
УДК 669.017

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

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

UDC 669.017

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

PRODUCTION, STRUCTURE AND PROPERTIES OF CHROME BRONZES, DOPED BY MECHANICALLY ALLOYED NANOCRYSTALLINE MODIFYING LIGATURES

Аннотация

Применение механически легированных модифицирующих лигатур, производство которых осуществляется на дешевом оборудовании и отличается простотой, экологической безопасностью и универсальностью, позволяет исключить из технологии получения хромовых бронз высокотемпературный, требующий специального дорогостоящего печного оборудования, экологически опасный процесс производства литых лигатур, а также холодную пластическую деформацию отливок и полученных из них полуфабрикатов. Использование разработанных лигатур снижает оптимальную температуру процесса легирования расплава меди на 50...100 °С, уменьшает его продолжительность в 2,5...3,5 раза и приводит к повышению физико-механических и эксплуатационных свойств бронз.

Ключевые слова:

механически легированные нанокристаллические модифицирующие лигатуры, эффективность применения, хромовые бронзы, технология получения, фазовый состав, структура, свойства.

Abstract

The production of mechanically alloyed modifying ligatures is simple, ecologically safe, and versatile and is carried out by using low-cost equipment. Their use excludes the process of the production of cast ligatures from the technology of obtaining chrome bronzes. The production of cast ligatures is a high temperature environmentally hazardous process, requiring special expensive furnace equipment. Also, there is no need in cold plastic deformation of castings and semi-finished products derived from them. The usage of the developed ligatures reduces the optimum temperature of the process of copper alloying by 50...100 °C, decreases its duration 2,5...3,5 times and increases physical, mechanical and performance properties of bronzes..

Key words:

mechanically alloyed nanocrystalline modifying ligatures, effectiveness of use, chrome bronzes, technology of production, phase composition, structure, properties.

Введение

Основной технологией производства хромовых бронз (в том числе комплексно легированных), являющихся распространенными материалами электротехнического назначения, служит двухстадийный способ выплавки, включающий производство лигатуры и

конечного сплава. Наиболее известные из них хромовые и хромциркониевые бронзы. Оптимальная концентрация хрома в лигатуре для первых и вторых составляет 10 %. Лигатура вторых, кроме того, содержит 1,0...1,5 % циркония. Особенностью технологии, определяющей высокую

стоимость бронз, а также экологическую вредность производства, является изготовление лигатур [1]. Общеизвестно, что перспективным способом повышения свойств литых материалов служит модифицирование. При этом наиболее эффективно применение модифицирующих лигатур. Однако источники литературы, в которых описаны получение и использование модификаторов и модифицирующих лигатур для производства бронз электротехнического назначения, направленные на упрощение технологии изготовления и повышение физико-механических свойств, отсутствуют. Одним из перспективных методов решения проблемы производства лигатур и бронз является применение реакционного механического легирования, обеспечивающего получение модифицирующих лигатур и исключаящего из технологического процесса их производства высокотемпературную плавку [2].

Целью работы авторов являлось исследование влияния 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].

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

Реакционное механическое легирование проводилось в механореакторе гирационного типа с четырьмя водоохлаждаемыми помольными камерами объемом 2 дм³ каждая. Процесс осуществлялся в атмосфере аргона (ГОСТ 10157-79). Продуктом механического легирования являются гранулированные реакционно способные композиции. 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 Cu–Cr–O–C и Cu–Cr–Zr–O–C приведены значения двух первых параметров.

Табл. 1. Результаты термодинамического расчета адиабатической температуры взаимодействия T_{ad} и равновесного состава реагирующих систем при этой 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 ₂ O ₃ + + 1,8 % Cr ₂₃ C ₆
Cu + 10 % Cr + 1,5 % Zr + + 0,3 % O + 0,05 % C	570	

Согласно результатам моделирования, в исследованных системах формируются термодинамически стабильные тугоплавкие оксиды Cr_2O_3 , ZrO_2 и карбиды Cr_{23}C_6 , ZrC . Они устойчивы в контакте с медной матрицей до 1800 К, что существенно превышает максимальную температуру медного расплава, составляющую 1350...1450 °С. Интерметаллид Cu_9Zr_2 сохраняется до температуры 1350 К. Общее содержание приведенных фаз превышает 2 %.

Компактные лигатуры в виде прутков диаметром 10 и 12 мм получались методом экструзии холоднопресованных брикетов из гранулированных композиций. Они сохраняют субмикроструктурный 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 вышеприведенные 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_2O_3 , ZrO_2 и карбидов Cr_{23}C_6 , ZrC , равновесных фаз Cu_3Zr , Cr_2O_3 , ZrO_2 , ZrC , Cr_{23}C_6 , 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, основным упрочнением является дисперсное, обусловленное наличием в структуре нанокристаллов вышеприведенных соединений.

Плавка бронз производилась в высокочастотной индукционной печи, питаемой от генератора ВЧГ 1/60-0,066, с использованием графитовых тиглей. Основой являлась 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)».

В качестве раскислителей использовался бор или фосфор, которые вводились в количестве 0,05 % от массы плавки. Легирование проводилось 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 в первую очередь на электропроводность хромовых бронз. Так, применение бора вместо фосфора увеличивает этот показатель примерно на 3 % и его значение достигает 85 % от электропроводности меди.

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

Защитная атмосфера	Раскислитель	Химический состав, %			Физико-механические свойства			
		Cr	P _{ост}	B _{ост}	σ _B , МПа	НВ	δ, %	ρ · 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

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 применялась комбинированная защита поверхности расплава системой «криолит (К) + аргон (А)», а в качестве раскислителя использовался 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, представляющей собой практически чистую медь, второй – растворение частиц хрома. Методика и результаты оценки продолжительности протекания этих процессов представлены в [7].

На первом этапе, согласно расчетам, выполненным по приближенной формуле Померанцева, расплавление сферических кусков лигатуры r_0 10...25 мм, введенных в расплав меди, имеющий температуру T_0 1200...1600 °С, происходит почти мгновенно и продолжительность этого расплавления t_m составляет 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, представлены в табл. 3.

Согласно полученным результатам, включения хрома в механически легированной лигатуре, имеющие размер 0,5...10 мкм, растворяются в жидкой меди мгновенно ($t_d \sim 10^{-2} \dots 10^{-3}$ с), что исключает необходимость выдержки расплава для легирования. В то же время продолжительность растворения частиц радиусом $r_0 = 0,5 \dots 2,5$ мм, характерных для литых лигатур, на 5...6 порядков выше. Так, при 1400 °С в зависимости от размера частиц, находящегося в вышеприведенном 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 подтверждается экспериментальными данными.

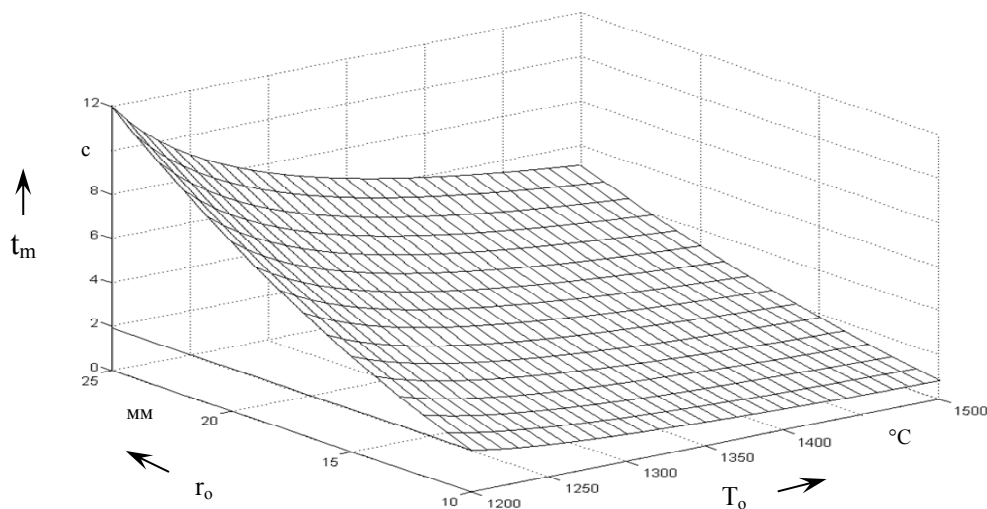


Рис. 1. Диаграмма времени плавления лигатуры в расплаве меди

Табл. 3. Время полного растворения t_d частиц Сг в расплаве меди

Состояние легирующего элемента	Γ_0 , мм	t_d , с, при температуре T , К			
		1200	1300	1400	1500
Включения Сг 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 Сг в литом гетерогенном сплаве Cu–Сг	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	$57,49 \cdot 10^4$	$18,22 \cdot 10^4$	$6,084 \cdot 10^4$	$1,656 \cdot 10^4$

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–Сг (рис. 2 и 3).

Анализ структуры материалов, полученных при оптимальном режиме, по-

казывает, 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 утверждать, что основную роль в модифицировании хромовых бронз выполняют нанокристаллы оксидов и карбидов хрома, а хромоциркониевых – нанокристаллы оксидов и карбидов циркония. При этом и в первом, и во втором случае не исключается модифицирующая роль субмикро- и нанокристаллов хрома.

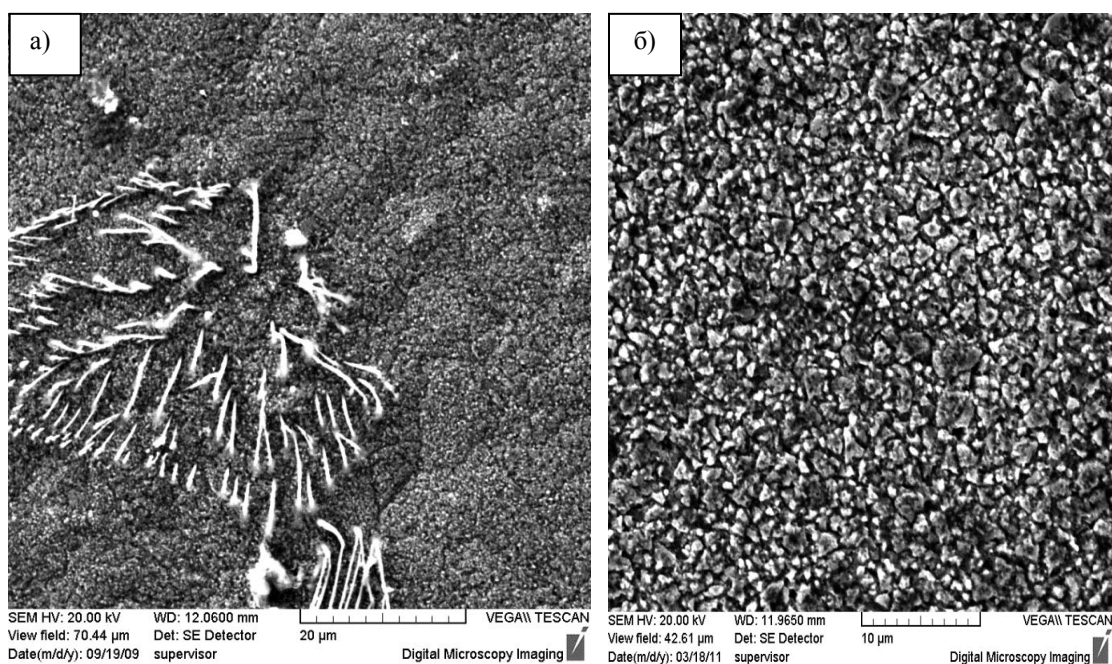


Рис. 2. Структура литой бронзы БрХ: а – выдержка расплава 3 мин; б – выдержка расплава 9 мин

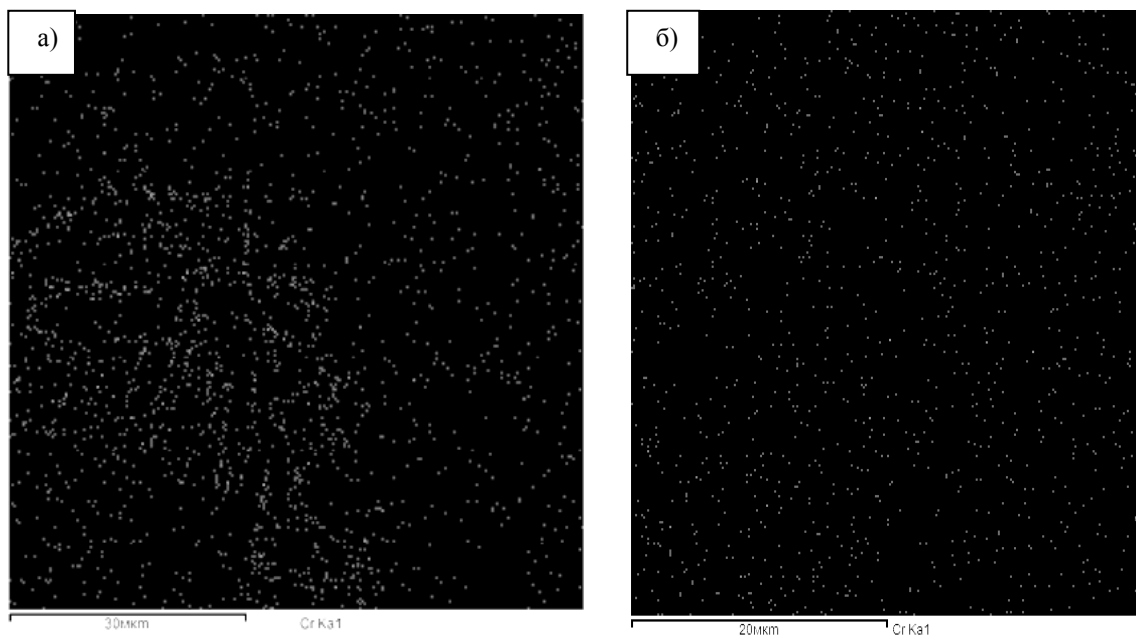


Рис. 3. Распределение хрома в литой бронзе БрХ по площади сканирования: а – выдержка расплава 3 мин; б – выдержка расплава 9 мин

Для сравнения на рис. 4 представлена 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 и цирконий структурно не выявляются. Большую информацию о фазовом составе и морфологии фаз дают результаты сравнительного анализа механических свойств (табл. 4) литых бронз, не подвергавшихся термической обработке.



Рис. 4. Структура литой классической бронзы БрХ

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

Сплав	Химический состав, %			Литье			Отжиг, t = 700 °С		
	Cr	Fe	P	НВ	σ_B , МПа	$\rho \cdot 10^{-8}$, Ом·м	НВ	σ_B , МПа	$\rho \cdot 10^{-8}$, Ом·м
БрХ (КВ)	0,71	0,044	0,038	60	180	2,00	55	185	1,94
БрХ (эксп.)	0,77	0,041	0,002	105	315	1,94	105	305	1,91

По электропроводности базовая и экспериментальная бронзы близки к меди. Хром не растворен в основе и находится в элементарном виде или частично связан в химические соединения. 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, включающим 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, его карбиды и оксиды.

Высокие свойства экспериментальных бронз (см. табл. 4) позволяют в ряде случаев применять их непосредственно после литья без термомеханической обработки. 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 оптимальный комплекс физико-механических свойств бронз, необходимый для электротехнических материалов.

Исследовано 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 опти-

мальные значения параметров закалки и старения базовых и экспериментальных бронз близки. В обоих случаях как для хромовых, так и хромоциркониевых бронз оптимальным режимом закалки является такой, при котором 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 деформация со степенью менее 30 % почти 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 %, а оптимальная степень деформации (60 %) классических бронз повышает эти свойства на 25...30 %. При этом электрическое сопротивление первых уменьшается на 2,3...2,4 %, а 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 материалов приводит к измельчению зерен основы. Причем реализованное непосредственно после закалки последующее старение по оптимальному режиму заметно не влияет на их величину (см. рис. 2, 4, 6...8).

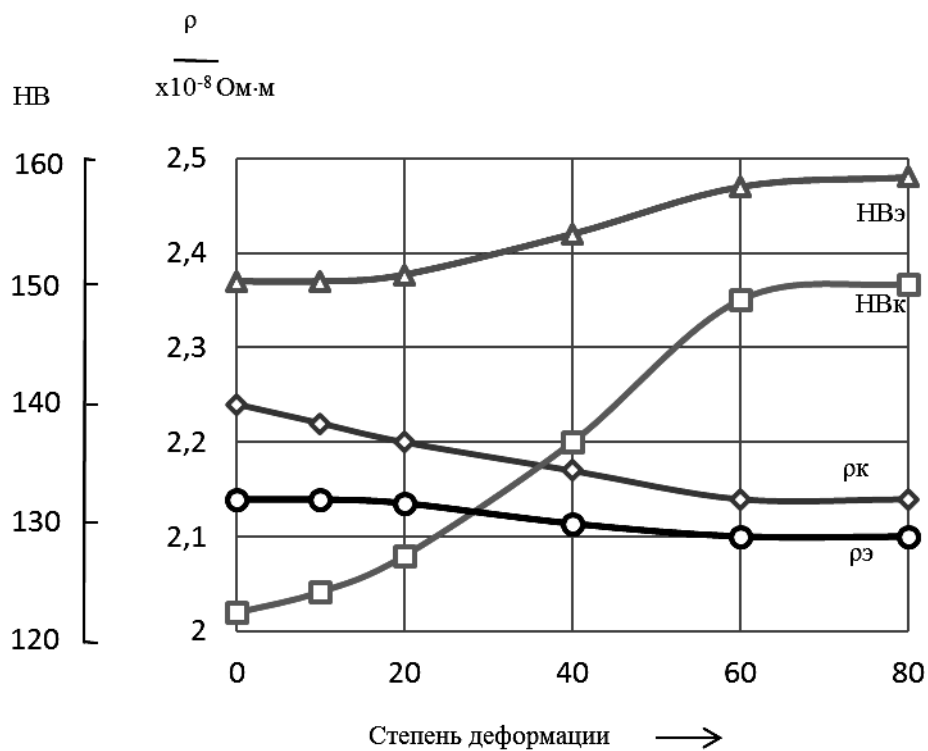


Рис. 5. Влияние степени холодной пластической деформации на электрические сопротивления $\rho_{э}$, ρ_k и твердость HV_э, HV_к экспериментальной (э) и классической (к) бронз БрХ

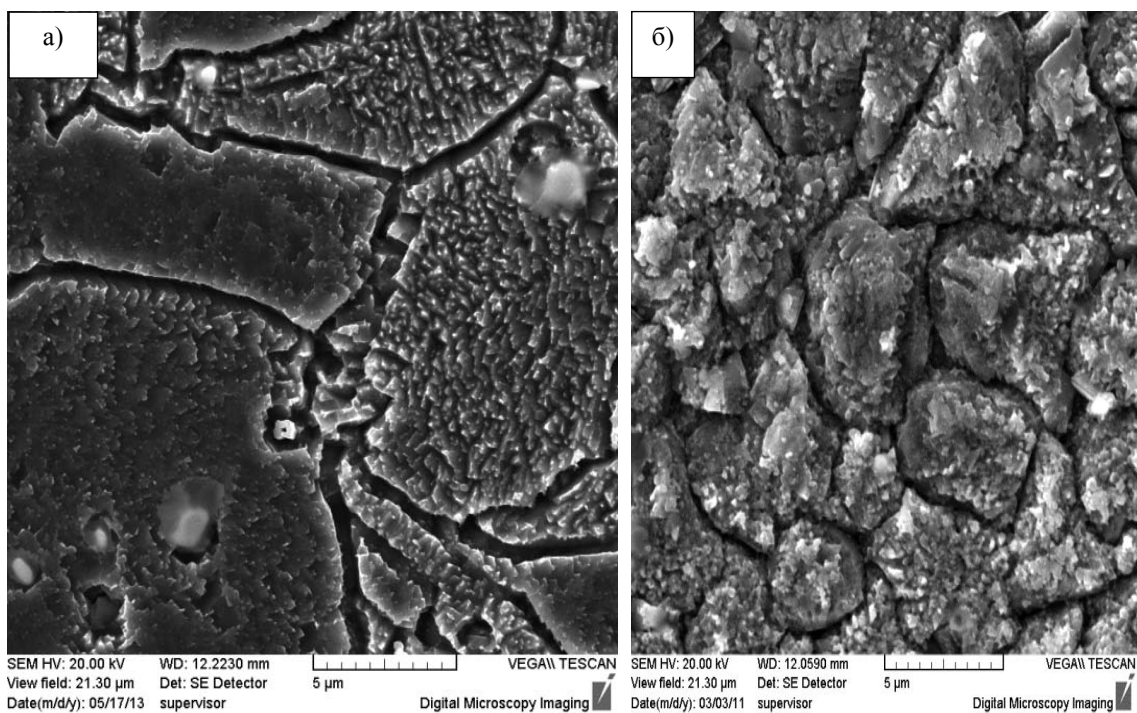


Рис. 6. Структура литой классической бронзы БрХ: а – закалка + старение; б – закалка + пластическая деформация 60% + старение

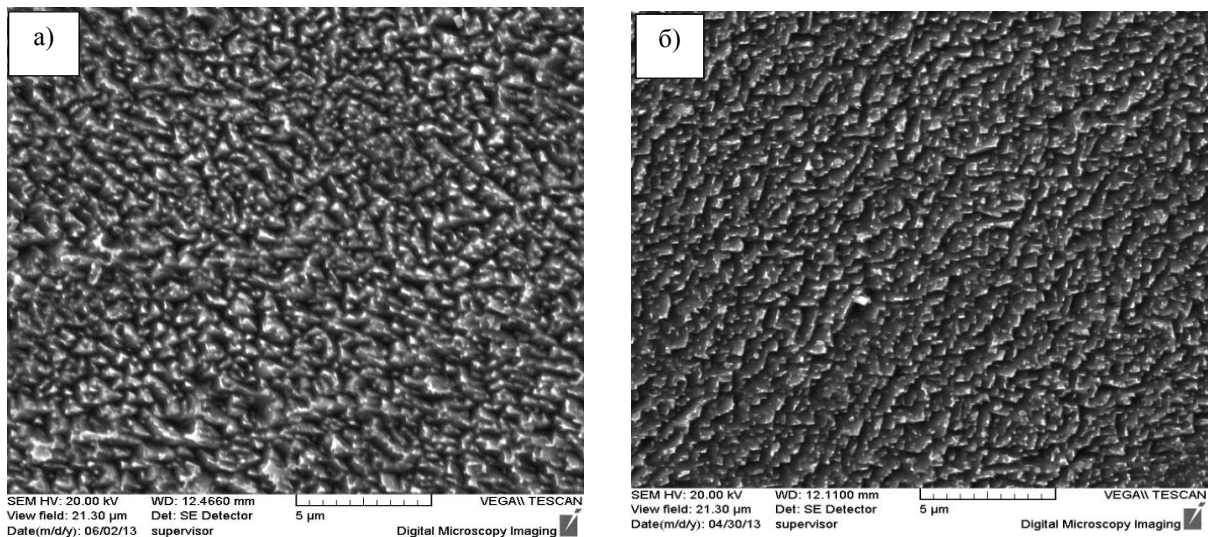


Рис. 7. Структура литой экспериментальной бронзы БрХ: а – закалка + старение; б – закалка + пластическая деформация, $\epsilon = 60\%$ + старение

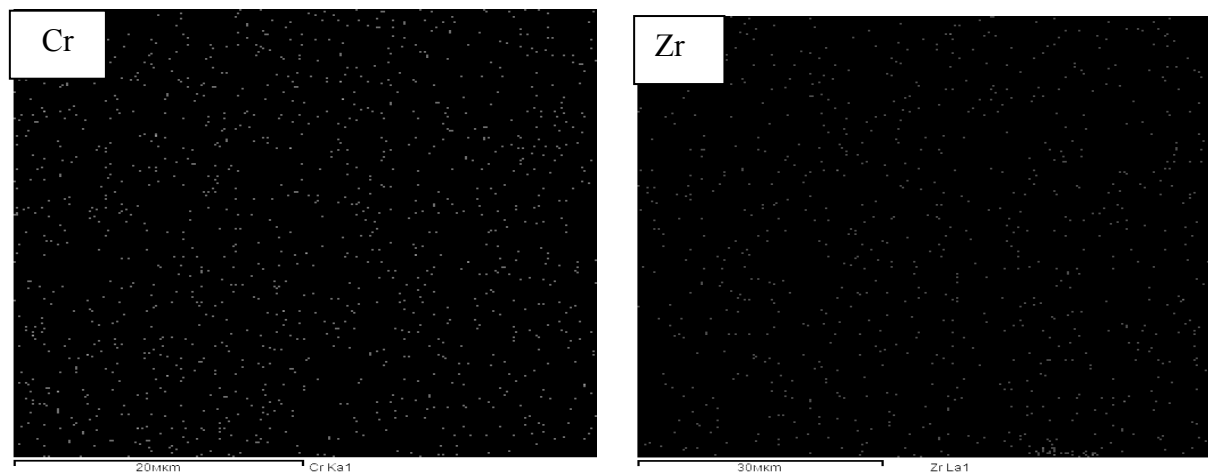
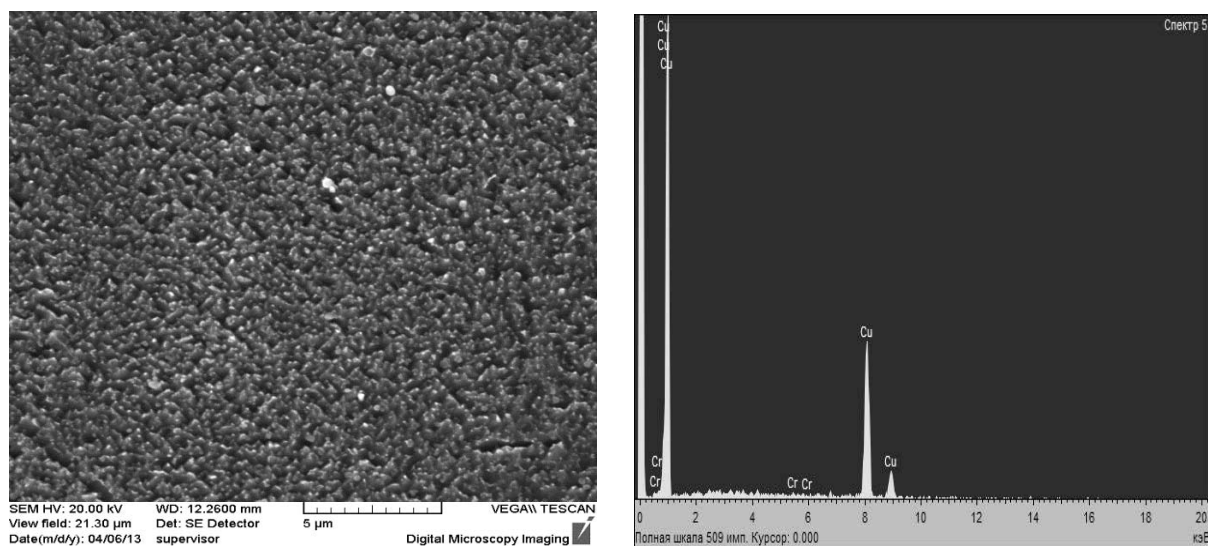


Рис. 8. Структура и результаты микроанализа экспериментальной бронзы БрХЦр, подвергнутой закалке и старению

После закалки и старения размер зерен основы классической бронзы уменьшается примерно в 2 раза и составляет 10 мкм (см. рис. 4 и 6). Влияние указанных операций на данный параметр экспериментальных бронз существенно выше (см. рис. 2 и 7). В этом случае зерно уменьшается в 5...10 раз – до 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 и 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 вышеприведенные свойства классических и экспериментальных бронз, различно, что объясняется разными механизмами протекания пластической деформации и фазовых превращений, что обусловлено различием в размере зерен основы и фазовом составе материалов. В классических 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, при которых зерно измельчается до $d = 2,5$ мкм (см. рис. 6).

Холодная деформация в экспериментальных бронзах в отличие от классических происходит путем скольжения зерен основы, являющихся суб- и микрорекристаллами ($d = 0,1...0,2$ 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 субмикрорекристаллов 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 незначительное влияние обработки давлением литых заготовок из экспериментальных бронз на свойства холоднодеформированных полуфабрикатов. Данный процесс приводит к увеличению твердости и прочности, а также к снижению пластичности и электропроводности материалов на 3...5 % соответственно. В связи с этим в общем случае является обоснованным исключение холодной пластической деформации из технологического процесса производства и упрочнения хромовых бронз.

Табл. 5. Физико-механические свойства классических и экспериментальных бронз

Материал	σ_B , МПа	НВ	δ , %	$T_{нач. рек.}$, °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

Кроме того, применение механически легированных модифицирующих лигатур приводит 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 5, 20, 20 и 10 % соответственно превосходят базовые. В то же время по пластичности они на 15...20 % уступают последним.

Как отмечалось выше, приведенное сочетание свойств обусловлено комплексным упрочнением, сочетающим зернограничное, дисперсионное и дисперсное. Наличие последнего является решающим фактором, определяющим высокую жаропрочность экспериментальных бронз.

Заключение

Применение механически легированных модифицирующих лигатур, из-

готовление которых осуществляется на дешевом оборудовании и отличается простотой, экологической безопасностью и универсальностью, позволяет исключить из технологии получения хромовых бронз высокотемпературный, требующий специального дорогостоящего печного оборудования, экологически опасный процесс производства литых лигатур, а также холодную пластическую деформацию отливок и полученных из них полуфабрикатов [11, 12]. При использовании разработанных лигатур оптимальная температура процесса легирования расплава меди снижается на 50...100 °С при уменьшении его продолжительности в 2,5...3,5 раза. Это существенно упрощает и удешевляет процесс получения хромовых бронз и расширяет область их применения. Кроме того, применение механически легированных модифицирующих лигатур приводит к повышению физико-механических свойств хромовых и хромоциркониевых бронз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Николаев, А. К.** Хромовые бронзы / А. К. Николаев, А. И. Новиков, В. М. Розенберг. – М. : Металлургия, 1983. – 175 с.
2. **Ловшенко, Ф. Г.** Перспективные технологии : монография / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, И. А. Лозиков ; под ред. В. В. Клубовича. – Витебск : ВГТУ, 2011. – 599 с.
3. **Ловшенко, Г. Ф.** Наноструктурные механически легированные материалы на основе металлов : монография / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко, Б. Б. Хина ; под ред. д-ра техн. наук, проф. Ф. Г. Ловшенко. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2008. – 679 с. : ил.
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. : ил.
5. **Ловшенко, Г. Ф.** Теоретические и технологические аспекты создания наноструктурных механически легированных материалов на основе металлов / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко. – Могилев : Белорус.-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. Белорус.-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 : сб. науч. тр. ФТИ НАН Беларуси. – Минск, 2013. – Кн. 2. – С. 343–354.
9. **Ловшенко, Ф. Г.** Перспективные материалы и технологии : монография в 2 т. / Ф. Г. Ловшенко, А. И. Хабибуллин. – Витебск : ВГТУ, 2010. – Т. 1. – 350 с.

10. Перспективные материалы и технологии : монография в 2 т. / Под ред. В. В. Клубовича. – Витебск : ВГТУ, 2015. –Т. 1. – 398 с.

11. **Ловшенко, Ф. Г.** Бронзы электротехнического назначения и особенности их производства / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, И. А. Лозиков // Вестн. Белорус.-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.

Статья сдана в редакцию 22 января 2016 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., ректор Белорусской государственной академии авиации. E-mail: Greg-lovshenko@mail.ru.

Игорь Александрович Лозиков, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. E-mail: Lozikoff@yandex.ru.

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

Grigory Fedorovich Lovshenko, DSc (Engineering), Prof., Rector of Belarusian State Aviation Academy. E-mail: Greg-lovshenko@mail.ru.

Igor Aleksandrovich Lozikov, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. E-mail: Lozikoff@yandex.ru.