

Анизотропия структуры и прочностных свойств жаропрочного композита Cu-Cr-Zr, индуцированная равноканальным угловым прессованием

А.И. Беляева^{1,*}, А.А. Галуза^{1,2}, И.В. Колоенов^{2,3}, С.Н. Фаизова⁴, Г.И. Рааб⁴, И.А. Фаизов⁴

¹ *Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичева, 21, 61002 Харьков, Украина*

² *Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины, ул. Гуданова, 13, 61024 Харьков, Украина*

³ *Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, ул. Проскуры, 12, 61085 Харьков, Украина*

⁴ *Институт физики перспективных материалов при УГАТУ, 450054 Уфа, Россия*

(Получено 12.09.2016; в отредактированной форме – 19.12.2016; опубликовано online 23.12.2016)

Исследовано влияние термической обработки и равноканального углового прессования (РКУП) на свойства композита Cu-Cr-Zr. Показано, что комбинированием этих двух воздействий можно добиться повышения микротвердости сплава при сохранении его высокой электропроводности. Экспериментально доказано, что формирование структуры преципитатов, обогащенных хромом, размер которых порядка структурных составляющих матрицы, не связано с размерами этих составляющих. Обнаружена сильная анизотропия как структуры и характера пространственного расположения волокон, обогащенных хромом, вдоль оси образца и поперек, так и микротвердости композита, вызванная РКУП. Показано, что РКУП приводит к анизотропному упрочнению композита за счет анизотропного распределения преципитатов, обогащенных хромом. При этом проводимость остается достаточно высокой и изотропной, так как определяется свойствами изотропной матрицы.

Ключевые слова: Композит Cu-Cr-Zr, Равноканальное угловое прессование, Ультрамелкое зерно, Анизотропия, Микроструктура, Преципитаты.

DOI: [10.21272/jnep.8\(4\(2\)\).04082](https://doi.org/10.21272/jnep.8(4(2)).04082)

PACS numbers: 81.40.Cd, 62.20.F –

1. ВВЕДЕНИЕ

Класс материалов, к которому принадлежит жаропрочный сплав Cu-Cr-Zr, относится к дисперсионно-упрочненным сплавам. Характер формирования и распределения в матрице частиц вторичных фаз (преципитатов) играет определяющую роль при создании в материале необходимого сочетания функциональных свойств: прочности, термо- и электропроводности [1]. Механические свойства таких сплавов определяются следующими механизмами упрочнения: измельчение зерна (вплоть до нанометров), дисперсионное упрочнение вследствие присутствия частиц вторичной фазы, дислокационное упрочнение. Преципитаты, внедренные в матрицу, взаимодействуют с дислокациями и влияют на их подвижность, что дает возможность управлять механическими свойствами материала. Морфология преципитатов, их ориентация, расстояние между ними вносят вклад в эффективность преципитатов как преград для движения дислокаций. Существенную роль в повышении прочности играют мелкие частицы – порядка 10-30 нм – чем они мельче и плотность их больше, тем выше прочность.

Термическая обработка для получения пересыщенного твердого раствора легирующих элементов в медной матрице состоит в закалке в воду (WQ) после выдержки в течение 1 часа при температуре ~ 1000 °C (SA) и старении. В результате старения образуются мелкие частицы вторичной фазы, которыми и обусловлен эффект упрочнения. После за-

калки сплава низкая проводимость сохраняется из-за рассеяния электронов на большом числе растворенных в медной матрице атомов примеси. В результате старения следует ожидать рост проводимости, так как растворенные атомы удаляются из раствора и формируют преципитаты [2].

Термообработка обеспечивает только дисперсионное упрочнение, которым не исчерпываются все возможные механизмы упрочнения. Механические свойства материала могут быть дополнительно улучшены дальнейшим измельчением зерна и формированием дефектной структуры [1, 3]. Изменение дисперсности структуры может быть достигнуто посредством различных типов пластической деформации (ПД) [4]: равноканального углового прессования (РКУП) и гидроэкструзии [5, 6 и ссылки к ним]. При этом нужно учесть, что результат РКУП может зависеть от вида оснастки и выбранного маршрута, который определяет изменение положения образца перед каждым последующим циклом РКУП по сравнению с предыдущим [7]. В итоге свойства материала могут стать анизотропными.

РКУП – это метод пластической деформации, который успешно используется для улучшения механических свойств материалов путем уменьшения размера зерна и увеличения плотности дефектов [1, 4, 8]. Старение, обеспечивая распад твердого раствора и выделение дисперсионно-упрочняющих фаз, приводит к дополнительному упрочнению [9, 10].

Хром и цирконий образуют эффективный допирующий комплекс для медного сплава, который поз-

* aibelyaeva@mail.ru

воляет получить оптимальное сочетание механической прочности и термической проводимости. При старении Cr выпадает в виде дисперсных упрочняющих частиц (преципитатов). Частицы Zr выделяются, как правило, на границах зерен и фиксируют их (уменьшают их подвижность), являясь, поэтому, стабилизатором структуры. Комбинация Cr и Zr в медной матрице дает стабильную структуру и упрочнение меди преципитатами.

Сплав Cu-Cr-Zr не применяется так широко, как этого можно было бы ожидать, т.к. склонен к появлению анизотропии свойств после РКУП, в отличие от коммерческой меди. В этом плане принципиально понять, возможно ли дальнейшее улучшение прочностных свойств сплава, основанное на анизотропии распределения преципитатов. Как следует из обзора литературы, в настоящее время отсутствуют исследования природы этих процессов.

В нашей предыдущей работе [11] детально изучено влияние структуры и размера зерна на функциональные характеристики медного сплава системы Cu-Cr-Zr. Объектами исследования служили крупнозернистый образец (размер зерна 35-50 мкм) и ультрамелкозернистый (размер зерна 200-300 нм), полученный из крупнозернистого после РКУП и старения. Экспериментально показано, что для крупнозернистого образца включения вторичных фаз распределены преимущественно по границам зерен. В случае ультрамелкозернистого, в котором размер включений вторичных фаз превосходит размер зерна, включения распределены в образце более равномерно. Показано, что в обоих образцах размеры включений одного порядка, а их распределение в ультрамелкозернистом образце не связано с размером зерна матрицы.

Целью данной работы, которая продолжает наши предыдущие исследования [11], было изучение изменения микротвердости и электропроводности ультрамелкозернистого сплава Cu-Cr-Zr. Работа выполнена на ультрамелкозернистом сплаве, который исследовался в работе [11]. Изучено влияние распределения легирующих элементов (Cr и Zr) после РКУП на формирование анизотропии свойств исследуемого сплава. Научная цель исследования состояла в том, чтобы оценить влияние распределения и формы преципитатов на механическую прочность и электропроводность сплава Cu-Cr-Zr и понять механизмы исследованных процессов.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исходный крупнозернистый материал - коммерческий дисперсионно-упрочненный сплав Cu-1Cr-0.7Zr и 0.2 примесей поставлялся в виде прутка ($D = 20$ мм).

Ультрамелкозернистая структура была получена с помощью трехэтапной обработки. На первом этапе (до РКУП) образцы прошли термическую обработку при следующих условиях: $T_{SA} = 950-1000$ °C, $t_{SA} = 1$ ч + закалка в воду. В результате был получен материал с крупным зерном (35-50 мкм) - крупнозернистый (КЗ). Второй этап - РКУП при угле 90° между каналами и скорости продавливания 0.4 мм/сек при ком-

натной температуре. РКУП выполнялось по маршруту Вс, когда после каждого прохода заготовка поворачивалась на 90° по часовой стрелке вокруг своей продольной оси [7]. Эти процедуры приводят к упрочнению исходного материала за счет измельчения зерен. В результате, после 3х проходов РКУП был получен материал с размером фрагментов структуры 200-300 нм – ультрамелкозернистый (УМЗ). На последнем этапе для стабилизации фрагментов структуры и выделения преципитатов материал подвергался старению при температуре 450 °C в течение 1 часа. После старения материал охлаждался на воздухе. Старение после РКУП обеспечивает структуру материала, устойчивую к термическим и механическим воздействиям.

Далее прутки были разрезаны на продольный и поперечный (относительно оси РКУП) образцы размером $1 \times 2.5 \times 16$ мм³. Образец, вырезанный вдоль оси прессования, будем обозначать «Lg» (longitudinal), а вырезанный поперек – «Tr» (transverse). Образцы были подготовлены по стандартной методике: механическая и электрохимическая полировки до зеркальной поверхности. Послойное исследование структуры поверхности образцов обеспечивалось распылением ионами дейтерия [12-14]. Тот факт, что материал матрицы (медь) и преципитатов (Cr и Zr) имеют разные коэффициенты распыления, позволил визуализировать структуру на глубину $h \approx 1$ мкм. В итоге для исследований были получены два образца: №1 - Lg и №2 - Tr.

Микроструктура и рельеф поверхности образцов исследовались с помощью микроинтерферометрического комплекса [15, 16], многофункционального оптического комплекса [17, 18] и сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) JSM-6390LV, оборудованного приставкой для локального химического анализа (EDXS).

Микротвердость измерялась по Виккерсу стандартным микротвердомером МПТ-3М с нагрузкой 1 Н длительностью 15 сек. Электросопротивление измерялась четырехзондовым методом с линейной конфигурацией контактов (точность измерений ~ 0.001 Ом мм²/м).

3. РОЛЬ АНИЗОТРОПИИ ПРЕЦИПИТАТОВ В ФОРМИРОВАНИИ МИКРОТВЕРДОСТИ И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ (ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ)

Значительное внимание было уделено роли преципитатов и их распределению на прочностные свойства и анизотропию, которая является основным предметом работы. Микроструктура обоих образцов после РКУП изучалась с помощью СЭМ и EDXS.

Общий вид структуры преципитатов обоих образцов после РКУП приведен на рис. 1: белые сферические точки на образце Tr (рис. 1а) и эллипсоидальные точки и вытянутые преципитаты (волокна) на образце Lg (рис. 1б).

Топография поверхности образцов разная и отражает распределение преципитатов после РКУП. В одних случаях это отдельные точки, их кластеры или более сложные образования. В других, вторичная фаза выглядит как волокна или их комплексы. Следует

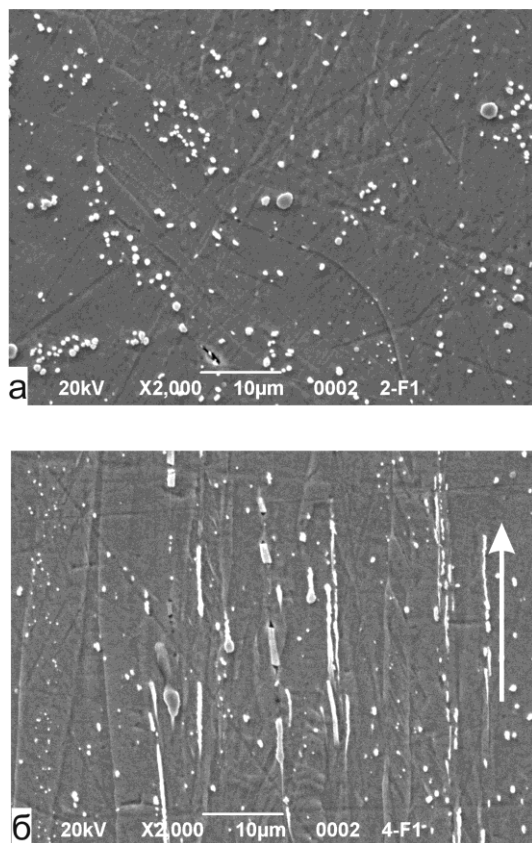


Рис. 1 – СЭМ-фотография микроструктуры precipитатов в сплаве Cu-Cr-Zr после РКУП и старения для образцов: (а) Тг (№ 1); (б) Lg (№ 2), белая стрелка показывает направление РКУП

отметить, что волокна формируются после РКУП только в продольном образце; в поперечном образце присутствуют только точки - поперечное сечение волокон. Таким образом, РКУП приводит не только к существенному уменьшению фрагментов структуры (до ~ 200-300 нм), но и к формированию анизотропной структуры precipитатов с осью вдоль продольного направления образца. Границы структурных составляющих не идентифицируются, т.к. размер precipитатов превосходит их размер. Поэтому такие precipитаты не могут вносить вклад в торможение движения дислокаций. Распределение precipитатов не связано с границами фрагментов структуры, что приводит к гомогенизации их распределения.

Фрагмент поверхности образца Lg в увеличенном масштабе приведен на (рис. 2). Показаны распределение precipитатов и результаты EDXS анализа для пяти областей образца. Видно, что в сплаве имеется три фазы: фаза, обогащенная медью (спектры 1 и 4), хромом (спектр 5) и цирконием (спектры 2 и 3). Хромовые и циркониевые precipитаты распределены в медной матрице неоднородно по поверхности. Основной особенностью микроструктуры сплава Cu-Cr-Zr после РКУП (как показала СЭМ) оказалась относительно высокая плотность precipитатов, обогащенных Cr. Анализ спектров 1 и 4 (рис. 2) показал, что precipитаты, обогащенные Cr и Zr, создают картину сложного легированного композита. Фактически, присутствуют precipитаты трех типов: сферы, эллипсоиды и волокна. Precipитаты всех типов

имеют существенный разброс по размерам. Практически вся богатая хромом фаза распределена в виде крупных precipитатов.

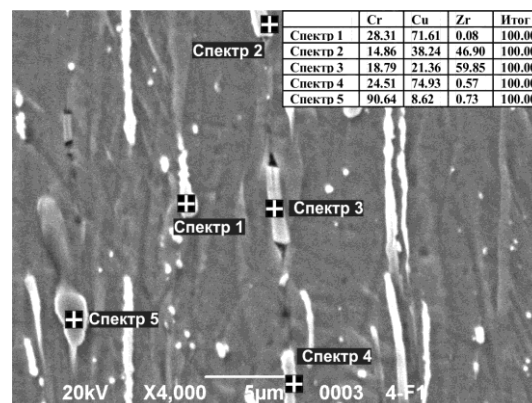


Рис. 2 – СЭМ-фотография в увеличенном масштабе для образца Lg. Вставка: EDXS-анализ вторичной фазы в областях, отмеченных «+» (мас.%)

Следует отметить особенность формирования precipитатов, обогащенных Zr (рис. 2, спектр 3). Их существенно меньше, чем хромовых, и они выглядят как параллелепипед в «трещине» матрицы. Детальное изучение изображения (рис. 2, спектр 3) позволило обнаружить разнообразие контрастов. Видны черные границы трещины сверху и снизу белого параллелепипеда - Zr precipитата. Очевидно, что локализация Zr создает значительные локальные искажения кристаллической решетки в медной матрице. В образце Lg имеются крупные Zr precipитаты, которые выглядят как волокна длиной от 5 до 50 мкм. Конкретные причины формирования трещин, связанных с precipитами, обогащенными Zr, на данный момент нам не известны.

На рис. 3 показаны фрагменты поверхностей, содержащие однородную матрицу и отдельные precipитаты, обогащенные хромом. На обоих образцах видны небольшие precipитаты (размером несколько сотен нанометров), неоднородно распределенные в микроструктуре. Сравнивая образцы, можно заметить разницу в форме precipитатов. Для образца Тг характерны сферические precipитаты, обогащенные хромом (рис. 3а), а для образца Lg (рис. 3б) – эллипсоидальные (рис. 3б). Видны как отдельные включения Cr размером сотни нанометров (отмечены на рис. 3 черными отрезками), так и ямки такого же размера и формы (отмечены на рис. 3 белыми отрезками). Ямки – это области образца, из которых выпали включения Cr. Они одинаково распределены для образцов Тг и Lg. СЭМ исследования выявили достаточно неоднородную структуру. Следует отметить, что средний размер precipитатов d~460 нм существенно превышает размер фрагментов структуры (200-300 нм). Анализ их химического состава показал, что это в основном частицы, обогащенные хромом. Два фрагмента Cr precipитатов (рис. 3) доказывают анизотропию формы precipитатов после РКУП.

Результаты измерений микротвердости и электросопротивления (электропроводности) для обоих образцов приведены в табл. 1. Электропроводность

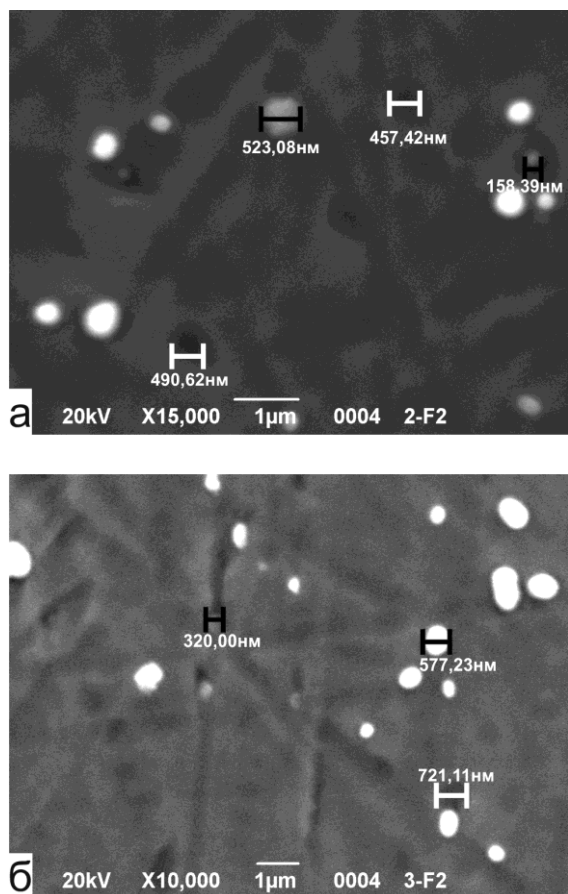


Рис. 3 – Фрагменты поверхностей образцов с преципитатами, обогащенными Cr: образец Tr (а) и образец Lg (б)

приведена в долях Международного стандарта по отожженной меди (% IACS). До РКУП крупнозернистый образец (КЗ) имел изотропную микротвердость 1600 МПа и высокую изотропную электропроводность 87.5 % IACS. Из таблицы видно, что РКУП не привело к заметному изменению микротвердости образца Tr, но вызвало увеличение HV образца Lg. Это значит, что нагрузка слишком мала, чтобы изменить распределение преципитатов в Tr образце. Максимальная микротвердость (1820 МПа) была получена для образца Lg после РКУП, которая существенно выше, чем для образца Tr.

Таблица 1 – Экспериментальные результаты для сплава Cu-Cr-Zr после РКУП и старения. HV – микротвердость по Виккерсу, ρ – удельное электросопротивление, σ – электропроводность в % IACS (International Annealed Copper Standard - 58·106 См/м).

Направление РКУП					
Продольное (Lg)			Поперечное (Tr)		
HV, МПа	ρ, Ом·мм ² /м	σ, %	HV, МПа	ρ, Ом·мм ² /м	σ, %
1820±30	0.025±0.001	69.0	1680±30	0.024±0.001	72.0

Температурная обработка дает наибольшее значение электропроводности (87.5 % IACS), но наименьшую микротвердость. После РКУП для образца Lg было получено наилучшее сочетание микротвердости и электропроводности при наибольшем увеличении микротвердости. Данные таблицы отражают высокую анизотропию микротвердости для

образцов Lg и Tr после РКУП. Приведенные данные являются результатом усреднения по 20 измерениям. Очевидно, что прочностные характеристики композита Cu-Cr-Zr после РКУП весьма анизотропны. Образец Lg имеет более высокое значение HV, чем образец Tr.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ВЫВОДЫ

Представлены результаты экспериментальных исследований слабодопированного тройного жаропрочного сплава Cu-Cr-Zr после термической обработки и РКУП с последующим старением. Показано, что РКУП дает возможность управлять структурой и свойствами этого материала. РКУП вызывает трансформацию дисперсионно-упрочненного композита в композит смешанного типа, а именно, в дисперсионно-волоконный металлический композит. РКУП приводит не только к значительному измельчению фрагментов структуры (до 200-300 нм) [11] и увеличению плотности дефектов (дислокаций) и границ между ними [2], но и к формированию анизотропной структуры с осью вдоль оси деформации. Таким образом, основной результат РКУП состоит в том, что анизотропная структура преципитатов определяет анизотропию упрочнения. Механические свойства должны быть анизотропными, так как определяются структурой и распределением преципитатов. Проводимость же должна остаться изотропной, поскольку определяется свойствами изотропной матрицы. Так как размер преципитатов превосходит размер фрагментов структуры, их распределение не привязано к границам между структурными составляющими и определяет гомогенную структуру.

В работе обсуждаются крупные частицы 500 нм, соизмеримые с размером фрагментов структуры 200-300 нм, которых дислокации «не видят». Все основные свойства – и прочность, и электропроводность изменяются в зависимости от распределения мелких частиц (10-30 нм). Структура матрицы в процессе РКУП формируется таким образом, что в продольном сечении имеется вытянутость фрагментов и размер составляет примерно 200-500 нм, а в поперечном сечении структура выглядит как равноосная со средним размером 200-300 нм. Размер частиц заметно больше фрагментов структуры матрицы. Как правило, большие частицы не оказывают заметного влияния на процессы пластического течения. Однако как показали проведенные исследования характер перераспределения частиц в процессе РКУП на мезоуровне (СЭМ) приводит к формированию ярко выраженной пространственной феноменологии. Такое перераспределение крупных частиц естественно отражает характер перераспределения более мелких частиц (10-20 нм), которые главным образом и определяют все последующие изменения физико-механических свойств. После РКУП и на последнем этапе старения появляются мелкие (4-10 нм) главные частицы, которые и определяют повышение прочности и восстановление электропроводности. Однако, крупные преципитаты отражают процессы, связанные с мелкими, и корректное изучение их перераспределения может быть косвенным фактором, отражающим суть основного процесса.

В рамках данной работы установлен факт разного характера пространственного распределения частиц в продольном и поперечном сечении. В продольном сечении наблюдаются вытянутые и протяженные частицы или их скопления вдоль линий пластического течения, а в поперечном - их сечения округлой или эллипсоидальной формы. В настоящей работе показано, что такое пространственное перераспределение частиц приводит к заметной анизотропии свойств в продольном и поперечном сечениях образцов после РКУП.

Благодаря РКУП ДУ композит на основе медного сплава получается сильно анизотропным: распределение преципитатов различно для поперечного (Tr) и продольного (Lg) образцов, следствием чего является анизотропное упрочнение сплава. Прочность образца Lg увеличилась на 12 %, но не изменилась для образца Tr. В то же время, проводимость образцов не зависит от направления, поскольку определяется свойствами изотропной матрицы. Это важно с практической точки зрения.

Как было сказано во Введении, электропроводность сплавов на основе меди является предметом особого внимания с инженерной точки зрения. Чтобы соответствовать промышленным требованиям, медные сплавы для электромеханических применений должны иметь электропроводность σ на уровне 75-80 %IACS [19]. Как показано в таблице, электропроводность сплава Cu-Cr-Zr после РКУП составляет 69-72 %IACS, что вполне приемлемо с учетом его упрочнения.

Удовлетворительное сочетание высоких механических свойств и хорошей электропроводности можно получить, используя механизмы дисперсионного

упрочнения, которое хотя и приводит к рассеянию электронов и, соответственно, к падению электропроводности по сравнению с чистым металлом, но это падение существенно меньше, чем для твердого раствора. При старении электропроводность увеличивается.

Очевидно, РКУП (или подобные методы, использующие интенсивную пластическую деформацию - ИПД) позволяют получать медные сплавы с широким диапазоном свойств. Варьируя степень деформации и условия старения, можно добиваться соответствия сплава промышленным требованиям. Старение в комбинации с обработкой ИПД позволяет получать материалы с высокими механическими свойствами при достаточно высокой электропроводности, что может быть полезным для многих промышленных приложений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Термомеханическая обработка образцов из хромоникелевой бронзы с использованием метода РКУП выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-01062) в ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет».

А.А. Галуза и И.В. Коленов хотели бы поблагодарить за поддержку Национальную академию наук Украины (грант для молодых ученых №0111U008185). Авторы также признательны П.А. Хаймовичу (Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт») за консультации, связанные с измерением микротвердости.

Anisotropy of Structure and Strength Properties of High-Temperature Cu-Cr-Zr Composite, Induced by Equal-Channel Angular Pressing

A.I. Belyaeva¹, A.A. Galuza^{1,2}, I.V. Kolenov^{2,3}, S.N. Faizova⁴, G.I. Raab⁴, I.A. Faizov⁴

¹ National Technical University «Kharkiv Politechnic Institute», 21, Kyrpychova st., 61002 Kharkiv, Ukraine

² Institute of Electrophysics and Radiation Technologies of NAS of Ukraine, 13, Gudanova st., 61024 Kharkiv, Ukraine

³ O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of NAS of Ukraine, 12, Proscura st., 61085 Kharkiv, Ukraine

⁴ Institute of Physics of Advanced Materials at USATU, 450054 Ufa, Russia

In the paper influence of thermal treatment and equal-channel angular pressing (ECAP) on properties of high-temperature Cu-Cr-Zr composite is studied. It is shown, that proper combination of these two treatments leads to increase of the alloy microhardness while preserving high electroconductivity. It is proved experimentally, that structure formation of Cr-rich precipitates is not connected with the size of the matrix structural elements which is close to the size of the precipitates. High ECAP-induced anisotropy of both structure and spatial arrangement of Cr-rich fibers along and across the sample axis, and of the composite microhardness is revealed. It is shown, that ECAP results in anisotropic strengthening of the composite due to anisotropic distribution of Cr-rich precipitates. Conductivity remains rather high and isotropic since it is determined by the isotropic matrix properties.

Keywords: Cu-Cr-Zr composite, Equal-channel angular pressing, Ultra-fine grain, Anisotropy, Microstructure, Precipitates.

Анізотропія структури та властивостей міцності жароміцного композиту Cu-Cr-Zr, що індуковано рівноканальним кутовим пресуванням

А.И. Беляева¹, А.А. Галуза^{1,2}, І.В. Коленов^{2,3}, С.М. Фаїзова⁴, Г.І. Рааб⁴, І.А. Фаїзов⁴

¹ Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 21, 61002 Харків, Україна

² Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України, вул. Гуданова, 13, 61024 Харків, Україна

³ Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усікова НАН України, вул. Проскури, 12, 61085 Харків, Україна

⁴ Інститут фізики перспективних матеріалів при УГАТУ, 450054 Уфа, Росія

Досліджено вплив термічної обробки та рівноканального кутового пресування (РККП) на властивості композита Cu-Cr-Zr. Показано, що комбінуванням цих двох впливів можна добитись підвищення мікротвердості сплаву при збереженні його високої електропровідності. Експериментально доведено, що формування структури преципітатів, збагачених хромом, розмір яких близький до структурних складових матриці, не пов'язано з розмірами цих складових. Виявлена сильна анізотропія як структури так і характеру просторового розташування волокон, збагачених хромом, уздовж вісі зразка та поперек, так й мікротвердості композиту, що визвано РККП. Показано, що РККП призводить до анізотропного зміцнення композиту за рахунок анізотропного розподілу преципітатів, збагачених хромом. При цьому провідність залишається достатньо високою та ізотропною, оскільки визначається властивостями ізотропною матриці.

Ключові слова: Композит Cu-Cr-Zr, Рівноканальне кутове пресування, Ультрадрібне зерно, Анізотропія, Мікроструктура, Преципітати.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. T.G. Langdon, *Mater. Sci. Eng.: A* **462** No 1, 3 (2007).
2. T. Ellis, S. Kim, J. Verhoeven, *J. Mater. Eng. Perform.* **4** No 5, 581 (1995).
3. I. Shakhova, Z. Yanushkevich, I. Fedorova, A. Belyakov, R. Kaibyshev, *Mater. Sci. Eng.: A* **606**, 380 (2014).
4. R.Z. Valiev, T.G. Langdon, *Prog. Mater. Sci.* **51** No 7, 881 (2006).
5. B. Zysk, M. Kulczyk, M. Lewandowska, K. J. Kurzydowski, *Arch. Metall. Mater.* **55** No 1, 143 (2010).
6. M. Lipińska, P. Bazarnik, M. Lewandowska, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **63** No 1, 012119 (2014).
7. V.M. Segal, *Mater. Sci. Eng. A* **197**, 157 (1995).
8. K.V. León, M. Muñoz-Morris, D. Morris, *Mater. Sci. Eng.: A* **536**, 181 (2012).
9. T. Kvačák, J. Bidulská, *Mater. Sci. Forum.* **783-786**, 842 (2014).
10. P. Jayakumar, K. Balasubramanian, G.R. Tagore, *Mater. Sci. Eng.: A* **538**, 7 (2012).
11. A.I. Belyaeva, A.A. Galuza, I.V. Kolenov, S.N. Faizova, G.N. Raab, D.A. Aksenov, *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **76** No. 7, 764 (2012).
12. A.I. Belyaeva, A.F. Bardamid, J. Davis, A.A. Haasz, V.G. Konovalov, A.D. Kudlenko, M. Poon, K.A. Slatin, V.S. Voitsenya, *J. Nucl. Mater.* **345** No 2-3, 101 (2005).
13. V.S. Voitsenya, M. Balden, A.I. Belyaeva, V.Kh Alimov, B. Tyburska-Püschel, A.A. Galuza, A.A. Kasilov, I.V. Kolenov, V.G. Konovalov, O.O. Skoryka, S.I. Solodovchenko, *J. Nucl. Mater.* **434** No 1-3, 375 (2013).
14. V.S. Voitsenya, A.F. Bardamid, A.I. Belyaeva, V.N. Bondarenko, G. De Temmerman, V.G. Konovalov, M. Lipa, A. Litnovsky, I.V. Ryzhkov, B. Schunke, *Plasma Dev. Oper.* **16** No 1, 1 (2008).
15. O.A. Galuza, A.I. Belyaeva, A.D. Kudlenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* **31** No 6, 791 (2009).
16. A.I. Belyaeva, A.A. Galuza, I.V. Kolenov, A.A. Savchenko, *Probl. At. Sci. Technol.* **90** No 2, 174 (2014).
17. A.I. Belyaeva, A.A. Galuza, V.F. Klepikov V.V. Litvinenko, A.G. Ponomarev, M.A. Sagajdachny, K.A. Slatin, V.V. Uvarov, V.T. Uvarov, *Probl. At. Sci. Technol.* **60** No 2, 191 (2009).
18. A.A. Galuza, A.D. Kudlenko, K.A. Slatin, A.I. Belyaeva, M.M. Smirnov, *Instrum. Exper. Techn.* **46** No 4, 477 (2003).
19. H. Nagasawa, S. Aoki, A. Katayama, *Q. Rep. RTRI.* **39**, No 3, 142 (1998).