

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕДИ И СПЛАВОВ МЕДИ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ

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



¹ *Институт физики металлов имени М.Н. Михеева
Уральского отделения РАН, Екатеринбург*



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



³ *Российский Федеральный ядерный центр–
ВНИИ технической физики,
имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск*

Внешний вид и микроструктура образца меди после ДКУП, n=4

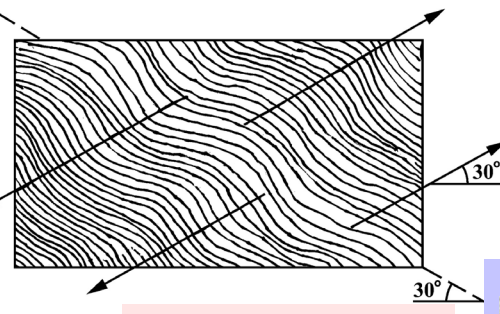
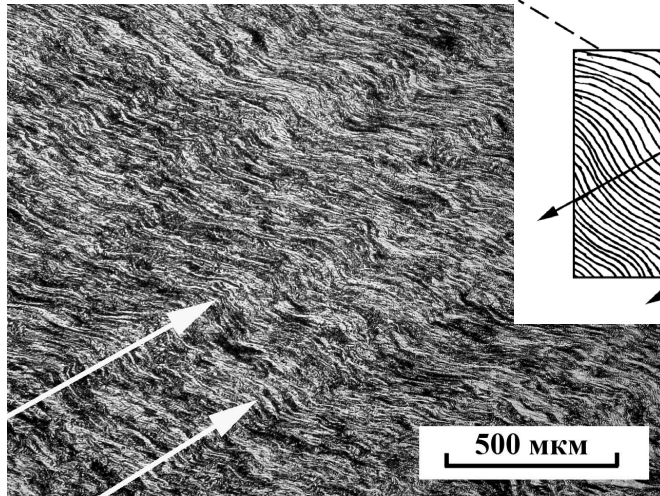
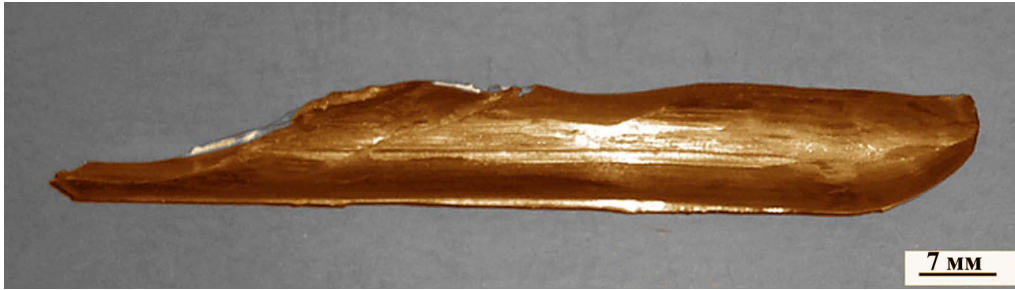
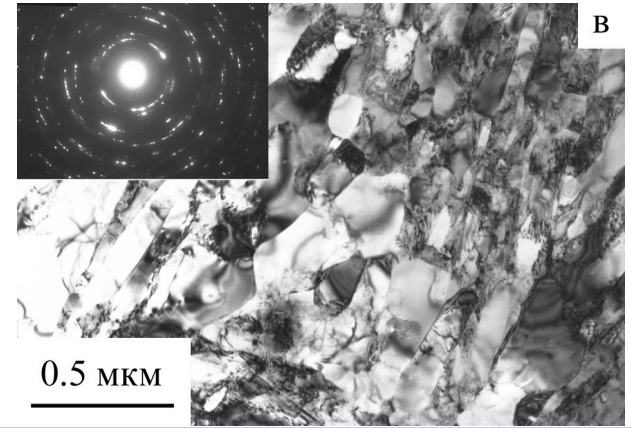


Схема структуры
Направления локализованных сдвигов указаны стрелками.

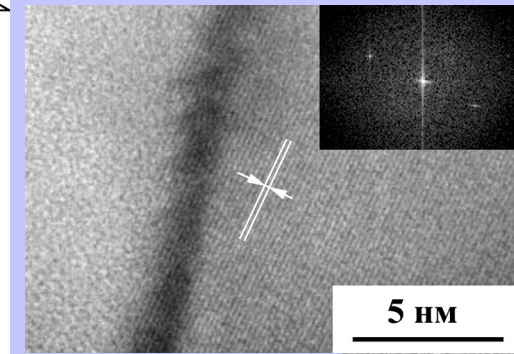
Волнообразная волокнистая структура

Гребни волн (стрелки белого цвета) формируют систему “неявных” полос сдвига направленных под углом 30-35° к продольной оси образца

(металлографический анализ)



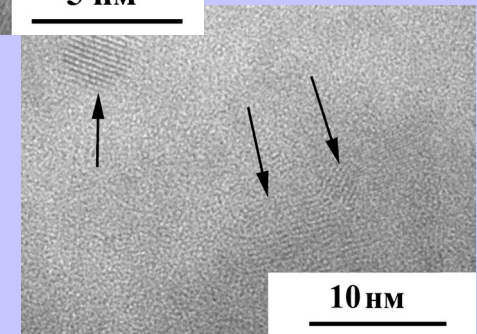
Зерна-субзерна размером 50-400 нм внутри волокон меди
(ЭМ электронномикроскопический анализ)



Наноразмерные (5-7 нм) участки внутри зерна.

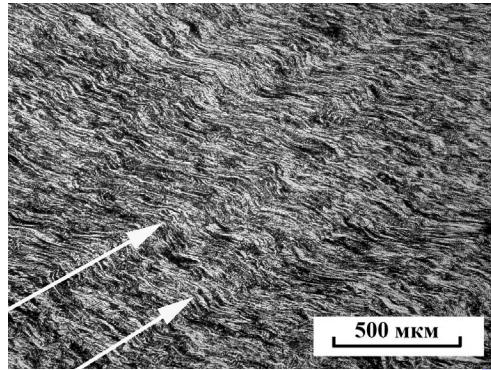
Участок межзеренной границы в меди и Фурье-изображение, полученное с правого зерна (межплоскостное расстояние = 0,210 нм)

(ВРЭМ -Высокорозрешающая электронная микроскопия)

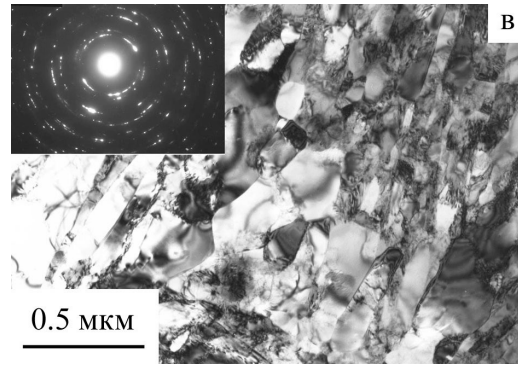


10 нм

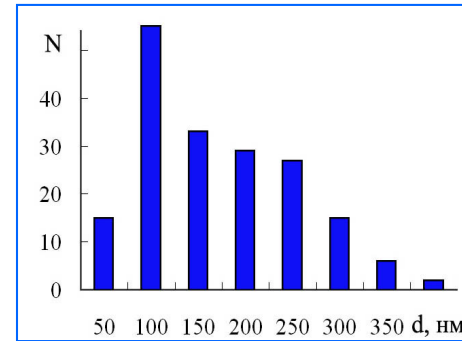
Анализ структуры СМК+НК меди, полученной ДКУП



Волнообразная
волокнистая структура

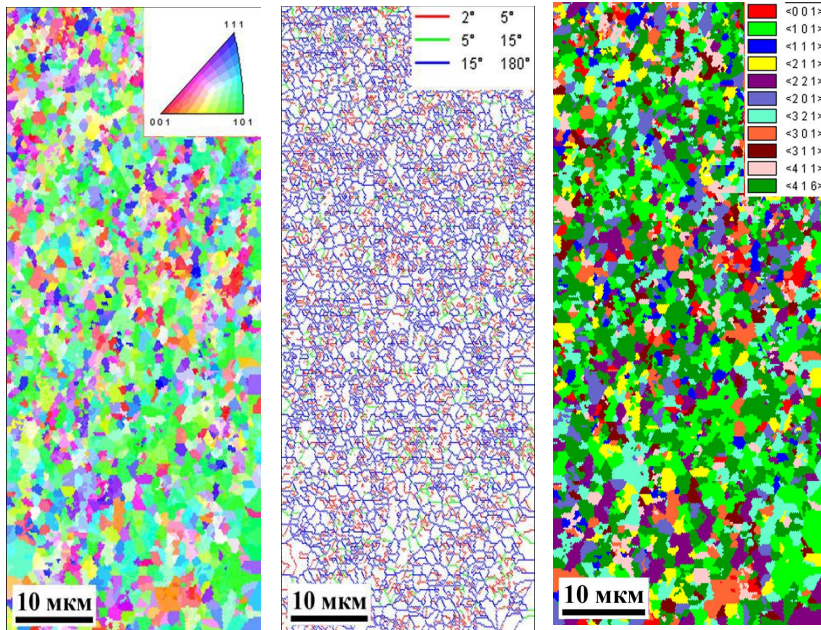


Зерна-субзерна размером
50-400нм внутри волокон меди



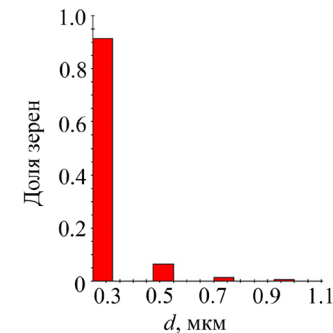
Данные ЭМ
анализа

Гистограмма распределения
зерен по размерам
30-35%- до 100 нм (НК структура)
70-65% - 150- 400 нм (СМК)

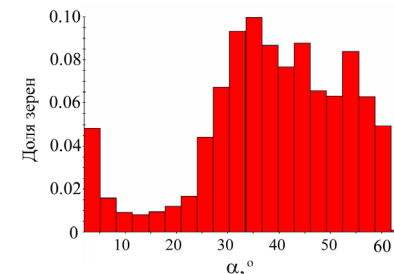


Данные
EBSD
анализа

Карты распределения зерен в СМК + НК меди по кристал-
лографической ориентировке, размерам и типу границ.



Гистограмма распределения зерен по размерам



Гистограмма распределения зерен по типу границ

Динамические свойства меди при испытании на ударное сжатие ($P = 5.6-6.8$ ГПа, $V_{\text{деф}} = 10^5$ с $^{-1}$)

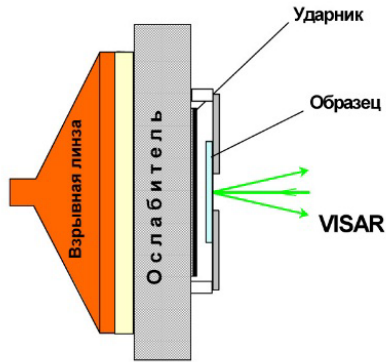
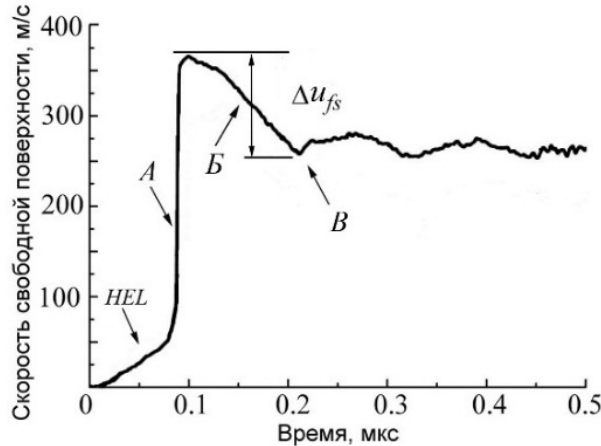


Схема ударно-волнового нагружения

• Ударное сжатие образцов толщиной ~ 2 мм в виде дисков диаметром 16 мм и пластин, размером 12x12 мм осуществляли путем прямого соударения алюминиевого ударника толщиной ~ 0.4 мм, разогнанного с помощью специального взрывного устройства до скорости 620 ± 30 м/с. P max ударного сжатия образцов - 5,6-6,9 ГПа, скорость деформирования в разгрузочной части волны сжатия перед откольным разрушением - $(0,9-2,0) \cdot 10^5$ с $^{-1}$

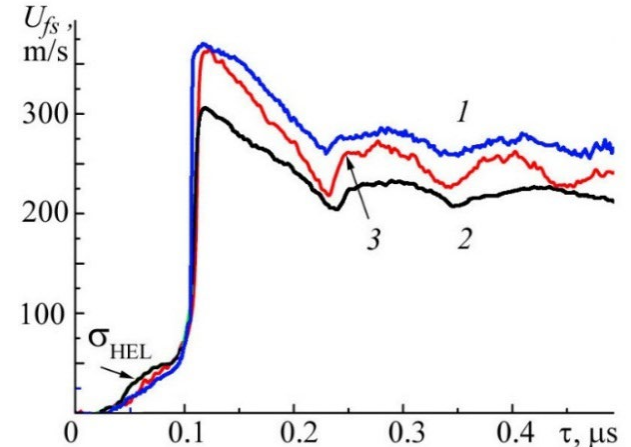
• Регистрацию профилей скорости свободной поверхности $U_{fs}(t)$ осуществляли при помощи лазерного Доплеровского измерителя скорости VISAR, имеющего временное разрешение ~ 1 нс и пространственное ~ 0.1 мм 2

Профили скорости свободной поверхности образцов меди



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

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 следующая 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 в откольной пластине приводят к дальнейшим осцилляциям скорости на волновых профилях.



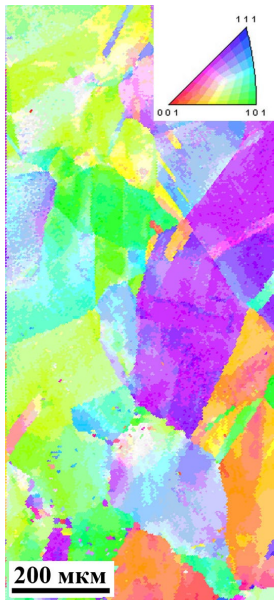
Сравнение волновых профилей образцов с различными кристаллическими структурами:

- 1 – КК структура (100 мкм)
 $\sigma_{HEL} = 0,1$; $Y = 0,05$; $\sigma_{sp} = 1,86$ ГПа
- 2 – СМК (0,5-1,0 мкм)
 $\sigma_{HEL} = 0,62$; $Y = 0,30$; $\sigma_{sp} = 1,79$ ГПа
- 3 – СМК+НК (0,05-0,40 мкм)
 $\sigma_{HEL} = 0,71$; $Y = 0,30$; $\sigma_{sp} = 2,51$ ГПа

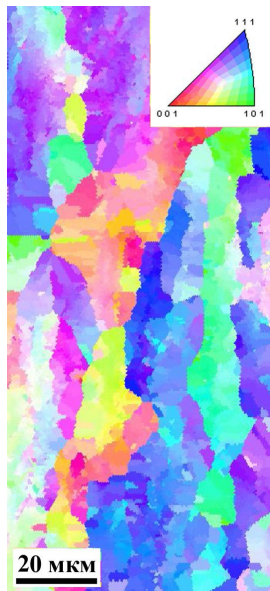


Влияние дисперсности кристаллической структуры на механические свойства меди

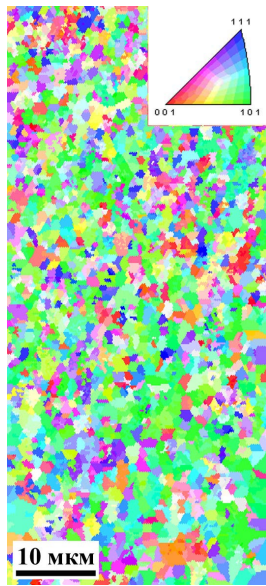
Исходная КК структура



ДКУП, n=1



ДКУП, n=4

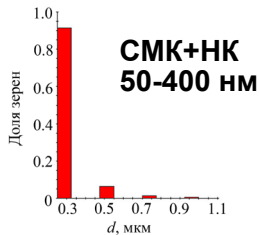
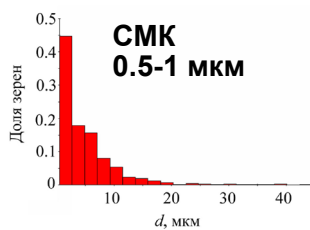
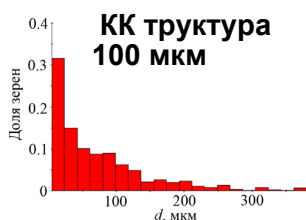


испытания на одноосное растяжение ($V_{деф}=10^{-2} \text{ с}^{-1}$)

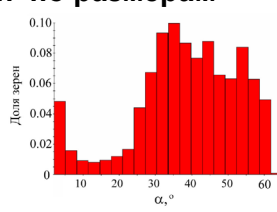
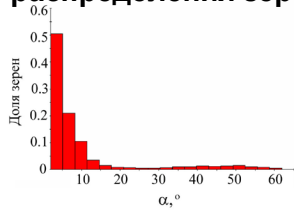
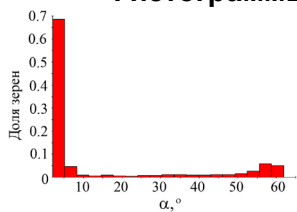
Структура и размер зерна	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
КК 100 мкм	312	304	37
СМК 0,5-1,0 мкм	396	362	22
СМК+НК 50-400 нм	440	414	19

испытания на ударное сжатие ($P= 5.6-6.8 \text{ ГПа}$, $V_{деф}=10^5 \text{ с}^{-1}$)

Структура, размер зерна, обработка	σ_{HEL} , ГПа	Y , ГПа	σ_{sp} , ГПа
КК 100 мкм (отжиг 450°C)	<0.10	<0.05	1.86
СМК 0.5-1.0 мкм (ДКУП, n=1)	0.62	0.30	1.79
СМК+НК 0.05-0.40 мкм (ДКУП, n=4)	0.69	0.30	2.51



Гистограммы распределения зерен по размерам



Гистограммы распределения зерен по типу границ

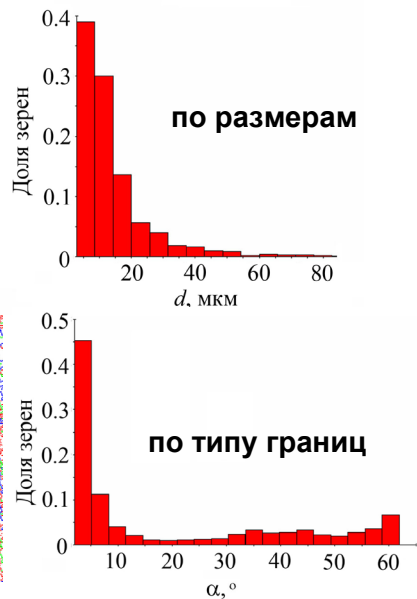
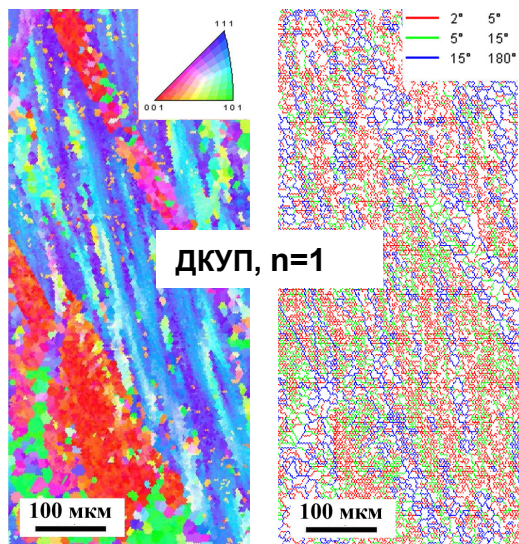
Динамические свойства **СМК и НК меди** выше ее **КК** аналога: так σ_{HEL} и Y в 6 раз, σ_{sp} в 1.4 раза. Это связано с формированием в меди при ДКУП структуры, состоящей из сильно разориентированных зерен размерами от 50 до 400 нм с преимущественно неравновесными большеугловыми границами, что способствует замедлению роста микротрещин, т.е. затягиванию процесса высокоскоростного разрушения.

Упрочняющий эффект СМК и СМК+НК меди сохраняется в широком интервале скоростей деформации от 10^{-2} до 10^5 с^{-1} .

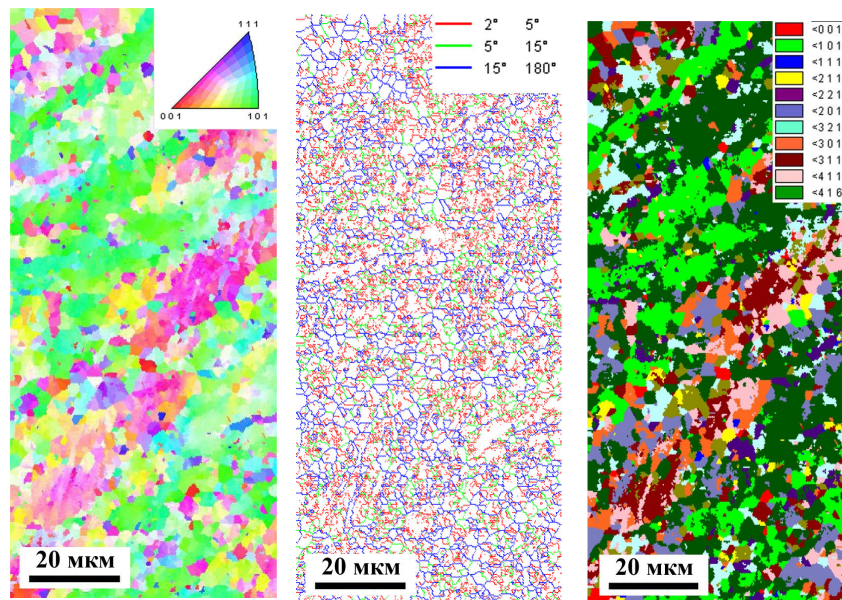


Результаты EBSD анализа сплавов Cu-0.1%Cr и Cu-0,03%Zr с СМК структурой, полученной методом ДКУП

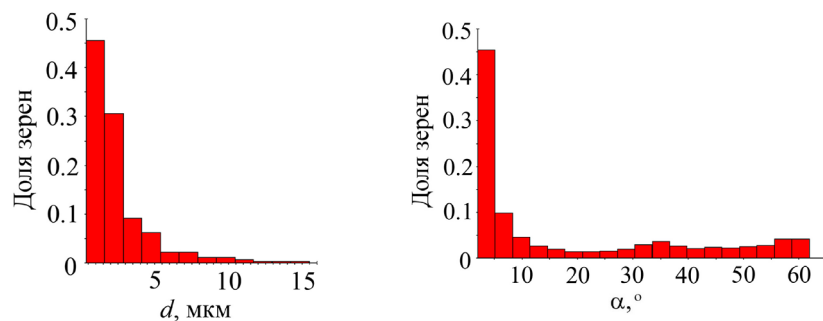
Cu-0.1%Cr



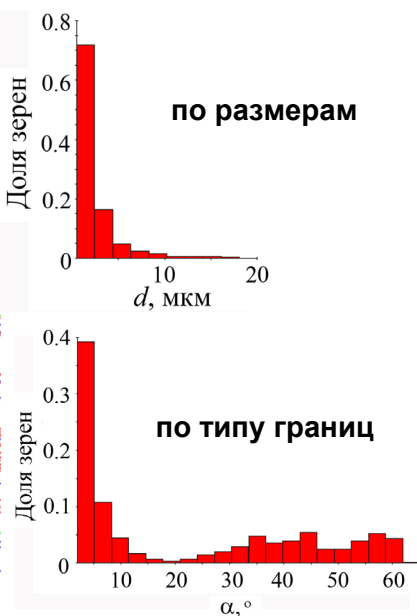
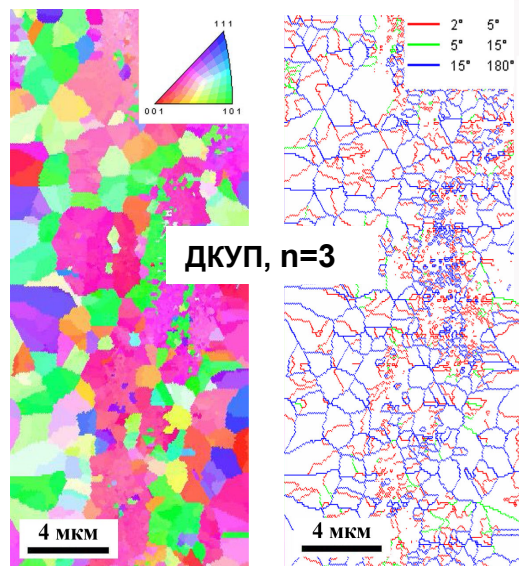
Cu-0.03%Zr ДКУП, n=3



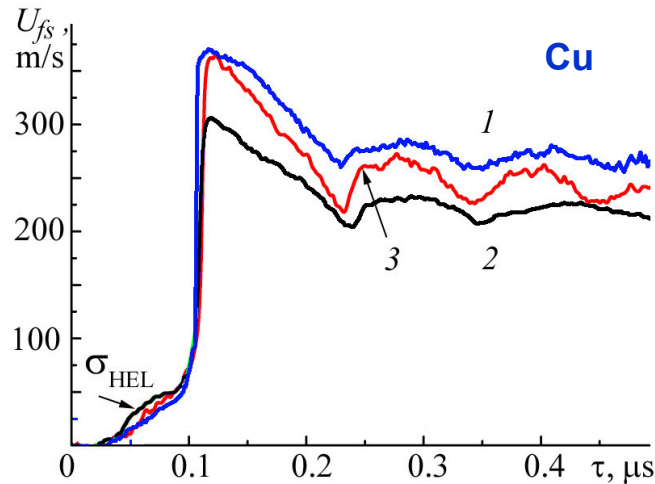
Карты распределения зерен по кристаллографической ориентировке, типу границ и размерам



Гистограммы распределения зерен по размерам и типу границ



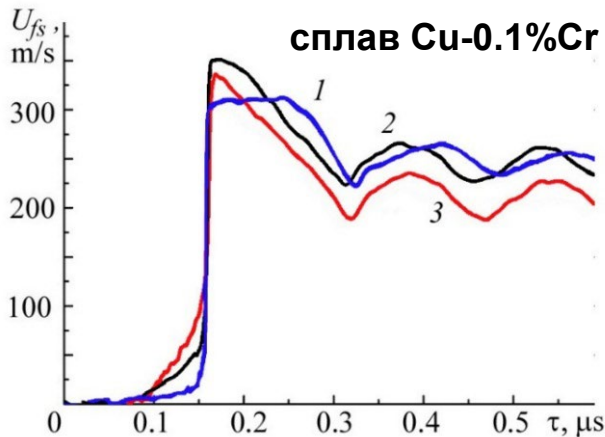
Волновые профили меди и сплавов



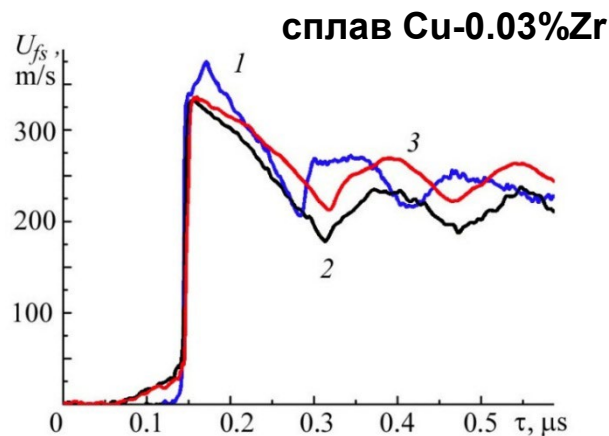
**1–КК структура, 100 мкм
(отжиг 450 °С)**

**2– СМК структура, 0.2-0.5 мкм
(ДКУП, n=1)**

**3–СМК+НК, 50-400 нм
(ДКУП, n=4)**



сплав Cu-0.1%Cr



сплав Cu-0.03%Zr

**1–КК структура, 200-400
мкм (закалка от 1000 °С**

**2–МК структура, 1-5 мкм
(ДКУП, n=1)**

**3–СМК структура,
0.2-0.5 мкм (ДКУП, n=3)**

Показано, что ДКУП, n=1 меди, приводящее к измельчению зерна от 100 до 0.5 мкм, в 5.7 раз увеличивает динамический предел упругости (σ_{HEL}) и динамический предел текучести (γ) меди. Формирование СМК+НК структуры (50-400 нм) при ДКУП, n=4, увеличивает динамическую (откольную) прочность меди в 1.4 раза, по сравнению с исходным КК состоянием. В сплавах Cu-0.03%Zr и Cu-0.1%Cr ДКУП, n=1 увеличивает σ_{HEL} и γ в 1.9-2.8 раза, соответственно. Измельчение зерна до СМК состояния (до 0.2-0.5 мкм) при ДКУП, n=3 увеличивает динамические свойства сплава Cu-0,1%Cr в 1.5-3.7 раз по сравнению с исходным КК состоянием.

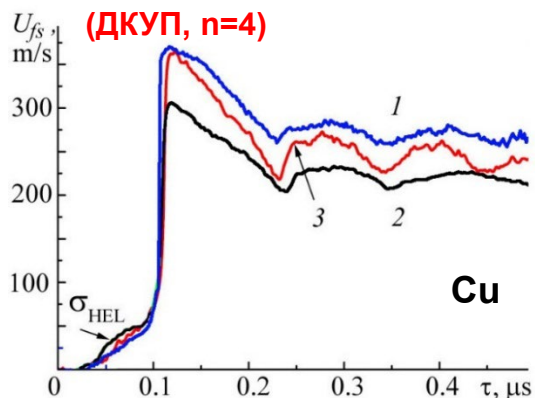
Влияние легирования Cr и Zr на динамические свойства меди

Профили скорости свободной поверхности образцов с различными кристаллическими структурами

1–КК структура, 100 мкм

2–СМК, 0.5 -1 мкм (ДКУП, n=1)

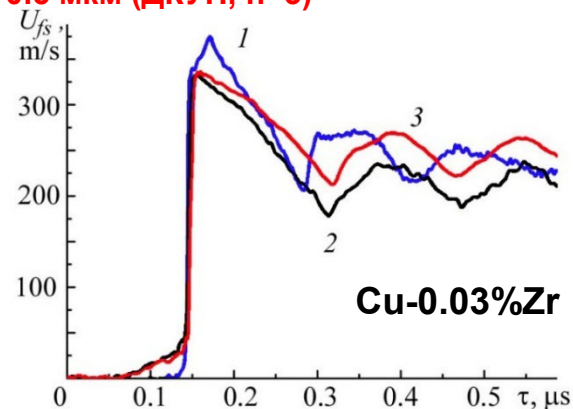
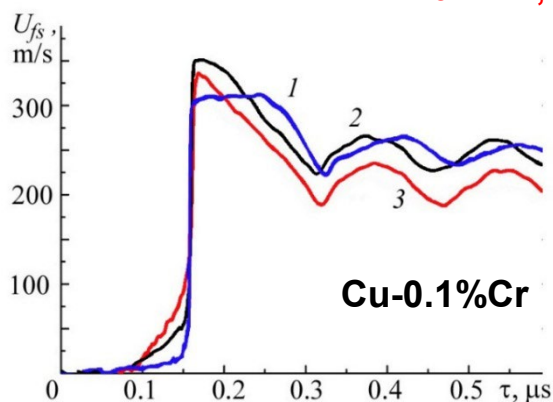
3–СМК+НК 0.05-0.4 мкм
(ДКУП, n=4)



1–КК структура, 200-400 мкм

2–МК, 1-5 мкм (ДКУП, n=1)

3–СМК, 0.2-0.5 мкм (ДКУП, n=3)



Динамические свойства сплавов в исходном КК состоянии и после ДКУП

Материал	Структура, размер зерна, обработка	σ_{HEL} , ГПа	γ , ГПа	σ_{sp} , ГПа
Cu-0.03Zr	КК 200-400 мкм (закалка 1000°C)	0.22	0.11	3.22
	МК 1-5 мкм (ДКУП, n=1)	0.41	0.18	2.90
	СМК 0.2-0.5 мкм (ДКУП, n=3)	0.42	0.20	2.31
Cu-0.1Cr	КК 200-400 мкм (закалка 1000°C)	0.19	0.12	1.90
	МК 1-5 мкм (ДКУП, n=1)	0.54	0.21	2.40
	СМК 0.2-0.5 мкм (ДКУП, n=3)	0.70	0.31	2.76

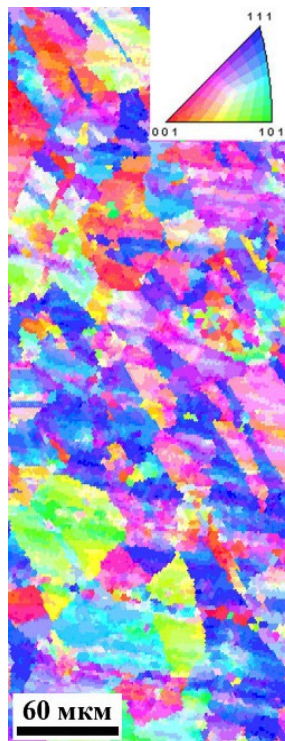
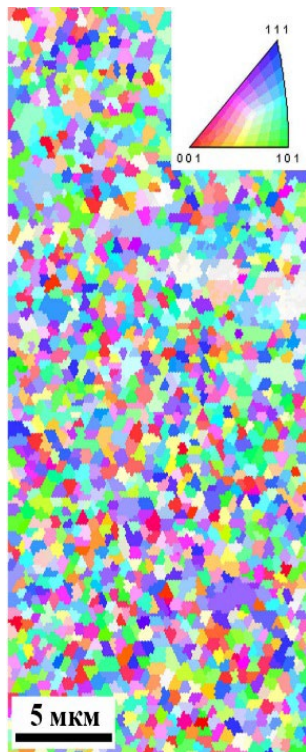
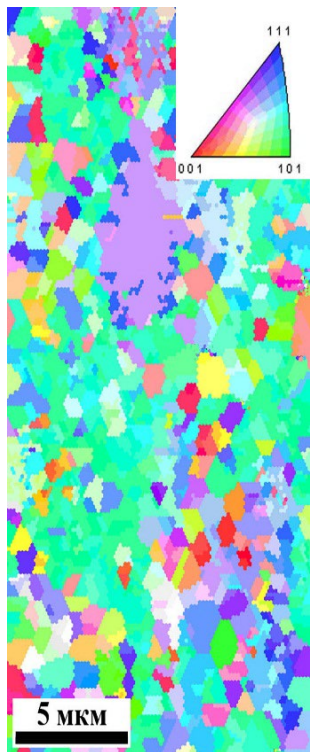
Определено, что ДКУП сплавов, приводящее к измельчению кристаллитов от 200–400 до 1–5 и (0.2–0.5) мкм увеличивает σ_{HEL} и γ в 1.9–3.7 раза, по сравнению с исходным КК состоянием. Диспергирование структуры сплава Cu–0.1Cr до СМК состояния увеличивает в 1.5 раза откольную прочность, по сравнению с исходным КК состоянием. Повышенный уровень динамических свойств сплавов, по сравнению с медью, связан с дополнительным упрочнением, обусловленным выделением наночастиц Cr и Cu₅Zr на границах и внутри зерен в процессе ДКУП

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

ДКУП, n=3

ДКУП+ 450°C

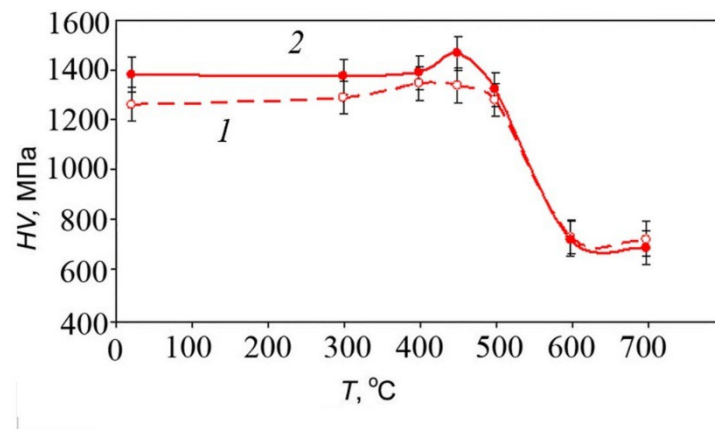
ДКУП +700°C



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

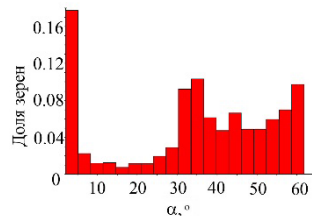
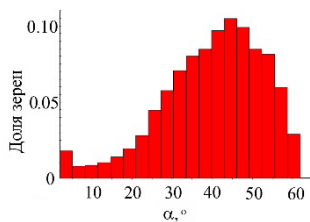
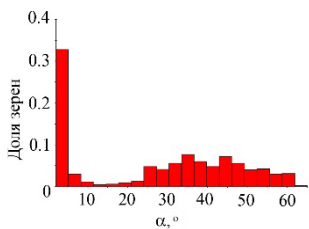
1 – ДКУП, n=1

2 – ДКУП, n=3



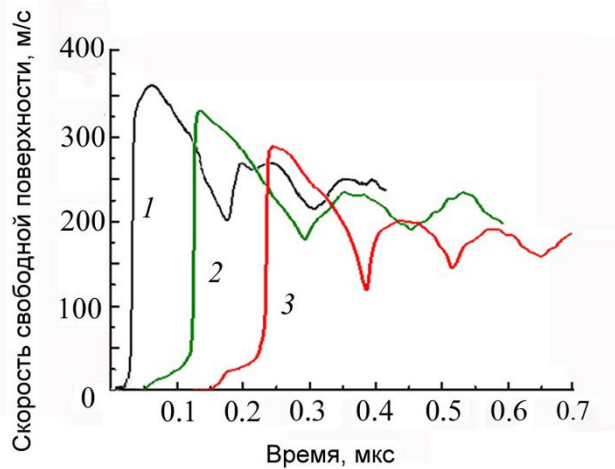
Отжиги при 400 (450°C) повышают микротвердость сплава с СМК структурой, полученной методом ДКУП, что связано с процессами распада пересыщенного α -твердого раствора меди, сопровождающимся выделением наноразмерных частиц Cu_5Zr

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

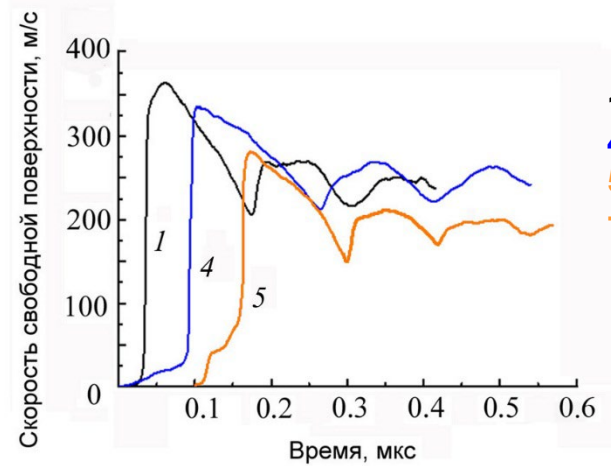


Гистограммы распределения зерен по типу границ

Влияние высокоскоростного ДКУП и последующего отжига на волновые профили и динамические свойства сплава Cu-0.03%Zr



1- закалка
2 - ДКУП, n=1
3-ДКУП, n=1
+450°C



1- закалка
4- ДКУП, n=3
5-ДКУП, n=3
+450°C

Установлено, что однократное ДКУП сплавов Cu-0.1%Cr и Cu-0.03%Zr, приводящее к измельчению кристаллитов от 300 до 1-5 мкм, увеличивает характеристики упруго-пластического перехода в 1.8-2.8 раза.

Режим обработки, тип структуры	Pmax, ГПа	Ufs max, м/с	UHEL, м/с	ΔUfs, м/с	σHEL, ГПа	Y, 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

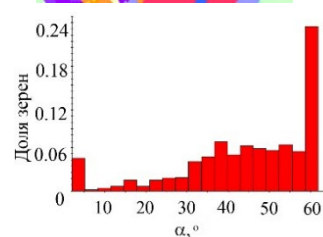
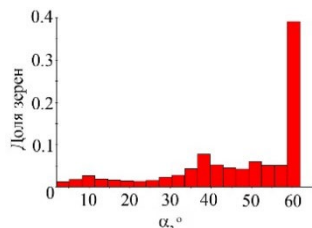
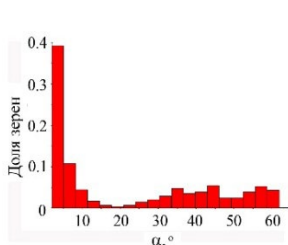
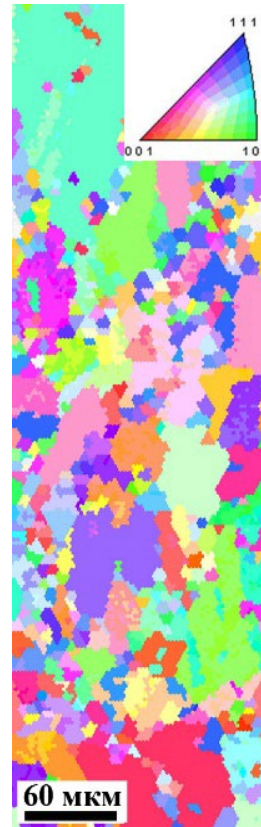
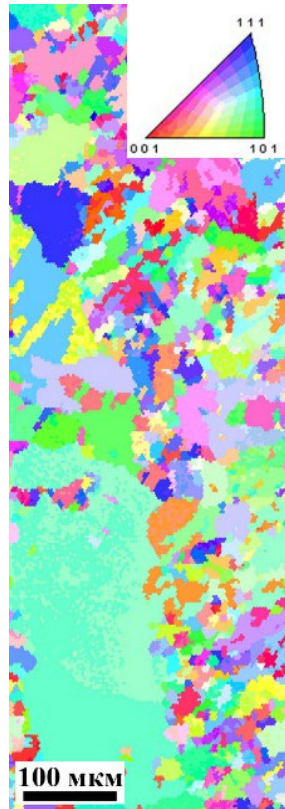
Pmax – max давление ударного сжатия; Ufs max – max скорость свободной поверхности; UHEL – скорость поверхности на фронте упругого предвестника; ΔUfs – величина спада скорости от max до первого min в момент откола; σHEL – динамический предел упругости; Y – динамический предел текучести; σSP – динамическая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

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

ДКУП, n=3

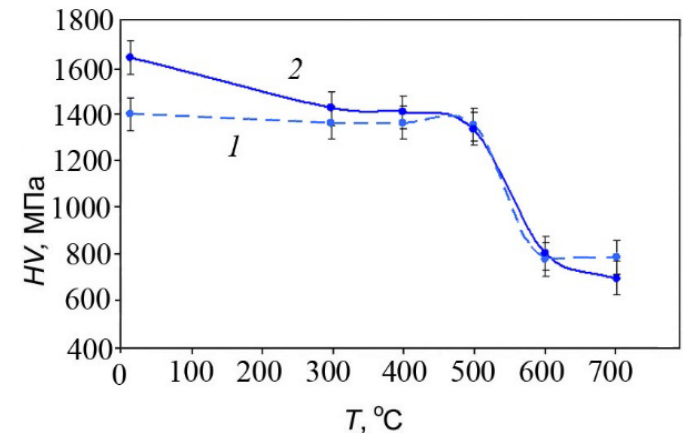
ДКУП+ 450°C

ДКУП +700°C



Гистограммы распределения зерен по типу границ

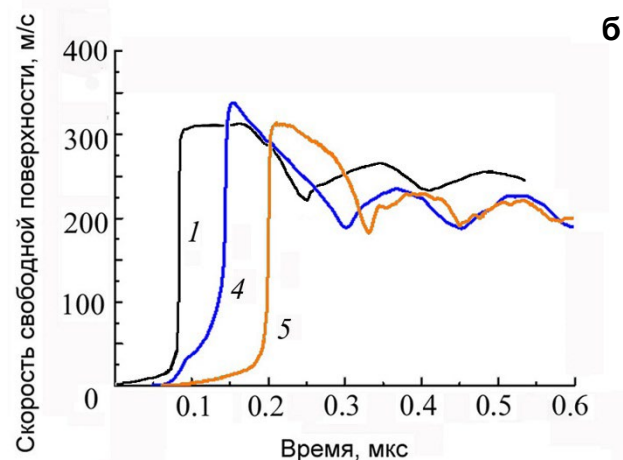
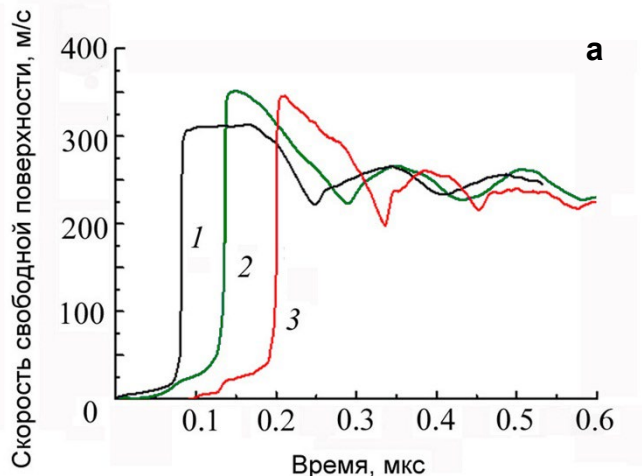
Изменение микротвердости сплава Cu-0.1%Cr с СМК структурой, полученной методом ДКУП, от температуры отжига. 1 – ДКУП, n=1; 2 – ДКУП, n=3



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 рекристаллизацией.

Увеличение температуры отжига до 550-700°C приводит к снижению микротвердости, что обусловлено развитием процесса рекристаллизации

Влияние высокоскоростного ДКУП и последующего отжига на волновые профили и динамические свойства сплава Cu-0.1%Cr



Диспергирование структуры при ДКУП до 0.2–0.5 мкм увеличивает динамический предел упругости, динамический предел текучести и динамическую (откольную) прочность сплава Cu–0.1%Cr в 1.5–4.0 раза по сравнению с исходным КК состоянием.

Режим обработки, тип структуры	P_{max} , ГПа	$U_{fs\ max}$, м/с	U_{HEL} , м/с	ΔU_{fs} , м/с	σ_{HEL} , ГПа	γ , 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

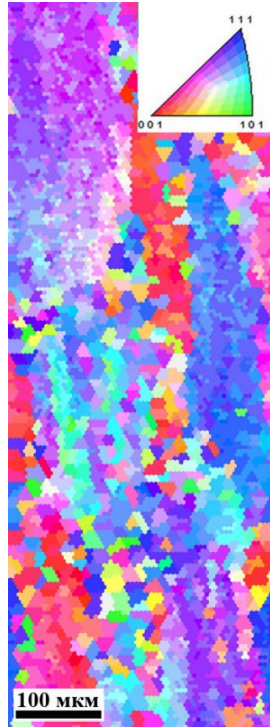
P_{max} – макс давление ударного сжатия; $U_{fs\ max}$ – макс скорость свободной поверхности; U_{HEL} – скорость поверхности на фронте упругого предвестника; ΔU_{fs} – величина спада скорости от $U_{fs\ max}$ до первого min в момент откола; σ_{HEL} – динамический предел упругости; γ – динамический предел текучести σ_{SP} – динамическая (откольная) прочность; h_{sp} – толщина откольной пластины

Эволюция структуры медных композитов с графеном, полученных синтезом «in-situ» под слоем солевого расплава в Институте высокотемпературной электрохимии УрО РАН

99,9% Cu

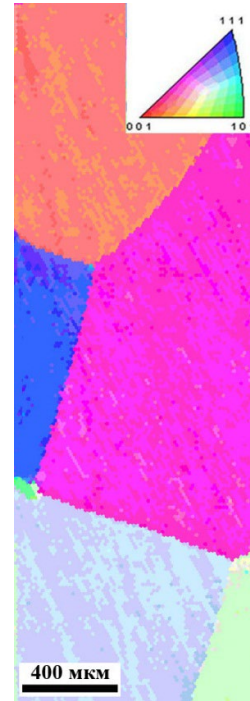


Исходное состояние



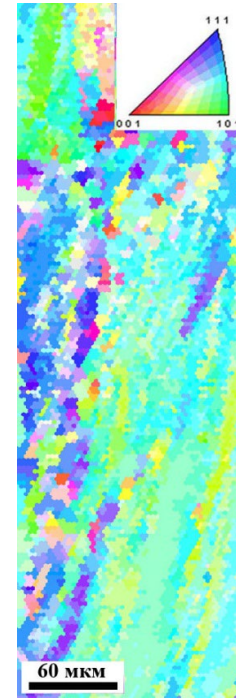
ДКУП, n=1

Cu-0.02%Gn (сплав 1)

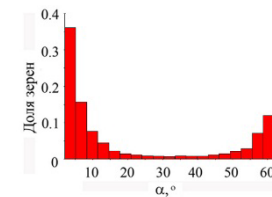
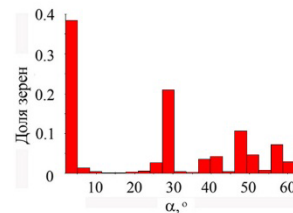
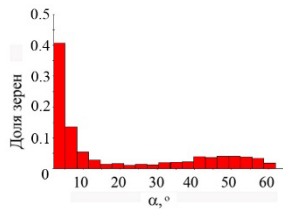
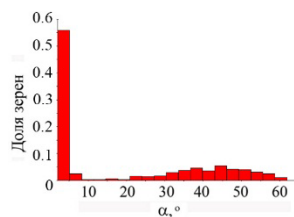


Исходное состояние

Cu-0.02%Gn (сплав 2)

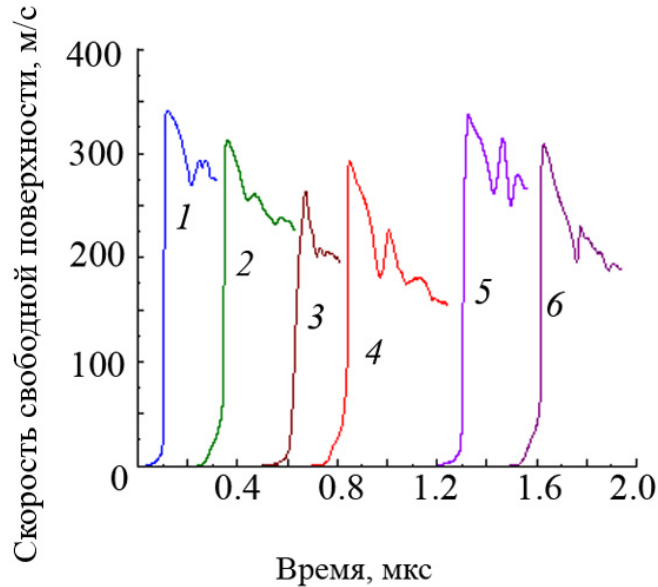


ДКУП, n=1



Гистограммы распределения зерен по типу границ

Динамические свойства меди и медных композитов с графеном при испытании на ударное сжатие



- Волновые профили образцов:
- 1 – 99.9%Cu в исходном КК состоянии
 - 2 – 99.9%Cu после ДКУП, n=1
 - 5 – Cu-0.02%Gn в исх. КК состоянии
 - 6 – Cu-0.02%Gn после ДКУП, n=1

Режим обработки	Hv, МПа	Pmax, ГПа	Ufs max, м/с	UHEL м/с	ΔUfs, м/с	σHEL, ГПа	Y, ГПа	σSP, ГПа	hsp, мм
99.9%Cu исходное КК	630	6.34	341	3	72	0.06	0.03	1.39	0.19
99.9%Cu ДКУП, n=1	1100	5.79	313	16	58	0.33	0.17	1.13	0.26
Cu-0.02%Gn (сплав 2) КК	700	6.2	336	5	76	0.1	0.05	1.47	0.16
Cu-0.02%Gn (2) ДКУП, n=1	1400	5.7	309	20	113	0.4	0.21	2.26	0.3

Hv – микротвердость; Pmax – макс давление ударного сжатия; Ufs max – макс 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; Y – динамический предел текучести σSP – динамическая (откольная) прочность; hsp – толщина откольной пластины

ВЫВОДЫ

- Изучены динамические свойства меди с СМК и СМК+НК структурой и сплавов Cu–0.03%Zr и Cu–0.1%Cr с СМК структурой, полученной ДКУП, в условиях ударного сжатия при субмикросекундных длительностях нагрузки. Установлено, что медь с СМК и СМК+НК 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 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 однократное ДКУП сплавов Cu–0.1%Cr и Cu–0.03%Zr, приводящее к измельчению кристаллитов от 300 до 1-5 мкм, увеличивает характеристики упруго-пластического перехода в 1.8-2.8 раза, по сравнению с исходным КК состоянием. Дальнейшее диспергирование структуры до 0.5 мкм при трехкратном ДКУП до увеличивает динамический предел упругости, динамический предел текучести и динамическую (откольную) прочность сплава Cu–0.1%Cr в 1.5-4.0 раза по сравнению с исходным КК состоянием.

Увеличение откольной прочности сплавов в 1.1-1.2 раза по сравнению с медью, связано с дополнительным упрочнением, обусловленным выделением наночастиц Cr и Cu_5Zr на границах и внутри зерен в процессе ДКУП. Последующие отжиги при 400-450С приводят к дополнительному увеличению динамических свойств в 1.2-1.9 раз.

Показано, что ДКУП композита на основе меди с микродобавкой графена приводит к увеличению динамического предела упругости и динамического предела текучести в 4.0-5.6 раз и откольной прочности в 1.5-1.8 раз, по сравнению с исходным КК состоянием.



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



Спасибо за внимание!