УДК 621.762

И. А. ЛОЗИКОВ, *канд. техн. наук*, *доц.*
Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ВЛИЯНИЕ СПОСОБОВ ВВЕДЕНИЯ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ЛИГАТУР И ТЕМПЕРАТУРЫ ОСНОВЫ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА БРОНЗ

Аннотация
Приведены закономерности формирования структуры и фазового состава модифицированных жаропрочных хромовых бронз, полученных с применением механически сплавленных модифицирующих лигатур с высоким содержанием легирующего компонента, в зависимости от способов введения модификаторов и температуры основы.

Ключевые слова:
получение, состав, структура, свойства, субмикрокристаллические модифицирующие лигатуры, хромовые бронзы.

Введение. Узким местом, сдерживающим процесс и определяющим высокую стоимость хромовых бронз, а также экологическую вредность производства, является изготовление лигатур. В то же время существующие на сегодняшний день сплавы данной группы, производимые по классической технологии на предприятиях РФ, обладают довольно ограниченным комплексом физико-механических свойств, в частности – температурой рекристаллизации. 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 сплавления, обеспечивающего получение модифицирующих лигатур с высоким содержанием легирующего компонента и исключающего из технологического процесса их производства высокотемпературную плавку.

Цель работы: изучить влияние основных технологических факторов при получении хромовых бронз с использованием модифицирующих лигатур на химический состав, структуру и свойства; установить кинетику формирования структуры сплавов в зависимости от температуры основы при плавке.

Получение экспериментальных образцов сплавов проводились методом открытой плавки в высокочастотной индукционной печи с применением графитовых тиглей марки АК-10. Заготовки для изучения свойств, структуры и химического состава получаемых бронз вырезались из отливок, заливаемых в стальной водоохлаждаемый кокиль с системой направленного отвода тепла. В качестве основы литых сплавов использовали медный прокат Ø50 марки М1 (ГОСТ 859–2001). Лигатура, содержащая 20 % Cr и полученная по оптимальному режиму, разработанному ранее, вводилась в виде мерных прутков Ø16 для получения бронзы БрХ с химическим составом, соответствующим ГОСТ 18175–78. 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, B, P. Изучение структуры и элементного состава проводилось с использованием сканирующего электронного микроскопа «TescanVEGA II SBH».

Результаты исследований и их обсуждение. Выполнение работы условно можно разделить на два этапа. На первом этапе определялось влияние способов подачи модифицирующих механически сплавленных лигатур с высоким содержанием хрома, как основного легирующего элемента, на состав, структуру и свойства жаропрочных хромовых бронз; на втором – влияние температуры медной основы при плавке на эти свойства.

Введение лигатуры осуществлялось двумя способами: прямой загрузкой в тигель с медной основой для последующего совместного расплавления, что проще и предпочтительнее, и введением в расплав за несколько минут перед разливкой. Состав и свойства полученных сплавов представлены в табл. 1.

Табл. 1. Состав и свойства экспериментальных бронз

Условие получения бронзы	% Cr	$Б_В$, МПа	НВ, МПа	R, 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 введения лигатуры практически равнозначны. Но изучение структуры сплавов установило значительное различие между ними. Структура литых материалов, полученных при загрузке с основой, относится к микрокристаллическому типу с размером зерен 20…25 мкм, объединенные в группы размером 150…200 мкм (рис. 1).

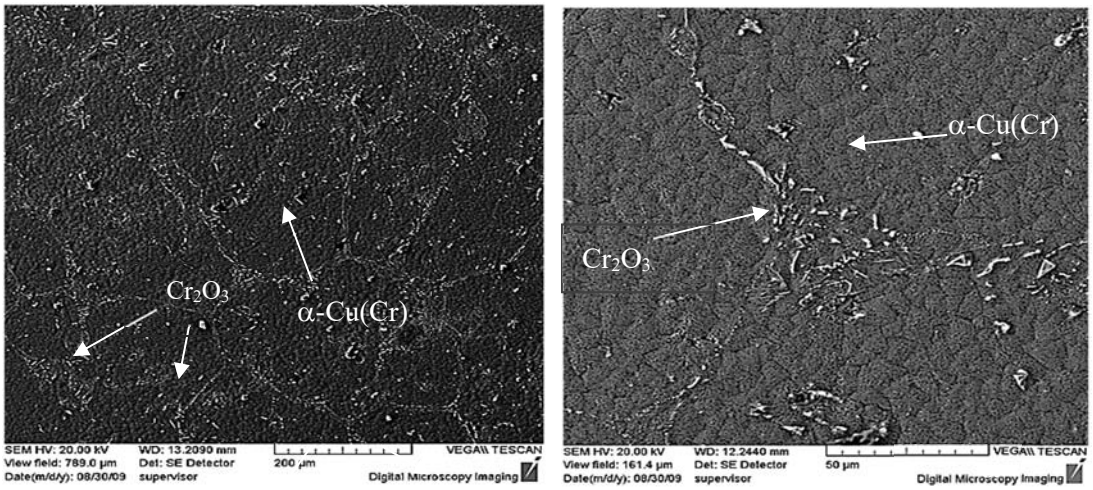

Рис. 1. Структура литых сплавов, полученных при загрузке с основой

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

Полученные введением лигатуры в расплав сплавы также можно отнести к микрокристаллическому типу, но уже с размером зерна 2…5 мкм, что на порядок

меньше по сравнению с предыдущими (рис. 2). В этом случае легирующие элементы имеют равномерное распределение в медной основе, представляя собой α-твердый раствор хрома в меди. При этом самостоятельные включения хрома отсутствуют. Это указывает на то, что экспериментальные бронзы имеют высокую жаропрочность.

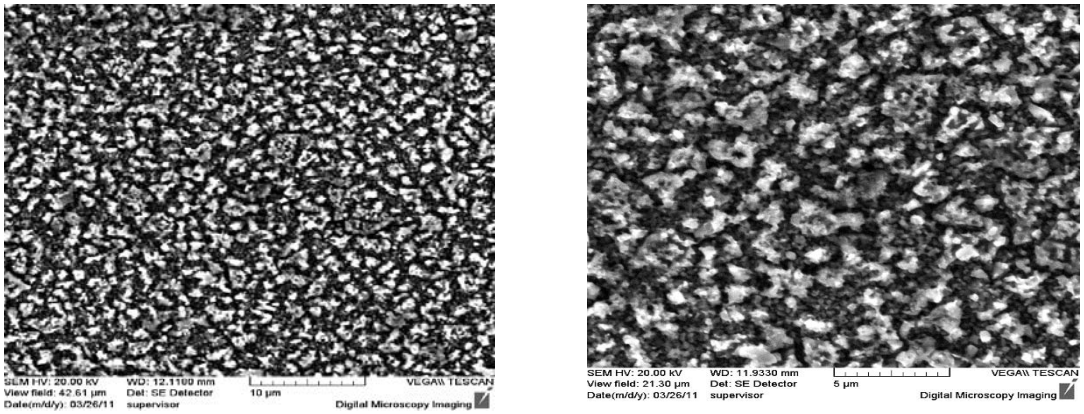

Рис. 2. Структура литых сплавов, полученных при введении лигатуры в расплав

На втором этапе проведения исследований определялась важная составляющая процесса плавки – влияние температуры медной основы и времени легирования расплава на фазовый состав, структуру и свойства литых жаропрочных электротехнических бронз. Вначале исследовали изменение содержания растворенного хрома в получаемой бронзе в зависимости от времени выдержки медной основы. Температура металлической ванны перед легированием составляла 1300 °С, а время выдержки для растворения лигатуры изменялось в пределе 2…30 мин. Содержание хрома в полученной бронзе в зависимости от времени выдержки приведено в табл. 2.

Табл. 2. Содержание хрома в зависимости от времени выдержки расплава

τ, мин	3	5	9	15	21	26	30
% Cr	0,44	0,73	0,88	0,81	0,62	0,52	0,48

Исследование структуры образцов плавок позволило выявить кинетику процесса: вначале сплав сильно ликвирует и образуются области с высоким содержанием хрома, представляющие собой эвтектику медь-хром (рис. 3, *а*; 4, *а*). При этом отдельные включения нерастворенного хрома даже на первом этапе уже отсутствуют. Повышение времени выдержки до 9…15 мин приводит к тому, что за счет перемешивания индукционными потоками эвтектика полностью растворяется и сплав приобретает гомогенное строение примерно на 10…12 мин (рис. 3, *б*). Дальнейшая выдержка негативно сказывается на содержании хрома за счет возрастающего угара. Хромовые бронзы, полученные методом открытой плавки с использованием модифицирующей лигатуры с высоким содержанием основного компонента, имеют высокую плотность. Поры или микровключения не выявлены (см. рис. 3, *б*); легирующие элементы равномерно распределены в основе (рис. 4, *б*).

а) *б*)

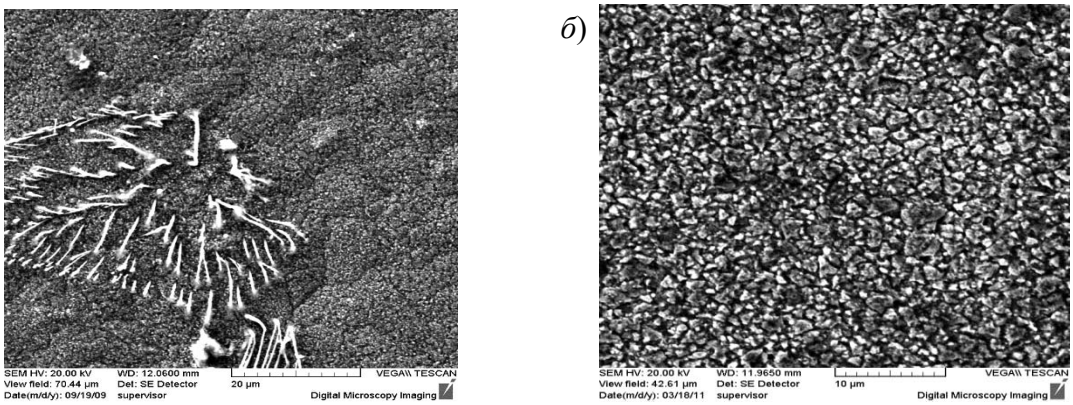

Рис. 3. Структура литой БрХ: *а* – выдержка 3 мин; *б* – выдержка 9 мин

а) *б*)

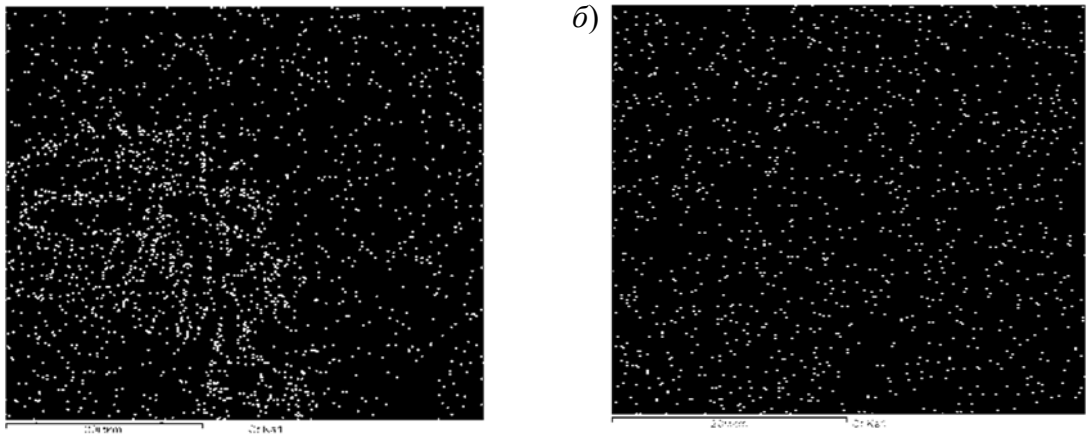

Рис. 4. Распределение хрома в литой БрХ (сканирование по площади): *а* – выдержка расплава 3 мин; *б* – выдержка расплава 9 мин

Высокая скорость растворения объясняется наномерным 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.

Следующим шагом являлось изучение влияния температуры легирования на химический состав и свойства бронз. Плавки проводили аналогично предыдущим, приняв время выдержки расплава 8 мин, а температуру изменяли в диапазоне 1150 ºС…1400 ºС. Содержание хрома в образцах экспериментальных бронз при изменении температуры медной основы приведено в табл. 3.

Табл. 3. Содержание хрома при изменении температуры расплава

t, ºС	1150	1200	1250	1300	1350	1400
% Cr	0,51	0,64	0,82	0,86	0,82	0,70

Полученные данные позволяют утверждать, что при введении лигатуры с частицами хрома, близкими к нанодисперсному размеру и с неокисленной поверхностью, необходимость в повышенных температурах медной основы

отсутствует. Все выплавленные при разных температурах сплавы обладают хорошей жидкотекучестью.

Химический состав и свойства бронзы, полученные по оптимальному режиму, приведены в табл. 4.

Табл. 4. Физико-механические свойства литой бронзы, полученные при $t_{легир}$ = 1250 °С и $\tau_{легир}$ = 8 мин

Марка сплава	Химический состав, %			Физико-механические свойства			
	Cr	Zr	Fe	$Б_В$, МПа	НВ, МПа	δ, %	R, 10^9 Ом · м
БрХ1	0,83	–	0,043	485	150	13	22

Выводы.

1. Наиболее оптимальным способом легирования меди при получении жаропрочных хромовых бронз является метод введения лигатуры непосредственно в расплав с последующей непродолжительной выдержкой для ее расплавления и растворения Cr в основе.

2. Время выдержки расплава при его легировании механически сплавленной лигатурой с высоким содержанием легирующего компонента не превышает 10…12 мин.

3. Нет необходимости перегрева основы для лучшего усвоения Cr. Оптимальная температура при легировании составляет 1250 °С…1300 °С.

4. Бронзы, полученные открытой плавкой в индукционных печах с применением модифицирующей лигатуры с высоким содержанием легирующего компонента, имеют высокую плотность. Поры или инородные микровключения не выявлены. Легирующие элементы равномерно распределены в основе.

5. Структура экспериментальных модифицированных материалов относится к микрокристаллическому типу с размером зерен основы, не превышающим 2…4 мкм.

Контакты:
Lozikoff@yandex.by (Лозиков Игорь Александрович).

I. A. LOZIKOV

INFLUENCE OF METHODS OF INTRODUCING MODIFYING LIGATURES AND BASE TEMPERATURE ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF BRONZES

Abstract

The regularities of the formation of the structure and phase composition of modified heat-resistant chrome bronzes obtained using mechanically fused modifying ligatures with a high content of alloying component, depending on the methods of introducing modifiers and the base temperature, are presented.

Keywords:

production, composition, properties, submicrocrystalline modifying ligatures, chrome bronzes.