



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-94-100>
УДК 621.762

Поступила 03.11.2023
Received 03.11.2023

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ПЛАВКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ ХРОМОВЫХ БРОНЗ

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

В работе приведены результаты исследования влияния технологических факторов открытой плавки на структуру и свойства модифицированных жаропрочных хромовых бронз. Изучена роль защитных атмосфер и раскислителей в формировании химического состава сплавов и предложена их оптимальная комбинация, заключающаяся в сочетании Криолита и аргона для защиты медного расплава при легировании с его предварительным раскислением модификатором на основе композиции «Cu – 10% В», разработанного и производимого на опытно-экспериментальном производстве в Белорусско-Российском университете. Получено представление о кинетике процесса растворения механически сплавленной модифицирующей лигатуры с высоким содержанием легирующего компонента и ее влияние на процесс формирования структуры литых материалов. Определены оптимальная продолжительность времени легирования и температура основы, зависящая от размеров включений хрома и состояния поверхности его частиц. Изучен фазовый состав и физико-механические свойства экспериментальных бронз.

Установлено, что применение механически сплавленной модифицирующей лигатуры с высоким содержанием легирующего компонента, имеющей частицы хрома, близкие к микро-/нанодисперсному размеру с не окисленной поверхностью и высокоэффективного модификатора-раскислителя, позволяет снизить температуру и продолжительность плавки, получая сплавы с микрокристаллическим типом структуры (2–5 мкм) и комплексом физико-механических свойств не уступающим, а по жаропрочности превосходящим аналоги, что подтверждается данными производственных испытаний на ОАО «Белкард» (г. Гродно, РБ) электродов контактной точечной сварки, изготовленных из экспериментальных бронз, которые по стойкости в 3,8 раз превосходят применяемые заводом.

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

Для цитирования. Ловшенко, Ф. Г. Влияние технологических факторов плавки на структуру и свойства модифицированных жаропрочных хромовых бронз / Ф. Г. Ловшенко, И. А. Лозиков // *Литье и металлургия*. 2023. № 4. С. 94–100. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-94-100>.

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL FACTORS OF MELTING ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF MODIFIED HEAT-RESISTANT CHROME BRONZES

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

The paper presents the results of a study of the influence of technological factors of open melting on the structure and properties of modified heat-resistant chrome bronzes. The role of protective atmospheres and deoxidizers in the formation of the chemical composition of alloys is studied and their optimal combination is proposed, consisting in a combination of Cryolite and argon to protect the copper melt during alloying with its preliminary deoxidation with a modifier based on the composition “Cu – 10% B”, developed and produced at a pilot production facility at the Belarusian-Russian University. An idea of the kinetics of the dissolution process of a mechanically fused modifying ligature with a high content of an alloying component and its effect on the formation of the structure of cast materials is obtained. The optimal duration of the doping time and the base temperature, depending on the size of chromium inclusions and the state of the surface of its particles, are determined. The phase composition and physico-mechanical properties of experimental bronzes have been studied.

It has been established that the use of a mechanically fused modifying ligature with a high content of alloying component having chromium particles close to micro-/nanodisperse size with a non-oxidized surface and a highly effective deoxidizer modifier reduces the temperature and duration of melting, obtaining alloys with a microcrystalline type of structure (2–5 microns) and a complex of physico-mechanical properties not inferior to, and in terms of heat resistance superior analogues, which is confirmed by the data of production tests at JSC “Belcard” (Grodno, RB) of contact spot welding electrodes made of experimental bronzes, which are 3.8 times more resistant than those used by the plant.

Keywords. Production, composition, properties, submicrocrystalline modifying ligatures, chrome bronzes.

For citation. Lovshenko F. G., Lozikov I. A. Influence of technological factors of melting on the structure and properties of modified heat-resistant chrome bronzes. *Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 4, pp. 95–100. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-94-100>.

Введение

В настоящее время в крупносерийном производстве наиболее эффективным способом производства хромовых бронз считается открытая плавка в канальных индукционных печах с отливкой слитков полунепрерывным методом [1]. Причем для этого рационально иметь комплекс, состоящий из двух агрегатов: в одном из них готовить медный расплав, а в другом – осуществлять присадку легирующих элементов и получать сплав требуемого состава. В первом агрегате, в качестве которого целесообразно применение индукционной канальной или дуговой печей достаточно большой емкости, медь расплавляют, перегревая ее до температуры, соответствующей оптимальной для легирования, которая в зависимости от марки сплава, массы присаживаемой лигатуры, способа ее введения и времени растворения обычно находится в пределах 1250–1450 °С, и раскисляют. Затем расплав меди переливают во второй агрегат, где и производят легирование. Второй агрегат обычно укомплектован машиной полунепрерывного литья.

Рассмотренная схема, отличительной особенностью которой является отдельное приготовление высококачественного медного расплава, имеет целый ряд преимуществ перед другими схемами производства хромовых бронз в открытых печах, включающих высокую производительность, гибкость при переходе от одной марки сплава к другой, хорошую стойкость печи. Недостатком данной технологии является необходимость применения лигатуры, основным методом получения которой является плавка в вакуумных индукционных тигельных печах по следующей схеме: расплавление и перегрев меди до 1350–1400 °С, введение легирующего элемента в кусковом виде, выдержка расплава до его растворения с одновременным повышением его температуры до 1550–1650 °С, захлаживание расплава до температуры литья, литье. Получать лигатуры можно и в открытых печах, принимая повышенные меры защиты сплава от окисления, однако это не позволяет исключить достаточно высокое шлакообразование, что приводит к последующему зашлаковыванию основной печи и повышению расхода лигатуры на плавку. При этом лигатуры, полученные по обеим технологиям, имеют относительно низкое содержание хрома (до 10%) и не обладают модифицирующим эффектом.

Эффективным методом решения данной проблемы является применение механически сплавленных модифицирующих нанокристаллических лигатур с высоким содержанием легирующего компонента.

Цель работы – исследование влияния основных технологических факторов открытой плавки: температуры, времени выдержки при легировании, защитных атмосфер и раскислителей на структуру, фазовый состав и свойства модифицированных жаропрочных хромовых бронз, полученных с применением механически сплавленных модифицирующих лигатур с содержанием основного легирующего компонента до 20%.

Материалы, оборудование, приборы и методы исследования

Получение механически сплавленной модифицирующей лигатуры проходило по классической технологии [2–4]. Исходными компонентами являлись порошки меди ПМС-1 (ГОСТ 4960-75 и хрома ПХ-1С (ТУ 14-1-1474-75). Во всех композициях в качестве примеси присутствовали 0,3–0,4% кислорода и 0,15% ИПС.

Реакционное механическое сплавление проводили в механореакторе – вибрмельнице гирационного типа с четырьмя водоохлаждаемыми помольными камерами объемом 2 дм³ каждая в атмосфере аргона. Продукт механического сплавления – гранулированную композицию, полученную по оптимальному режиму, разработанному ранее, подвергали холодному брикетированию до плотности 70–75% от теоретической и последующему горячему прессованию или экструзии в полуфабрикаты в виде прутков диаметром 20 мм, которые вводили в расплавленную медную основу для получения бронзы БрХ с химическим составом, соответствующему ГОСТ 18175-78.

Плавку экспериментальных сплавов выполняли в высокочастотной индукционной печи открытого типа, питаемой от генератора ВЧГ 1/60-0,066, с использованием графитовых тиглей АК-10. Основой являлась медь марки М1 (ГОСТ 859-2001). Образцы для исследований вырезали из слитков, заливаемых в металлический кокиль. Для определения физико-механических свойств сплавов образцы подвергали типовой термической обработке [5], состоящей в закалке с температуры 1000±10 °С в воде и последующему старению при температуре 450±2 °С в течение 4 ч с последующим охлаждением вместе с печью. Промежуточная между закалкой и старением операция пластической деформации отсутствовала. Так

как одним из наиболее важных параметров, определяющим физико-механические свойства, является химический состав бронз, на спектрографе SPECTROMAXx контролировали содержание основных элементов, вводимых в сплав: Cr, В, Р.

Металлографический анализ осуществляли на металлографическом комплексе МКИ-2М (Беларусь), сканирующем электронном микроскопе «Tescan VEGA II SBH» (Чехия). Исследование элементного состава проводили на микроскопе «Tescan VEGA II SBH» (Чехия) с системой энергодисперсионного микроанализа «INCA ENERGY 350/XT» с беззотным детектором X-Act ADD (OXFORD Instruments NanoAnalysis, Великобритания) при линейном непрерывном и шаговом сканировании, а также сканировании по площади. Механические свойства определяли по стандартной методике на пропорциональных цилиндрических образцах с диаметром в рабочей части 5 мм и с начальной расчетной длиной 25 мм. Исследования выполняли на разрывной машине МР-100. Твердость измеряли по методу Бринелля и Виккерса. Электропроводность измеряли при помощи многофункционального прибора измерения геометрических параметров «Константа К5».

Результаты исследований

Особенностью открытой плавки хромовых бронз при ее экономической эффективности особенно в условиях мелкосерийного производства являются повышенные требования к защите расплава от окисления, хорошему предварительному раскислению медной основы перед легированием и минимальной выдержке для усвоения легирующих элементов, в данном случае хрома. Не соблюдение указанных требований приводит к его значительному угару и, как следствие, низким физико-механическим свойствам полученных сплавов.

При выполнении работы вначале применяли простые, дешевые и доступные покровные флюсы, рекомендуемые для выплавки хромовых бронз: прокаленный древесный уголь, кокс пековый электродный КПЭ-2, электродный графит ЭГ, сажу [6–9]. Установлено, что они хорошо защищают расплав от окисления и служат хорошими теплоизоляторами, но в процессе растворения хрома происходит обволакивание его кусковых включений сажей и увлечение их в шлаковую пленку, что приводит к резкому снижению содержания хрома в выплавляемых бронзах. В связи с этим в работе использовали оксидно-солевые флюсы (Криолит, Криофат), позволяющие не только защитить жидкий металл от окисления, но и разжижать образующиеся шлаки хромовой бронзы, способствуя их более легкому удалению.

Наряду с требованиями по хорошей защите поверхности ванны от окисления необходимо учитывать негативную роль кислорода, растворенного непосредственно в расплаве и окисляющего вводимый хром. Для получения качественной бронзы содержание кислорода в основе перед легированием не должно превышать 0,001 %. При его содержании 0,01 % и более переход хрома и циркония в раствор практически не наблюдается [6,10,11]. Исходя из этого, медный расплав перед легированием раскисляли элементами, имеющими сродство к кислороду большее, чем медь (Al, Ti, С, Р). Но при высокой раскисляющей способности указанных элементов даже незначительное их содержание в бронзе резко снижает электропроводность и наиболее эффективным оказалось использование бора. Так как он нерастворим в меди при комнатной температуре и не образует с ней соединений, его избыток не оказывает вредного влияния на свойства сплавов. В то же время образующийся оксид бора B_2O_3 , имеющий кислый характер, взаимодействуя с закисью меди, способен образовывать содержащие борат меди шлаки $2Cu_2O \cdot B_2O_3$. В результате бор способен связывать на 60 % больше кислорода, чем это следует из стехиометрического соотношения элементов в оксиде B_2O_3 . Также бор обладает модифицирующим эффектом [12].

Для раскисления и модифицирования медных сплавов на опытно-экспериментальном производстве Белорусско-Российского университета разработана технология и освоен выпуск раскислителя-модификатора на основе композиции Cu – 10 % В. Высокая эффективность модификатора подтверждена его применением в условиях литейного производства завода «Красный Выборжец» (г. Санкт-Петербург, РФ).

Проведенные опытные плавки модифицированных хромовых бронз с применением бора в качестве раскислителя и Криолита в качестве покровного флюса показали сниженное содержание хрома в сплавах, т.е. на его достаточно высокий угар. Выяснено, что Криолит не обеспечивает полной защиты сплава от окисления, так как индуктивные потоки, образующие выпуклый мениск жидкого металла при плавке, оттесняли флюс к стенкам тигля, что снижало его защитные свойства. Кроме того, потоки горячих газов, поднимающихся от расплава, периодическое «дрознение» и помешивание также приводят к кратковременному нарушению изоляции и попаданию атмосферного кислорода. Однако зашлаковка поверхности ванны при этом была значительно ниже, чем при применении сажи или смеси сажа + Криолит и шлак легко удаляется с поверхности расплава.

Решением проблемы явилось подача струи аргона в плавильный тигель, вытесняющий атмосферный воздух и обеспечивающий дополнительную защиту расплава. Комбинированная защита Криолит + Ar позволила снизить угар хрома на 12 %.

Существенными факторами, определяющими технологичность и экономическую эффективность процесса плавки, а также физико-механические свойства сплавов, являются температура медной основы и продолжительность времени легирования. Введение лигатуры осуществляли двумя способами: прямой загрузкой в тигель с медной основой для последующего совместного расплавления и введением в расплав за некоторое время перед разливкой. Состав и свойства полученных сплавов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Состав и свойства экспериментальных бронз

Условия получения бронзы	% Cr	σ_B , МПа	НВ, МПа	$R \cdot 10^9$, Ом·м
Загрузка с основой	0,67	420	120	21
Введение в расплав	0,73	480	140	22

Анализ состава и свойств позволяет предположить, что оба способа подачи лигатуры достаточно равнозначны. Однако изучение структуры сплавов установило значительное различие между ними.

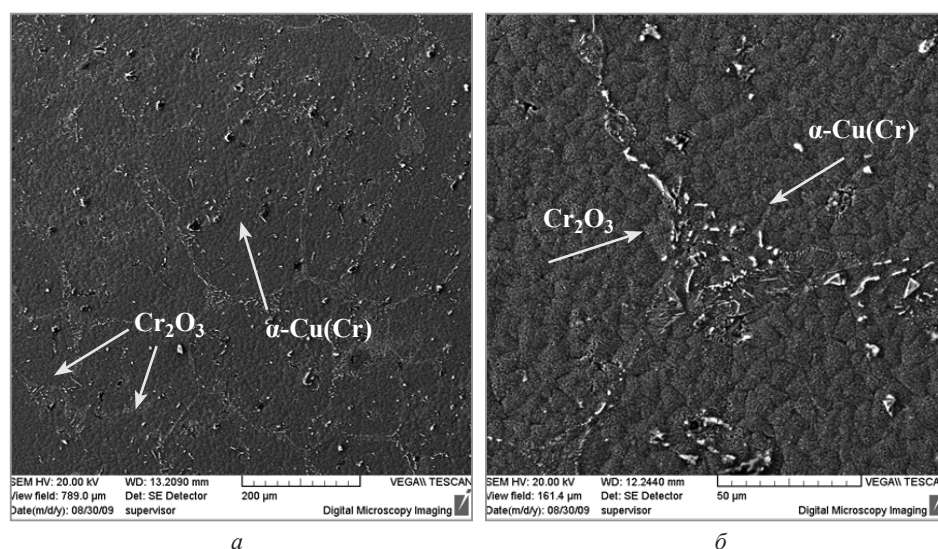


Рис. 1. Структура литой БрХ1, полученной при загрузке лигатуры с основой: а – $\times 250$; б – $\times 1000$

Структура литых материалов, полученных по первому варианту (при загрузке с основой), относится к микрокристаллическому типу с размером зерен 20–25 мкм, объединенных в группы размером 150–200 мкм (рис. 1).

Наряду с α -твердым раствором хрома в меди присутствуют отдельные самостоятельные включения первого в окисленном виде. Это указывает на то, что длительная выдержка приводит к коагуляции и окислению хрома лигатуры и, как следствие, снижению ее модифицирующего эффекта и жаропрочности сплава.

Бронзы, полученные введением лигатуры в расплав, также имеют структуру, относящуюся к микрокристаллическому типу, но с размером зерна 2–5 мкм (рис. 2). Легирующие элементы равномерно распределены в основе, образуя α -твердый раствор. Отдельные включения хрома не выявляются, что обуславливает высокую жаропрочность экспериментальной бронзы.

Для определения оптимального времени легирования расплава проводили опытные плавки при температуре медной основы 1300 °С в интервале выдержки от 2 до 30 мин. Контролируемым параметром являлось содержание хрома и структура сплава. Концентрация хрома в полученной бронзе в зависимости от времени выдержки приведена в табл. 2.

Таблица 2. Содержание хрома в зависимости от времени выдержки расплава

τ , мин	2	4	8	14	20	25	30
% Cr	0,45	0,74	0,87	0,86	0,78	0,63	0,49

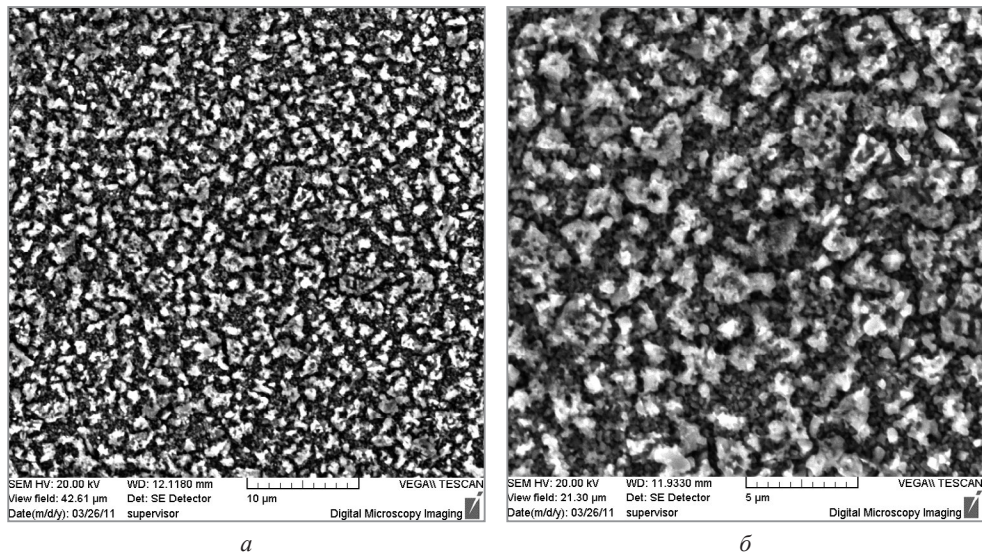


Рис. 2. Структура литой БрХ1, полученной при введении лигатуры в расплав: *a* – $\times 5000$; *б* – $\times 10000$

Исследование структуры образцов плавок позволило выявить кинетику процесса растворения хрома, указывающую, что вначале сплав сильно ликвует и образуются области, обогащенные хромом (рис. 3, *a*, *б*, *г*). По интенсивности пиков хрома и меди (рис. 3, *в*) и низкому содержанию кислорода можно предположить, что это не оксид, а эвтектика Cu – Cr. При этом отдельные включения нерастворенного хрома на этом этапе уже отсутствуют.

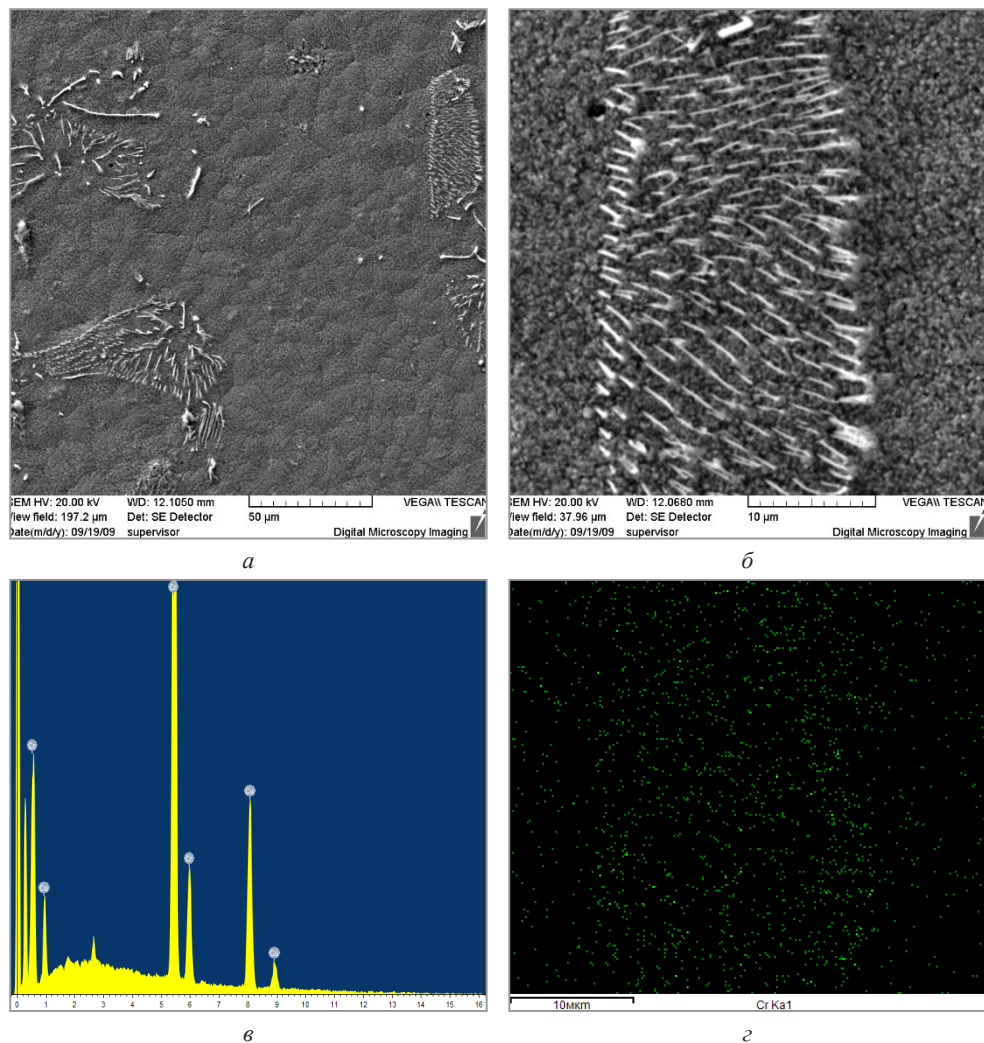


Рис. 3. Структура литой БрХ1 (*a*, *б*) и распределение Cr при сканировании по площади (*г*): выдержка 2 мин

По мере увеличения времени выдержки до 8–14 мин за счет индукционного перемешивания эвтектика полностью растворяется в медной основе и процесс гомогенизации сплава завершается на 10–12-й минуте (рис. 3, б). Дальнейшая выдержка ведет к снижению хрома за счет его угара.

БрХ1, полученная с применением механически сплавленной лигатуры с высоким содержанием легирующего компонента, отличается высокой плотностью, отсутствием пор или микровключений (рис. 4, а) и равномерным распределением легирующих элементов в основе. Отдельные включения Cr не выявляются (рис. 4, б).

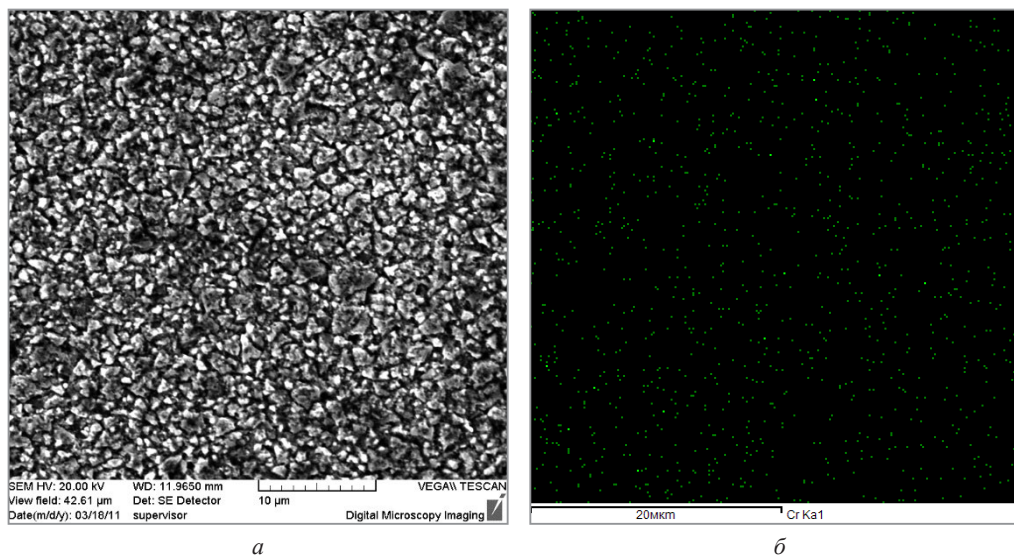


Рис. 4. Структура литой БрХ1 (а) и распределение Cr при сканировании по площади (б): выдержка 12 мин

Высокая скорость усвоения объясняется малым размером включений хрома в лигатуре, получаемой механическим сплавлением. Даже его отдельные непроработанные частицы не превышают 15–20 мкм и на их поверхности отсутствуют оксидные пленки, замедляющие процесс растворения. Это подтверждает изучение влияния температуры легирования на химический состав бронз. Плавки проводили аналогично предыдущим, приняв время выдержки расплава 12 мин, а температуру изменяли в диапазоне 1150–1400 °С. Содержание хрома в зависимости от температуры медной основы приведено в табл. 3.

Таблица 3. Содержание хрома в зависимости от температуры расплава

$T, ^\circ\text{C}$	1150	1200	1250	1300	1350	1400
% Cr	0,51	0,64	0,82	0,86	0,87	0,87

Полученные данные позволяют утверждать, что при введении лигатуры при частицах хрома, близких к микро-/нанодисперсному размеру и с не окисленной поверхностью необходимость в повышенных температурах медной основы отсутствует. Физико-механические свойства бронзы, полученной по оптимальному температурно-временному режиму ($T_{\text{легир}} = 1280 ^\circ\text{C}$ и $\tau_{\text{легир}} = 12$ мин), приведены в табл. 4.

Таблица 4. Физико-механические свойства литой бронзы

Сплав	Химический состав, %			Физико-механические свойства			
	Cr	Zr	Fe	σ_B , МПа	НВ, МПа	δ , %	$R \cdot 10^9$, Ом·м
БрХ1	0,85	—	0,043	490	150	13	22

Анализ физико-механических свойств, приведенных в таблице, показывает, что сплавы, полученные с применением механически синтезированной лигатуры по твердости, прочности, электропроводности, не уступают существующим аналогам. В то же время полученные результаты производственных испытаний на ОАО «Белкард» (г. Гродно, РБ) электродов контактной точечной сварки, изготовленных из экспериментальных бронз, которые по стойкости в 3,8 раз превосходят применяемые заводом, указывают на их более высокую жаропрочность.

Выводы

Применение механически сплавленной модифицирующей лигатуры с высоким содержанием легирующего компонента, содержащей частицы хрома, близкие к микро-/нанодисперсному размеру и с не окисленной поверхностью, а также высокоэффективного модификатора-раскислителя, разработанного и производимого на опытно-экспериментальном производстве Белорусско-Российского университета, позволяет снизить температуру и продолжительность плавки, получая сплавы с микрокристаллическим типом структуры и комплексом физико-механических свойств не уступающим, а по жаропрочности превосходящие аналоги.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Галовешко, В.Ф.** Оптимизация параметров плавки при непрерывном литье хромовой бронзы / В.Ф. Галовешко, Н.Н. Полунин // *Литейное производство*. – 1980. – № 12. – С. 14.
2. **Ловшенко, Г.Ф.** Наноструктурные механически легированные материалы на основе металлов / 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.
3. **Витязь, П.А.** Механически легированные сплавы на основе алюминия и меди / П.А. Витязь, Ф.Г. Ловшенко, Г.Ф. Ловшенко. – Минск: Беларуская наука, 1998. – 352 с.
4. **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.
5. **Николаев, А.К.** Сплавы для электродов контактной сварки / А.К. Николаев, В.М. Розенберг. – М.: Metallurgija, 1978. – 96 с.
6. **Николаев, А.К.** Хромовые бронзы / А.К. Николаев, А.И. Новиков, В.М. Розенберг. – М.: Metallurgija, 1983. – 175 с.
7. Совершенствование технологии и оборудования для плавки хромовых бронз / Р.М. Фридлянский [и др.] // *Плавка и литье цветных металлов и сплавов*. – М.: Metallurgija, 1971. – № 35. – С. 20–22.
8. **Белюсов, Н.П.** Растворение хрома в жидкой меди / Н.П. Белюсов, Л.Н. Сергеев, Б.И. Хнызов // *Цветные металлы*. – 1978. – № 4. – С. 61–62.
9. **Пименов, А.М.** Раскислительная способность углеродистых покровных флюсов при плавке меди / А.М. Пименов, Л.И. Гофеншефер // *Литейное производство*. – 1989. – № 3. – С. 31.
10. **Гофеншефер, Л.И.** Получение сплава меди, содержащего до 25% хрома, методом открытой индукционной плавки / Л.И. Гофеншефер, В.М. Чурсин, В.И. Рыжов // *Цветные металлы*. – 1981. – № 9. – С. 90–91.
11. **Головешка, В.Ф.** Влияние условий плавки на растворение хрома в жидкой меди / Ф.Г. Головешка, Л.Н. Сергеев // *Цветные металлы*. – 1972. – № 10. – С. 63–65.
12. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди: справ.; под ред. Н.Х. Абрикосова. – М.: Наука, 1979. – 247 с.

REFERENCES

1. **Galoveshko V.F., Polunin N.N.** Optimizacija parametrov plavki pri nepreryvnom lit'e hromovoj bronzy [Optimization of melting parameters during continuous casting of chrome bronze]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 1980, no. 12, p. 14.
2. **Lovshenko G.F., Lovshenko F.G., Hina B.B.** Nanostrukturnye mehanicheski legirovannye materialy na osnove metallov [Nanostructured mechanically alloyed materials based on metals]. Mogilev, Belarus.-Ros. un-t Publ., 2008, 679 p.
3. **Vitjaz' P.A., Lovshenko F.G., Lovshenko G.F.** *Mehanichecki legirovannye splavy na osnove aljuminija i medi* [Mechanically alloyed alloys based on aluminum and copper]. Minsk, Belaruskaja navuka Publ., 1998, 352 p.
4. **Lovshenko G.F., Lovshenko F.G.** *Teoreticheskie i tehnologicheskie aspekty sozdaniya nanostrukturnyh mehanicheski legirovannyh materialov na osnove metallov* [Theoretical and technological aspects of the creation of nanostructured mechanically alloyed materials based on metals]. Mogilev, Belarus.-Ros. un-t Publ., 2005, 276 p.
5. **Nikolaev A.K., Rozenberg V.M.** *Splavy dlja jelektrodov kontaktnoj svarki* [Alloys for contact welding electrodes]. Moscow, Metallurgija Publ., 1978, 96 p.
6. **Nikolaev A.K., Novikov A.I., Rozenberg V.M.** *Hromovye bronzy* [Chrome bronzes]. Moscow, Metallurgija Publ., 1983, 175 p.
7. **Fridljanskij R.M., Izmajlov V.A., Brenner A.L., Moldavskij O.D., V'jugin L.F.** Sovershenstvovanie tehnologii i oborudovaniya dlja plavki hromovyh bronzy [Improvement of technology and equipment for melting chrome bronzes]. *Plavka i lit'e cvetnyh metallov i splavov = Melting and casting of non-ferrous metals and alloys*. Moscow, Metallurgija Publ., 1971, no. 35, pp. 20–22.
8. **Belousov N.P., Sergeev L.N., Hnyzhov B.I.** Rastvorenije hroma v zhidkoj medi [Dissolution of chromium in liquid copper]. *Cvetnye metally = Non-ferrous metals*, 1978, no. 4, pp. 61–62.
9. **Pimenov A.M., Gofenshefer L.I.** Raskislitel'naja sposobnost' ugljerodistyh pokrovnyh fljusov pri plavke medi [Deoxidizing ability of carbonaceous cover fluxes during copper melting]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 1989, no. 3, 31 p.
10. **Gofenshefer L.I., Chursin V.M., Ryzhov V.I.** Poluchenije splava medi, sodержashhego do 25% hroma metodom otkrytoj indukcionnoj plavki [Obtaining a copper alloy containing up to 25% chromium by open induction melting]. *Cvetnye metally = Non-ferrous metals*, 1981, no. 9, pp. 90–91.
11. **Goloveshka V.F., Sergeev L.N.** Vlijanie uslovij plavki na rastvorenije hroma v zhidkoj medi [Influence of melting conditions on the dissolution of chromium in liquid copper]. *Cvetnye metally = Non-ferrous metals*, 1972, no. 10, pp. 63–65.
12. *Dvojnye i mnogokomponentnye sistemy na osnove medi* [Dual and multicomponent systems based on copper]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 247 p.