



Структура и свойства сплавов меди, легированных хромом, цирконием и графеном

Д.Н. Абдуллина¹, И.В. Хомская¹, С.В. Разоренов², Е.В. Шорохов³, Л.А. Елшина⁴

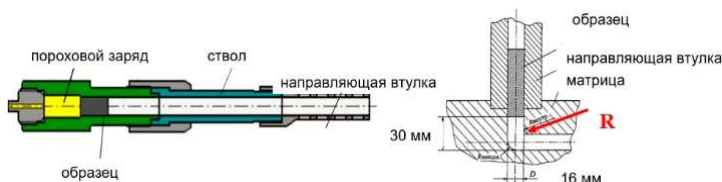
¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург

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

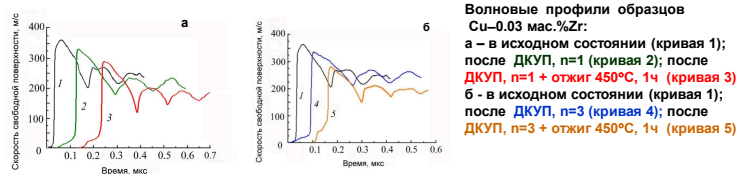
³Российский Федеральный Ядерный Центр - Всероссийский научно-исследовательский институт имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск

⁴Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Екатеринбург

Схема динамического канально-углового прессования (ДКУП)



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	R _{max} , ГПа	U _f s max, м/с	U _{HEL} , м/с	ΔU _f s, м/с	σ _{HEL} , ГПа	Y, ГПа	σ _{SP} , ГПа	h _{SP} , 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

R_{max} – макс давление ударного сжатия;
U_fs max – макс скорость свободной поверхности;
U_{HEL} – скорость поверхности на фронте упругого предельника;
ΔU_fs – величина спада скорости от макс до первого min в момент откола;
σ_{HEL} – динамический предел упругости;
Y – динамический предел текучести;
σ_{SP} – динамическая (откольная) прочность;
h_{SP} – толщина откольной пластины

МАТЕРИАЛЫ: сплавы: Cu-0.03%Zr; Cu-0,1%Cr; Cu-0.02 % Gn

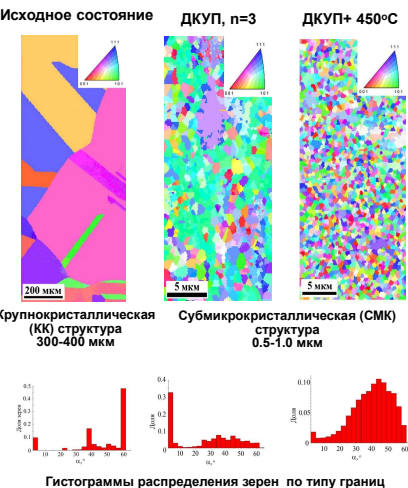
ОБРАЗЦЫ: d=16 мм, длина=65 мм;

ПАРАМЕТРЫ ДКУП:

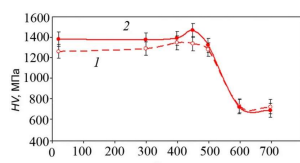
- Разгон образца - при помощи порохового заряда
- Матрицы из 2-х каналов d=16 и 14 мм (радиус внутреннего угла закругления каналов: R=0)
- Начальная скорость образцов (V₀) – 230 м/с
- Количество проходов (n=1 и n=3)
- Скорость деформации материала 10⁴-10⁵ с⁻¹
- Длительность одного цикла прессования 5·10⁻⁴ с
- Давление в области угла поворота ≤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)

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



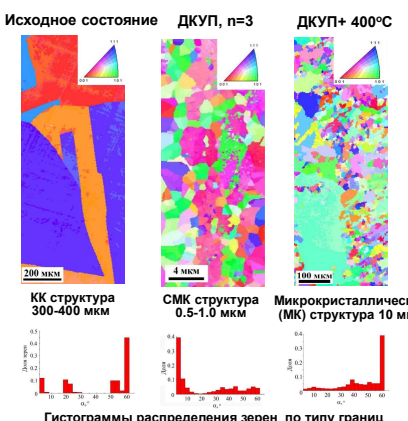
Изменение микротвердости сплава Cu-0.03%Zr с СМК структурой, полученной методом ДКУП, от температуры отжига.
1 – ДКУП, n=1
2 – ДКУП, n=3



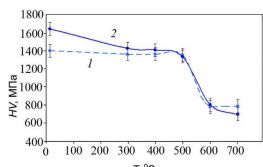
Отжиги при 400 (450°C) повышают микротвердость сплава с СМК структурой, полученной методом ДКУП, что связано с процессами распада пересыщенного α-твердого раствора меди, сопровождающимся выделением наноразмерных частиц Cu₂Zr

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

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

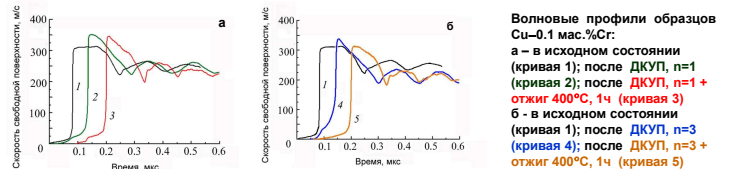


Изменение микротвердости сплава Cu-0.1%Cr с СМК структурой, полученной методом ДКУП, от температуры отжига.
1 – ДКУП, n=1;
2 – ДКУП, n=3



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 рекристаллизации

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	R _{max} , ГПа	U _f s max, м/с	U _{HEL} , м/с	ΔU _f s, м/с	σ _{HEL} , ГПа	Y, ГПа	σ _{SP} , ГПа	h _{SP} , 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

R_{max} – макс давление ударного сжатия;
U_fs max – макс скорость свободной поверхности;
U_{HEL} – скорость поверхности на фронте упругого предельника;
ΔU_fs – величина спада скорости от макс до первого min в момент откола;
σ_{HEL} – динамический предел упругости;
Y – динамический предел текучести;
σ_{SP} – динамическая (откольная) прочность;
h_{SP} – толщина откольной пластины

Структура и динамические свойства медных композитов с графеном при ДКУП

Режим обработки	H _v , МПа	R _{max} , ГПа	σ _{HEL} , ГПа	Y, ГПа	σ _{SP} , ГПа
99.9%Cu	630	6.34	0.06	0.03	1.39
99.9%Cu ДКУП, n=1	1100	5.79	0.33	0.17	1.13
Cu-0.02%Gn	700	6.2	0.1	0.05	1.47
Cu-0.02%Gn ДКУП, n=1	1400	5.7	0.4	0.21	2.26

H_v – микротвердость;
R_{max} – макс давление ударного сжатия;
σ_{HEL} – динамический предел упругости;
Y – динамический предел текучести;
σ_{SP} – динамическая (откольная) прочность;

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)·10⁵ 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 при 0.5 мкм увеличивает в 1.5 раза откольную прочность сплава Cu-0.1%Cr. Методом ДКУП получена СМК структура в Cu-0.02 %Gn композите и изучены его динамические свойства. Установлено, что преобразование исходного литого КК состояния в СМК при ДКУП, n=1, вызывает значительное повышение динамических свойств. В частности, динамический предел упругости и динамический предел текучести медь-графенового композита возрастает в 4.0–4.2 раза, по сравнению с исходным КК состоянием. Показано, что откольная прочность СМК композита превышает откольную прочность СМК меди в 2 раза.