
7. Lovshenko F. G., Lovshenko G. F., Lozиков I. A. *Modelirovanie rastvoreniya ligatury v rasplave medi pri vyplavke hromovykh bronzy i optimizaciya processa ih proizvodstva* [Modeling dissolution of copper master alloy melt in the smelting of chromium bronzes and optimization of the production process]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2013, no. 4, pp. 125–133.
8. Lovshenko F. G., Lovshenko N. N., Lozиков I. A. *Termomekhanicheskaya obrabotka submikrokristallicheskih hromovykh bronzy modifitsirovannykh mekhanicheski legirovannyimi ligaturami* [Thermomechanical treatment submicrocrystalline chrome bronze modified mechanically alloyed ligatures]. *Sovremennye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki metallov = Modern methods and technologies of creation and processing of materials*, Minsk, 2013. Kn. 2, pp. 343–354.
9. Lovshenko F. G., Habibullin A. I. *Poluchenie, struktura i svojstva; mekhanizmy uprochneniya i razrusheniya mekhanicheski legirovannykh materialov* [Preparation, structure and properties; mechanisms of hardening and destruction of mechanically alloyed materials]. *Perspektivnye materialy i tekhnologii = Advanced Materials and Technologies*. V 2 t. T. 1. Vitebsk, «VGTU» Publ., 2010, pp. 199–237.

10. **Perspektivnye** materialy i tekhnologii. V 2 t. T. 1 [Advanced Materials and Technologies]. In 2. vol. 1. Vitebsk, «VGTU» Publ., 2015, 398 p.

11. **Lovshenko F. G., Lovshenko G. F., Lozikov I. A.** Bronzy elektrotekhnicheskogo naznacheniya i osobennosti ikh proizvodstva [Bronzes of electrical devices and the characteristics of their production]. *Vestnik Belarusko-Rossijskogo Universiteta = Bulletin of the Belarusian-Russian University*, 2012, no. 3, pp. 36–52.

12. **Lovshenko F. G., Lovshenko G. F., Lozikov I. A.** Litye khromsoderzhashchie bronzy, poluchaemye s primeneniem mekhanicheskii legirovannykh ligatur [Chromium alloy of bronze, obtained through the use of mechanically alloyed ligatures]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2012, no. 3, pp. 131–135.

13. **Lovshenko G. F., Komarov O. S., Urbanovich N. I.** Povyshenie effektivnosti modifitsirovaniya serogo chuguna za schet vvedeniya v sostav modifikatora ugleroda [Increase of effectiveness of modifying the cast iron due to the introduction of the carbon modifier]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2010, no. 3, pp. 47–50.