

УДК 669.3:539.89:539.2

**И. В. Хомская^{1*}, В. И. Зельдович¹, Е. В. Шорохов²,
Н. Ю. Фролова¹, А. Э. Хейфец¹, Д. Н. Абдуллина¹**

¹Институт физики металлов УрО РАН, г. Екатеринбург

²Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский
научно-исследовательский институт технической физики, г. Снежинск

**khomskaya@imp.uran.ru*

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МЕДИ И ЕЕ СПЛАВОВ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Исследованы структура и динамические свойства технической меди и низколегированных сплавов на основе меди с субмикроструктурной (СМК) структурой, полученной методом динамического канально-углового пресования. Испытания проводились в условиях ударного сжатия с давлением 6–7 ГПа и скоростью деформации $(0,9–2,0) \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$. Проведена оценка влияния дисперсности и дефектности СМК-структуры на ее сопротивление высокоскоростному деформированию и разрушению.

Ключевые слова: медь и медные сплавы, субмикроструктурная структура, высокоскоростная деформация, ударные волны.

**I. V. Khomskaya, V. I. Zel'dovich, E. V. Shorokhov,
N. Yu. Frolova, A. E. Kheifets, D. N. Abdullina**

STRUCTURE AND PROPERTIES OF COPPER AND ALLOYS UNDER EXTREME LOADING

The dynamic properties of technical copper and copper alloys with a submicrocrystalline (SMC) structure formed by the dynamic channel-angular pressing method were studied. The tests were carried out under shock-wave compression with intensity 6–7 GPa and speed deformation of $(0.9–2.0) \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$. The effect of the dispersion and defects of SMC structure on its resistance to high-speed deformation and fracture is estimated.

Key words: copper and copper alloys, submicrocrystalline structure, high-speed deformation, shock compression.

Изучены механические и эксплуатационные свойства меди чистотой 99,8 мас. % и дисперсионно-твердеющих сплавов Cu-Zr, Cu-Cr и Cu-Cr-Zr, легированных микродобавками (0,03–0,2 мас. %) хрома и циркония (0,03–0,08 мас. %) с субмикроструктурными (СМК) структурами, полученными методом динамического канально-углового прессования (ДКУП). Динамические свойства СМК-меди и сплавов исследованы при ударно-волновом нагружении с давлением до 7 ГПа и скоростью деформации 10^5 с^{-1} . При ДКУП на образец действует высокоскоростная (10^4 – 10^5 с^{-1}) деформация сдвига, ударно-волновая деформация сжатия и температура.

В меди при ДКУП в результате высокоскоростных циклических процессов фрагментации и динамической рекристаллизации формируются специфические неравновесные СМК и СМК+НК структуры с повышенными свойствами. Показано, что медь с такими структурами при скорости деформирования $(0,9$ – $2,0) \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ демонстрирует увеличение динамического предела упругости и динамического предела текучести в 6 раз, по сравнению с исходным крупнокристаллическим (КК) состоянием. Это обусловлено специфическими неравновесными состояниями, сформированными в меди при ДКУП. Определено, что дальнейшее диспергирование структуры меди до СМК+НК состояния увеличивает в 1,4 раза откольную прочность, по сравнению с КК состоянием. Это связано с формированием в меди при четырехкратном ДКУП структуры, состоящей из сильно разориентированных зерен размерами от 0,05 до 0,40 мкм с преимущественно неравновесными большеугловыми границами, что способствует замедлению роста микротрещин, т. е. затягиванию процесса высокоскоростного разрушения.

Установлено, что формирование неравновесной СМК структуры в сплавах меди при ДКУП происходит в результате высокоскоростных процессов фрагментации, динамической полигонизации и частично деформационного старения с выделением наноразмерных частиц Cr и Cu_5Zr . Исследовано влияние ДКУП и старения на прочностные и эксплуатационные свойства сплавов. Показано, что измельчение структуры сплавов Cu-Cr-Zr на три порядка (от 200–400 мкм до 0,2–0,4 мкм) и повышение предела прочности в 2,6 раза и предела текучести в 3,3 раза при сохранении удовлетворительной пластичности может быть достигнуто уже при трех-четырех проходах ДКУП. Изучено влияние дисперсности кристаллической структуры сплавов, полученной

при ДКУП на их сопротивление высокоскоростному деформированию и разрушению. Показано, что однократное ДКУП сплавов Cu-Zr и Cu-Sr, приводящее к измельчению кристаллитов от 300 до 1–5 мкм, увеличивает характеристики упруго-пластического перехода в 1,9–2,8 раза. Дальнейшее диспергирование структуры до 0,05–0,40 мкм увеличивает динамический предел упругости, динамический предел текучести и динамическую (откольную) прочность сплава Cu-Sr в 1,5–4,0 раза по сравнению с исходным крупнокристаллическим состоянием.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Структура» № АААА–А18–118020190116–6 и при частичной поддержке УрО РАН (проект № 18–10–2–39).