

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СПЛАВОВ МЕДИ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ



Д.Н. Абдуллина¹, И.В. Хомская¹, С.В. Разоренов², Г.В. Гаркушин², А.С. Савиных²

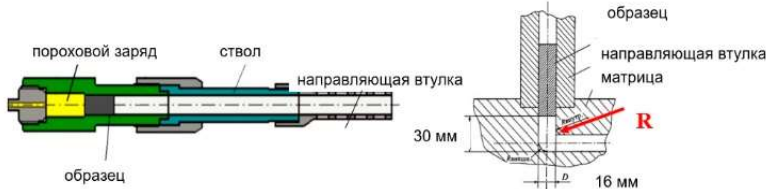
¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург

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

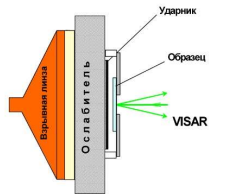
e-mail: abdullina@imp.uran.ru



Схема динамического канально-углового прессования (ДКУП)



Ударно-волновое нагружение ($P = 5.2-6.98$ ГПа, $V \text{ деф} = 10^5 \text{ с}^{-1}$)

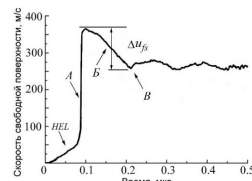


Ударное сжатие образцов толщиной ~ 2 мм в виде дисков диаметром 12 мм осуществляли путем прямого соударения алюминиевого ударника толщиной ~ 0.4 мм, разогнанного с помощью специального взрывного устройства до скорости 260 ± 30 м/с. Ртах ударного сжатия образцов - 5.2-6.98 ГПа, скорость деформирования в разгрузочной части волны сжатия перед откольным разрушением - $(0.9-2.0) \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$

Регистрацию профилей скорости свободной поверхности Ufs(t) осуществляли при помощи лазерного Доплеровского измерителя скорости VISAR, имеющего временное разрешение ~ 1 нс и пространственное ~ 0.1 мм²

МАТЕРИАЛЫ: сплавы: Cu-0.03\%Zr ; Cu-0.1\%Cr
ОБРАЗЦЫ: $d=16$ мм, длина=65 мм;
ПАРАМЕТРЫ ДКУП:
 - Разгон образца - при помощи порохового заряда
 - Матрицы из 2-х каналов $d=16$ и 14 мм (радиус внутреннего угла закругления каналов: $R=0$)
 - Начальная скорость образцов (V_0) - 230 м/с
 - Количество проходов ($n=1$ и $n=3$)
 - Скорость деформации материала 10^4-10^5 с^{-1}
 - Длительность одного цикла прессования $5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$
 - Давление в области угла поворота $\leq 1,5-2$ ГПа

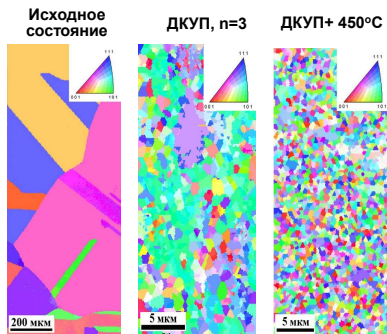
«Способ динамической обработки материалов»
 авторы: Шорохов Е. В., Жиглев И.Н. (РФЯЦ-ВНИИФ, Снежинск), Валиев Р.З. (УГАТУ, Уфа).
 Патент РФ 2006 г. (№ 2283717)



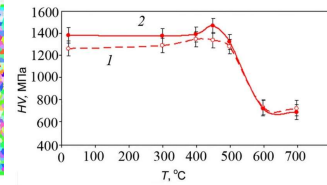
Сразу за фронтом упругой волны наблюдается плавный рост скорости свободной поверхности до резкого скачка в пластической волне сжатия (А) вследствие упрочнения материала и отсутствия релаксации напряжений за фронтом упругого предвестника. После выхода на поверхность пластической волны сжатия регистрируются следующие за ней волна разрежения (Б). При достижении растягивающими напряжениями критической величины происходит откольное разрушение образца (начало формирования откола обозначено стрелкой В) и в этот момент формируется слабая волна сжатия - откольный импульс; многократные переотражения которого на откольной пластине приводят к дальнейшим осцилляциям скорости на волновых профилях

Волновой профиль исходного КК образца; стрелками показаны: HEL - упругий предвестник волны сжатия; А - фронт пластической волны сжатия; Б - волна разрежения; В - момент формирования откола; ΔUfs - величина спада скорости от максимума до минимума в момент откола;

Эволюция структуры и изменение микротвердости сплава Cu-0.03\%Zr после ДКУП и последующих отжигов

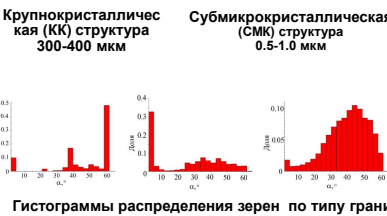


Изменение микротвердости сплава Cu-0.03\%Zr с СМК структурой, полученной методом ДКУП, от температуры отжига.

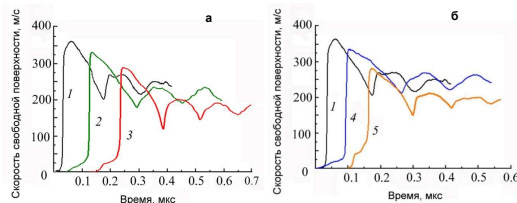


Отжиги при 400 (450°C) повышают микротвердость сплава с СМК структурой, полученной методом ДКУП, что связано с процессами распада пересыщенного α-твердого раствора меди, сопровождающимся выделением наноразмерных частиц Cu_2Zr

Увеличение температуры отжига до 500-600°C приводит к снижению микротвердости, что обусловлено развитием процесса рекристаллизации



Влияние дисперсности микроструктуры сплава Cu-0.03\%Zr на волновые профили образцов и динамические свойства



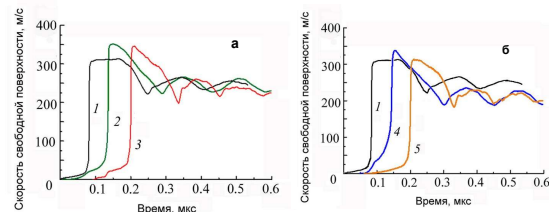
Волновые профили образцов Cu-0.03 мас. %Zr: а - в исходном состоянии (кривая 1); после ДКУП, $n=1$ (кривая 2); после ДКУП, $n=1$ + отжиг 450°C, 1ч (кривая 3) б - в исходном состоянии (кривая 1); после ДКУП, $n=3$ (кривая 4); после ДКУП, $n=3$ + отжиг 450°C, 1ч (кривая 5)

Режим обработки, тип структуры	Rmax, ГПа	Ufs max, м/с	UHEL, м/с	ΔUfs, м/с	σHEL, ГПа	γ, ГПа	σsp, ГПа	hsp, мм
Исходное КК состояние	6.98	373	10	167	0.22	0.11	3.22	0.30
ДКУП, $n=1$, МК	6.18	333	20	157	0.41	0.18	2.90	0.35
ДКУП, $n=1$, + отжиг 450°C, 1ч	5.30	289	22	171	0.46	0.20	3.31	0.3
ДКУП, $n=3$, СМК	6.20	334	20	122	0.42	0.20	2.31	0.34
ДКУП, $n=3$, + отжиг 450°C, 1ч	5.20	281	39	132	0.81	0.39	2.54	0.28

Rmax - max давление ударного сжатия;
 Ufs max - max скорость свободной поверхности;
 UHEL - скорость поверхности на фронте упругого предвестника;
 ΔUfs - величина спада скорости от max до первого min в момент откола;
 σHEL - динамический предел упругости;
 γ - динамический предел текучести
 σsp - динамическая (откольная) прочность;
 hsp - толщина откольной пластины

Показано, что ДКУП ($n=1-3$) сплава, приводящее к измельчению кристаллитов от 200-400 до 0.5-1 мкм, увеличивает динамический предел упругости и динамический предел текучести в 1.6-1.9 раза, по сравнению с исходным крупнокристаллическим состоянием. Последующие отжиги при 400-450°C приводят к дополнительному увеличению динамических свойств в 1.1-1.9 раз. Повышенный уровень механических свойств сплавов, по сравнению с медью, связан с упрочнением, обусловленным фрагментацией структуры при ДКУП и процессами распада твердого раствора с выделением наночастиц Cu_2Zr в процессе ДКУП и последующего отжига.

Влияние дисперсности микроструктуры сплава Cu-0.1\%Cr на волновые профили образцов и динамические свойства

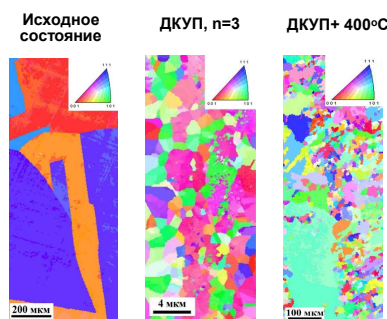


Волновые профили образцов Cu-0.1 мас. %Cr: а - в исходном состоянии (кривая 1); после ДКУП, $n=1$ (кривая 2); после ДКУП, $n=1$ + отжиг 400°C, 1ч (кривая 3) б - в исходном состоянии (кривая 1); после ДКУП, $n=3$ (кривая 4); после ДКУП, $n=3$ + отжиг 400°C, 1ч (кривая 5)

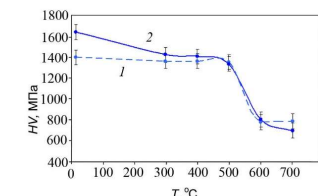
Режим обработки, тип структуры	Rmax, ГПа	Ufs max, м/с	UHEL, м/с	ΔUfs, м/с	σHEL, ГПа	γ, ГПа	σsp, ГПа	hsp, мм
Исходное КК состояние	5.73	310	8.7	167	0.19	0.12	1.90	0.37
ДКУП, $n=1$, МК	6.52	350	26.4	157	0.54	0.21	2.40	0.33
ДКУП, $n=1$, + отжиг 400°C, 1ч	6.40	346	21	171	0.44	0.17	2.82	0.28
ДКУП, $n=3$, СМК	6.20	334	33.5	122	0.70	0.31	2.76	0.34
ДКУП, $n=3$, + отжиг 400°C, 1ч	5.80	315	2/5	132	0.10	0.04	2.57	0.28

Rmax - max давление ударного сжатия;
 Ufs max - max скорость свободной поверхности;
 UHEL - скорость поверхности на фронте упругого предвестника;
 ΔUfs - величина спада скорости от max до первого min в момент откола;
 σHEL - динамический предел упругости;
 γ - динамический предел текучести
 σsp - динамическая (откольная) прочность;
 hsp - толщина откольной пластины

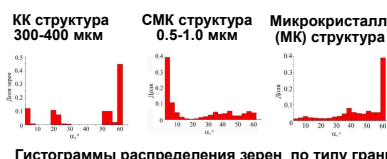
Эволюция структуры и изменение микротвердости сплава Cu-0.1\%Cr после высокоскоростного ДКУП и последующих отжигов



Изменение микротвердости сплава Cu-0.1\%Cr с СМК структурой, полученной методом ДКУП, от температуры отжига.



Отжиги при 300 - 500°C несколько понижают микротвердость сплава с СМК структурой, полученной методом ДКУП, что связано с действием конкурирующих процессов распада пересыщенного α-твердого раствора меди, сопровождающимся выделением наноразмерных частиц Cr и рекристаллизацией



Выводы:

- Установлено, что сплавы Cu-0.03\%Zr и Cu-0.1\%Cr с СМК структурой, полученной ДКУП, при скорости деформирования $(0.9-2.0) \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ демонстрируют увеличение динамического предела упругости и динамического предела текучести в 1.8-4.0 раза, по сравнению с исходным КК состоянием. Это связано с образованием в сплавах при ДКУП неравновесной дефектной СМК структуры. Определено, что диспергирование структуры до 0.5 мкм увеличивает в 1.5 раза откольную прочность сплава Cu-0.1\%Cr .
- Последующие отжиги при 400-450°C приводят к дополнительному увеличению откольной прочности в 1.2 раза. Повышенный уровень динамических свойств сплавов, по сравнению с медью, связан с упрочнением, обусловленным фрагментацией структуры при ДКУП и процессами распада твердого раствора с выделением наночастиц Cr в процессе ДКУП и последующего отжига.
- Упрочняющий эффект СМК сплавов, полученных при ДКУП, сохраняется при скорости деформации 10^5 с^{-1}