

Дарья Николаевна Абдуллина^{1*}, Ирина Вячеславовна Хомская¹, Сергей Владимирович Разоренов², Евгений Вениаминович Шорохов³, Людмила Августовна Елишина⁴

¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

²Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, г.Черноголовка, Россия

³Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, г. Снежинск, Россия

⁴Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

*abdullina@imp.uran.ru,

СТРУКТУРА И ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СПЛАВОВ И КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ МЕДИ

Исследовано влияние дисперсности и дефектности кристаллической структуры на сопротивление высокоскоростному деформированию и разрушению сплавов и композита на основе меди, легированных микродобавками (0.02-0.1) мас.% хрома, циркония и графена. Субмикрокристаллическую структуру получали методом динамического канально-углового прессования. Механические свойства сплавов изучали в условиях ударного сжатия с давлением 4.7-7.3 ГПа и скоростью деформации $(0.9-2.0) \times 10^5$ с⁻¹.

Ключевые слова: сплавы и композиты на основе меди, субмикрокристаллическая структура, высокоскоростная деформация, динамический предел упругости, откольная прочность.

Darya N. Abdullina, Irina V. Khomskaya, Sergey V. Razorenov, Evgeny V. Shorokhov, Ludmila A. Elshina

STRUCTURE AND DYNAMIC PROPERTIES OF ELECTRICAL ALLOYS AND COMPOSITES BASED ON COPPER

The effect of the dispersion and defectiveness of the crystalline structure on the resistance to high strain rate deformation and fracture of copper-based alloys and composites alloyed with microadditives (0.02-0.1) wt % chromium, zirconium and graphene. The submicrocrystalline structure was obtained by the method of dynamic channel angular pressing. The mechanical properties of the alloys were studied under conditions of shock compression with a pressure of 4.7–7.3 GPa and a deformation rate of $(0.9-2.0) \times 10^5$ s⁻¹.

Keywords: copper-based alloys and composites, submicrocrystalline structure, high strain rate deformation, dynamic elastic limit, spall strength.

В качестве объектов исследования были выбраны бинарные дисперсионно-твердеющие сплавы (мас.%) Cu-0.03 %Zr и Cu-0.1 %Cr и медь-графеновый композит Cu-0.023%Gp. Для получения субмикро-

кристаллической (СМК) структуры образцы были подвергнуты динамическому канально-угловому прессованию (ДКУП) в один и три прохода (n). Уникальность метода ДКУП определяется высокой скоростью деформации – 10^5 с^{-1} и сложным напряженным состоянием материала в результате комплексного воздействия высокоскоростной деформации простого сдвига и ударно-волновой деформации сжатия [1]. Формирование при ДКУП неравновесной СМК структуры в сплавах меди происходит в результате процессов фрагментации и частичного деформационного старения с выделением наночастиц вторых фаз [2]. В исходном крупнокристаллическом (КК) состоянии структура сплавов состоит из зерен 200-400 мкм. При ДКУП, $n=1$ формируется структура, состоящая из вытянутых зерен, с поперечными размерами 3-15 мкм, доля малоугловых границ (МУГ) составляет $\sim 70\%$. Увеличение степени деформации при увеличении числа проходов ДКУП до $n=3$ приводит к дальнейшему диспергированию структуры. На рис. 1 представлены результаты EBSD анализа образцов после ДКУП, $n=3$. В сплаве Cu-0.03%Zr формируются равноосные зерна со средним размером 0.5-0.7 мкм, доля БУГ составляет $\sim 60\%$ (рис.1 а). В сплаве Cu-0.10%Cr образуется структура со средним размером зерна 1.0-2.0 мкм, доля БУГ составляет $\sim 50\%$ (рис.1 б). Отжиг при 400-450°C не приводит к росту зерна в сплаве Cu-0.03%Zr, подвергнутом ДКУП, $n=3$, но увеличивает долю БУГ до 85-90%. В сплаве Cu-0.10%Cr отжиг при 400°C вызывает существенный рост зерна до 10 мкм и увеличивает долю БУГ до 90%.

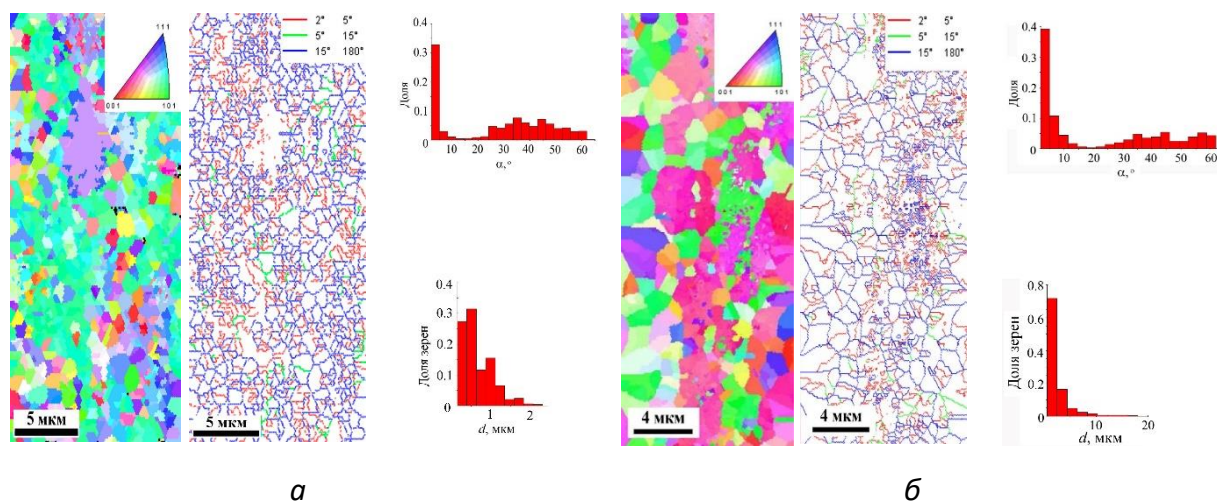


Рис. 1. EBSD-карты и гистограммы распределения границ по углам разориентировки и размерам зерен в сплаве Cu-0.03%Zr (а) и Cu-0.10%Cr (б), подвергнутых ДКУП, $n=3$

Ударно-волновые эксперименты проводили в специальной взрывной камере [3], при этом давление составляло 4.7-7.3 ГПа, скорость деформации в разгрузочной части волны сжатия перед откольным разрушением $\sim 10^5 \text{ с}^{-1}$. В процессе нагружения осуществляли непрерывную регистрацию профилей скорости свободной поверхности при помощи лазерного Доплеровского измерителя скорости VISAR, имеющего временное разрешение $\sim 1 \text{ нс}$ [3]. На основании анализа полученных волновых профилей в исходном КК

состоянии, после ДКУП и ДКУП и отжига при 450°C были определены параметры ударно-волнового нагружения и рассчитаны [4], динамические свойства образцов: динамический предел упругости (σ_{HEL}), динамический предел текучести (Y) и откольная прочность (σ_{sp}) сплавов после различных обработок (таблица 1). Из анализа приведенных данных видно, что измельчение исходной КК (200-400 мкм) структуры сплавов до МК (3-5 мкм) и СМК (0.2-1.0 мкм) состояния приводит к существенному изменению свойств.

Измельчение зерна до СМК состояния увеличивает σ_{HEL} и Y сплава Cu-0.03%Zr в 1.9 и 1.8 раза, но уменьшает его σ_{sp} в 1.4 раза. Последующие отжики при 400 и 450°C, сопровождающиеся распадом пересыщенного твердого раствора с выделением наноразмерных частиц Cu₅Zr, увеличивают характеристики упруго-пластического перехода в 3.0 и 3.7 раза и σ_{sp} практически до уровня КК аналога. Диспергирование структуры в сплаве Cu-0.10%Cr до СМК состояния значительно увеличивает не только σ_{HEL} и Y в 3.7 и 2.6 раза, но и приводит к увеличению σ_{sp} в 1.5 раза, по сравнению с КК аналогом. Это связано с формированием при ДКУП структуры, состоящей из сильно разориентированных дисперсных зерен с преимущественно неравновесными большеугловыми границами, что способствует затруднению роста микротрещин и замедлению процесса откольного разрушения, по сравнению с КК состоянием [5].

Таблица 1

Характеристики динамической прочности сплавов

Сплав	Режимы обработки и структура образцов	Hv , МПа	σ_{HEL} , ГПа	Y , ГПа	σ_{sp} , ГПа
Cu-0.03%Zr	Закалка 1000 °С, КК структура	630	0.22	0.11	3.22
	ДКУП, n=1, МК	1240	0.41	0.18	2.90
	ДКУП, n=1 + отжиг 450 °С, 1 ч	1330	0.46	0.20	3.31
	ДКУП, n=3, СМК	1380	0.42	0.20	2.31
	ДКУП, n=3 + отжиг 400 °С, 1 ч	1390	0.67	0.32	3.16
Cu-0.10%Cr	Закалка 1000 °С, КК структура	680	0.19	0.12	1.90
	ДКУП, n=1, МК	1400	0.54	0.21	2.40
	ДКУП, n=3, СМК	1670	0.70	0.31	2.76
	ДКУП, n=3 + отжиг 400 °С, 1 ч	1410	0.10	0.04	2.57

Методом ДКУП получены МК структура в литом КК медном композите с микродобавкой графена 0.023%Gn, синтезированного в расплаве меди под слоем солевого расплава, и изучены его динамические свойства. В исходном состоянии средний размер зерен-субзерен меди чистотой 99.99% составлял 300-600 мкм. После ДКУП, n=1 в меди формируется зеренно-субзеренная структура со средним размером 15 мкм, доля МУГ составляет 60% (рис.2 а). В композите Cu-0.023%Gn в исходном КК литом состоянии средний размер зерен составлял 300-600 мкм. ДКУП, n=1 приводит к формированию полосовой структуры, средний размер зерен-субзерен ~ 9 мкм, доля МУГ -

65 % (рис.2 б). Микродобавка графена повышает микротвердость Cu-матрицы с 630 до 700 МПа (таблица 2). После ДКУП микротвердость композита Cu-0.023%Gn увеличивается до 1400 МПа, т.е. становится в 2 раза выше КК литой структуры. В неармированной графеном меди данный показатель составляет 1.7 раза. Установлено, что преобразование исходного литого КК состояния Cu-0.023%Gn композита в СМК при ДКУП, $n=1$, вызывает существенное повышение динамических свойств. В частности, Y медь-графенового композита с СМК структурой возрастает в 4.0-4.2 раза, по сравнению с исходным КК состоянием. Откольная прочность σ_{sp} композита превышает σ_{sp} меди в 2 раза.

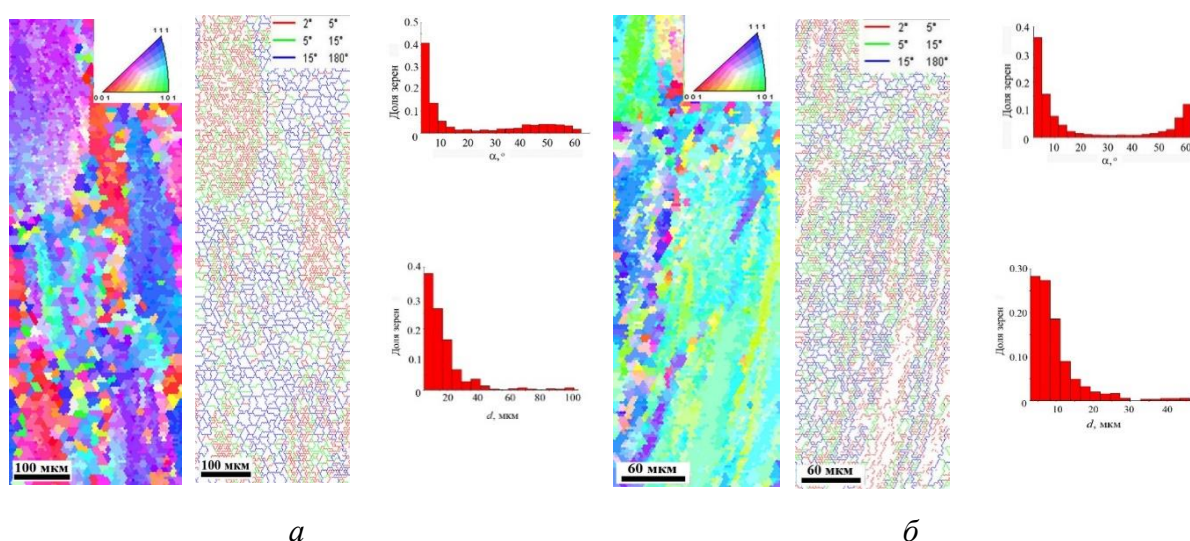


Рис 2. EBSD-карты и гистограммы распределения границ по углам разориентировки и размерам зерен в меди чистотой 99.99% (а) и Cu-0.023%Gn (б) после ДКУП, $n=1$

Таблица 2

Характеристики динамической прочности меди и медного композита с Gn

Режим обработки	Hv , МПа	σ_{HEL} , ГПа	Y , ГПа	σ_{sp} , ГПа
99.99%Cu	630	0.06	0.03	1.39
99.99%Cu ДКУП, $n=1$	1100	0.33	0.17	1.13
Cu-0.023%Gn	700	0.10	0.05	1.47
Cu-0.023%Gn ДКУП, $n=1$	1400	0.40	0.21	2.26

Полученные экспериментальные данные о характере откольного разрушения сплавов меди, легированных микродобавками Zr, Cr и Gn, с СМК структурой, сформированной при ДКУП, и оценка влияния дисперсности и дефектности структуры на сопротивление деформированию при субмикросекундных длительностях нагрузки позволят прогнозировать поведение СМК материалов в экстремальных условиях эксплуатации.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России по теме «Структура» №122021000033-2.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Способ динамической обработки материалов: пат. 2283717 Рос. Федерация: МПК51 В 21 J 5/04, В 21 С 23/18, С 21 D 7/02 /Шорохов Е.В., Жгилев И.Н., Валиев Р.З.; опубл. 27.04.2006, Бюл. № 26. 64 с.
2. Бродова И. Г. Фазово-структурные превращения и свойства цветных сплавов при экстремальных воздействиях / И.Г. Бродова, В.И. Зельдович, И.В. Хомская // ФММ. 2020. Т. 121. № 7. С. 696–730. <https://doi.org/10.1134/S0031918X20070029>.
3. Разоренов С. В. Упрочнение металлов и сплавов при ударном сжатии / С.В. Разоренов, Г.Н. Гаркушин // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 7. С. 77–82. <https://doi.org/10.1134/S106378421507021X>.
4. Хомская И. В. Динамическая прочность субмикроструктурной и нанокристаллической меди, полученной высокоскоростной деформацией / И.В. Хомская [и др.] // ФММ. 2020. Т. 121. № 4. С. 435–442. <https://doi.org/10.31857/S0015323020040063>.
5. Абдуллина Д. Н. Динамические свойства низколегированных сплавов меди с субмикроструктурной структурой, полученной высокоскоростной деформацией / Д. Н. Абдуллина [и др.] // ФММ. 2023. Т. 124. С. 1279-1287. <https://doi.org/10.31857/S0015323022601969>.

REFERENCES

1. Method for dynamic processing of materials: patent 2283717 RF: / Shorokhov E.V., Zhgilev I.N., Valiev R.Z. //Byull. Izobret. 2006. № 26. P. 64.
2. Brodova I. G. Dynamic properties of submicrocrystalline aluminum alloys / I.G. Brodova, A.N. Petrova //Phys. Met. Metallogr. 2018. № 13. V.119. P.1342–1345. <https://doi.org/10.1134/s0031918x18130033>.
3. Razorenov S.V. Hardening of metals and alloys during shock compression / S.V. Razorenov, G.V. Garkushin //Tech. Phys. 2015. V.60, P.1021–1026. <https://doi.org/10.1134/S106378421507021X>.
4. Khomskaya I.V. Dynamic strength of submicrocrystalline and nanocrystalline copper obtained by high-strain-rate deformation I.V. Khomskaya [et al.] // Phys. Met. Metallogr. 2020 V.121. № 4. P. 391–397. <https://doi.org/10.1134/s0031918x20040067>.
5. Abdullina D. N. Dynamic Properties of Low-Alloyed Copper Alloys with Submicrocrystalline Structure Obtained by High Strain Rate Deformation / D. N. Abdullina [et al.] // Phys. Met. Metallogr. 2023. V. 124. P. 1308-1316. <https://doi.org/10.1134/S0031918X23602081>.