

---

УДК 669.017

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

---

**ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ ЭКСТРУЗИИ МЕХАНИЧЕСКИ ЛЕГИРОВАННЫХ КОМПОЗИЦИЙ «МЕДЬ–ХРОМ» И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ, ФАЗОВОГО СОСТАВА И СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ИЗ НИХ**

---

UDC 669.017

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

---

**THE OPTIMIZATION OF EXTRUSION OF MECHANICALLY ALLOYED «COPPER–CHROME» COMPOSITIONS AND THE FORMATION OF STRUCTURE, PHASE COMPOSITION AND PROPERTIES OF MATERIALS MADE FROM THEM**

---

**Аннотация**

Приведены результаты оптимизации процесса горячего прессования механически легированных хромсодержащих гранулированных композиций «медь–хром» с содержанием хрома до 20 % и закономерности формирования структуры, фазового состава и свойств материалов из них.

**Ключевые слова:**

механически легированная композиция, система «медь–хром», экструзия, оптимизация, материал, закономерности формирования, структура, фазовый состав, свойства, применение.

**Abstract**

The paper presents the results of optimizing the process of hot pressing of mechanically alloyed chromium-containing granular «copper–chrome» compositions with a chromium content of 20 % and the formation of structure, phase composition and properties of materials made from them

**Key words:**

mechanically alloyed composition, «copper–chrome» system, extrusion, optimization, material, formation pattern, structure, phase composition, properties, application.

---

**Введение**

Хромсодержащие бронзы широко применяются для изготовления как многотоннажных конструкций, например, теплообменных агрегатов, так и относительно мелких изделий, включающих различные типы электродов контактной сварки, арматуру машин сварки сопротивлением, а также разрывные контакты. Они относятся к низколегированным дисперсионно-твердеющим медным сплавам. В производстве низколегированных медных материалов удельный объем хромсодержащих бронз со-

ставляет 50 %. Наличие в них элементов, имеющих большое сродство к кислороду (Cr, Zr), малые допуски на легирование и сравнительно высокие требования к чистоте материала ставят перед необходимостью использования в качестве шихты лигатур [3, 4]. Применение их позволяет с большей надежностью воспроизвести заданный состав сплава; снизить температуру перегрева медной основы, уменьшить продолжительность плавки, а следовательно, увеличить производительность плавильных агрегатов; сократить угар дорогостоящих легирующих компонентов и зашла-

кованность плавильной ванны. Краткий обзор основных промышленных технологий изготовления хромсодержащих бронз производства приведен в [1, 2].

Принимая меры защиты расплава от окисления, лигатуры для хромовых бронз получают плавкой в открытых печах. При этом расход хрома в результате угара, по сравнению с расчетным, возрастает вдвое, а потери циркония составляют 90 %, что ставит под сомнение экономическую целесообразность вышеприведенного способа изготовления [5]. Качество лигатуры повышается, а угар хрома снижается при плавке в вакуумных индукционных тигельных печах. В этом случае технологический процесс включает следующие этапы: расплавление и перегрев меди до 1350...1400 °С, введение кускового хрома, выдержка расплава до растворения хрома с одновременным повышением его температуры до 1550...1650 °С, охлаждение расплава до температуры литья, литье. Оптимальное содержание хрома в лигатуре Cu-Cr составляет 8...10 %. Такие сплавы склонны к ликвации и их следует отливать в водоохлаждаемую изложницу слитками массой 15...25 кг. Таким образом, изготовление лигатур – процесс, во многом сдерживающий выпуск хромовых бронз и определяющий их высокую стоимость, а также экологическую вредность производства. Исследования, выполненные авторами работы, некоторые результаты которых представлены в [1, 2, 6, 7], показывают, что один из перспективных методов решения проблемы – применение механического легирования, заключающегося в обработке порошковой шихты заданного состава в энергонапряженной мельнице – механореакторе, продуктом которой является гранулированная композиция с суб-/микроструктурной основой, упрочненной, как правило, нано-, субмикро-/размерными включениями. Приведенная структура устойчива и в большинстве случаев достигается компактными материалами, производимыми из механически леги-

рованных композиций.

В отличие от аналогов – литых лигатур, получаемых длительной высокотемпературной ( $t = 1650...1700$  °С) плавкой в вакуумных печах и содержащих хром в виде грубых макровключений, применение механически легированных лигатур позволяет:

- исключить из технологического процесса производства бронз экологически опасный длительный, высокотемпературный, энергоемкий, требующий специального вакуумного оборудования этап производства лигатуры;
- уменьшить производственные расходы при выплавке бронз за счет снижения температуры плавки на 100...150 град и продолжительности процесса в 1,5...2,0 раза соответственно, повысить его экологичность;
- получить субмикроструктурные высокопрочные бронзы, позволяющие увеличить стойкость изделий электротехнического назначения (электродов контактной точечной и рельефной сварки, роликов шовной сварки, губок стыковых машин и т. п.) в 1,8...2,2 раза;
- улучшить качество и надежность сварных соединений.

Таким образом, использование технологии механического легирования упрощает и удешевляет производство как лигатур, так и хромсодержащих бронз. При этом разработанные материалы, наряду с легированием, эффективно выполняют роль модификаторов, обеспечивающих получение бронз с субмикроструктурным типом структуры, обладающих высоким комплексом физико-механических свойств [7]. Продуктом механического легирования является гранулированная композиция, средний размер частиц которой при оптимальном режиме реализации процесса составляет 0,2...0,5 мм. Предварительные исследования показали, что минимальный угар легирующих элементов достигается при введении в расплав меди лигатур в виде экструдированных прутков, имеющих плотность, близкую

к теоретической, оптимальные условия получения и закономерности формирования структуры и свойств которых не установлены. Кроме этого, на необходимость решения задачи указывают данные [7], позволяющие сделать предположение, что механически легированные материалы на основе системы «медь–хром» с содержанием хрома до 20 % могут быть использованы в качестве электродных, заменяющих сложнелегированные бериллиевые бронзы.

Исходя из этого **целью работы** являлась оптимизация процесса горячего прессования механически легированных хромсодержащих гранулированных композиций и исследование закономерностей формирования структуры, фазового состава и свойств получаемых материалов.

#### **Методика исследования, применяемое оборудование и приборы**

Исходные компоненты, оптимальные условия механического легирования, методика исследования, применяемое оборудование и приборы аналогичны использованным в [6]. Гранулированная композиция, полученная при реакционном механическом легировании, подвергалась холодному брикетированию в стальной пресс-форме методом двухстороннего прессования до плотности 70...75 % от теоретической. Брикет, обладающий достаточной прочностью и неразрушающийся при переработке, получался прессованием композиции, насыпанной в контейнер из меди с толщиной стенки 0,2...0,3 мм; полуфабрикаты лигатуры в виде прутков диаметром 10 и 12 мм – методом горячего прессования или экструзии брикетов из гранулированных композиций. С целью увеличения градиента разностороннего перемещения слоев брикета и интенсификации процесса течения, способствующего разрушению оксидных и адсорбционных пленок и образованию ювенильного контакта «металл–металл», фильера, формирующая прутки при экс-

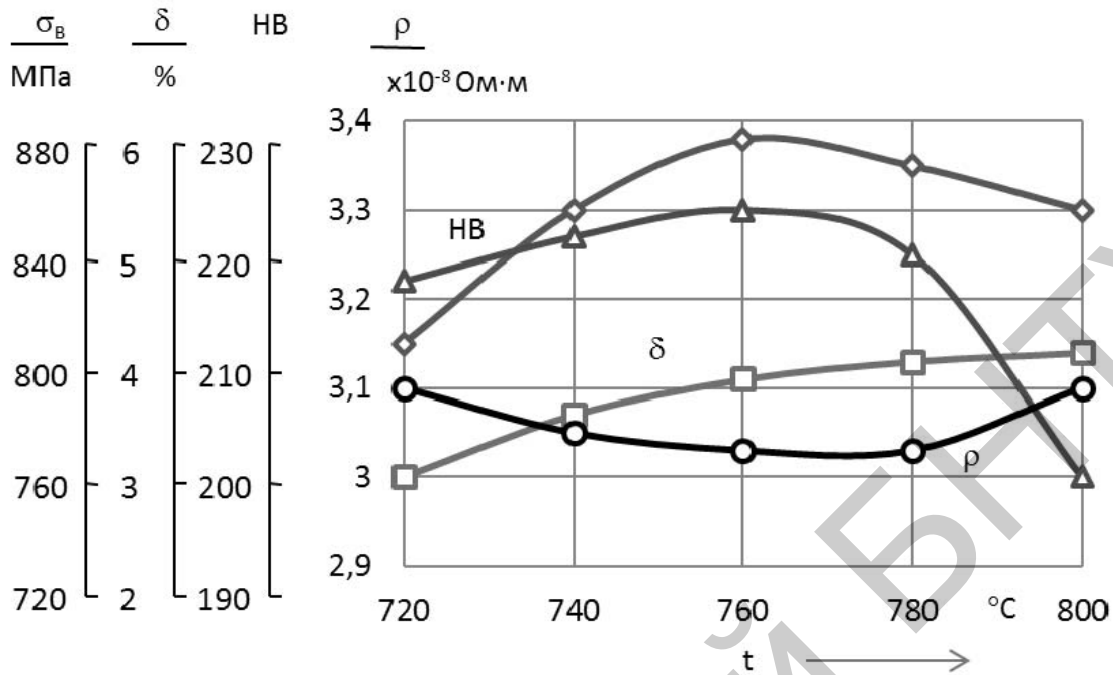
трузии, имела обратный конус. Физико-механические свойства сплавов определялись на стандартных образцах, подвергнутых типовой термической обработке [3], заключающейся в закалке с температуры  $(1000 \pm 10)^\circ\text{C}$  в воде и последующем старении при  $450^\circ\text{C}$  в течение 4 ч с дальнейшим охлаждением вместе с печью. Промежуточная между закалкой и старением операция пластической деформации отсутствовала.

Для получения полуфабрикатов в форме прутков с плотностью, равной теоретической или близкой к ней, наиболее эффективным способом является горячее прессование с большой степенью пластической деформации (экструзия) [1, 2, 6, 7]. В качестве заготовок служили брикеты плотностью 75 %, изготовленные методом холодного прессования механически легированных композиций. Отжиг (спекание) брикетов, оптимальная температура которого находится в интервале  $0,75...0,80 T_{\text{пл. меди}}$ , совмещался с нагревом для экструзии.

#### **Результаты исследования и их обсуждение**

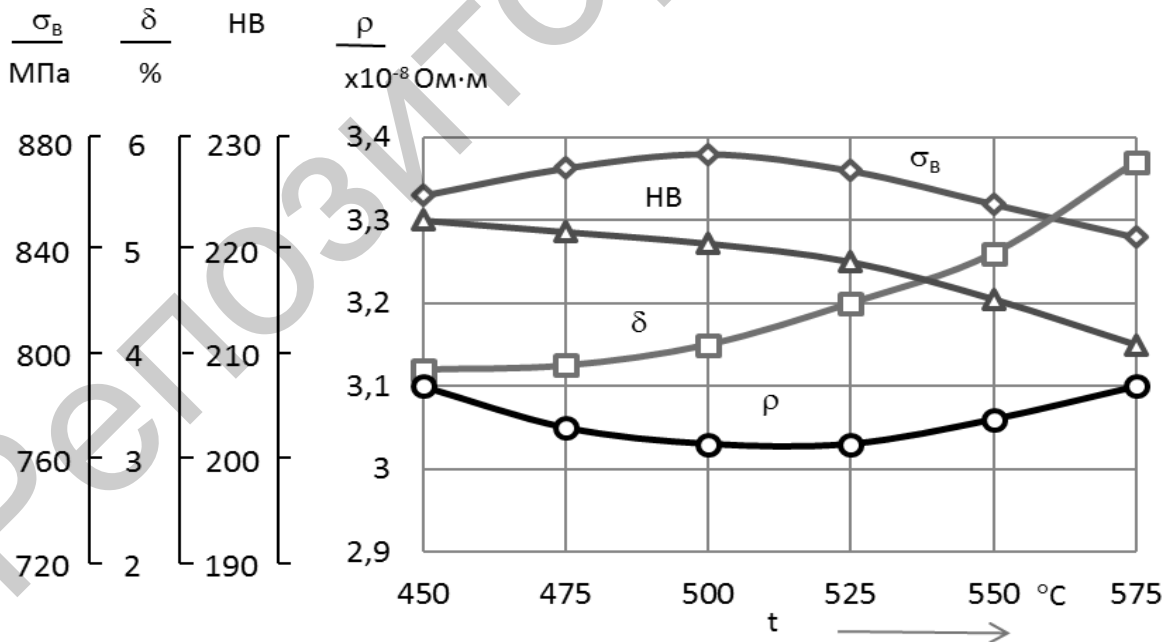
С целью оптимизации процесса экструзии исследовано влияние температуры нагрева заготовки и матрицы, а также коэффициента вытяжки на физико-механические свойства материалов: твердость, предел прочности при растяжении, относительное удлинение, удельное электросопротивление. Основой для установления допустимых интервалов варьирования технологических факторов являлись данные ранее выполненных исследований авторов, приведенные в [1, 2, 6, 7]. Полученные результаты влияния технологических факторов на свойства представлены на рис. 1...3.

Зависимость твердости, прочности и электрического сопротивления от температуры нагрева брикета под экструзию и температуры нагрева матрицы описывается кривыми с экстремумом (см. рис. 1 и 2).



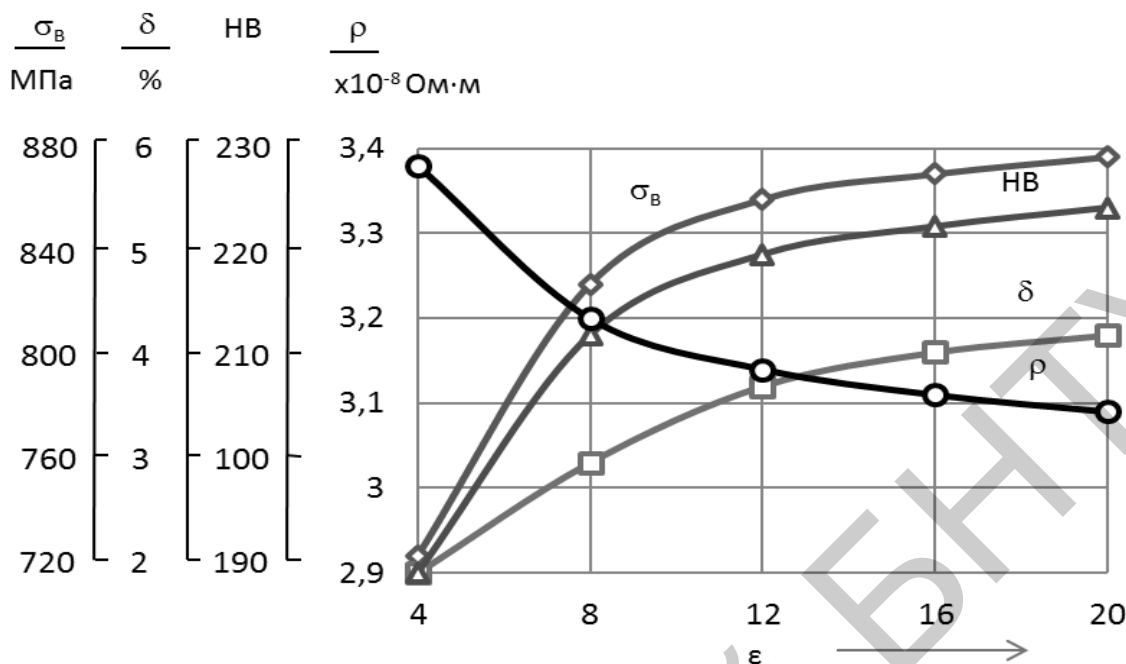
Условия получения материала:  $a_n = 130 \text{ м·с}^{-2}$ ,  $\varepsilon = 75 \%$ ,  $k = 10$ ,  $t = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 8 \text{ ч}$ ,  $t_{\text{отж}} = 700 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{\text{отж}} = 2 \text{ ч}$ ,  $t_{\text{инст}} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\varepsilon_{\text{экт}} = 15$

Рис. 1. Влияние температуры нагрева брикетов для экструзии на физико-механические свойства композиции Cu + 10 % Cr + 1,5 % Zr + 0,1 % Гр



Условия получения материала:  $a_n = 120 \text{ м·с}^{-2}$ ,  $\varepsilon = 70 \%$ ,  $k = 8$ ,  $t = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 6 \text{ ч}$ ,  $t_{\text{отж}} = 700 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{\text{отж}} = 2 \text{ ч}$ ,  $t_{\text{брик}} = 750 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\varepsilon_{\text{экт}} = 15$

Рис. 2. Влияние температуры прессового инструмента на физико-механические свойства композиции Cu + 10 % Cr + 1,5 % Zr + 0,1 % Гр



Условия получения материала:  $a_{ц} = 120 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ ,  $\varepsilon = 70 \%$ ,  $k = 8$ ,  $t = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 6 \text{ ч}$ ,  $t_{отж} = 700 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{отж} = 2 \text{ ч}$ ,  $t_{брик} = 750 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_{инст} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$

Рис. 3. Влияние коэффициента вытяжки при экструзии на физико-механические свойства композиции  $\text{Cu} + 10 \%$   $\text{Cr} + 1,5 \%$   $\text{Zr} + 0,1 \%$   $\text{Gr}$

Анализ полученных результатов показывает, что для достижения максимального упрочнения температура нагрева заготовок под экструзию соответствует оптимальной температуре отжига брикетов и составляет  $0,75 \dots 0,80 T_{пл. \text{ меди}}$ . Для исследованных композиций она равна  $740 \dots 780 \text{ }^\circ\text{C}$ . Уменьшение температуры экструзии ниже установленного предела увеличивает склонность к формированию волокнистой структуры и снижает прочность связи между волокнами. Кроме этого, возрастает удельное давление прессования. При температурах прессования, превышающих верхнее значение установленного предела, резко снижается величина внутренней энергии, накапливаемой материалом при термомеханической обработке, что отрицательно сказывается на прочности связи по границам бывших гранул.

Экструзию следует проводить в матрице, нагретой до  $475 \dots 525 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ниж-

ний уровень нагрева прессового инструмента ограничен предельно допустимым перепадом температур заготовки и матрицы, верхний – температурой начала разупрочнения горячештамповых сталей, что приводит к резкому снижению их срока службы.

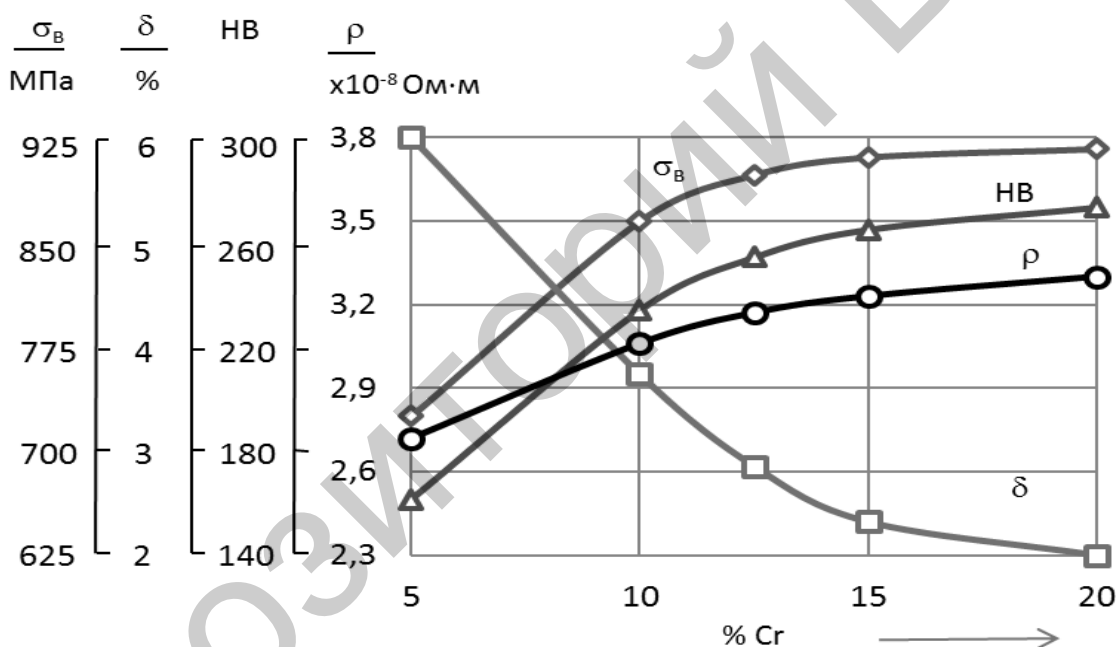
Физико-механические свойства материалов в значительной мере определяются образованием надежного металлического контакта по границам гранул и формированием структуры без пор, что, в свою очередь, зависит от степени деформации при экструзии. Установлено, что скорость истечения металла при экструзии зависит от степени обжатия и изменяется в пределах  $0,12 \dots 0,19 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ . Нижнее значение этого параметра соответствует обработке с коэффициентом вытяжки 5, верхнее – 20. Обработка по приведенному режиму приводит к повышению температуры деформируемого материала на  $90 \dots 160 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Для достижения  $\approx 100\%$  плотности материала коэффициент вытяжки должен находиться выше 5. Увеличение коэффициента вытяжки вызывает увеличение предела прочности, твердости и пластичности и снижение электрического сопротивления (см. рис. 3). Наиболее чувствительными к изменению этого фактора являются первый и последний параметры. Для обеспечения максимальной электропроводности коэффициент вытяжки должен быть более 15. Положительным является то, что условия, при которых достигается наибольшее упрочнение, обеспечивают минимальное электрическое сопротивление

материала.

Таким образом, оптимальным способом получения материалов из механически легированных и термообработанных (отожженных) гранулированных композиций является горячее прессование (экструзия), осуществляемое при следующих параметрах: температура нагрева брикета –  $750\text{ }^\circ\text{C}$ , температура нагрева инструмента –  $500\text{ }^\circ\text{C}$ , коэффициент вытяжки – 15.

Основным легирующим элементом в экспериментальных легатурных сплавах является хром. Его влияние на физико-механические свойства материала приведено на рис. 4.



Условия получения материала:  $a_{II} = 120\text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ ,  $\varepsilon = 70\%$ ,  $k = 8$ ,  $t = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 6\text{ ч}$ ,  $t_{отж} = 700\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{отж} = 2\text{ ч}$ ,  $t_{брик} = 750\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_{инст} = 500\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\varepsilon_{экст} = 15$

Рис. 4. Влияние содержания хрома на физико-механические свойства композиции Cu-Cr – 0,1 % Gr

С повышением содержания хрома характеристики прочности заметно возрастают, особенно при его концентрации в интервале 10...15%. Дальнейшее повышение степени легированности до 20% не приводит к существенному упрочнению сплава, что по данным исследования, результаты которого приведены в [7], является следствием нарушения

протекания процесса механического легирования. Увеличение количества хрома в сплаве снижает его пластичность и электропроводность. Введение в систему «медь–хром» до 1,5% Zr повышает указанные характеристики, что объясняется активацией окислительно-восстановительных превращений, вызывающих рафинирование основы материала в ре-

зультате восстановления оксидов меди этим элементом, обладающим высоким сродством к кислороду.

Компактные материалы, получен-

ные экструзией, характеризуются однородным и дисперсным распределением элементов (рис. 5...10).

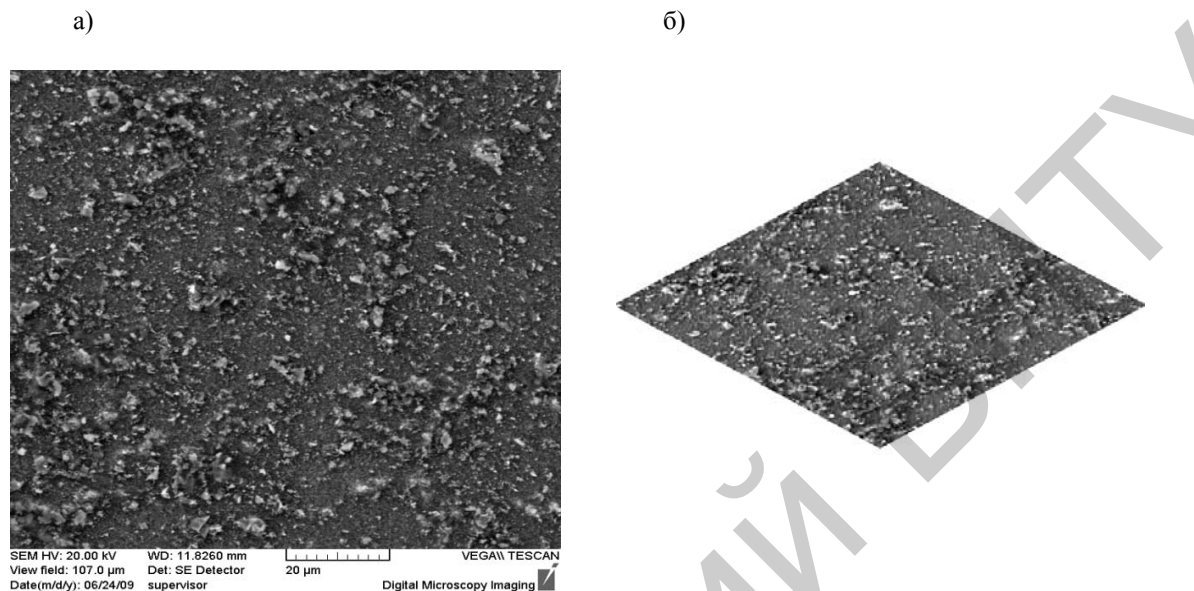


Рис. 5. Микроструктура композиции состава Cu – 10 % Cr: а – двухмерное; б – 3D-изображения

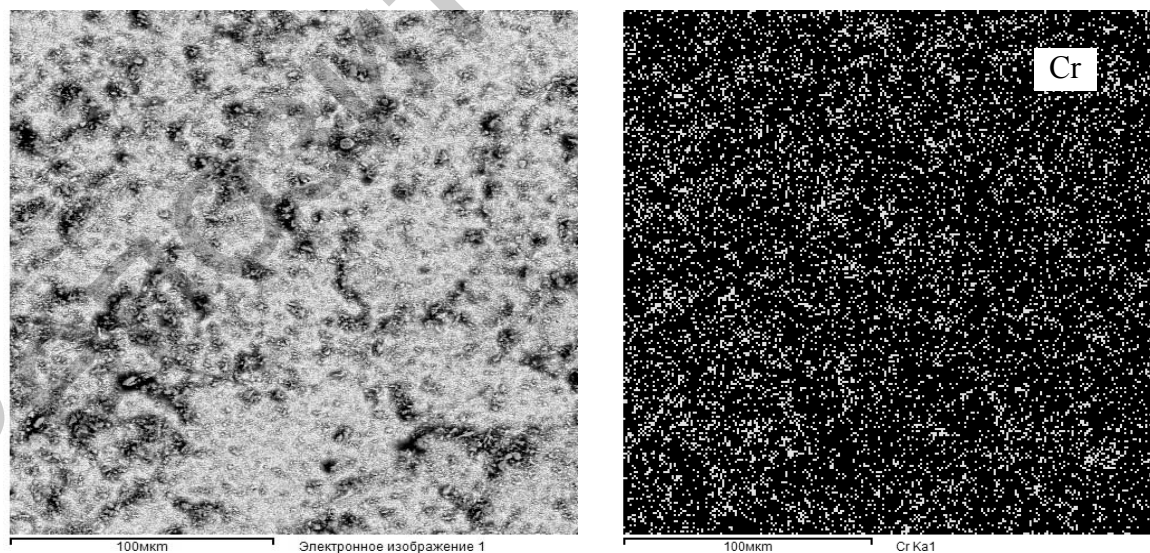


Рис. 6. Распределение хрома в композиции Cu – 10 % Cr

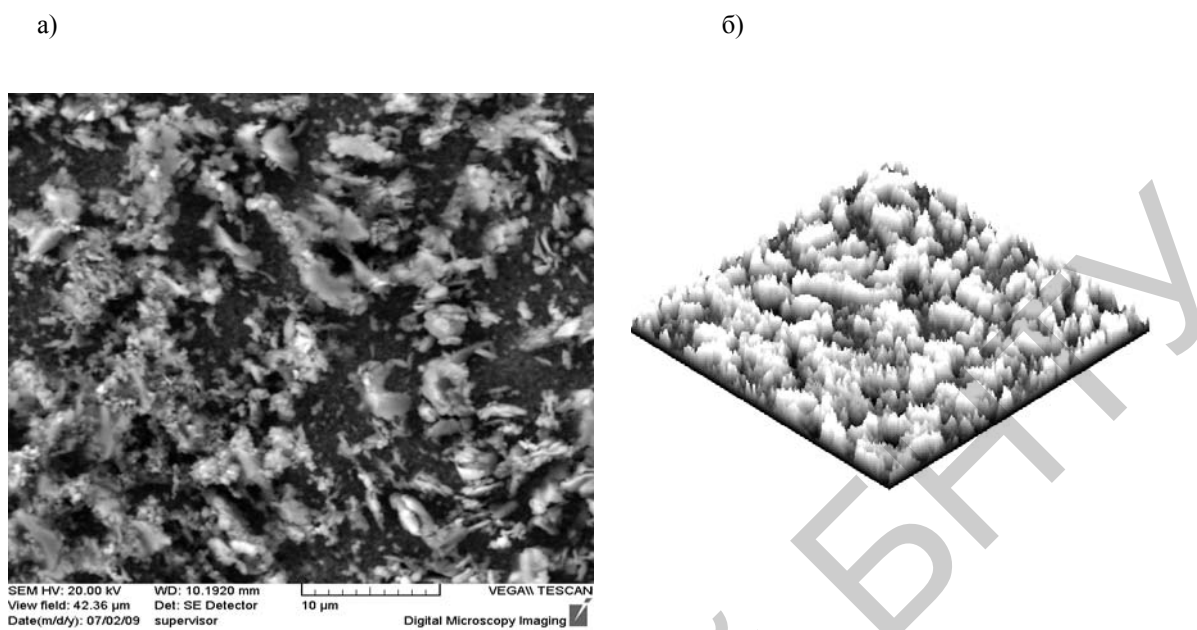


Рис. 7. Микроструктура композиции состава Cu – 15 % Cr: а – двухмерное; б – 3D-изображения

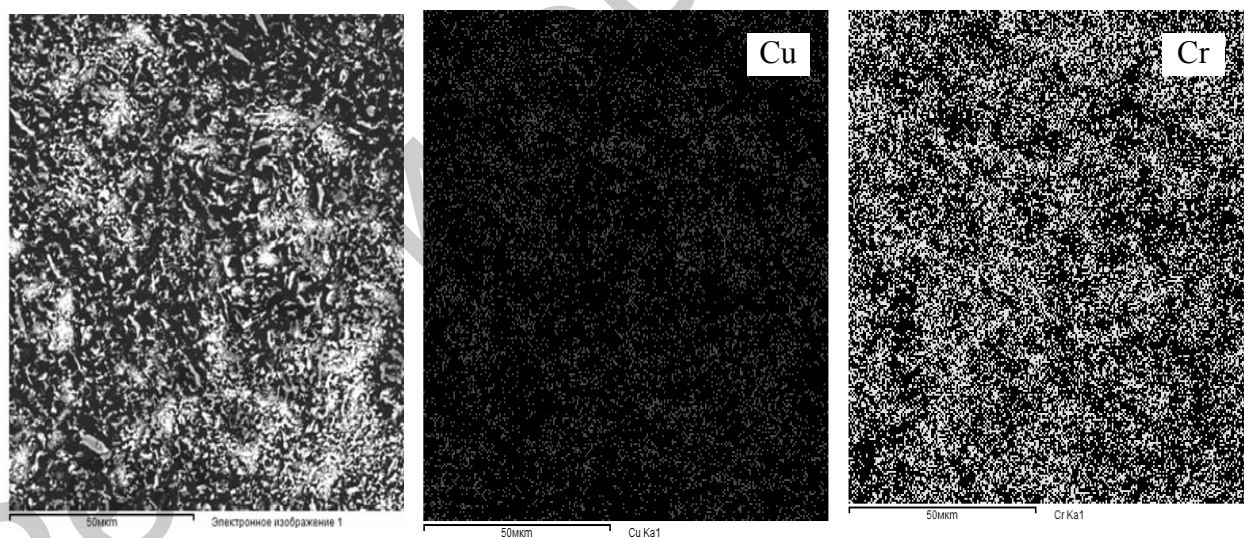


Рис. 8. Распределение элементов в композиции Cu – 15 % Cr



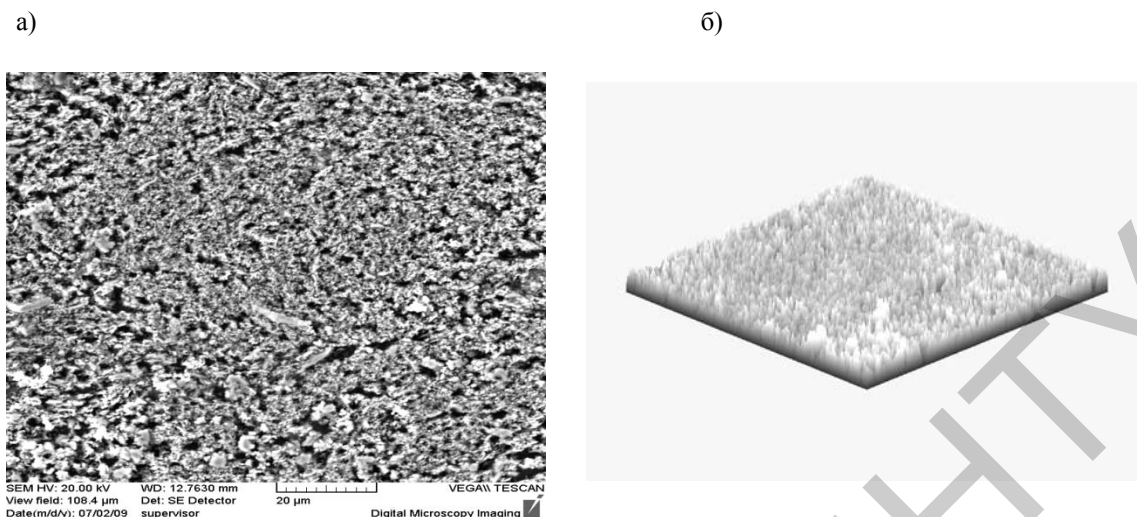


Рис. 9. Микроструктура композиции состава Cu – 20 % Cr: а – двухмерное; б – 3D-изображение

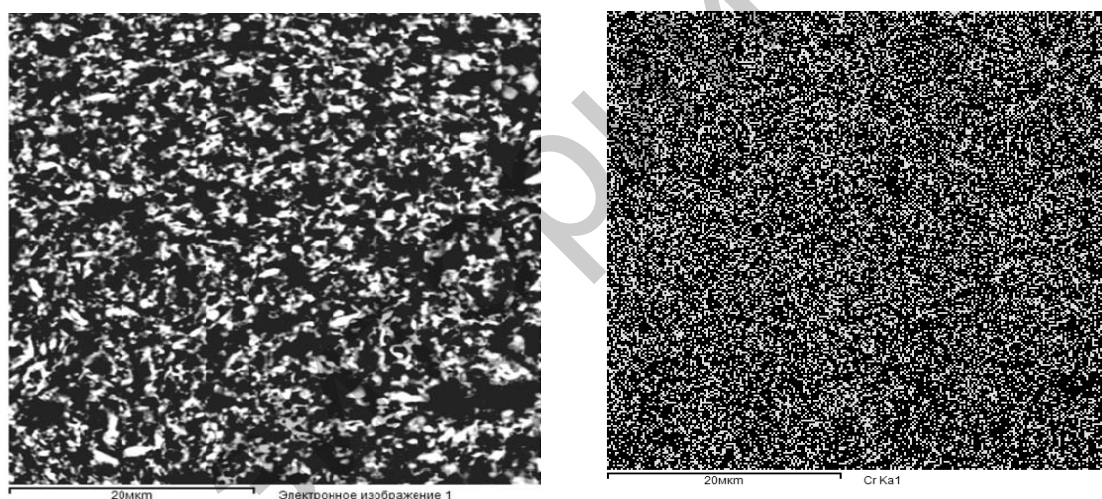


Рис. 10. Распределение элементов в композиции Cu – 20 % Cr

В компактных материалах сохраняется тип структуры гранулированных композиций, который является микрокристаллическим. Размер зерен основы не превышает 1 мкм. Зерна, в свою очередь, разделены на блоки, величина которых составляет десятые доли микрометра. Основное количество хрома находится в виде включений глобулярного типа размером менее 0,5 мкм. Кроме того, в структуре выявляются отдельные пластинчатые включения этого элемента длиной до 5 мкм и толщиной

менее 1 мкм. Термическое воздействие, имеющее место при отжиге и горячей экструзии, приводит к фазовому превращению, направленному на установление термодинамического равновесия. Электронографическим методом наряду с Cu, Cr, Zr, Fe установлено также наличие в материале  $\text{Cu}_3\text{Zr}$ .

Микрокристаллический тип структуры материалов, сохраняющийся после длительного высокотемпературного воздействия, имеющего место при переработке гранулированной композиции в

полуфабрикат (пруток), указывает на жаропрочность механически легированного материала.

Для сравнения были проведены дюраметрические исследования материалов, легированных хромом, нахо-

дившихся в гранулированном и компактном состояниях (табл. 1).

Результаты исследования механических свойств компактных материалов представлены в табл. 2.

Табл. 1. Результаты дюраметрических исследований

Состав, %	Твердость, НВ	
	гранул	компактного материала
Cu + 5 % Cr + 0,15 % Gr	171	122
Cu + 10 % Cr + 0,15 % Gr	266	204
Cu + 15 % Cr + 0,15 % Gr	289	246
Cu + 20 % Cr + 0,15 % Gr	291	269

Табл. 2. Механические свойства компактных материалов

Состав, %	Механические свойства			
	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	твёрдость, НВ	$\rho$ , % от Cu
Cu + 10 % Cr + 0,15 % Gr	679	4	204	54,9
Cu + 15 % Cr + 0,15 % Gr	803	3	246	50,4
Cu + 10 % Cr + 1 % Zr + 0,15 % Gr	907	5	220	62,6
Cu + 15 % Cr + 1 % Zr + 0,15 % Gr	974	3	268	52,7

Анализ данных показывает, что разработанные для использования в качестве лигатуры высоколегированные хромовые (10...15 % Cr) и хромоциркониевые (10...15 % Cr, 1 % Zr) бронзы при низкой пластичности и удовлетворительной электропроводности обладают высокой твердостью и прочностью. Кроме того, они являются жаропрочными. Согласно проведенным исследованиям, температура рекристаллизации их превышает 650 °С. Это позволяет сделать вывод о возможности использования созданных лигатур, в ряде случаев, в качестве заменителей дорогостоящих и дефицитных бериллиевых бронз для изготовления изделий электротехнического назначения типа электродов кон-

тактной сварки, работающих в жестких температурно-силовых условиях.

### Выводы

1. Оптимальным способом получения материалов из механически легированных гранулированных композиций является горячее прессование (экструзия) брикетов, осуществляемое при следующих параметрах: температура нагрева брикета – 750 °С, температура нагрева инструмента – 500 °С, коэффициент вытяжки – 15.

2. Экструзии должен предшествовать отжиг холоднопрессованных брикетов, оптимальными условиями которого являются: температура – 700...750 °С,

продолжительность – 0,5...2,0 ч, атмосфера – защитная; термическую обработку целесообразно совмещать с горячим прессованием.

3. Термическое воздействие, имеющее место при отжиге и горячей экструзии, приводит к фазовым превращениям, направленным на установление термодинамического равновесия; наряду с фазами Cu, Cr, Zr, Fe, присутствует соединение  $Cu_3Zr$ .

4. Горячепрессованный материал сохраняет микрокристаллический тип структуры, характерный для механически легированных композиций.

5. Механически легированные хромовые (10...15 % Cr) и хромоциркониевые (10...15 % Cr, 1 % Zr) сплавы, эффективно выполняющие роль лигатур и модификаторов, являются жаропрочными и при удовлетворительной электропроводности обладают высокой твердостью и прочностью, что позволяет использовать их в качестве заменителей дорогостоящих и дефицитных бериллиевых бронз, применяемых для изготовления электродов контактной сварки, работающих в жестких температурно-силовых условиях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **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.
2. **Ловшенко, Ф. Г.** Литые хромосодержащие бронзы, получаемые с применением механически легируемых лигатур / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, И. А. Лозиков // Литье и металлургия. – 2012. – № 3. – С. 131–135.
3. **Николаев, А. К.** Хромовые бронзы / А. К. Николаев, А. И. Новиков, В. М. Розенберг. – М. : Металлургия, 1983. – 175 с.
4. **Николаев, А. К.** Сплавы для электродов контактной сварки / А. К. Николаев, В. М. Розенберг. – М. : Металлургия, 1978. – 96 с.
5. **Головешка, В. Ф.** Производство меднохромовой лигатуры и влияние некоторых условий плавки и литья на ее качество / В. Ф. Головешка, В. И. Соколов // Плавка и литье цветных металлов и сплавов : науч. тр. Гипроцветметобработка. – М. : Металлургия, 1969. – № 32. – С. 105–112.
6. **Ловшенко, Ф. Г.** Наноструктурные механически легированные материалы на основе металлов : монография / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, Б. Б. Хина ; под ред. Ф. Г. Ловшенко. – Могилев : Белорус.- Рос. ун-т, 2008. – 679 с. : ил.
7. **Ловшенко, Ф. Г.** Получение механически высокопрочных легированных наноструктурных модифицирующих лигатур для производства субмикрокристаллических бронз электротехнического назначения / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, И. А. Лозиков // Литье и металлургия. – 2013. – № 2. – С. 115–126.

*Статья сдана в редакцию 24 марта 2014 года*

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

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

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

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

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

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