



## ЗАБАБАХИНСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ

Российский Федеральный Ядерный Центр –

Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е.И. Забабахина

19 – 23 мая 2025 г.

Снежинск, Россия

# Влияние высокоскоростной динамической деформации и интенсивной пластической деформации кручением под высоким давлением на состояние границ зерен в Ni, Nb и низколегированных бронзах

*В.В. Попов<sup>1</sup>, Е.Н. Попова<sup>1</sup>, Е.В. Осинников<sup>1</sup>, С.А. Судакова<sup>1</sup>  
Р.М. Фалахутдинов<sup>1</sup>, Е.В., Шорохов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия;

<sup>2</sup>Российский федеральный ядерный центр ВНИИ технической физики, Снежинск,  
Россия;

# Исследуемые материалы

Ni, Nb, Оловянистая бронза (0.56 ат. %Sn) Гафниевая бронза (0.28 ат. %Hf)

## Исходное состояние

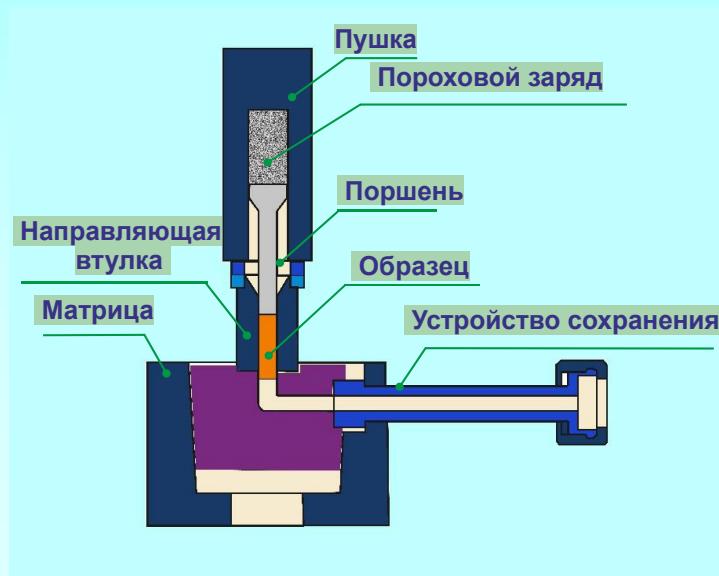
Ni – отжиг 1000°C, 2 ч

Nb – отжиг 850°C, 4 ч

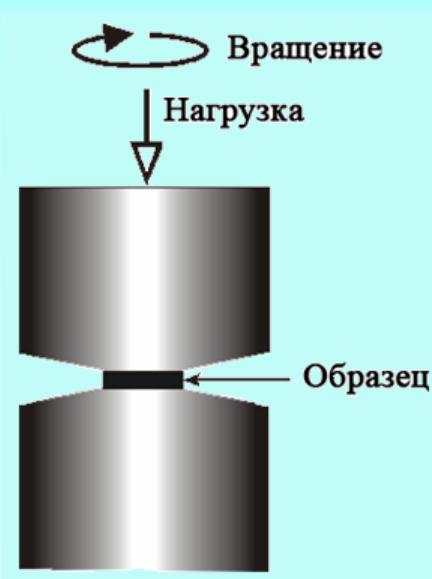
Оловянистая бронза – отжиг 800°C, 1 ч    Гафниевая бронза – закалка от 950°C

## Обработки

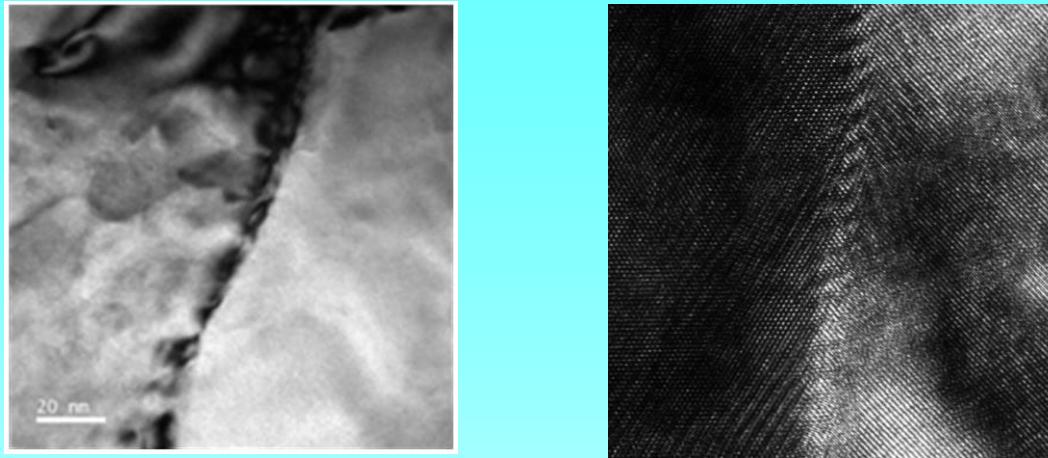
### ДКУП



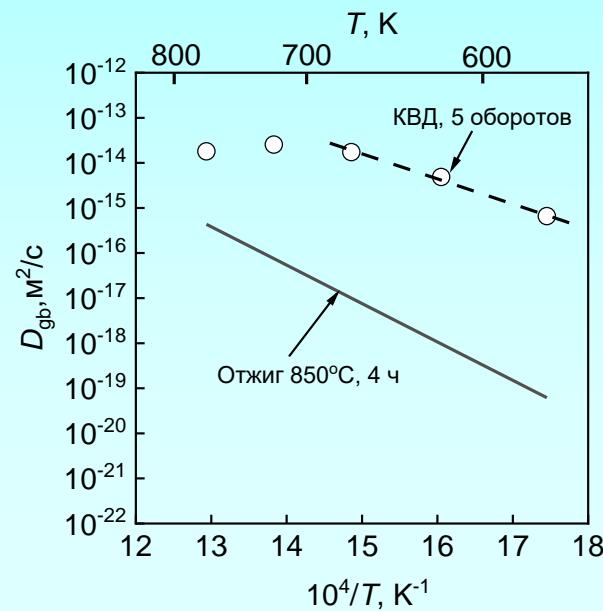
### КВД



# Микрофотографии границ зерен в Nb, продеформированном КВД на 5 оборотов

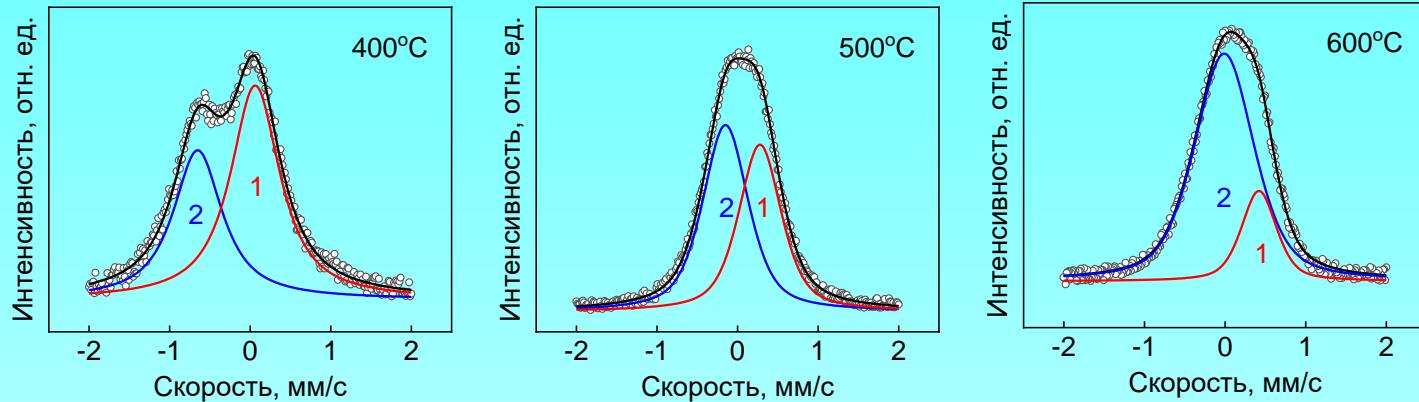


Сравнение коэффициентов зернограничной диффузии в отожженном Nb и Nb, продеформированном КВД

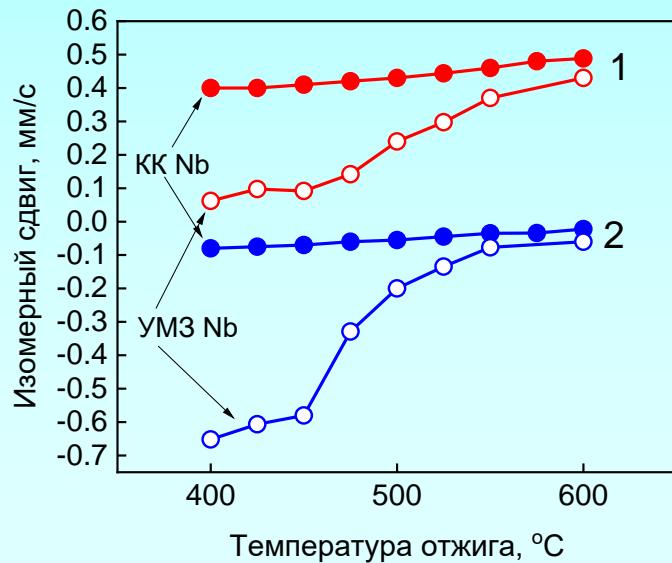


# Эмиссионная ядерная гамма-резонансная (мессбауэровская) спектроскопия границ зерен

Примеры эмиссионных мессбауэровских спектров, снятых с образцов УМЗ Nb

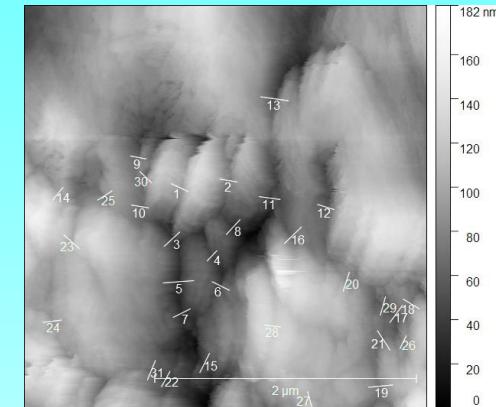
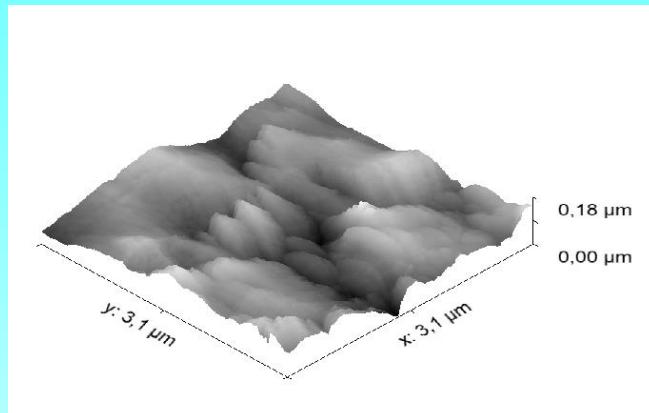
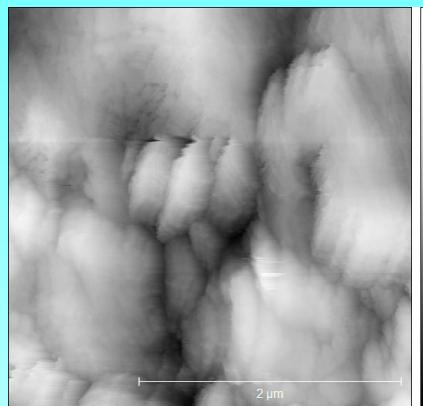


Зависимости изомерных сдвигов спектральных линий  $^{57}\text{Co}$ ( $^{57}\text{Fe}$ ), снятых с образцов крупнозернистого и УМЗ Nb, от температуры отжига

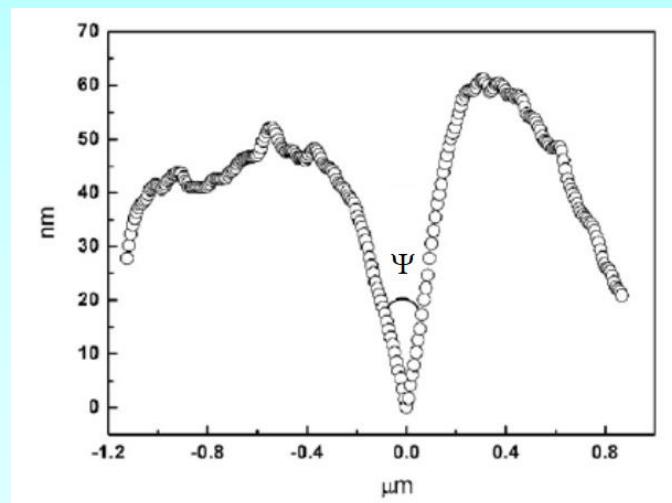
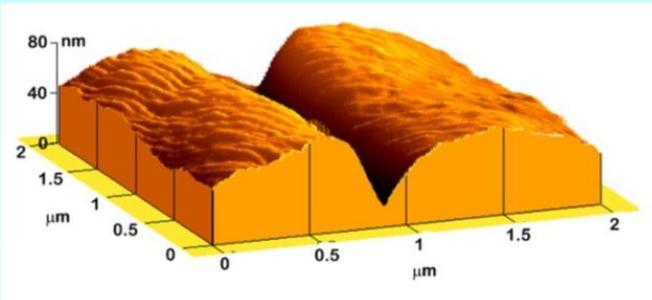


# Определение энергии границ зерен методом измерения двугранных углов канавок термического травления

СТМ микрофотография структуры оловянистой бронзы подвергнутой ДКУП и ее 3d изображение



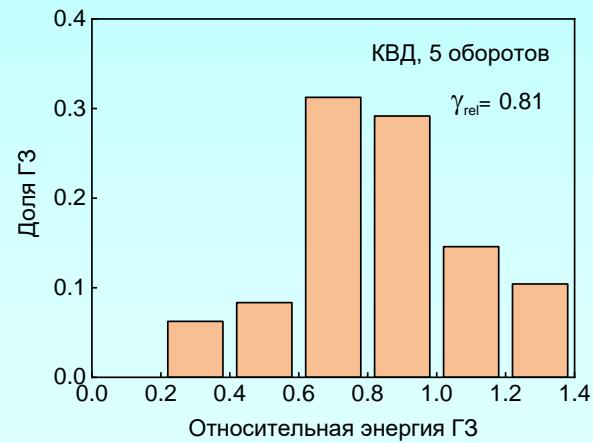
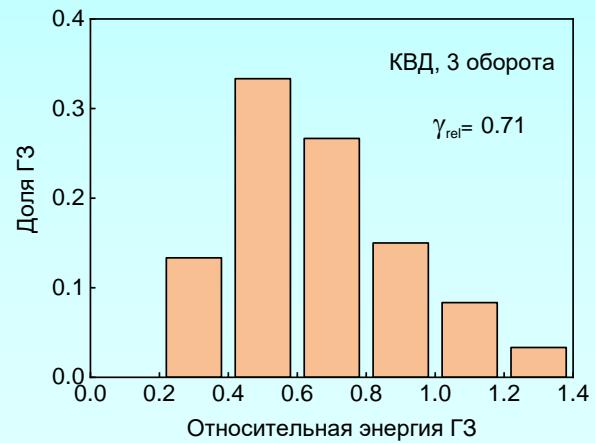
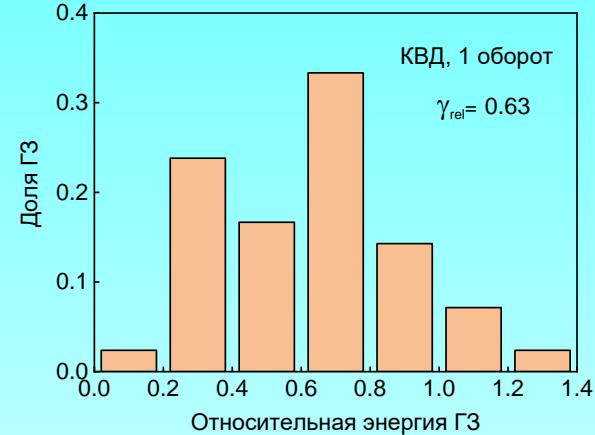
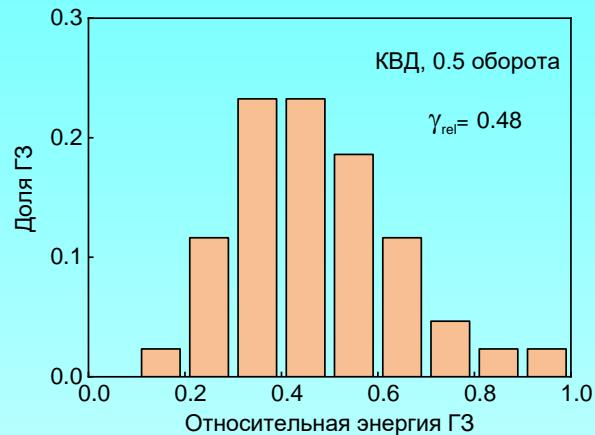
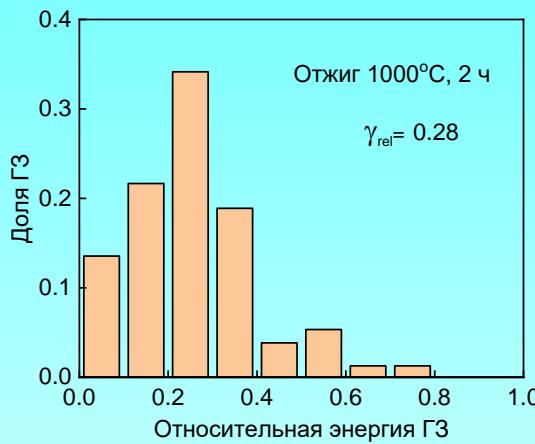
Примеры топографического изображения канавки и профиля перпендикулярно границе зерна



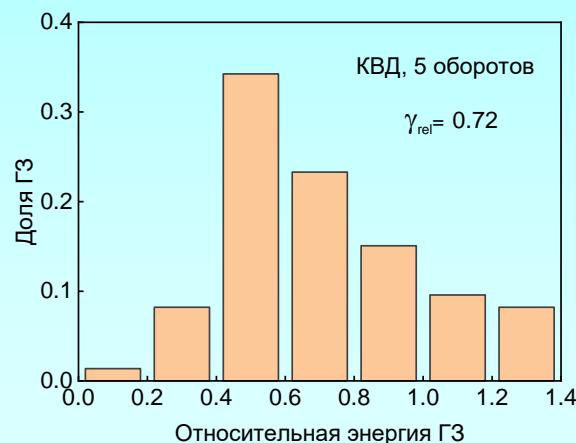
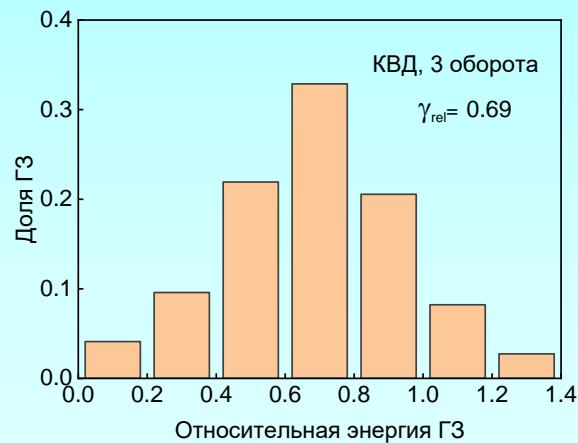
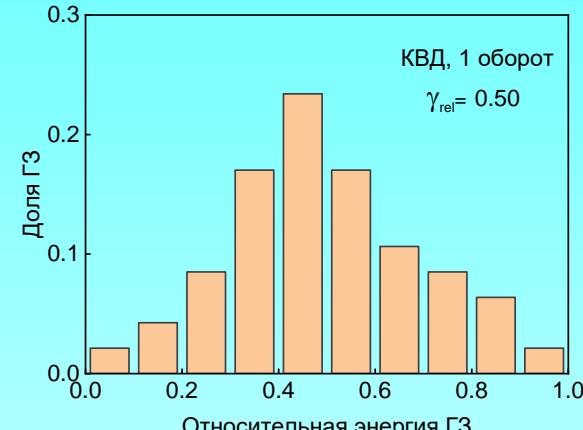
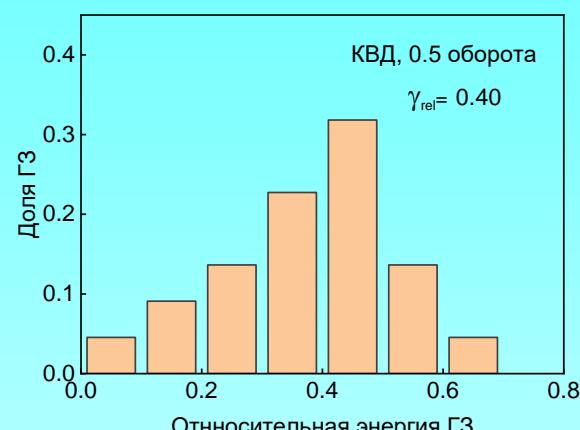
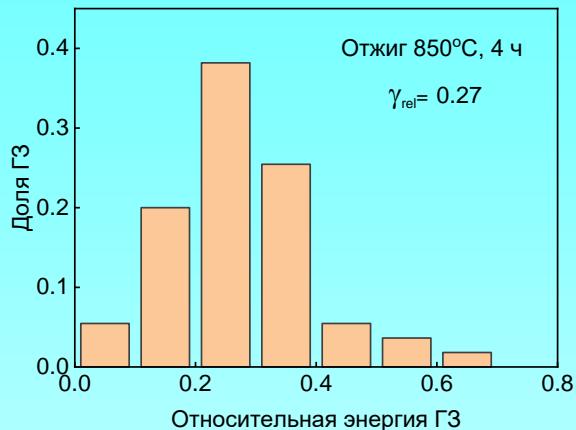
$$\gamma_{\text{rel}} = \frac{\gamma_{\text{gb}}}{\gamma_s} = 2 \cos \frac{\Psi}{2}$$

$\gamma_{\text{rel}}$ ,  $\gamma_{\text{gb}}$ ,  $\gamma_s$  – безразмерная относительная энергия границы зерна, энергия границы зерна и энергия свободной поверхности соответственно,  $\Psi$  – угол у дна канавки.

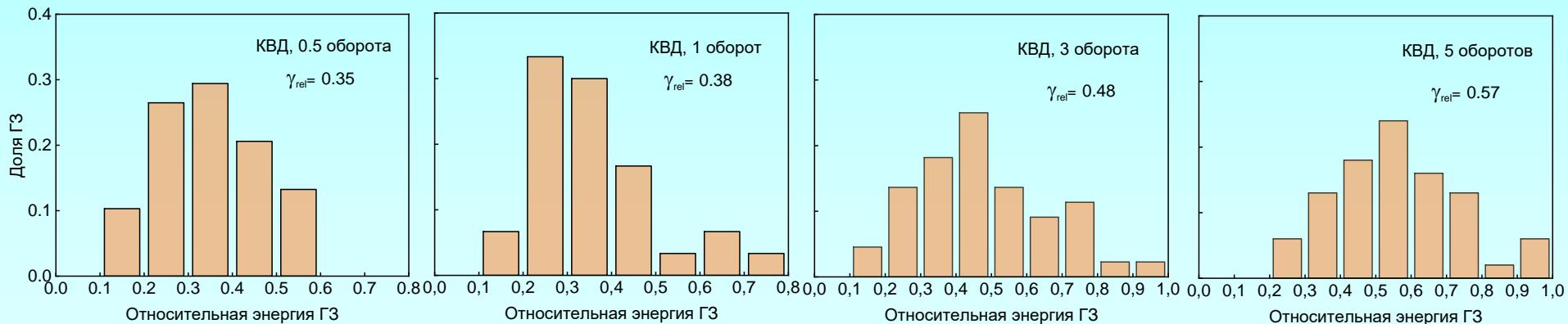
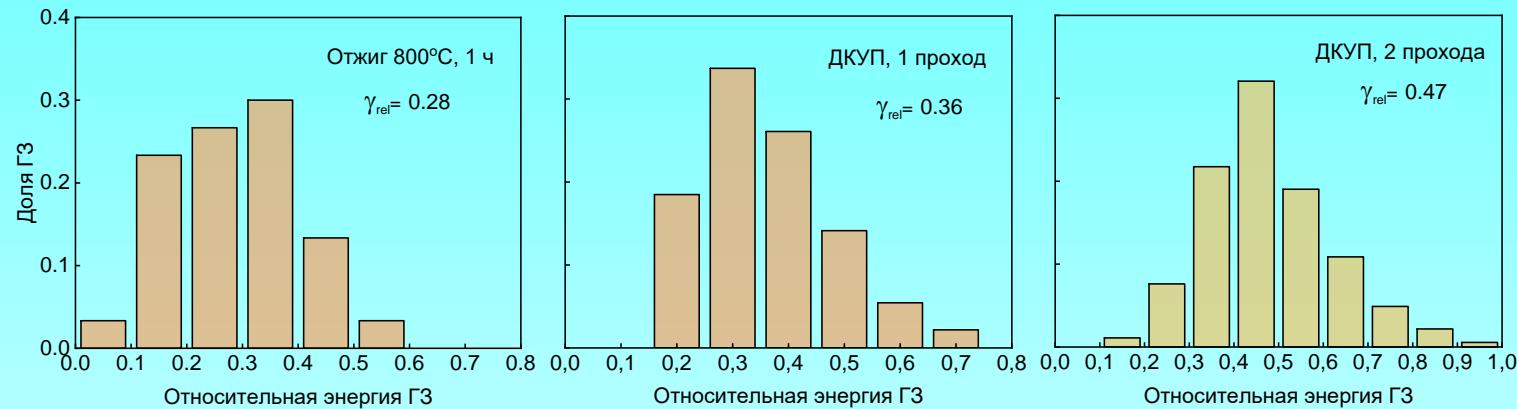
# Относительная энергия границ зерен в никеле, продеформированным КВД



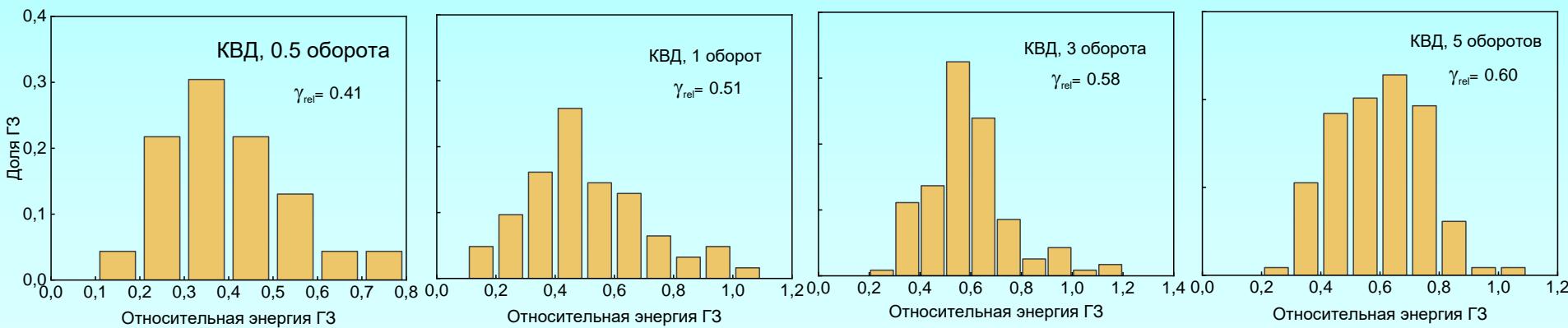
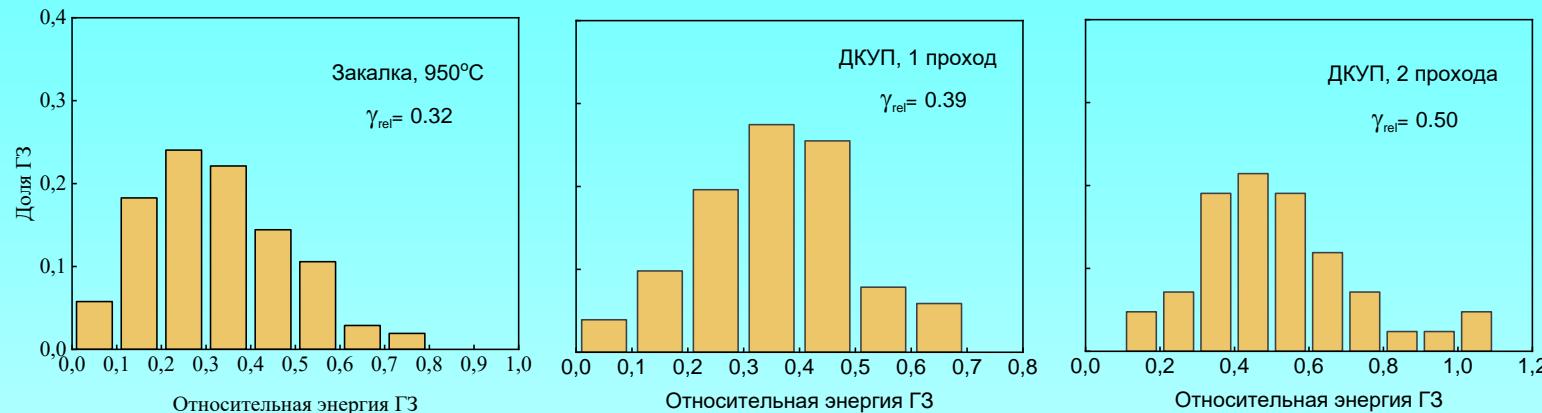
# Относительная энергия границ зерен в ниобие, продеформированным КВД

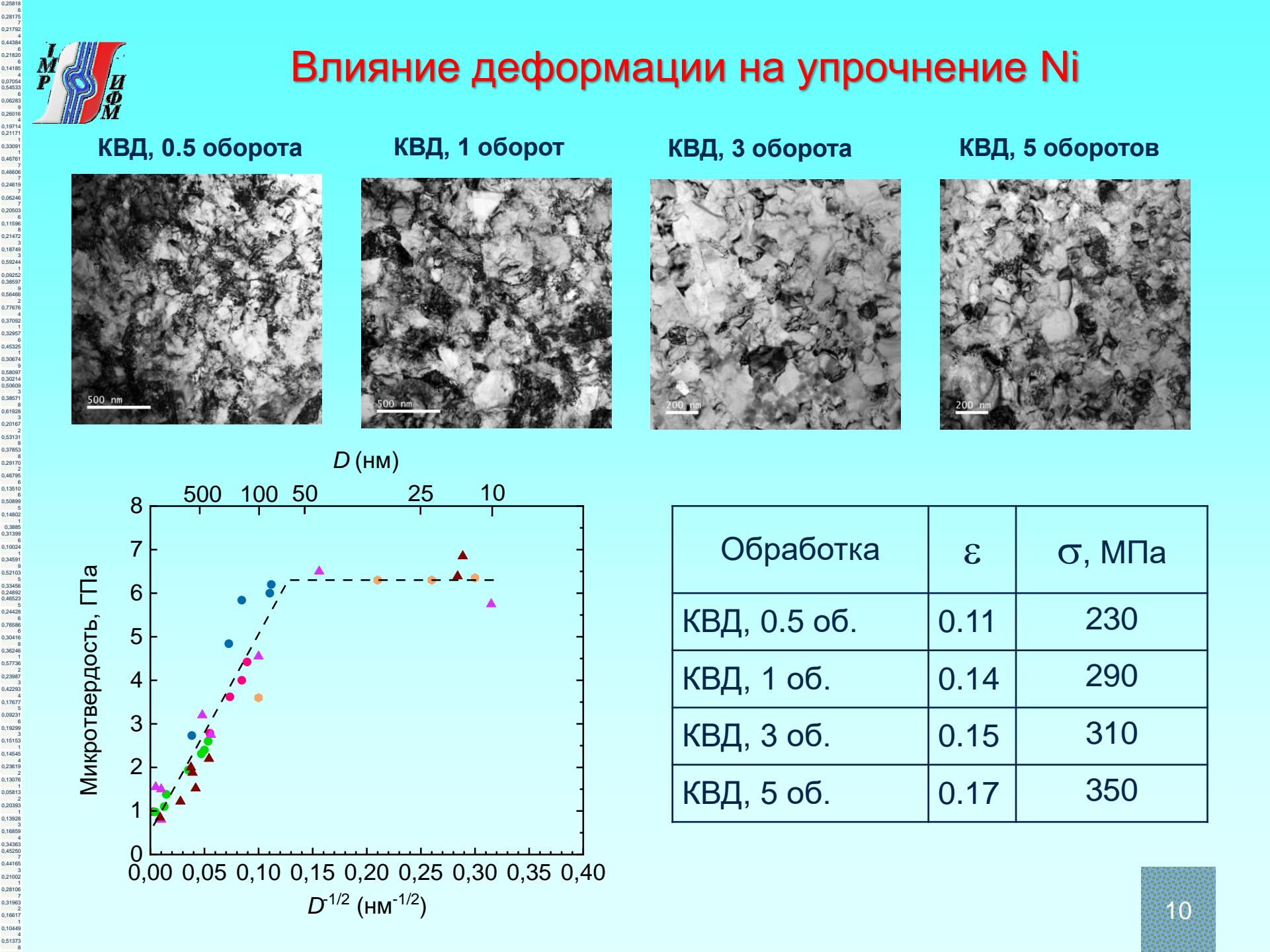


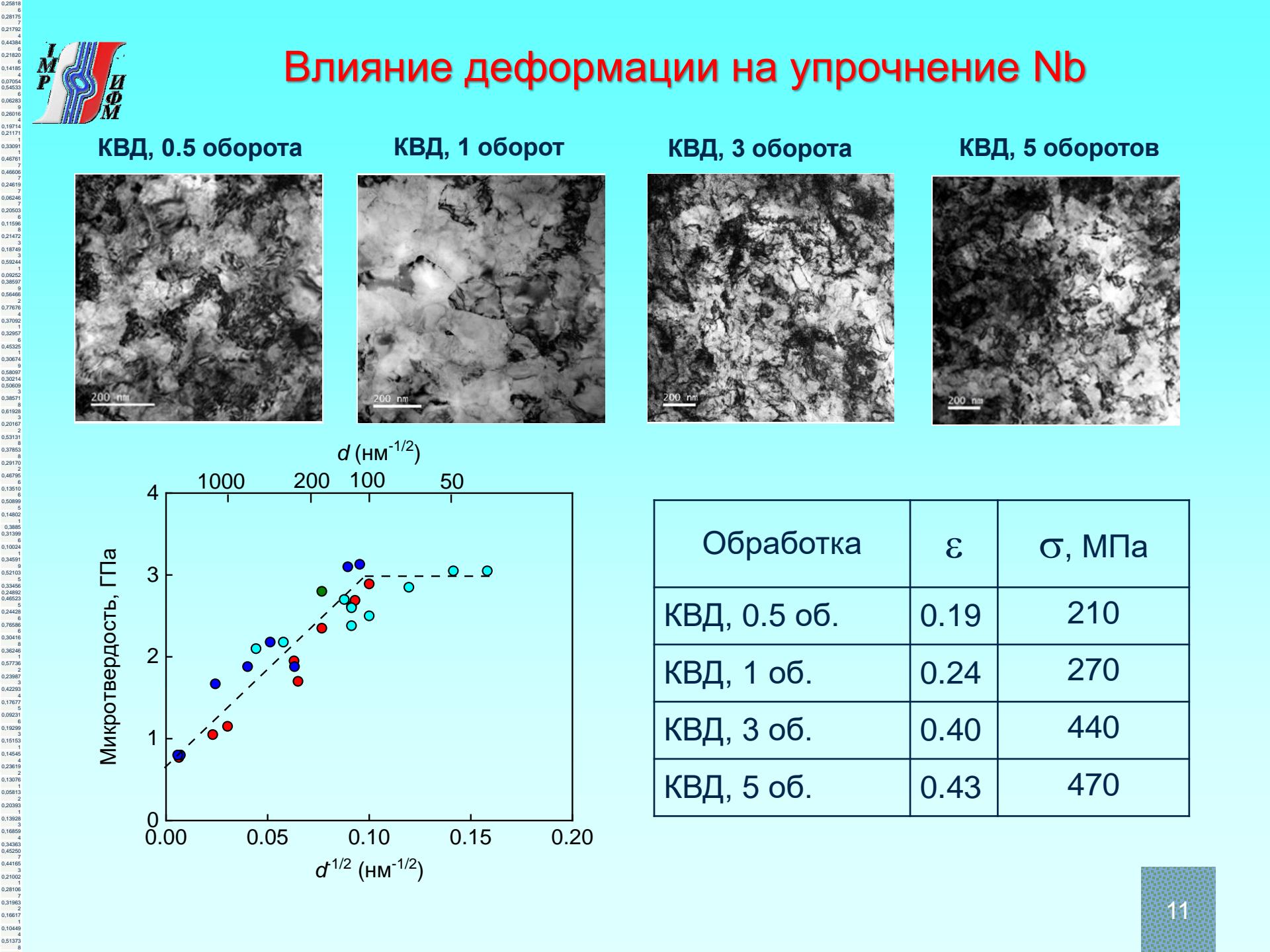
# Относительная энергия границ зерен в оловянной бронзе, промоделированной ДКУП и КВД

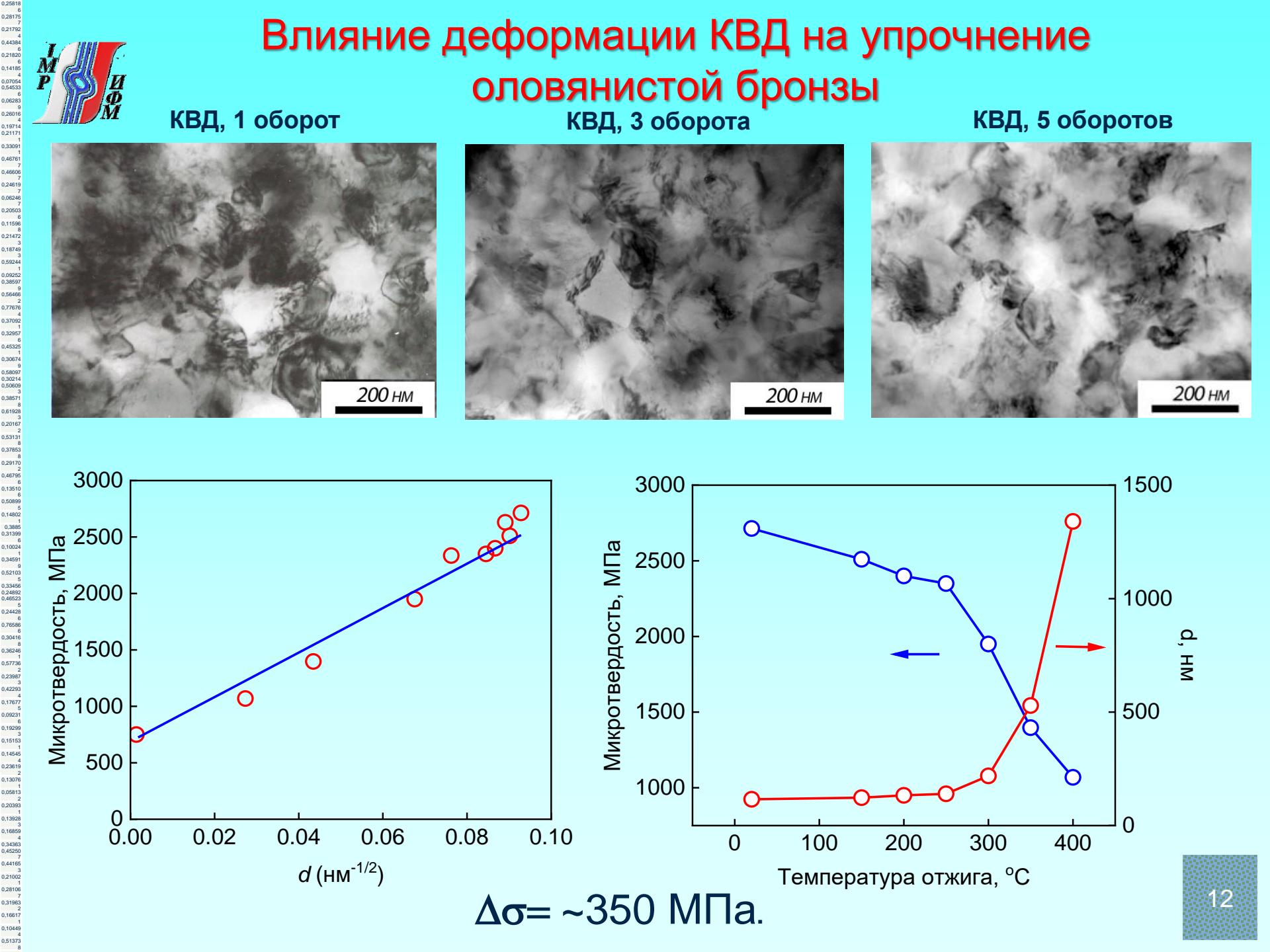


# Относительная энергия границ зерен в гафниевой бронзе, продеформированной ДКУП и КВД



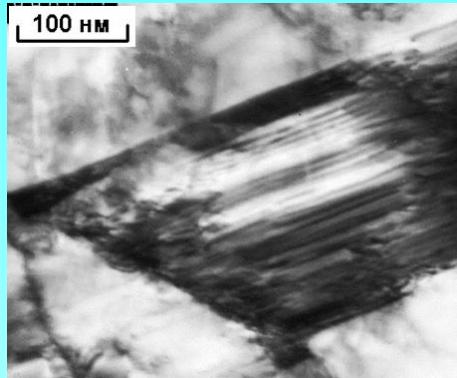




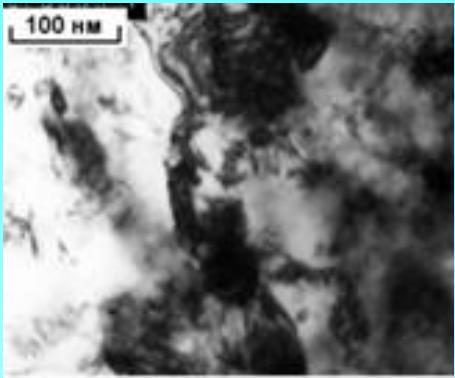


# Влияние деформации КВД на упрочнение гафниевой бронзы

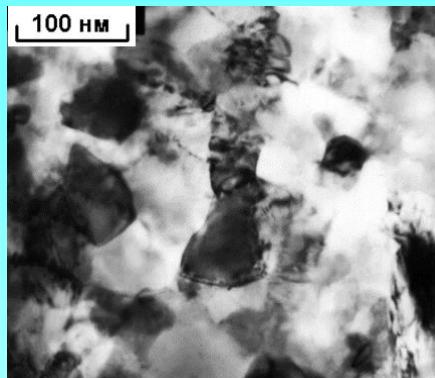
КВД, 0.5 оборота



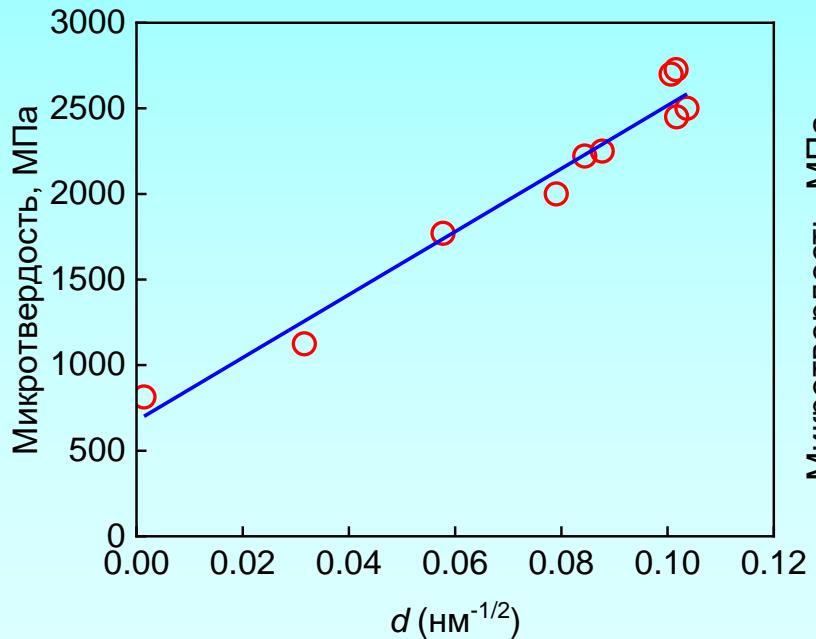
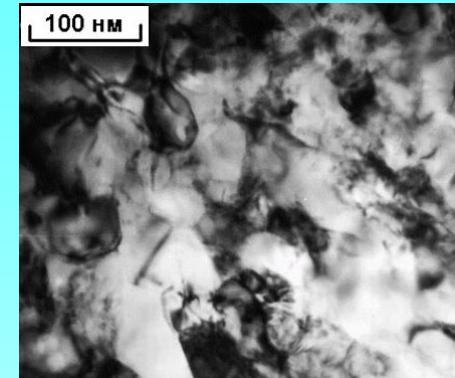
КВД, 1 оборот



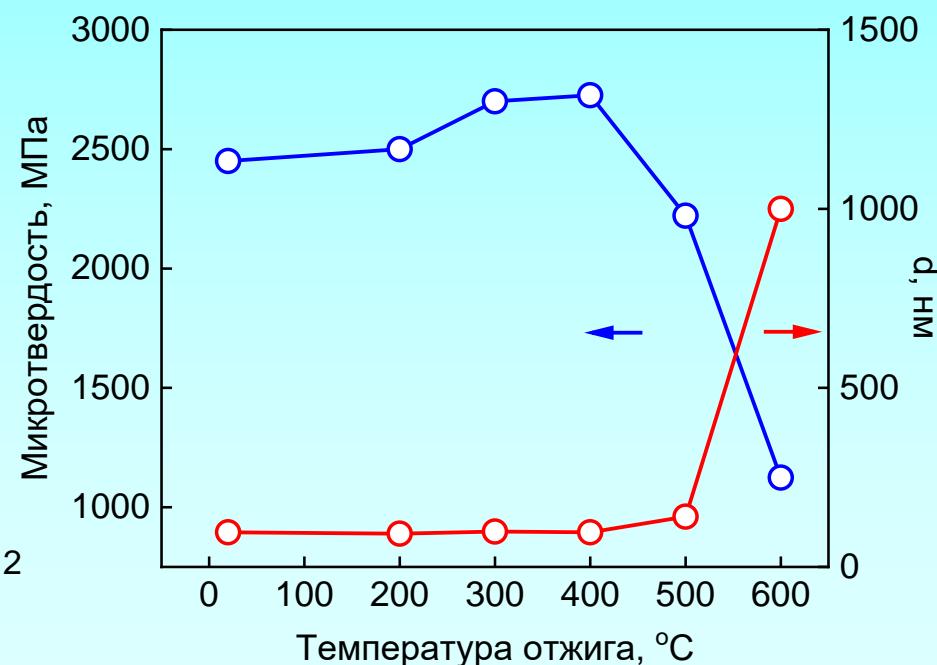
КВД, 3 оборота



КВД, 5 оборотов



Дислокации и  
неравновесные ГЗ  $\Delta\sigma = 275 \text{ МПа}$

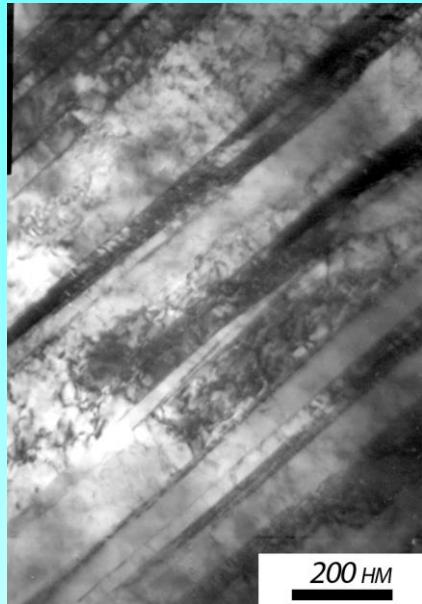


$\Delta\sigma_{\text{д.ч.}} = \sim 300 \text{ МПа}$

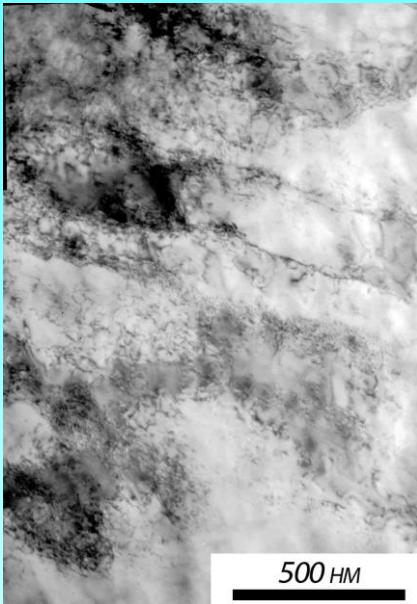


# Влияние деформации ДКУП на упрочнение гафниевой бронзы

ДКУП 1, проход

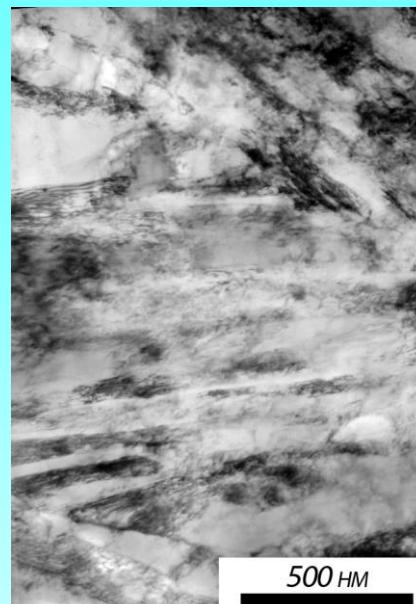


200 нм

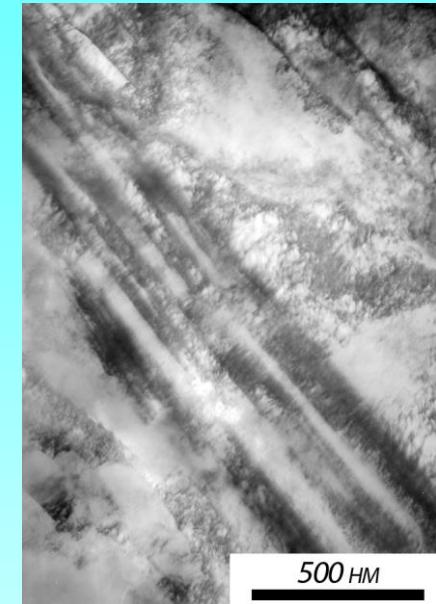


500 нм

ДКУП, 2 прохода



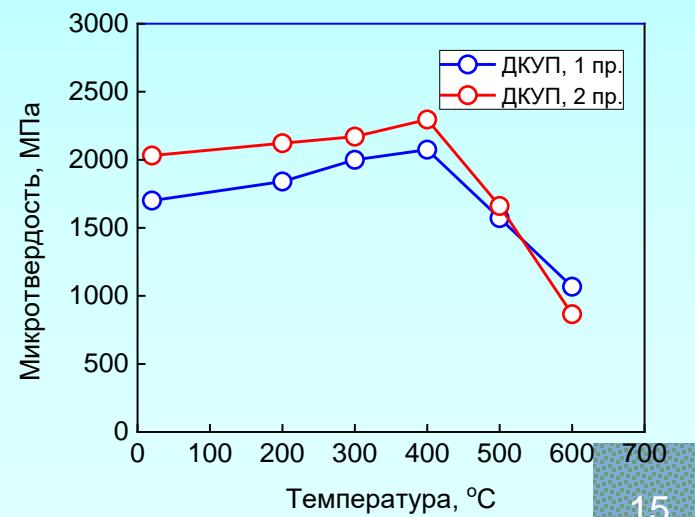
500 нм



500 нм

Закалка, 950°C	ДКУП, 1 проход	ДКУП, 2 прохода
740 МПа	1700 МПа	2030 МПа

$$\Delta\sigma_{\text{д.ч.}} = 300-350 \text{ МПа}$$





## Заключение

На примере четырех материалов: никель, ниобий, оловянистая и гафниевая бронза исследовано состояние границ зерен после деформации методами динамического канально-углового прессования или кручения под высоким давлением. Показано, что во всех исследованных материалах после КВД и ДКУП формируются неравновесные границы зерен.

Показано, что в исследованных материалах, продеформированных методом КВД, основным фактором обеспечивающим упрочнение является измельчение зерен. Вклад дислокационного упрочнения и упрочнения, обусловленного формированием неравновесных границ зерен в большинстве случаев не превышает 300-400 МПа.

В бронзах, легированных оловом и гафием – элементами понижающими энергию дефектов упаковки, основным фактором упрочнения при деформации методом ДКУП является интенсивное развитие двойникования.

При старении бронзы, легированной гафием, наряду с другими факторами упрочнения при старении может быть достигнуто упрочнение в результате выделения дисперсных частиц на уровне до 300 МПа



**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !**