

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ И КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ МЕДИ

И. В. Хомская¹, Д. Н. Абдуллина¹, С. В. Разоренов², Е. В. Шорохов³, К. В. Гаан³

¹ФГБУН Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

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

³ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

Изучено влияние дисперсности и дефектности кристаллической структуры меди, легированной микродобавками хрома, циркония, графена и углеродными нанотрубками на сопротивление высокоскоростному деформированию и разрушению. Субмикроструктурная (СМК) структура (0,5–1,0 мкм) в материалах была получена методом динамического канально-углового прессования (ДКУП). Метод ДКУП представляет собой высокоскоростной (10^4 – 10^5 с⁻¹) вариант известного квазистатического метода РКУП. Деформация простого сдвига, которая формирует структуру при РКУП, в случае ДКУП является высокоскоростной, кроме того, на образец действует ударно-волновая деформация сжатия, что создает дополнительный источник деформационного наклепа [1]. Механические свойства материалов исследованы в условиях ударного сжатия интенсивностью 4,7–7,3 ГПа и скоростью деформации $(0,9$ – $3,2) \times 10^5$ с⁻¹. Регистрацию волновых процессов в образцах осуществляли с помощью лазерного доплеровского интерферометрического измерителя скорости VIZAR имеющим временное разрешение ~1 нс и пространственное разрешение ~0,1 мм [2]. Из анализа полученных волновых профилей были рассчитаны: динамического предел упругости Гюгонио (σ_{HEL}), динамический предел текучести (Y) и откольная прочность (σ_{sp}) материалов до и после ДКУП по различным режимам [3].

Определено, что исследованные медь и дисперсионно-стареющие сплавы Cu-0,1%Cr и Cu-0,03%Zr с СМК структурой (0,5–1,0 мкм), полученной методом ДКУП, в условиях ударного сжатия демонстрируют увеличение σ_{HEL} и Y в 1,8–2,8 и 1,8–3,7 раза, соответственно, по сравнению с исходным крупнокристаллическим (КК) состоянием. Это связано с образованием при ДКУП специфической неравновесной и дефектной СМК структуры в результате высокоскоростных процессов фрагментации. Таким образом, упрочняющий эффект ДКУП сохраняется в экстремальных условиях ударно-волнового нагружения при субмикросекундных длительностях нагрузки [3, 4].

Показано, что измельчение зерна от КК (200–400 мкм) до СМК состояния (0,5–1,0 мкм) 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 отжиги при 400 и 450°C, сопровождающиеся распадом пересыщенного твердого раствора с выделением наноразмерных (3–5 нм) частиц Cu₅Zr, позволяют увеличить характеристики упруго-пластического перехода в 3,0 и 3,7 раза и повысить σ_{sp} до уровня КК-аналога. Определен режим комбинированной обработки: ДКУП, $n = 3$, и отжиг при 450°C, 1 ч, позволяющий получить СМК-сплав Cu-0,03% Zr с высокими динамическими характеристиками и микротвердостью.

Установлено, что диспергирование структуры сплава Cu-0,10% Cr от КК до СМК-состояния не только значительно увеличивает динамический предел упругости и динамический предел текучести в 3,7 и 2,6 раза, но и приводит к увеличению откольной прочности в 1,5 раза, по сравнению с их значениями в КК-состоянии. Увеличение откольной прочности 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 [4].

Определено, что ДКУП композитов на основе меди с микродобавками графена (Cu-0,02 % Gn) и углеродными нанотрубками приводит к увеличению динамического предела упругости, динамического предела текучести в 4,0–5,6 раза и откольной прочности в 1,2–1,8 раза. Повышенный уровень механических свойств сплавов и композитов по сравнению с медью [3], связан с упрочнением, обусловленным выделением наночастиц вторых фаз (Cu₅Zr и Cr), в сплавах в процессе ДКУП и последующего отжига, и введением армирующих микродобавок графена и углеродных нанотрубок. Полученные данные о динамических свойствах и характере откольного разрушения СМК сплавов

и композитов на основе меди позволяют прогнозировать их поведение в экстремальных условиях эксплуатации.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН (тема «Структура» № 122021000033-2).

Литература

1. **Khomsкая, I. V.** Effect of high-speed dynamic channel angular pressing and aging on the microstructure and properties of Cu–Cr–Zr alloys [Text] / I. V. Khomsкая, V. I. Zel'dovich, N. Yu. Frolova, A. E. Kheifets, E. V. Shorokhov, D. N. Abdullina // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 447. – P. 12007–12012. – doi:10.1088/1757-899x/447/1/012007.
 2. **Разоренов, С. В.** Упрочнение металлов и сплавов при ударном сжатии [Текст] / С. В. Разоренов, Г. В. Гаркушин // ЖТФ. – 2015. – Т. 85. – С. 77–82. – doi: 10.1134/S106378421507021X.
 3. **Хомская, И. В.** Динамическая прочность субмикроструктурной и нанокристаллической меди, полученной высокоскоростной деформацией [Текст] / И. В. Хомская, С. В. Разоренов, Г. В. Гаркушин, Е. В. Шорохов, Д. Н. Абдуллина // Физика металлов и металловедение. – 2020. – Т. 121. – С. 435–442. – doi: 10.31857/S0015323020040063.
 4. **Абдуллина, Д. Н.** Динамические свойства низколегированных сплавов меди с субмикроструктурной структурой, полученной высокоскоростной деформацией [Текст] / Д. Н. Абдуллина, И. В. Хомская, С. В. Разоренов, Е. В. Шорохов // Физика металлов и металловедение. – 2023. – Т. 124. – С. 1279–1287. – doi: 10.31857/S0015323022601969.
-