

# ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ И КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ МЕДИ

И.В. Хомская<sup>1</sup>, Д.Н. Абдуллина<sup>1</sup>, С.В. Разоренов<sup>2</sup>,  
Е.В. Шорохов<sup>3</sup>, К.В. Гаан<sup>3</sup>



<sup>1</sup> *Институт физики металлов имени М.Н. Михеева  
Уральского отделения РАН, Екатеринбург*



<sup>2</sup> *Федеральный исследовательский центр проблем  
химической физики и медицинской  
химии РАН, Черноголовка*



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



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

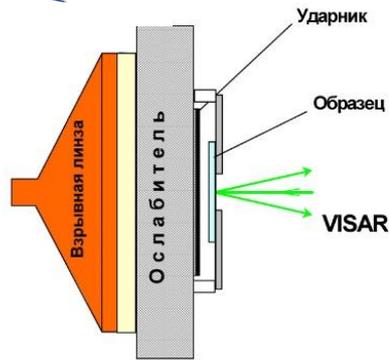
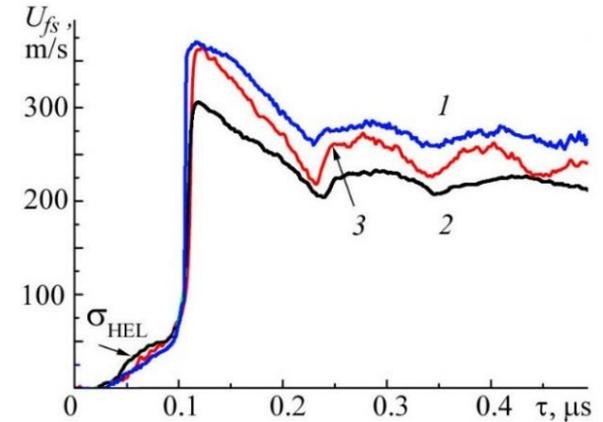
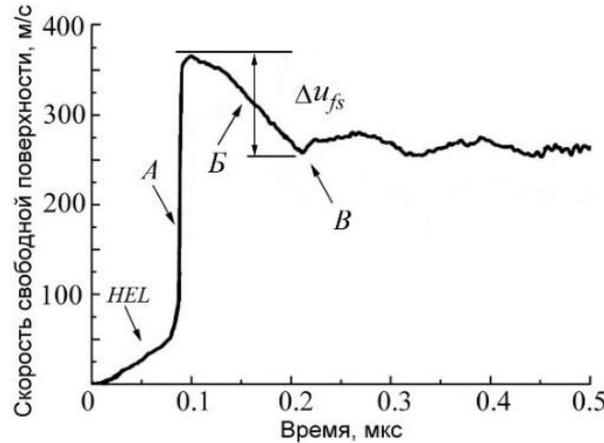


Схема ударно-волнового нагружения

• Ударное сжатие образцов толщиной  $\sim 2$  мм в виде дисков диаметром 16 мм и пластин, размером 12x12 мм осуществляли путем прямого соударения алюминиевого ударника толщиной  $\sim 0.4$  мм, разогнанного с помощью специального взрывного устройства до скорости  $620 \pm 30$  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  $\sim 1$  нс и пространственное  $\sim 0.1$  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; В – волна разрежения; В – момент формирования откола;  $\Delta U_{fs}$  – величина спада скорости от максимума до минимума в момент откола;

**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)

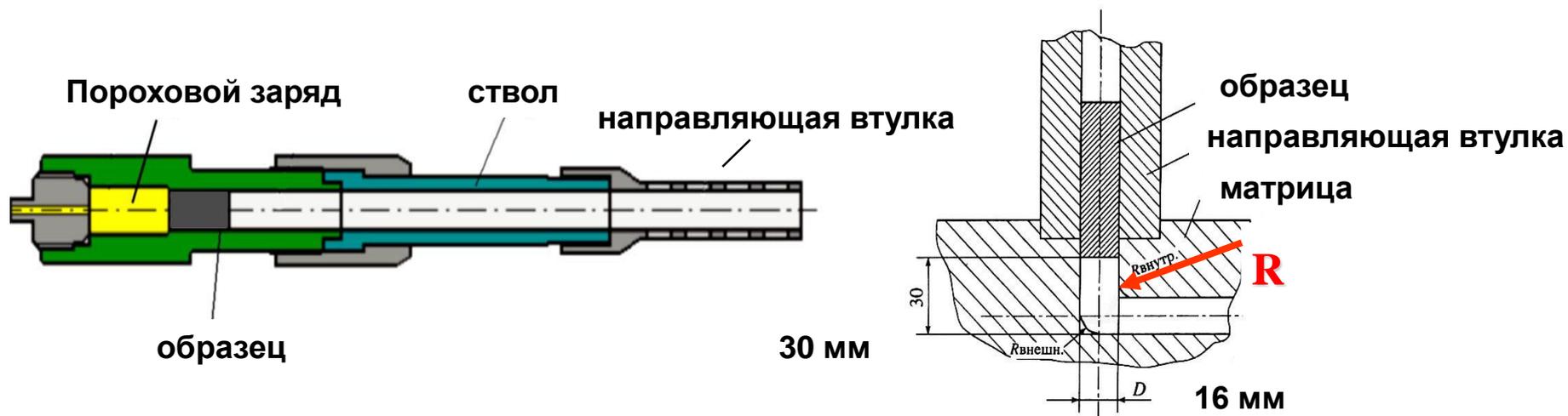
$\sigma_{HEL} = 0,62$ ;  $Y = 0,30$ ;  $\sigma_{sp} = 1,79$  ГПа

3 – СМК+НК (0,05-0,40 мкм)

$\sigma_{HEL} = 0,71$ ;  $Y = 0,30$ ;  $\sigma_{sp} = 2,51$  ГПа

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 (В). 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.

# Схема динамического канально-углового прессования (ДКУП)



**МАТЕРИАЛЫ:** микролегированные сплавы  $\text{Cu-(0,03-0,06)\%Zr}$ ;  $\text{Cu-(0,1-0,2)\%Cr}$  и композиты на основе  $\text{Cu}$ , легированные микродобавками графена и углеродными нанотрубками (исходный размер зерна 200-400 мкм;  $HV=600-680$  МПа);

**ОБРАЗЦЫ:**  $d=10-16$  мм, длина=65 -160 мм;

## ПАРАМЕТРЫ ДКУП:

- Разгон образца - при помощи порохового заряда.
- Матрицы из 2-х каналов диаметром 16 и 14 мм, пересекающихся под углом  $90^\circ$  (радиус закругления внутреннего угла пересечения каналов:  $R=0$ .)
- Скорость разгона образцов ( $V_0$ ) – 230-250 м/с.
- Скорость деформации материала  $10^4-10^5$  с $^{-1}$ .
- Количество циклов прессования  $n = 1-4$
- Длительность одного цикла  $5 \cdot 10^{-4}$  с.
- Давление в области угла поворота  $\leq 1,5-2$  ГПа.

**Патент РФ 2006 г. ( № 2283717).**

**«Способ динамической обработки материалов»** авторы: Шорохов Е. В., Жгилев И.Н. (РФАЦ-ВНИИТФ, Снежинск), Валиев Р.З. ( УГАТУ, Уфа)



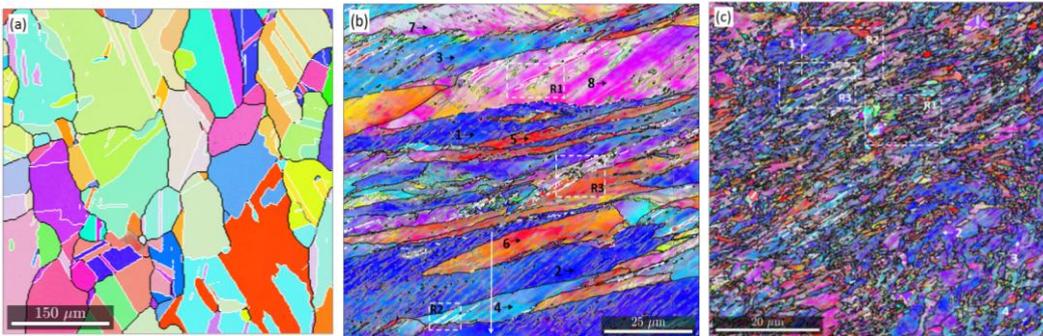
# Влияние дисперсности кристаллической структуры на механические свойства меди

Исходная КК структура  
100 мкм

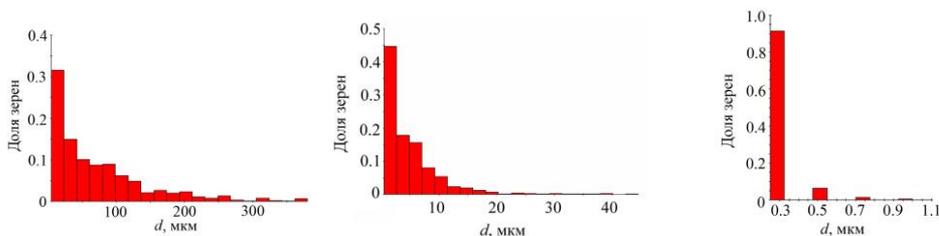
СМК структура,  
0.5-1 мкм,  
ДКУП, n=1

СМК +НК  
0.05-0,4 мкм,  
ДКУП, n=4

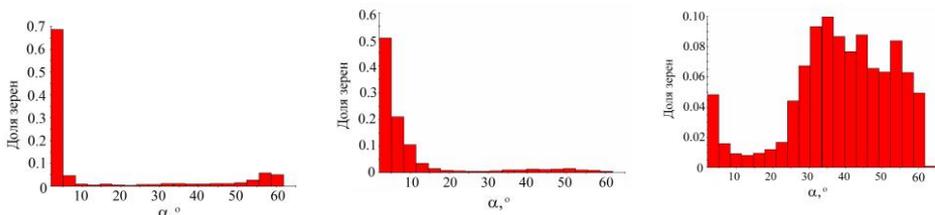
испытания на одноосное растяжение ( $V_{деф}=10^{-2} \text{ с}^{-1}$ )



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



Гистограммы распределения зерен по размерам



Гистограммы распределения границ зерен по углам разориентировки

испытания на ударное сжатие ( $P=5-7 \text{ ГПа}$ ,  $V_{деф}=10^5 \text{ с}^{-1}$ )

Структура, размер зерна, обработка	$\sigma_{HEL}$ , ГПа	$\gamma$ , ГПа	$\sigma_{sp}$ , 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

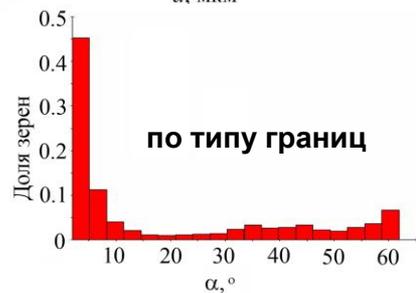
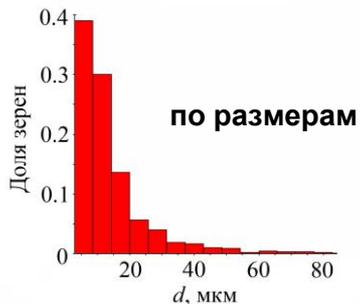
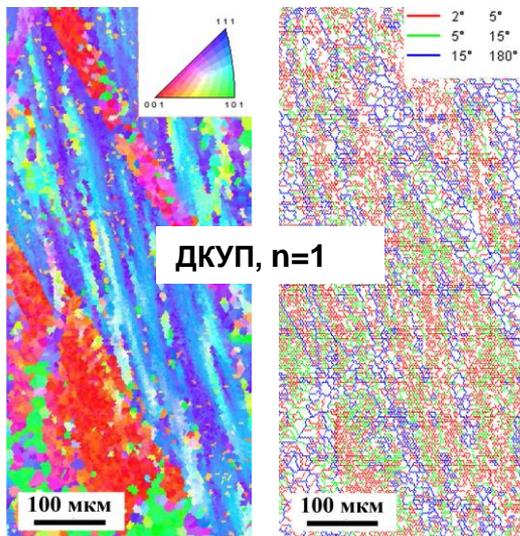
Динамические свойства **СМК и НК меди** выше ее **КК** аналога: так  $\sigma_{HEL}$  и  $\gamma$  в 6 раз,  $\sigma_{sp}$  в 1.4 раза. Это связано с формированием в меди при ДКУП структуры, состоящей из сильно разориентированных зерен размерами от 50 до 400 нм с преимущественно неравновесными большеугловыми 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  $10^5 \text{ с}^{-1}$ .

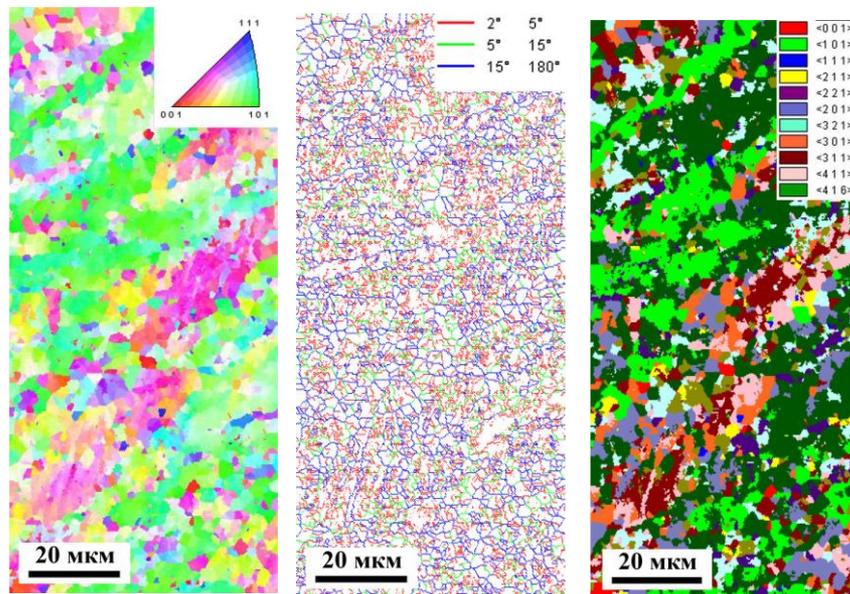


# Результаты EBSD анализа сплавов Cu-0.1%Cr и Cu-0,03%Zr с СМК структурой, полученной методом ДКУП

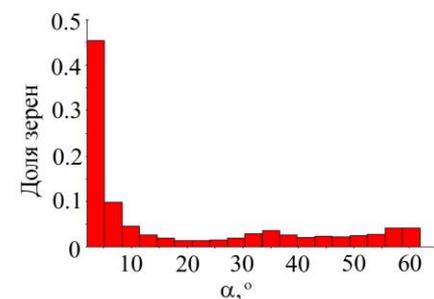
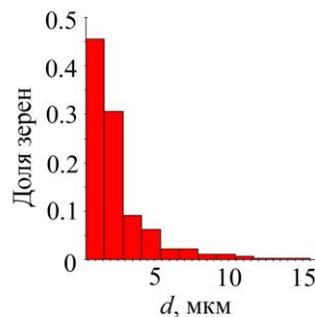
Cu-0.1%Cr



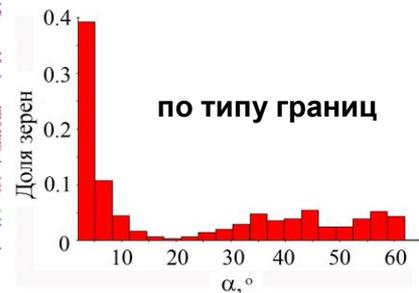
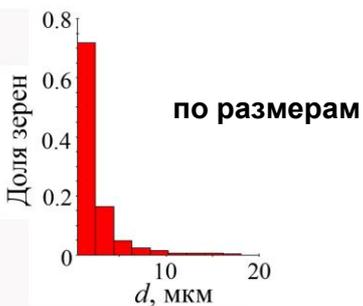
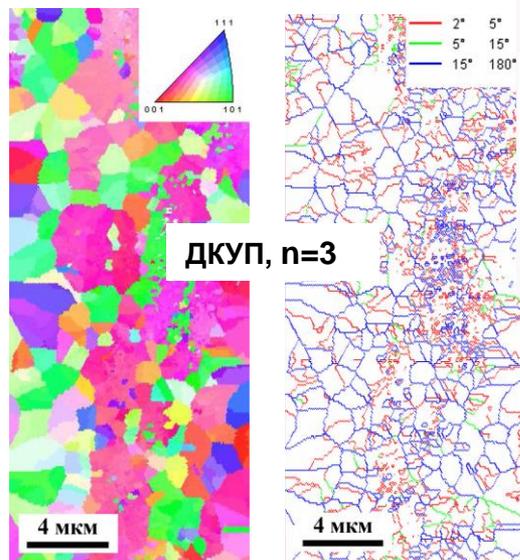
Cu-0.03%Zr ДКУП, n=3



Карты распределения зерен по кристаллографической ориентировке, типу границ и размерам



Гистограммы распределения зерен по размерам и границ зерен по углам разориентировки





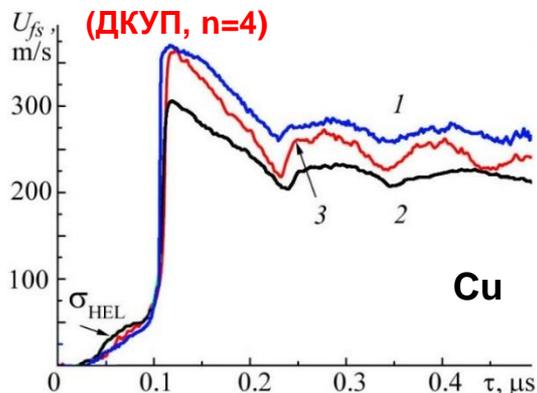
# Влияние легирования Cr и Zr на динамические свойства меди

Профили скорости свободной поверхности образцов с различными кристаллическими структурами

1–КК структура, 100 мкм

2–СМК, 0.5 -1 мкм (ДКУП, n=1)

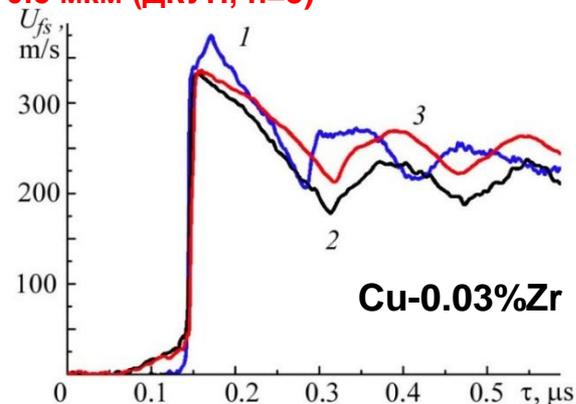
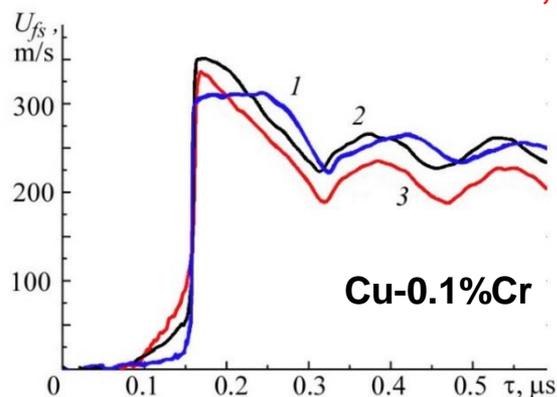
3–СМК+НК 0.05-0.4 мкм  
(ДКУП, n=4)



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	$\sigma_{HEL}$ , ГПа	$\gamma$ , ГПа	$\sigma_{sp}$ , 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

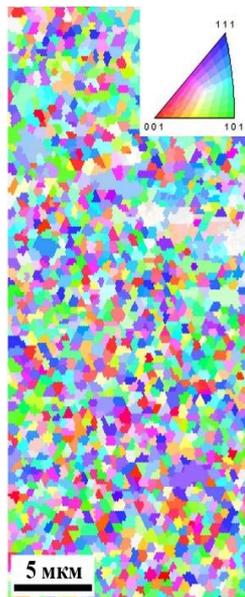
Определено, что ДКУП сплавов, приводящее к измельчению кристаллитов от 200–400 до 1–5 и (0.2-0.5) мкм увеличивает  $\sigma_{HEL}$  и  $\gamma$  в 1.9–3.7 раза, по сравнению с исходным КК состоянием. Диспергирование структуры сплава Cu–0.1Cr до СМК состояния увеличивает в 1.5 раза откольную прочность, по сравнению с исходным КК состоянием. Повышенный уровень динамических свойств сплавов, по сравнению с медью, связан с дополнительным упрочнением, обусловленным выделением наночастиц Cr и  $Cu_5Zr$  на границах и внутри зерен в процессе ДКУП

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

Исходная КК

ДКУП,  $n=3$

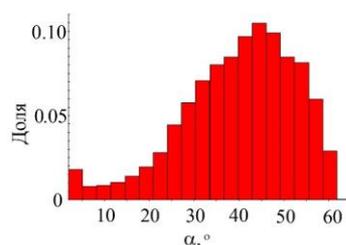
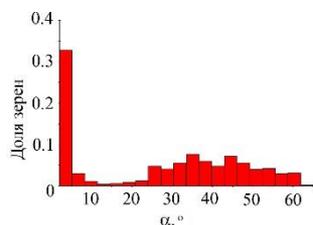
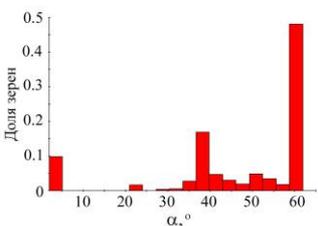
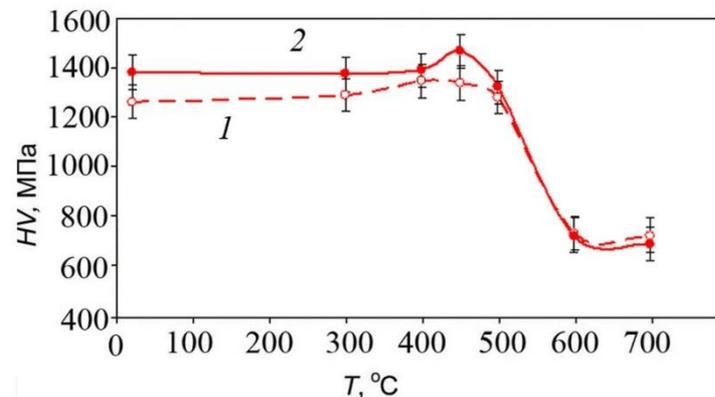
ДКУП+ 450°C



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

1 – ДКУП,  $n=1$

2 – ДКУП,  $n=3$



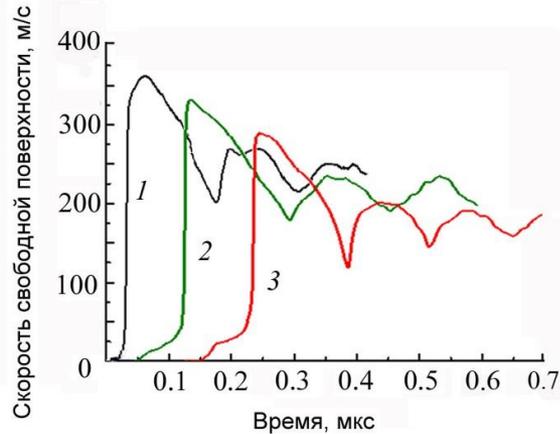
Гистограммы распределения границ зерен по углам разориентировки

Отжиги при 400 (450°C) повышают микротвердость сплава с СМК структурой, полученной методом ДКУП, что связано с процессами распада пересыщенного  $\alpha$ -твердого раствора меди, сопровождающимся выделением наноразмерных частиц  $\text{Cu}_5\text{Zr}$

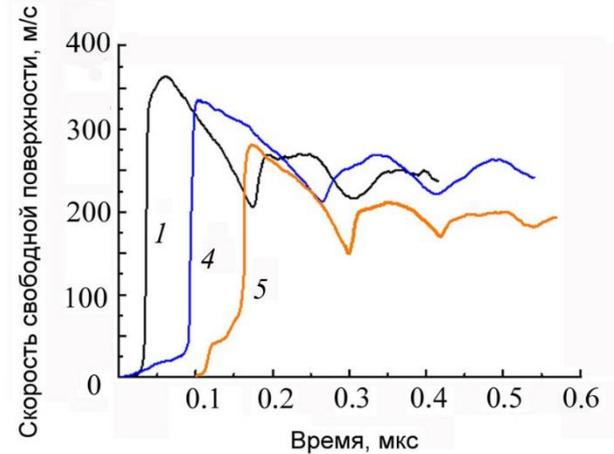
Увеличение температуры отжига до 500-600°C приводит к снижению микротвердости, что обусловлено развитием процесса рекристаллизации



# Влияние высокоскоростной деформации методом ДКУП и оследующего отжига на динамические свойства сплава Cu-0.03%Zr



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

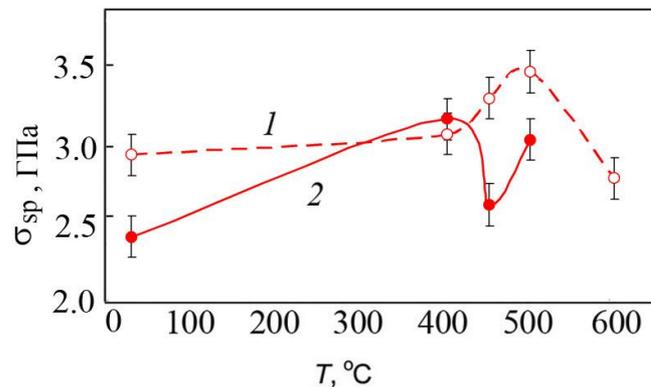
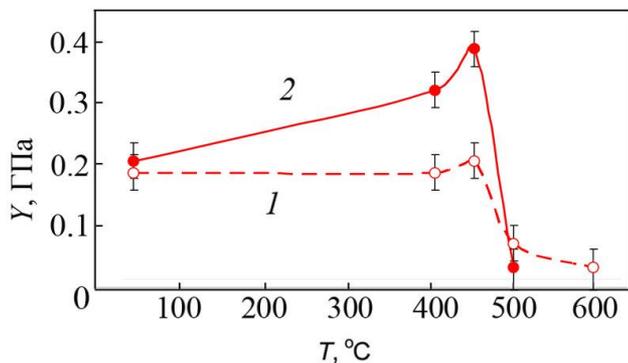
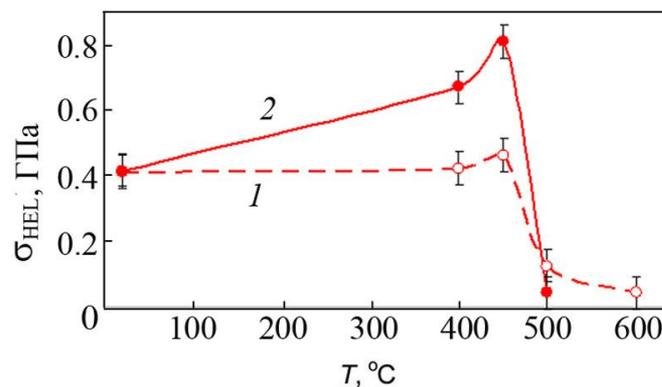
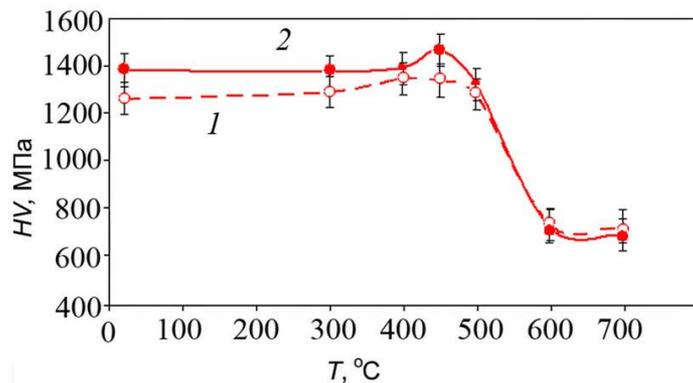


1- закалка  
4- ДКУП, n=3  
5-ДКУП, n=3 +450°С

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°С, 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°С, 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

# Влияние высокоскоростной деформации методом ДКУП и последующего отжига на динамические свойства сплава Cu-0.03%Zr

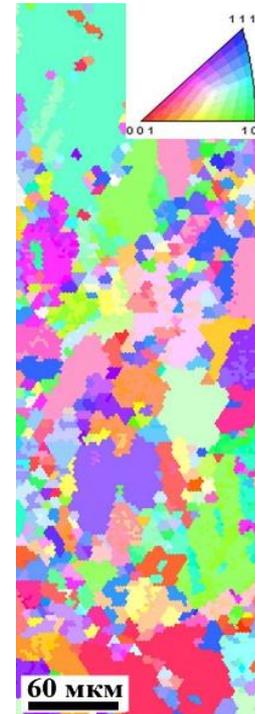
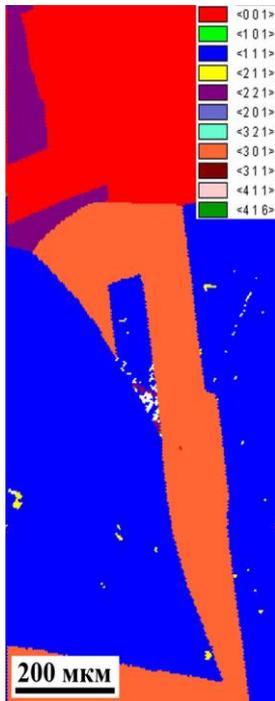


Изменение HV- микротвердости,  $\sigma_{HEL}$  – динамического предела упругости;  
 $Y$  – динамического предела текучести и  $\sigma_{sp}$ – откольной прочности  
 сплава Cu-0.03%Zr с СМК структурой, полученной ДКУП от температуры отжига.  
 1 – ДКУП, n=1  
 2 – ДКУП, n=3

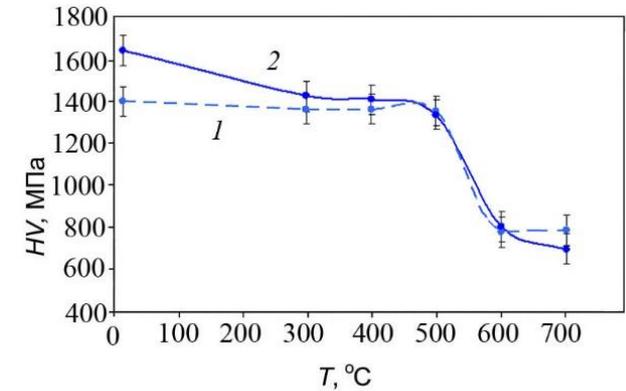


# Эволюция структуры и изменение микротвердости сплава Cu-0.1%Cr при ДКУП и последующих отжигах

Исходная КК    ДКУП, n=3    ДКУП+ 450°C    ДКУП +700°C

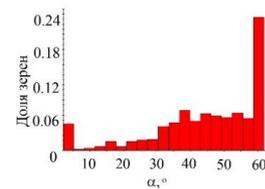
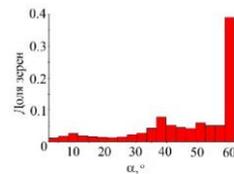
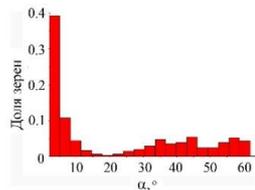
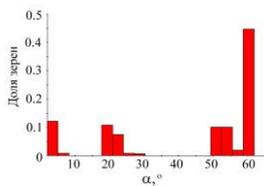


Изменение микротвердости сплава Cu-0.1%Cr с СМК структурой, полученной методом ДКУП, от температуры отжига. 1 – ДКУП, n=1; 2 – ДКУП, n=3



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

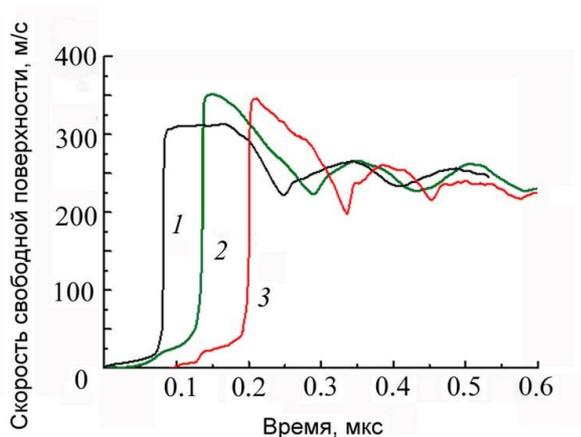
Увеличение температуры отжига до 550-700°C приводит к снижению микротвердости, что обусловлено развитием процесса рекристаллизации



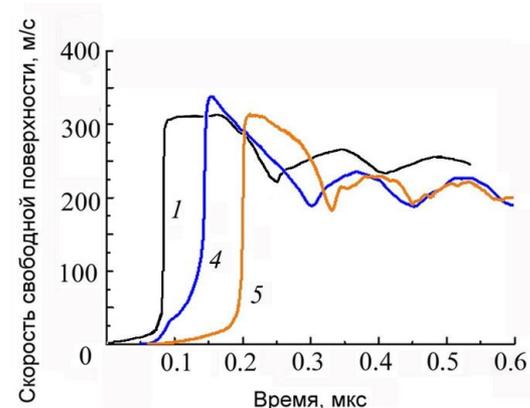
Гистограммы распределения границ зерен по углам разориентировки



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



1- закалка  
2 - ДКУП, n=1  
3-ДКУП, n=1 +400°



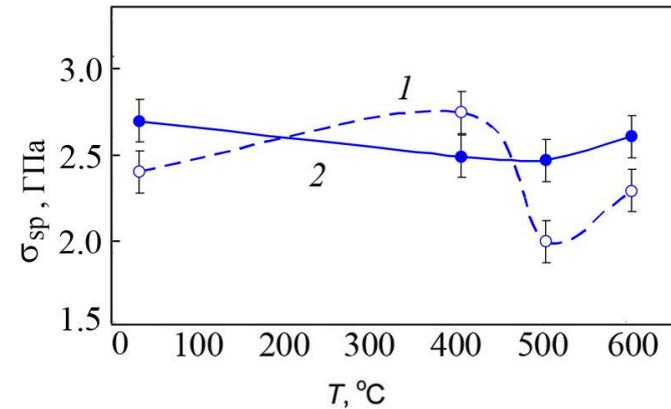
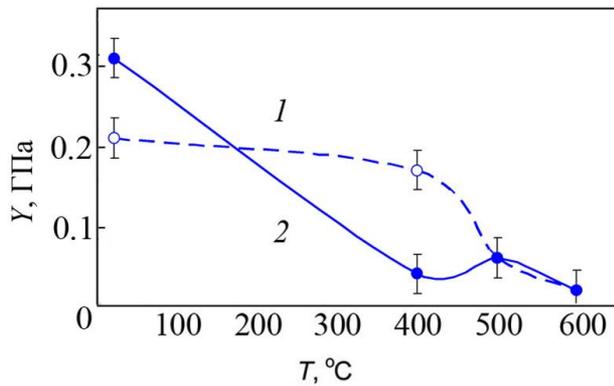
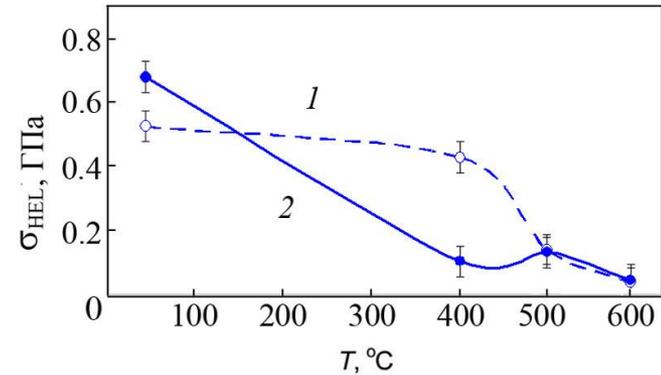
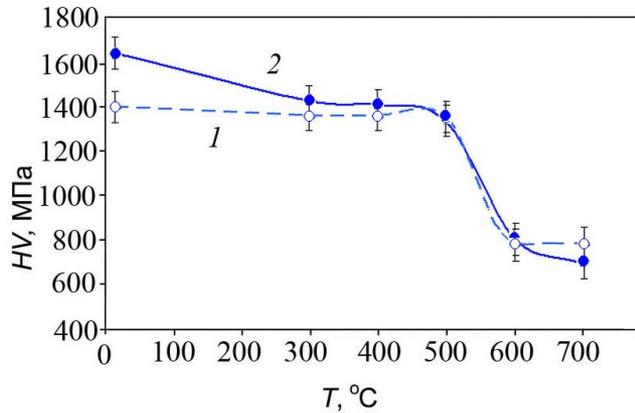
1- закалка  
4- ДКУП, n=3  
5-ДКУП, n=3 +400°С

Режим обработки, тип структуры	$P_{max}$ , ГПа	$U_{fs} \max$ , м/с	$U_{HEL}$ , м/с	$\Delta U_{fs}$ , м/с	$\sigma_{HEL}$ , ГПа	$\gamma$ , ГПа	$\sigma_{SP}$ , 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°С, 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°С, 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;  $\Delta U_{fs}$  – величина спада скорости от  $U_{fs} \max$  до первого  $\min$  в момент откола;  $\sigma_{HEL}$  – динамический предел упругости;  $\gamma$  – динамический предел текучести;  $\sigma_{SP}$  – динамическая (откольная) прочность;  $h_{sp}$  – толщина откольной пластины



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



Изменение HV-микротвердости,  $\sigma_{HEL}$  – динамического предела упругости;  
Y – динамического предела текучести и  $\sigma_{sp}$  – откольной прочности  
сплава Cu-0.1%Cr с СМК структурой, полученной ДКУП от температуры отжига.

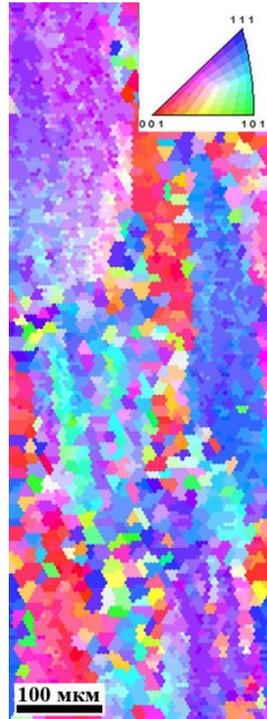
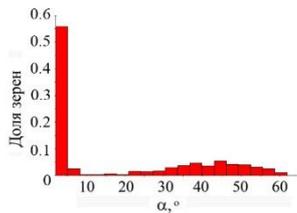
1 – ДКУП, n=1  
2 – ДКУП, n=3

# Эволюция структуры меди и медных композитов с графеном при высокоскоростной деформации методом ДКУП

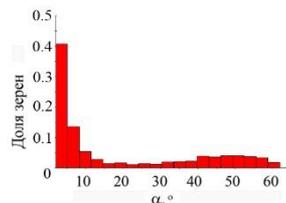
99,9% Cu



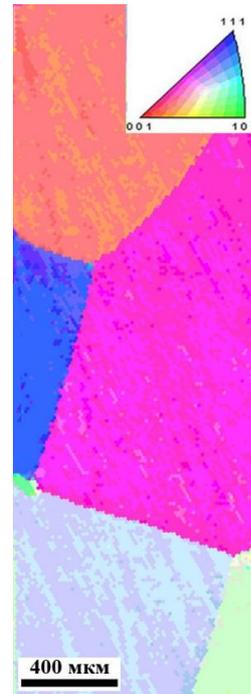
Исходное состояние



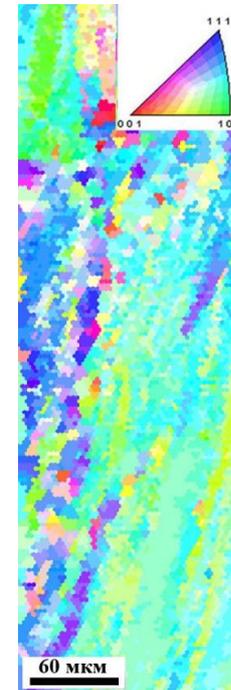
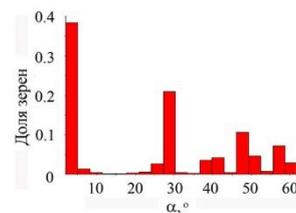
ДКУП, n=1



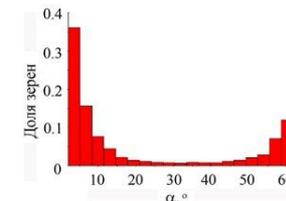
Cu-0.02%Gn (сплав 2)



Исходное состояние



ДКУП, n=1

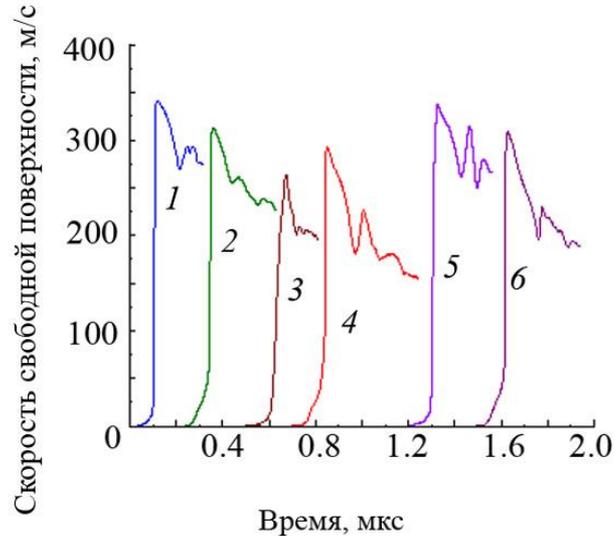


медные композиты с графеном, получены синтезом «in-situ» под слоем солевого расплава в Институте высокотемпературной электрохимии УрО РАН под рук. Л.А. Елшиной

Гистограммы распределения границ зерен по углам разориентировки



# Влияние ДКУП на микротвердость и динамические свойства меди и медных композитов с графеном при испытании на ударное сжатие ( $P = 5.7-6.3$ ГПа, $V_{\text{деф}} = 10^5$ с $^{-1}$ )



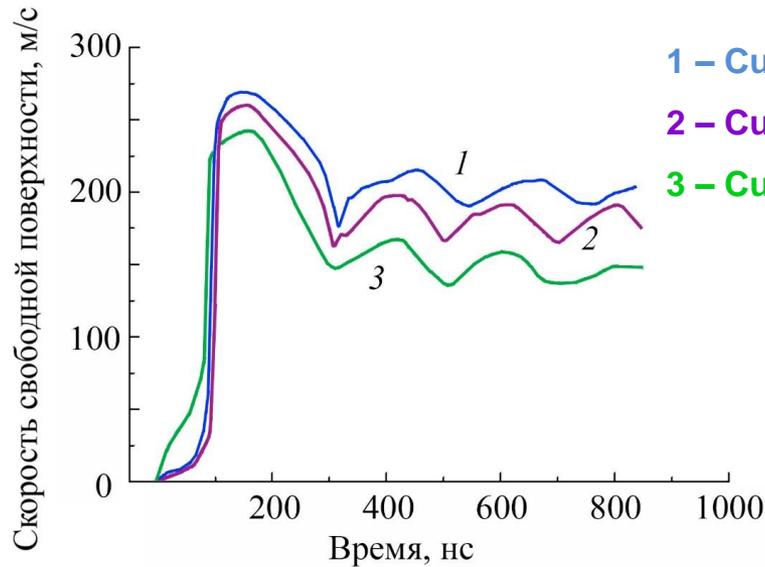
- Волновые профили образцов:
- 1 – 99.9%Cu в исходном КК состоянии
  - 2 – 99.9%Cu после ДКУП, n=1
  - 5 – Cu-0.02%Gn в исх. КК состоянии
  - 6 – Cu-0.02%Gn после ДКУП, n=1

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 – 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



# Влияние ДКУП на динамические свойства меди и медного композита, легированного углеродными нанотрубками ( УНТ) при испытании на ударное сжатие ( $P = 4.4-4.5$ ГПа, $V_{\text{деф}} = 10^5 \text{ с}^{-1}$ )



Волновые профили образцов:

1 – Cu (M1) в исходном КК состоянии

2 – Cu (M1) КК состояние +УНТ

3 – Cu (M1)+ УНТ + ДКУП, n=1, СМК состояние

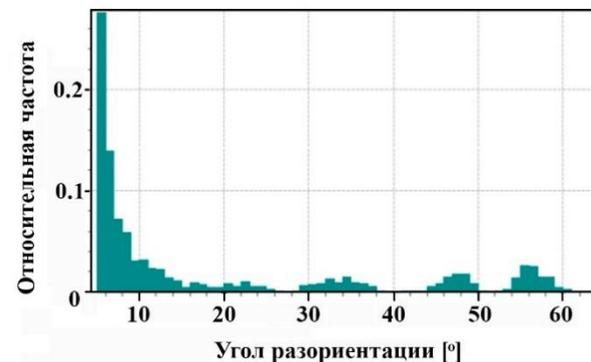
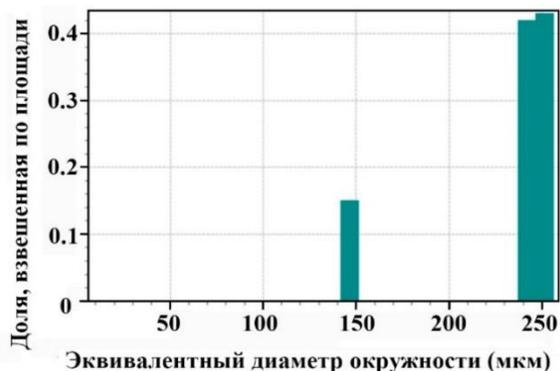
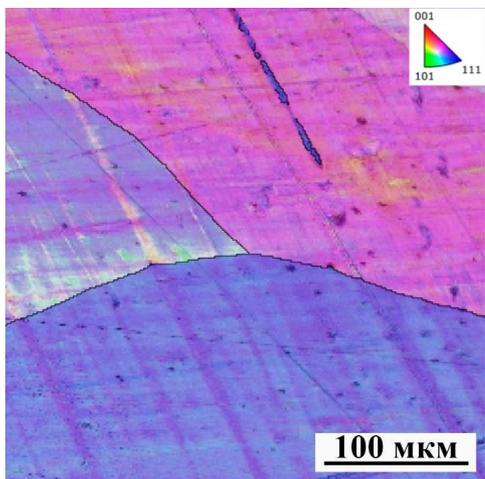
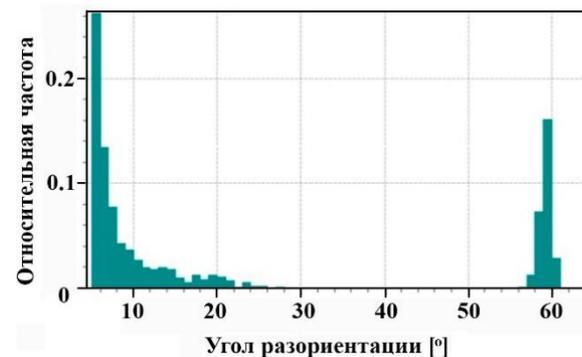
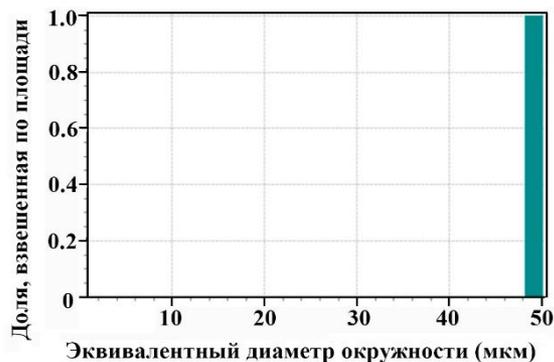
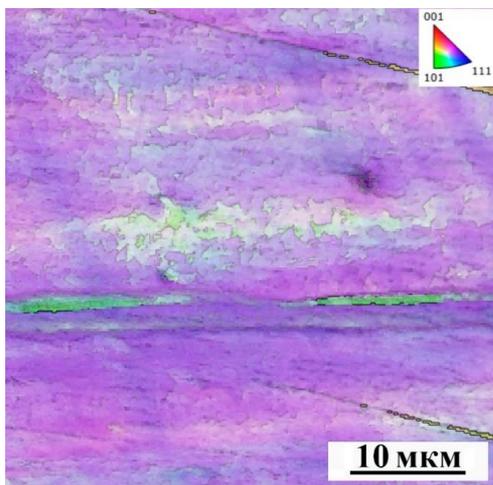
литой медный композит, модифицированный многостенными углеродными нанотрубками (при концентрации УНТ-0.002 мас.%) был получен в Институте химии твердого тела и механохимии СО РАН под рук. Б.П. Толочко

Режим обработки, тип структуры	$P_{\text{max}}$ , ГПа	$U_{\text{fs max}}$ , м/с	$U_{\text{HEL}}$ , м/с	$\Delta U_{\text{fs}}$ , м/с	$\sigma_{\text{HEL}}$ , ГПа	$Y$ , ГПа	$\sigma_{\text{SP}}$ , ГПа	$h_{\text{sp}}$ , мм
Cu (M1), исх. КК сост.	4.9	269	6	93	0.12	0.06	1.74	0.50
Cu исх. КК сост. +УНТ	4.8	261	4	100	0.08	0.04	1.86	0.45
Cu +УНТ, ДКУП, n=1	4.4	243	21	97	0.43	0.19	1.78	0.46

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



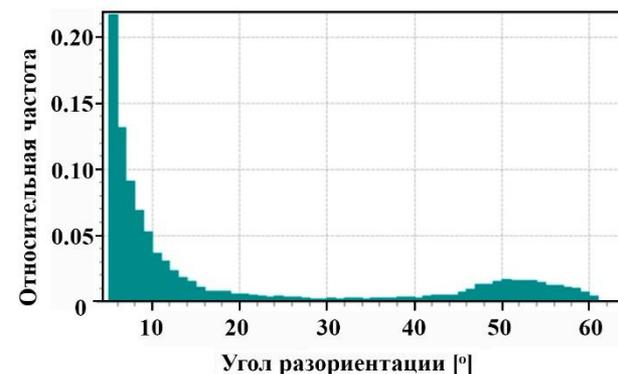
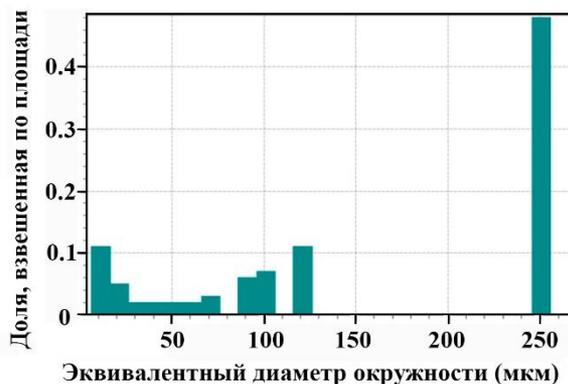
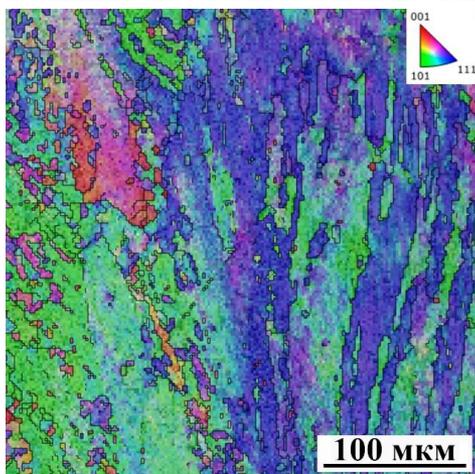
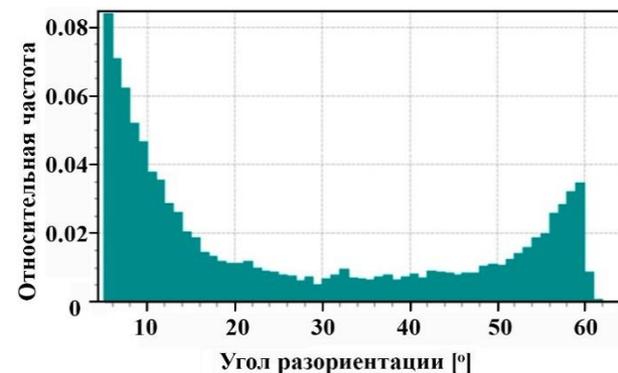
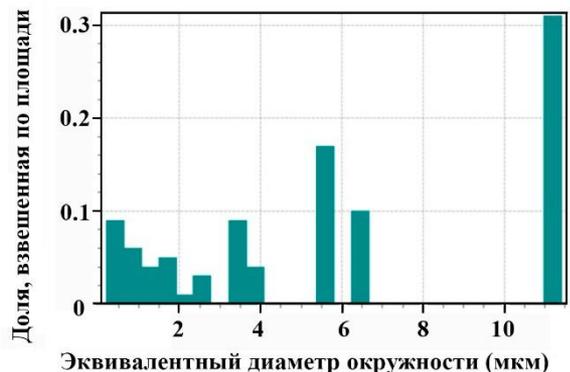
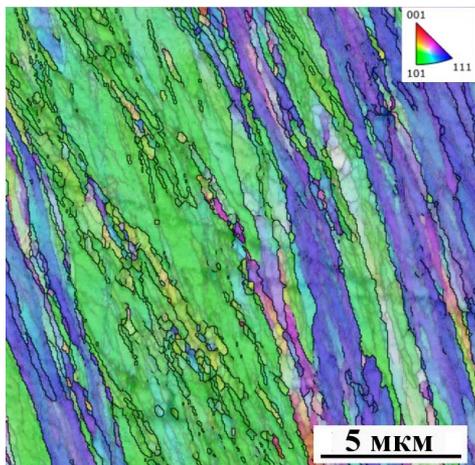
# Результаты EBSD анализа структуры литого медного композита с углеродными нанотрубками, подвергнутого ударному сжатию (Cu +УНТ+УВН)



Гистограммы распределения зерен по размеру

Гистограммы распределения границ зерен по углам разориентировки

# Результаты EBSD анализа структуры медного композита с углеродными нанотрубками, подвергнутого высокоскоростной деформации методом ДКУП, $n=1$ и ударному сжатию (Cu +УНТ+ ДКУП, $n=1$ +УВН)



Гистограммы распределения зерен по размерам

Гистограммы распределения границ зерен по углам разориентировки

## ВЫВОДЫ

- Изучены динамические свойства сплавов и композитов на основе меди 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 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.
- 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<sub>5</sub>Zr 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 композитов на основе меди с микродобавками графена и углеродных нанотрубок 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!**