

СТРУКТУРА, ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ДИФфуЗИЯ

УДК 669.3'791:539.89

ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ ХРОМОГАФНИЕВОЙ БРОНЗЫ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ КАНАЛЬНО-УГЛОВОМ ПРЕССОВАНИИ И ПОСЛЕДУЮЩЕМ ОТЖИГЕ

© 2024 г. В. В. Попов^{а, *}, Е. Н. Попова^а, Р. М. Фалахутдинов^а, С. А. Судакова^а,
Е. В. Шорохов^б, К. В. Гаан^б, В. В. Атрошкин^б

^аИнститут физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620108 Россия

^бРоссийский федеральный ядерный центр ВНИИ технической физики
им. акад. Забабахина, а/я 245, Снежинск, Челябинская обл., 456770 Россия

*e-mail: vpopov@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 29.05.2024 г.

После доработки 29.05.2024 г.

Принята к публикации 08.07.2024 г.

Изучена эволюция структуры хромогафниевой бронзы при высокоскоростной интенсивной пластической деформации методом динамического канально-углового прессования (ДКУП) и последующем отжиге. Показано, что фрагментация структуры при ДКУП происходит преимущественно по механизму двойникования, особенно при деформации в 2 прохода. При этом происходит существенное упрочнение и микротвердость возрастает до 1750 МПа. При отжиге бронзы наблюдается дополнительное упрочнение за счет выделения частиц Cu_5Hf и Cr . Структура бронзы после ДКУП имеет высокую термическую стабильность, максимум твердости достигается после отжига при 400°C. Упрочнение и термическая стабильность структуры в хромогафниевой бронзе выше, чем в гафниевой.

Ключевые слова: хромогафниева бронза, динамическое канально-угловое прессование, термическая стабильность, электронная микроскопия

DOI: 10.31857/S0015323024100087, **EDN:** JFBCYI

ВВЕДЕНИЕ

В современной электротехнической и атомной промышленности находят широкое применение бронзы, легированные малыми добавками Cr и Zr , поскольку в этих сплавах сочетаются высокая прочность с хорошей электропроводностью [1–3]. Эти бронзы являются дисперсионно-твердеющими сплавами, в которых при старении механические свойства существенно повышаются по сравнению со свойствами нелегированной меди [4, 5]. Особый интерес к этим материалам в настоящее время обусловлен возможностью повышения их эксплуатационных характеристик за счет применения к ним различных способов интенсивной пластической деформации (ИПД) [6, 7]. Прочностные и пластические характеристики и термическую стабильность структуры бронз, легированных Cr и Zr , удается повысить при обработке кручением под высоким давлением (КВД) [8, 9], равноканальным угловым прессованием (РКУП) [10,

11] и динамическим канально-угловым прессованием (ДКУП) [12–14]. В последние годы применяется также легирование хромистой бронзы гафнием [15–18]. Поскольку растворимость Hf в меди при эвтектической температуре выше, чем Zr , можно было ожидать, что и упрочняющий эффект от него после деформации и старения будет выше за счет более высокой объемной доли выделений вторых фаз, что подтверждают имеющиеся литературные данные [16]. В работе [19] нами исследовано поведение гафниевой бронзы при ДКУП в зависимости от исходного состояния (отжиг или закалка), а в [20] проведены подробные исследования эволюции структуры бронзы $\text{Cu}-0.78\text{Hf}$ при нагреве после закалки, после закалки и ДКУП и после закалки и КВД. Показано, что структура во всех случаях характеризуется достаточно высокой термической стабильностью.

Цель настоящей работы — изучить влияние дополнительного легирования гафниевой брон-

Таблица 1. Химический состав исследованной хромогафниевой бронзы (остальное — медь)

Элемент	Hf	Cr	Ni	Zn	Sn
ат. %	0.17	0.48	~0.005	~0.004	~0.002
мас. %	0.54	0.45	~0.005	~0.005	~0.005

зы хромом на ее поведение при динамическом канально-угловом прессовании и последующем отжиге.

при нагрузке 100 г, и рассчитывали по формуле $H=18192 \cdot P/D^2$, МПа, где P — нагрузка в г, D — диагональ отпечатка в мкм.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовали хромогафниевою бронзу, состав которой определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре ICPE-9000. Результаты представлены в табл. 1.

После отливки бронзу подвергали горячей ковке при 600°C, а затем закаливали в воде от температуры 950°C. Для проведения закалки образцы запаивали в кварцевые ампулы, которые откачивали до давления 10^{-4} бар, затем выдерживали при температуре 950°C в течение 1 ч и закаливали в воду. Такой режим обработки был выбран с учетом данных о растворимости хрома и гафния в меди [21].

Цилиндрические образцы закаленной бронзы Cu–0.45Cr–0.54Hf диаметром 10 мм и длиной 50 мм подвергали высокоскоростной интенсивной пластической деформации методом динамического канально-углового прессования. ДКУП проводили на 1 и 2 прохода со скоростью 10^4 – 10^5 с⁻¹, начальная скорость образцов составляла ~ 250 м/с, давление на образец 2 ГПа. Внутренний радиус зоны закругления каналов составлял 1–2 мм. После первого прохода образцы поворачивали на 180°.

Образцы после ДКУП изотермически отжигали в вакуумной печи при давлении 10^{-2} – 10^{-3} Па в температурном интервале 100–600°C, с интервалом 100°C и выдержкой 2 ч.

Структуру изучали в оптическом микроскопе (ОМ) NEOPHOT-21, сканирующем микроскопе (СЭМ) Quanta-200 с приставкой EDAX для локального химического анализа и определения разориентировок при анализе картин дифракции обратнорассеянных электронов (ДОРЭ) и просвечивающих электронных микроскопах (ПЭМ) JEM-200CX и Tescan G-30 Twin с энергодисперсионным спектрометром EDAX для локального химического анализа. Тонкие фольги готовили электрополировкой в ортофосфорной кислоте. Микротвердость измеряли на приставке к оптическому микроскопу Neophot-21,

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После горячейковки в структуре исследуемой бронзы присутствует большое количество частиц, которые были идентифицированы как выделения интерметаллида Cu₅Hf и Cr. На рис. 1а, б представлены растровая электронная микрофотография структуры бронзы после горячейковки и энергодисперсионный спектр отмеченной частицы. Результаты микроанализа дают состав 18.88 ат. % Hf и 79.37 ат. % Cu, что позволяет достаточно уверенно утверждать, что эти выделения представляют собой частицы интерметаллида Cu₅Hf. Кроме того, в структуре присутствуют и выделения хрома.

После закалки в структуре уже не обнаруживаются выделения интерметаллида Cu₅Hf, но сохраняется небольшое количество крупных выделений Cr. На рис. 1в, г видно, что в структуре отсутствуют мелкие выделения, а отмеченная крупная частица идентифицирована как выделения хрома.

Сохранение в структуре закаленного образца не растворившихся частиц хрома обусловлено тем, что согласно диаграмме состояния Cu–Cr [21], при 950°C может раствориться только 0.31 ат. % Cr, а это существенно меньше содержания хрома в исследуемой бронзе (0.48 ат. %).

Внешний вид образцов после ДКУП представлен на рис. 2. Они идентичны образцам гафниевой бронзы, исследованным в [19]. После 1 прохода поверхность образцов достаточно ровная и гладкая, без задиры и трещин. Цилиндры вытягиваются и немного прогибаются, что характерно для этого способа деформации (рис. 2а). После двух проходов цилиндры еще больше вытянуты и изогнуты, и на внутренней поверхности появляются небольшие задиры, но трещин нет (рис. 2б).

Образцы после ДКУП на 1 и 2 прохода исследовали методом СЭМ. В обоих образцах обнаружены, как и в исходном закаленном состоянии, крупные частицы округлой формы, которые, согласно проведенному микроанализу, принадлежат хрому. Частиц интерметаллида Cu₅Hf, доста-

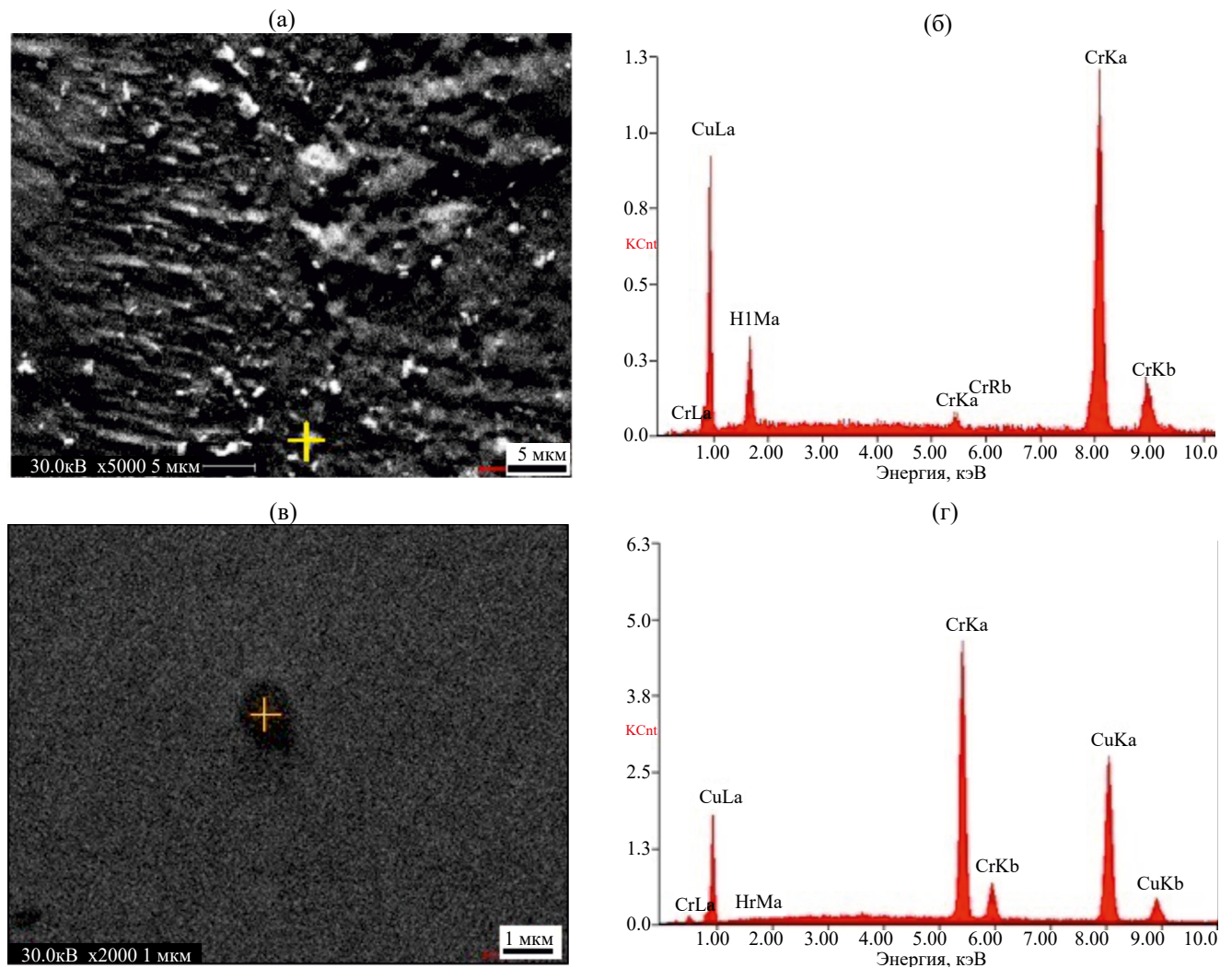


Рис. 1. Растровые электронные микрофотографии (а, в) структуры хромографниевой бронзы после горячейковки (а) и закалки (в) и энергодисперсионные рентгеновские спектры (б, г), снятые с частиц, отмеченных крестиком на микрофотографиях.



Рис. 2. Внешний вид образцов хромографниевой бронзы после 1 (а) и 2 (б) проходов ДКУП.

точно крупных для микроанализа, обнаружено не было.

Информация о механизмах фрагментации в процессе ДКУП, соотношении высоко- и ма-

лоугловых границ и размерах формирующихся фрагментов была получена с помощью анализа картин ДОРЭ. Результаты этого исследования представлены на рис. 3.

После 1 прохода в структуре наблюдаются широкие полосы, плавное изменение контраста внутри которых свидетельствует о наличии малоугловых разориентировок. Внутри полос на некоторых участках наблюдаются мелкие сильно разориентированные кристаллиты (рис. 3а, б). Обработка результатов анализа ДОРЭ показала, что после 1 прохода ДКУП в структуре бронзы преобладают малоугловые границы ($< 15^\circ$), доля которых составляет $\sim 85\%$ (рис. 3д).

Широкие полосы с малыми разориентировками сохраняются и после 2 проходов ДКУП, но границы между ними становятся более четкими (рис. 3в, г). Внутри этих полос наблюдается зна-

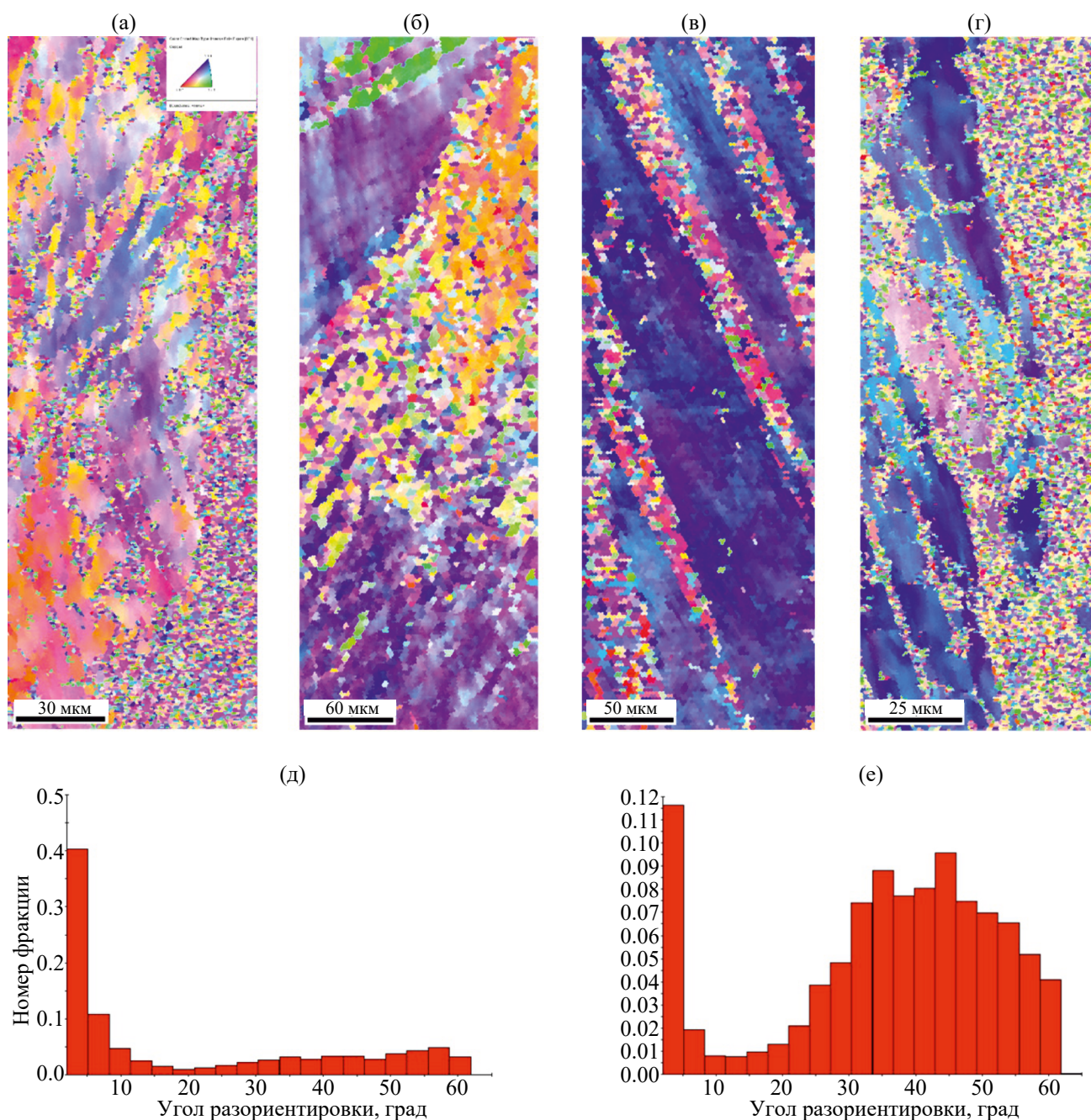


Рис. 3. Ориентационные ДОРЭ-карты хромогафниевой бронзы (а–г) и распределения углов разориентировки кристаллитов (д, е) после 1 (а, б, д) и 2 (в, г, е) проходов ДКУП.

чительное измельчение структуры, сильно разориентированные фрагменты мельче, чем после 1 прохода. При этом доля высокоугловых границ заметно увеличивается (до ~ 40 %) (рис. 3е).

Более детальная информация об эволюции структуры бронзы и механизмах деформации при ДКУП была получена с помощью просвечивающей электронной микроскопии. Структуру бронзы после одного и двух проходов ДКУП исследовали на фольгах, вырезанных в поперечном направлении из средней части образцов.

Структура хромогафниевой бронзы после 1 прохода ДКУП представлена на рис. 4. Можно выделить участки двух типов, которые свидетельствуют о действии двух механизмов деформации: скольжения и двойникования. Участки с ячеистой структурой представлены на рис. 4а, б. Ячейки имеют широкие дислокационные границы, по форме ячейки близки к равноосным или слегка вытянуты. Размеры некоторых ячеек достигают 1 микрона. На других участках ячейки соседствуют с двойниками или преобладают

широкие двойники (рис. 4в, г). Электронограммы в этом образце, в основном, точечные, от одной из плоскостей обратной решетки. Иногда на них наблюдается азимутальное размытие рефлексов или близкорасположенные на кольце рефлексы, что свидетельствует о малоугловой разориентировке ячеек.

После двух проходов ДКУП в структуре преобладают двойники, хотя сохраняется частично и ячеистая структура (рис. 5). В этом образце, как показал микроанализ, присутствуют в небольшом количестве частицы Сг. Они были обнаружены и на фольгах при ПЭМ исследовании (рис. 5в, г). Одна из таких частиц “подсвечивается” в темном поле, снятом в рефлексах (111) двойника и матрицы, потому что Сг имеет близкое межплоскостное расстояние ($d_{111\text{Cu}}=2.08 \text{ \AA}$; $d_{110\text{Cr}}=2.05 \text{ \AA}$).

Как отмечено во введении, применение к хромистым, циркониевым, хромоциркониевым и хромогафниевым бронзам различных способов ИПД открывает перспективы получения более высокого комплекса свойств. Например, согласно [15, 16], КВД приводит к существенному упрочнению бронз благодаря формированию в них ультрамелкозернистой структуры со средними размерами зерен 209, 155 и 108 нм для сплавов Cu–0.7%Cr, Cu–0.9%Hf и Cu–0.7%Cr–0.9%Hf, соответственно, причем самая высокая микротвердость (2400 МПа) получена в тройном сплаве. Частицы Cu_3Hf более эффективно тормозят рост зерен по сравнению с выделениями Cr, что приводит к дополнительному упрочне-

нию при последующем старении. Аналогичное положительное влияние гафния наблюдается и при обработке бронзы методом РКУП, причем гафний повышает термическую стабильность бронзы с 450 до 500°C [18].

В работе [20] нами было исследовано поведение гафниевой бронзы Cu–0.78Hf при нагреве после закалки, ДКУП и КВД. Показано, что структура во всех случаях характеризуется достаточно высокой термической стабильностью.

При отжиге закаленной гафниевой бронзы вплоть до 500°C не наблюдались заметные изменения структуры, а микротвердость увеличивалась, достигая максимума при 500°C. Максимальная микротвердость после старения на 250 МПа выше, чем после закалки. Высокая термическая стабильность и рост микротвердости при отжиге обусловлены выделением дисперсных частиц Cu_3Hf , препятствующих возврату и рекристаллизации и упрочняющих бронзу по механизму дисперсионного твердения. При нагреве до 600°C было обнаружено протекание процессов рекристаллизации и снижение микротвердости, но она остается на 25% выше, чем в исходном закаленном состоянии. При отжиге образцов, подвергнутых ДКУП, отсутствие заметных изменений микроструктуры и рост микротвердости наблюдались до 400°C, и микротвердость превысила значения после ДКУП на 250–350 МПа. После ДКУП термическая стабильность несколько ниже, чем закаленной бронзы: при 500°C наблюдались возврат и снижение микротвердости, а при 600°C – процессы рекристаллизации

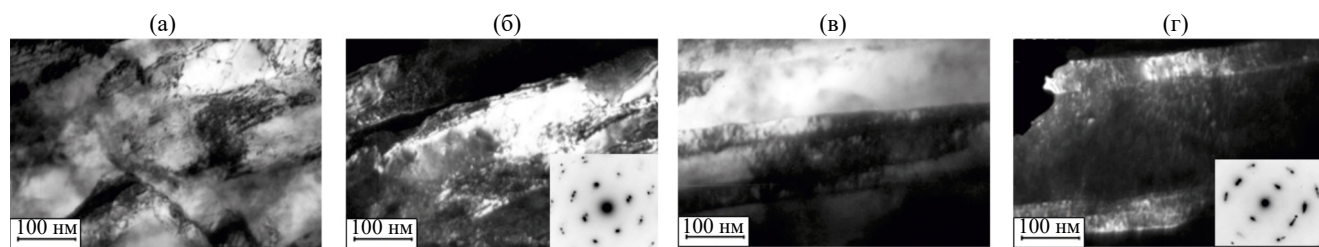


Рис. 4. Структура хромогафниевой бронзы после 1 прохода ДКУП: а, в – светлые поля; б, г – темные поля в рефлексах $(200)_{\text{Cu}}$ и $(220)_{\text{Cu}}$, соответственно, и электронограммы, оси зон $[001]$ и $[112]$.

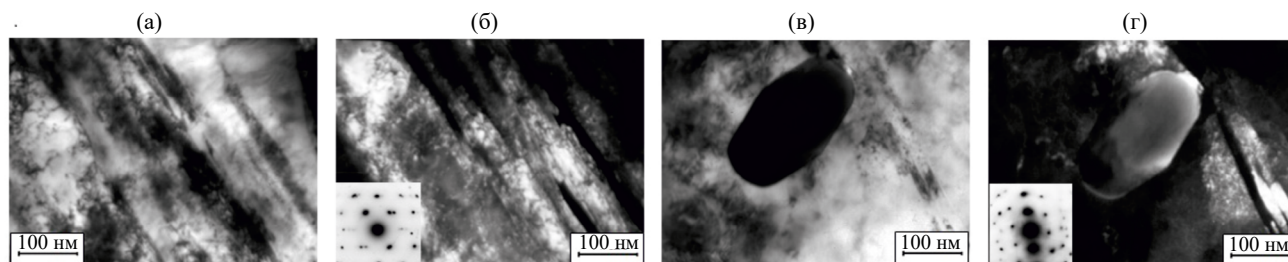


Рис. 5. Структура хромогафниевой бронзы после 2 проходов ДКУП: а, в – светлые поля; б – темное поле в рефлексе $(111)_{\text{Cu}}$ и электронограмма, ось зоны $[110]$; г – темное поле в рефлексах $(1\bar{1}1)_{\text{Cu}}$ и двойника.

и резкое снижение микротвердости. При отжиге образцов, подвергнутых КВД, также не наблюдалось заметных изменений микроструктуры, и микротвердость повышалась вплоть до 400°C. Максимальная микротвердость была достигнута при 300–400°C и составила 2730 МПа, что заметно больше, чем в случае ДКУП. При 500°C имела место частичная рекристаллизация, а при 600°C сформировалась полностью рекристаллизованная структура.

На рис. 6 сравнивается изменение микротвердости при отжиге гафниевой и хромогафниевой бронзы после ДКУП на 1 и 2 прохода. В целом, изменения микротвердости аналогичные, но все же есть отличия в абсолютных значениях. Максимальное значение микротвердости в обеих бронзах достигается при отжиге 400°C, но в бронзе Cu–Hf оно на 15% выше, чем микротвердость сразу после 2-х проходов ДКУП, а в бронзе Cu–Cr–Hf – на 35% выше. В то же время при 600°C у первой падение микротвердости составляет 55% от исходного значения, а у хромогафниевой бронзы – 28%. Таким образом, двойное легирование представляется более перспективным и для упрочнения, и для повышения термической стабильности.

Рассмотрим эволюцию структуры бронзы Cu–0.45Cr–0.54Hf при отжиге после ДКУП на 2 прохода. Как видно из рис. 6б, при низкотемпературных отжигах (100–200°C) микротвердость очень незначительно возрастает. Структура при этом практически не изменяется, в ней сохраняется неоднородность и наблюдаются участки двух типов – с ячеистой структурой и с двойниками. Несколько больший прирост микротвердости зафиксирован после отжига при 300°C. В структуре после такой обработки (ДКУП 2 прохода + отжиг 300°C, 2 ч) также имеются участки двух типов – с ячеистой структурой и с двойни-

ками. Ячейки размерами до 1 мкм имеют равноосную или слегка вытянутую форму, с широкими дислокационными границами. Электронограммы в этом состоянии, в основном, точечные.

В этой бронзе и в исходном закаленном состоянии, и после ДКУП были обнаружены в небольшом количестве частицы Cr округлой формы, размерами приблизительно 0.4 мкм. Такие же частицы были обнаружены и после отжига при 300°C, но, судя по незначительному изменению микротвердости, эти частицы не дают вклад в упрочнение. Мелкодисперсных частиц Cu₅Hf в этом состоянии не обнаружено. Можно полагать, что небольшой прирост микротвердости обусловлен образованием предвыделений.

Максимальная микротвердость в хромогафниевой бронзе, как и в гафниевой, достигнута после отжига при 400°C (рис. 6). Микроанализ, проведенный в просвечивающем электронном микроскопе Technai, показал, что после такой обработки в структуре присутствуют частицы двух фаз – Cr и Cu₅Hf (рис. 7).

Частицы Cr в основном крупные, размерами 200–300 нм (рис. 7а), но встречаются и мелкодисперсные, размерами меньше 100 нм. Первые могли сохраниться из исходного состояния, о них упоминалось выше, а мелкодисперсные частицы выделяются при отжиге и дают дополнительный вклад в упрочнение, за счет чего микротвердость хромогафниевой бронзы после этой обработки выше, чем гафниевой (см. рис. 6). Частицы Cu₅Hf еще более дисперсные, и выявить их при микроанализе достаточно сложно, но, тем не менее, это удалось, как показывает рис. 7б.

Структура бронзы после ДКУП и отжига при 400°C представлена на рис. 8. В основном для этого образца характерны участки со смешанной структурой, где присутствуют и ячейки, и двойники (рис. 8а, б). Ячейки широкие, вытянутые, с

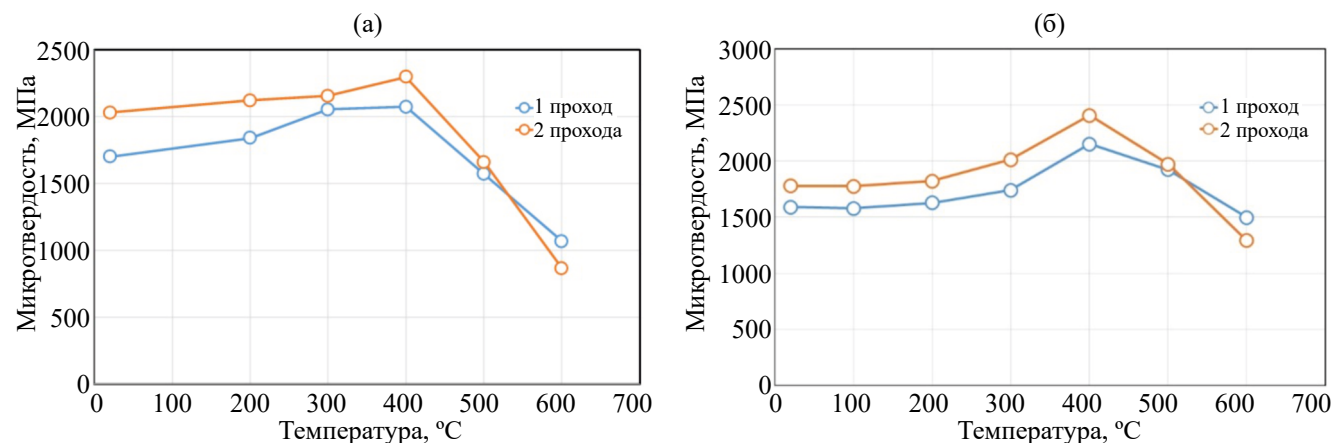


Рис. 6. Влияние температуры отжига на микротвердость гафниевой (а) и хромогафниевой (б) бронзы, подвергнутой ДКУП.

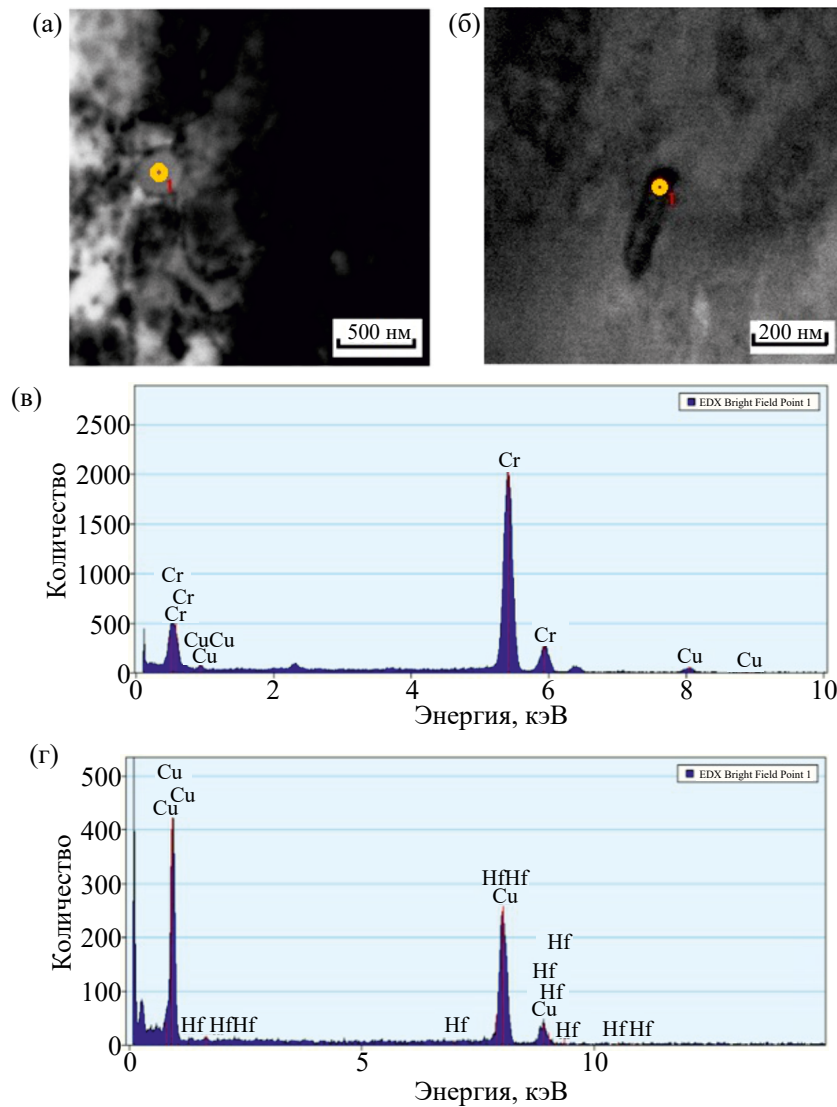


Рис. 7. Микроанализ хромогафниевой бронзы после 2 проходов ДКУП и отжига 400°C , 2 ч: а, в — частицы Cr и спектр в точке, отмеченной кружком; б, г — частицы Cu_5Hf и спектр в точке, обозначенной кружком.

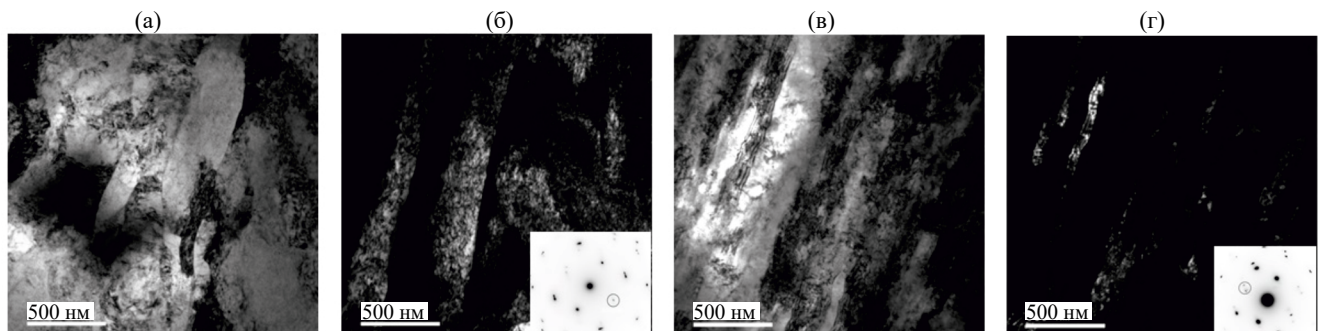


Рис. 8. Структура хромогафниевой бронзы после ДКУП 2 прохода и отжига 400°C , 2 ч: а, в — светлые поля, б — темное поле в рефлексе $(002)_{\text{Cu}}$, ось зоны $[100]$, г — темное поле в рефлексах $(002)_{\text{Cu}}$ и Cu_5Hf , обозначенных кружком на электронограмме.

низкой плотностью дислокаций. Все электронограммы точечные. Есть и участки с преимущественно двойниковой структурой (рис. 8в, г). На некоторых электронограммах удалось выявить

слабые дополнительные рефлексы, соответствующие фазе Cu_5Hf (вставка к рис. 8г). Мелкодисперсные частицы этой фазы видны на темнопольных изображениях (рис. 8г).

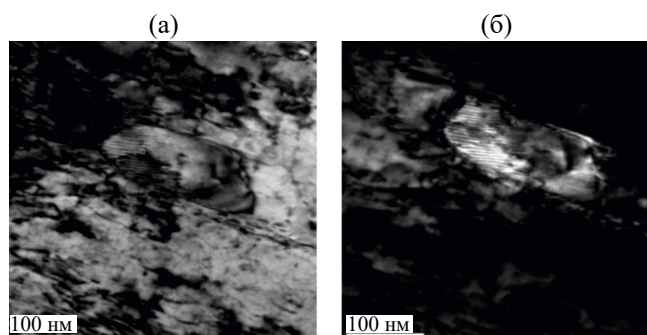


Рис. 9. Структура хромогафниевой бронзы после ДКУП 2 прохода и отжига 400°C, 2 ч: а – светлое поле, б – темное поле в рефлексе (002)_{Cu}.

Можно полагать, что при этой обработке (ДКУП 2 прохода + отжиг 400°C, 2 ч) в сплаве протекают релаксационные процессы, снимаются внутренние упругие напряжения, границы приходят в более равновесное состояние, а упрочнение (повышение микротвердости) происходит за счет дисперсионного твердения с выделением мелкодисперсных частиц Cu_3Hf и Cr .

При съемке с большим увеличением обнаружен тонкий полосчатый контраст на границах зерен, свидетельствующий о релаксации границ (рис. 9).

Рассмотрим структуру хромогафниевой бронзы после ДКУП 2 прохода и отжига при температуре 500°C (рис. 10), при которой начинается понижение микротвердости. Структура в целом достаточно однородная, двойники не столь явно выражены, как в предыдущих состояниях, плотность дислокаций меньше. Основным же отличием является присутствие очень большого количества выделений вторых фаз, значительно больше, чем при более низкой температуре отжига, и более крупных размеров. Эти выделения дают дополнительные рефлексы на электронограммах, соответствующие, в основном, фазе Cu_3Hf . Кроме того, есть и рефлексы от частиц Cr . Большое количество частиц этих фаз наблюдается на всех полученных темнопольных изображениях.

После отжига при 600°C, 2 ч структура бронзы резко изменяется (рис. 11). Это полностью рекристаллизованная структура с крупными равноосными зернами размерами больше 1 мкм, т. е. это уже не субмикроструктурная структура. На некоторых участках видны широкие двойники отжига. Основным отличием этого состояния является огромное количество выделений вторых фаз в виде скоплений из множества мелкодисперсных (размерами 10–20 нм) и

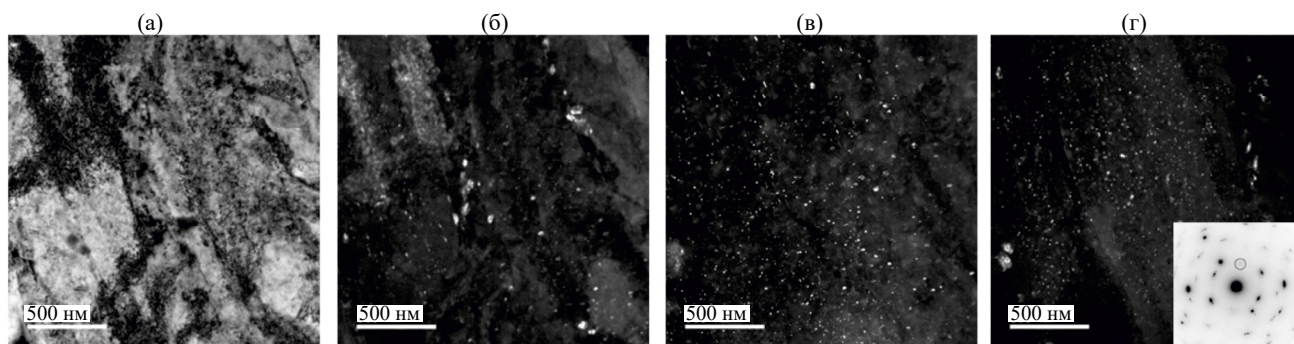


Рис. 10. Структура хромогафниевой бронзы после ДКУП 2 прохода и отжига 500°C, 2 ч: а – светлое поле, б – темное поле в рефлексах (111)_{Cu} и (110)_{Cr}, в, г – темные поля в рефлексе Cu_3Hf , обозначенном кружком на электронограмме.

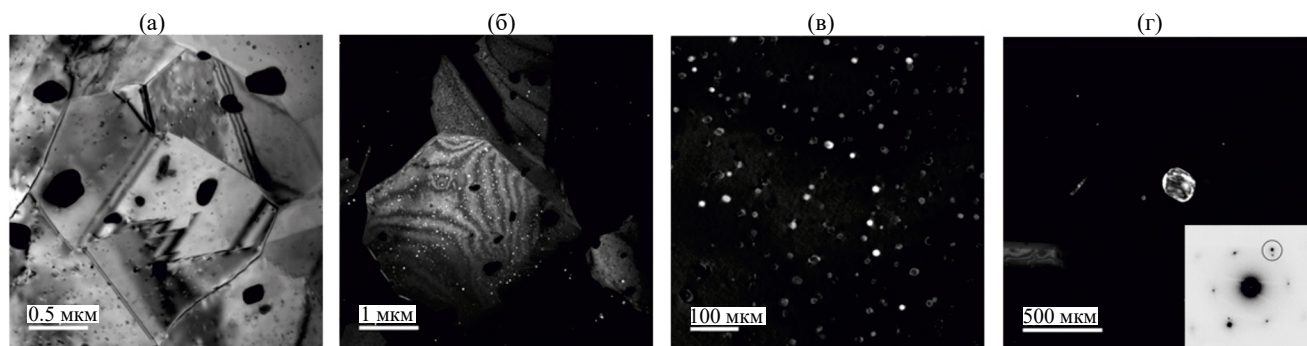


Рис. 11. Структура хромогафниевой бронзы после ДКУП 2 прохода и отжига 600°C, 2 ч: а – светлое поле, б – темное поле в рефлексах (002)_{Cu} и Cu_3Hf , в – темное поле в рефлексах Cu_3Hf , г – темное поле в рефлексах (002)_{Cu} и (110)_{Cr}.

более крупных частиц. Мелкие выделения имеют округлую форму. Более крупные выделения, имеющие овальную, округлую или полиэдрическую форму, могут достигать размера 100 нм. На всех электронограммах есть дополнительные рефлексы, соответствующие фазам Cu_5Hf и Cr . По данным проведенного микроанализа, большинство частиц являются выделениями фазы Cu_5Hf , но есть и частицы Cr .

Поскольку размеры частиц после отжига при 600°C стали значительно больше, чем после отжига при 500°C , то можно полагать, что не все они могут тормозить рост зерен, т. е. наблюдается так называемое перестаривание, что приводит к существенному понижению микротвердости.

Тем не менее она остается на более высоком уровне, чем микротвердость бронзы, легированной только гафнием (см. рис. 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована эволюция структуры хромогафниевой бронзы при ДКУП и последующем отжиге.

Фрагментация структуры при ДКУП происходит преимущественно по механизму двойникования, особенно при деформации в 2 прохода. Микротвердость хромогафниевой бронзы при ДКУП, как и гафниевой бронзы, существенно возрастает (до 1750 МПа).

Полученная при ДКУП структура отличается достаточно высокой термической стабильностью. При отжиге образцов, подвергнутых ДКУП, отсутствие заметных изменений микроструктуры и рост микротвердости наблюдаются вплоть до 400°C . После отжига при 400°C микротвердость на 350 МПа выше, чем после ДКУП. Рост микротвердости обусловлен дисперсионным упрочнением, а именно, выделением мелкодисперсных частиц Cu_5Hf и Cr . При 500°C наблюдается протекание процессов возврата и снижение микротвердости, а при 600°C идут процессы рекристаллизации и микротвердость резко снижается.

В целом, поведение хромогафниевой бронзы при отжиге после ДКУП аналогично поведению гафниевой бронзы, но все же есть отличия. Максимальное значение микротвердости в обеих бронзах достигается при отжиге 400°C , но в бронзе $\text{Cu}-\text{Hf}$ оно на 15% выше, чем микротвердость сразу после 2 проходов ДКУП, а в бронзе $\text{Cu}-\text{Cr}-\text{Hf}$ — на 35% выше. В то же время при 600°C у первой падение микротвердости составляет 55% от исходного значения, а у хромогафниевой бронзы — 28%. Таким образом, двойное легирование представляется более перспектив-

ным и для упрочнения, и для повышения термической стабильности.

Таким образом, сочетание интенсивной пластической деформации с последующим отжигом и применение разных вариантов легирования позволяют целенаправленно влиять на свойства сплавов на основе меди.

Электронно-микроскопическое исследование выполнено на оборудовании центра коллективного пользования в Испытательном центре нанотехнологий и перспективных материалов ИФМ УрО РАН.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБНАУКИ России (тема “Функция”, номер госрегистрации 122021000035-6).

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Осинцев О.Е., Федоров В.Н.* Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки. Справочник. М.: Машиностроение, 2004. 336 с.
2. *Барабаш В.П., Калинин Г.М.* Опыт разработки и практического использования базы данных по свойствам материалов внутри корпусных элементов ИТЭР // *Вопр. атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы.* 2006. Вып. 2(67). С. 450–458.
3. *Беляева А.И., Колонов И.В., Савченко А.А., Галуза А.А., Аксенов Д.А., Рааб Г.И., Фаизова С.Н., Войцень В.С., Коновалов В.Г., Рыжков И.В., Скорик О.А., Солодовченко С.И., Бардаמיד А.Ф.* Влияние размера зерна на стойкость к ионному распылению зеркал из низколегированного медного сплава системы $\text{Cu}-\text{Cr}-\text{Zr}$ // *Вопр. атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез.* 2011. Вып. 4. С. 50–59.
4. *Зельдович В.И., Фролова Н.Ю., Хомская И.В., Хейфец А.Э.* Электронно-микроскопическое исследование старения в сплаве $\text{Cu}-0.06\% \text{Zr}$ // *ФММ.* 2016. Т. 117. № 7. С. 732–741.
5. *Khomskey I.V., Zeldovich V.I., Frolova N.Y., Abdullina D.N., Kheifets A.E.* Investigation of Cu_5Zr particles precipitation in $\text{Cu}-\text{Zr}$ and $\text{Cu}-\text{Cr}-\text{Zr}$ alloys subjected to quenching and high strain rate deformation // *Letters on Materials.* 2019. V. 9. No. 4. P. 400–404.
6. *Бродова И.Г., Зельдович В.И., Хомская И.В.* Фазово-структурные превращения и свойства цветных металлов и сплавов при экстремальных воздействиях // *ФММ.* 2020. Т. 121. № 7. С. 696–730.
7. *Абдуллина Д.Н., Хомская И.В., Разоренов С.В., Шорохов Е.В.* Динамические свойства низколегированных сплавов меди с субмикроструктурной структурой, полученной высокоскоростной деформацией // *ФММ.* 2023. Т. 124. № 12. С. 1279–1287.
8. *Dobatkin S.V., Shangina D.V., Bocharov N.R., Janacek M.* Effect of deformation schedules and initial states on

- structure and properties of Cu-0.18% Zr alloy after high-pressure torsion and heating // *Mater. Sci. Eng. A*. 2014. V. 598. P. 288–292.
9. Purcek G., Yanar H., Shangina D.V., Demirtas M., Bochvar N.R., Dobatkin S.V. Influence of high pressure torsion-induced grain refinement and subsequent aging on tribological properties of Cu–Cr–Zr alloy // *J. Alloys and Compounds*. 2018. V. 742. P. 325–333.
 10. Wongsan-Ngam J., Kawasaki M., Langdon T.G. The development of hardness homogeneity in a Cu–Zr alloy processed by equal-channel angular pressing // *Mater. Sci. Eng. A*. 2012. V. 556. P. 526–532.
 11. Zhilyaev A.P., Morozova A., Cabrera J.M., Kaibyshev R., Langdon T.G. Wear resistance and electroconductivity in a Cu-0.3Cr-0.5Zr alloy processed by ECAP // *J. Mater. Sci.* 2017. V. 52. P. 305–313.
 12. Зельдович В.И., Добаткин С.В., Фролова Н.Ю., Хомская И.В., Хейфец А.Э., Шорохов Е.В., Насонов П.А. Механические свойства и структура хромоциркониевой бронзы после динамического канально-углового прессования и последующего старения // *ФММ*. 2016. Т. 117. № 1. С. 74–82.
 13. Khomskaya I.V., Zel'dovich V.I., Frolova N. Yu., Kheifets A.E., Shorokhov E.V., Abdullina D.N. Effect of high-speed dynamic channel angular pressing and aging on the microstructure and properties of Cu–Cr–Zr alloys // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2018. V. 447. P. 012007 (6 pp.).
 14. Хейфец А.Э., Хомская И.В., Коршунов Л.Г., Зельдович В.И., Фролова Н.Ю. Влияние высокоскоростной деформации и температуры старения на эволюцию структуры, микротвердость и износостойкость низколегированного сплава Cu–Cr–Zr // *ФММ*. 2018. Т. 119. № 4. С. 423–432.
 15. Shangina D.V., Bochvar N.R., Dobatkin S.V. The effect of alloying with hafnium on the thermal stability of chromium bronze after severe plastic deformation // *J. Mater. Sci.* 2012. V. 47. P. 7764–7769.
 16. Shangina D.V., Gubicza J., Dodony E., Bochvar N.R., Straumal P.B., Tabachkova N. Yu., Dobatkin S.V. Improvement of strength and conductivity in Cu-alloys with the application of high pressure torsion and subsequent heat-treatments // *J. Mater. Sci.* 2014. V. 49. P. 6674–6681.
<https://doi.org/10.1007/s10853-014-8339-4>
 17. Dobatkin S.V., Bochvar N.R., Shangina D.V. Ageing processes in ultrafine-grained low-alloyed bronzes subjected to equal channel angular pressing // *Adv. Eng. Mater.* 2015. V. 17. No. 12. P. 1862–1868.
 18. Shangina D., Maksimenkova Yu., Bochvar N., Serebryany V., Raab G., Vinogradov A., Skrotzki W., Dobatkin S. Influence of alloying with hafnium on the microstructure, texture and properties of Cu–Cr alloy after equal channel angular pressing // *J. Mater. Sci.* 2016. V. 51. P. 5493–5501.
 19. Попов В.В., Попова Е.Н., Столбовский А.В., Фалахутдинов Р.М., Мурзинова С.А., Шорохов Е.В., Гаан К.В. Влияние исходной обработки на структуру гафниевой бронзы при высокоскоростном прессовании // *ФММ*. 2020. Т. 121. № 5. С. 501–508.
 20. Фалахутдинов Р.М., Попов В.В., Попова Е.Н., Столбовский А.В., Шорохов Е.В., Гаан К.В. Влияние исходного состояния на эволюцию структуры гафниевой бронзы при старении // *ФММ*. 2022. Т. 123. № 9. С. 962–970.
 21. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3 т.: Т. 2. Под общей ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1996. 1024 с.

EVOLUTION OF THE STRUCTURE OF CuCrHf BRONZE UNDER DYNAMIC CHANNEL-ANGULAR PRESSING AND SUBSEQUENT ANNEALING

V. V. Popov^{1,*}, E. N. Popova¹, R. M. Falahutdinov¹, S. A. Sudakova¹,
E. V. Shorokhov², K. V. Gaan², and V. V. Atroshkin²

¹Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, 620108 Russia

²Federal State Unitary Enterprise “Russian Federal Nuclear Center — Zababakhin All—Russia Research Institute of technical Physics”, Snezhinsk, Chelyabinsk region, 456770 Russia

*e-mail: vpopov@imp.uran.ru

The evolution of the structure of chromium–hafnium bronze under high-speed severe plastic deformation by dynamic channel-angular pressing (DCAP) and subsequent annealing has been studied. It is shown that fragmentation of the structure under DCAP occurs predominantly through the twinning mechanism, especially upon two passes. In this case, significant strengthening occurs and the microhardness increases to 1750 MPa. When bronze is annealed, additional strengthening occurs due to the precipitation of Cu₅Hf and Cr particles. The structure of bronze after DCAP has high thermal stability, and maximum hardness is achieved after annealing at 400°C. The strengthening and thermal stability of the structure in chromium–hafnium bronze is higher than in hafnium bronze.

Keywords: chromium–hafnium bronze, dynamic channel-angular pressing, thermal stability, electron microscopy