



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. Попов¹, Е.Н. Попова¹, Е.В. Осинников¹, С.А. Судакова¹
Р.М. Фалахутдинов¹, Е.В., Шорохов²*

¹Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия;

²Российский 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

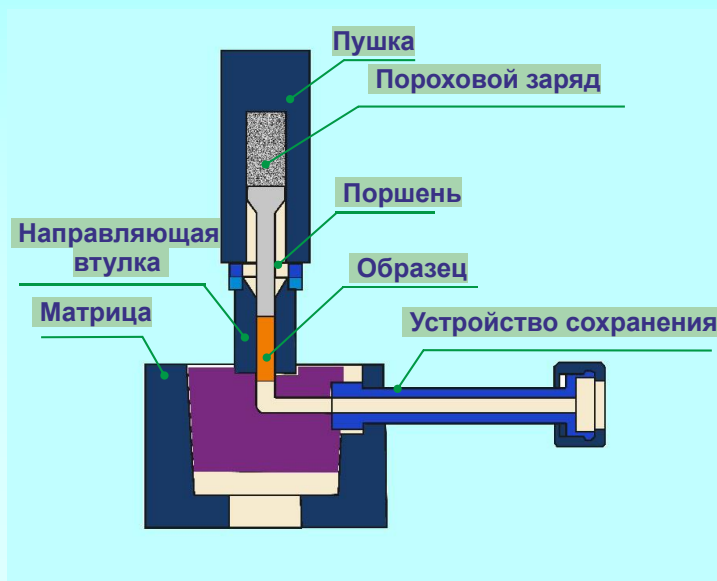
Ni – отжиг 1000°C, 2 ч

Nb – отжиг 850°C, 4 ч

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

Обработки

ДКУП

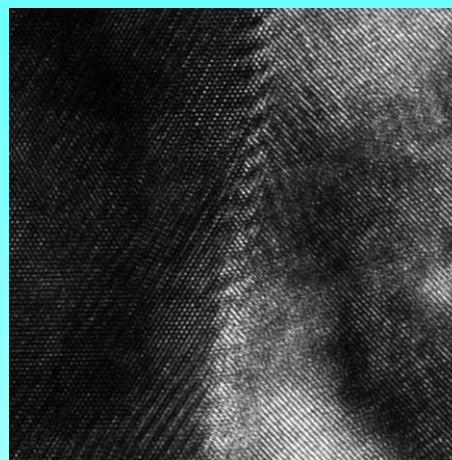
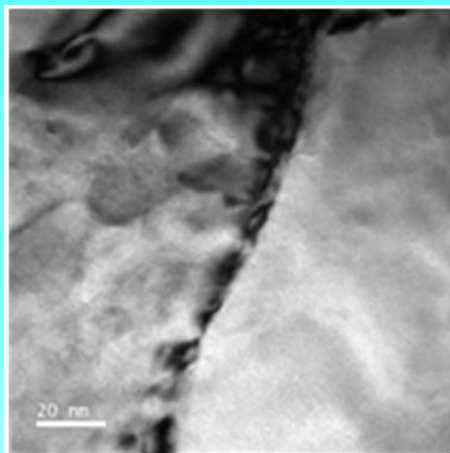


КВД

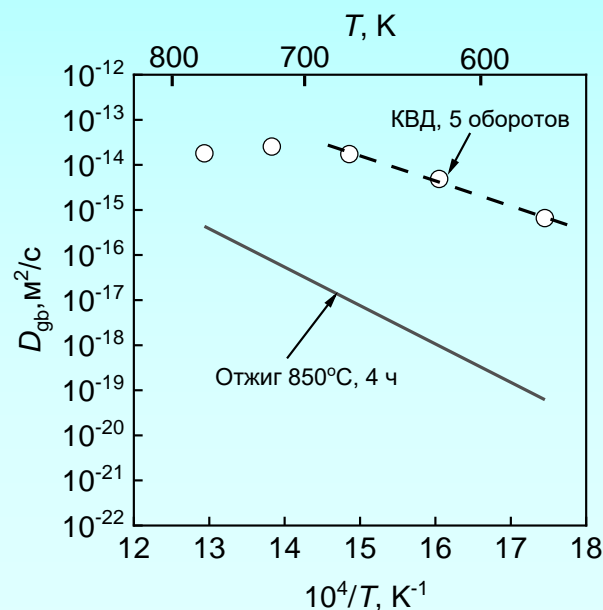




Микрофотографии границ зерен в Nb, продеформированном КВД на 5 оборотов



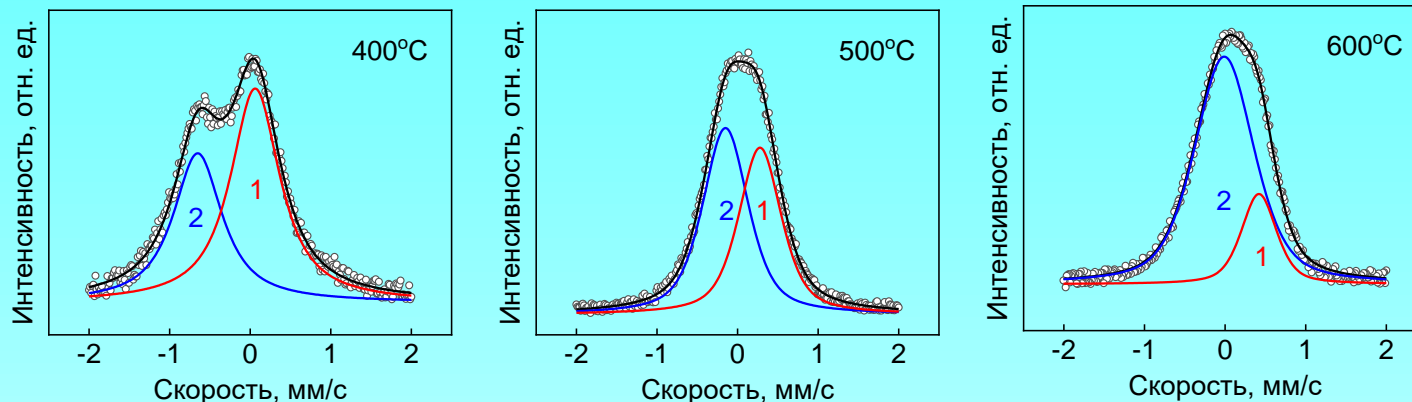
Сравнение коэффициентов зернограницной диффузии в отожженном Nb и Nb, продеформированном КВД



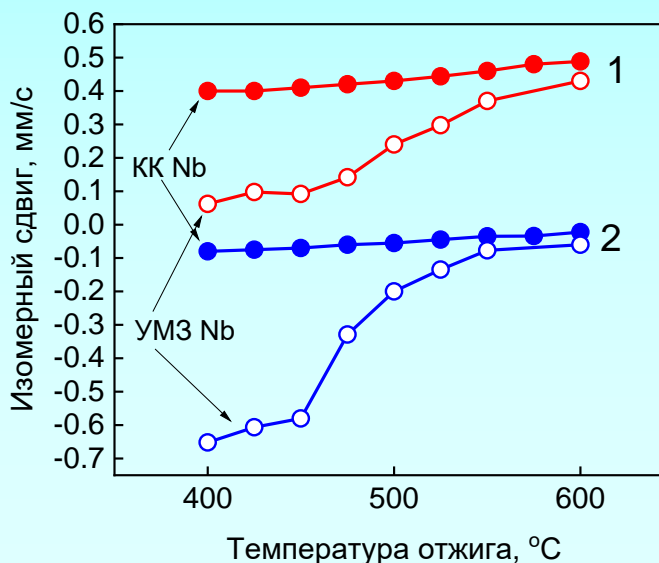


Эмиссионная ядерная гамма-резонансная (мессбауэровская) спектроскопия границ зерен

Примеры эмиссионных мессбауэровских спектров, снятых с образцов УМЗ Nb



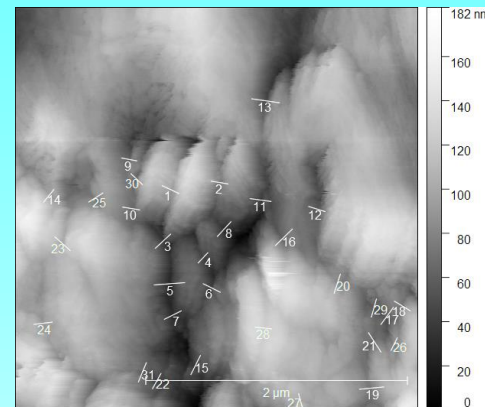
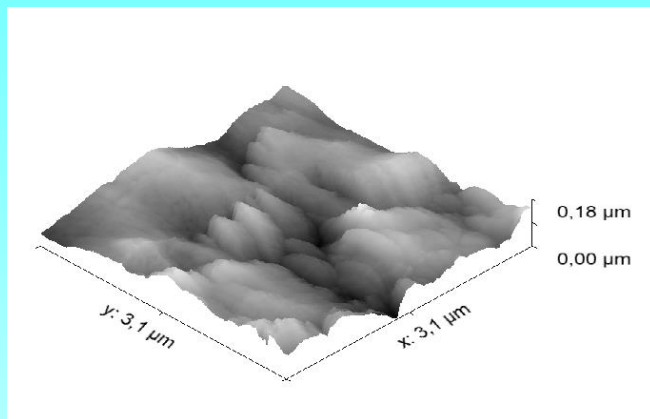
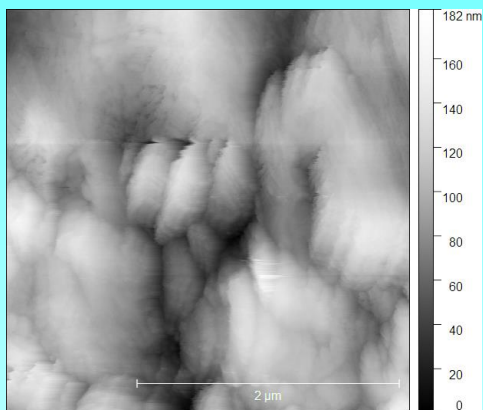
Зависимости изомерных сдвигов спектральных линий ^{57}Co (^{57}Fe), снятых с образцов крупнозернистого и УМЗ Nb, от температуры отжига



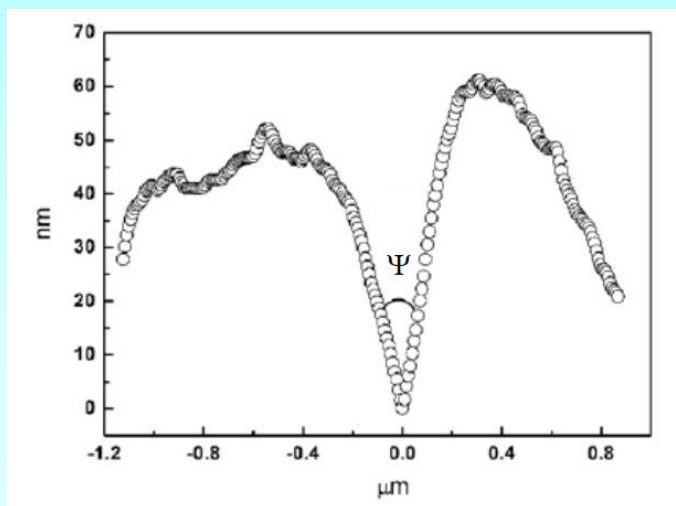
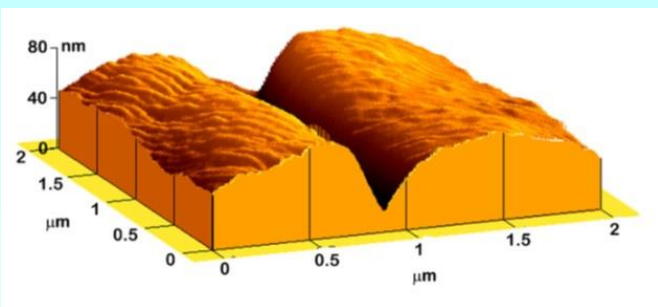


Определение энергии границ зерен методом измерения двугранных углов канавок термического травления

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



Примеры топографического изображения канавки и профиля перпендикулярно границе зерна

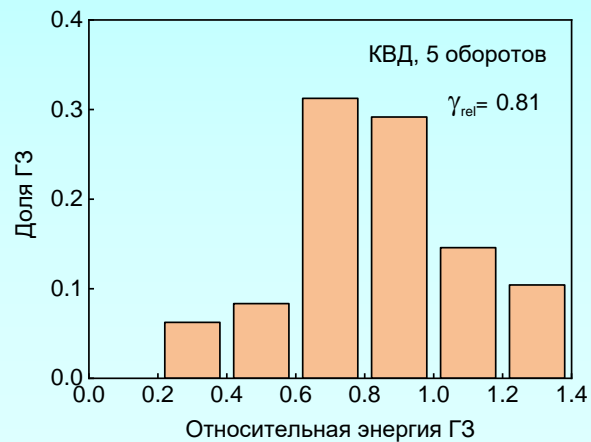
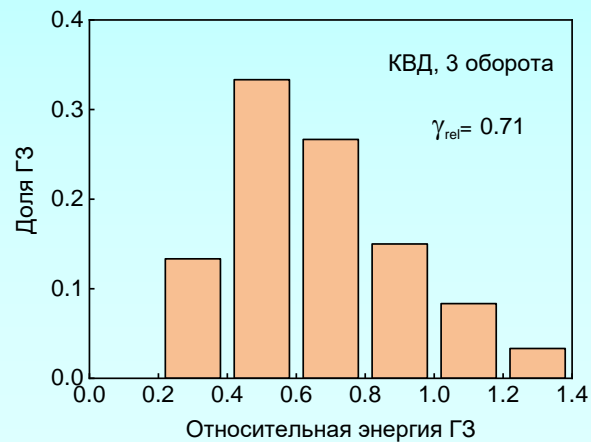
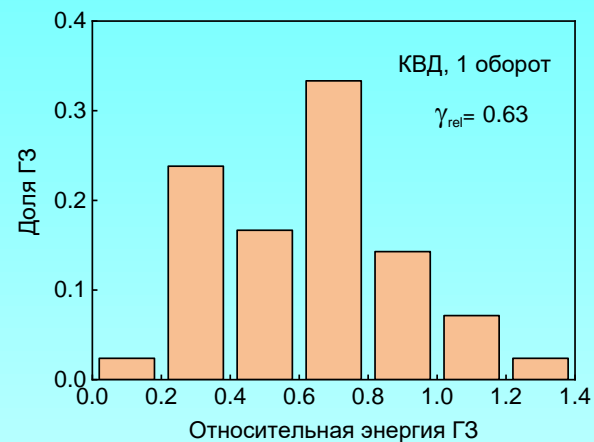
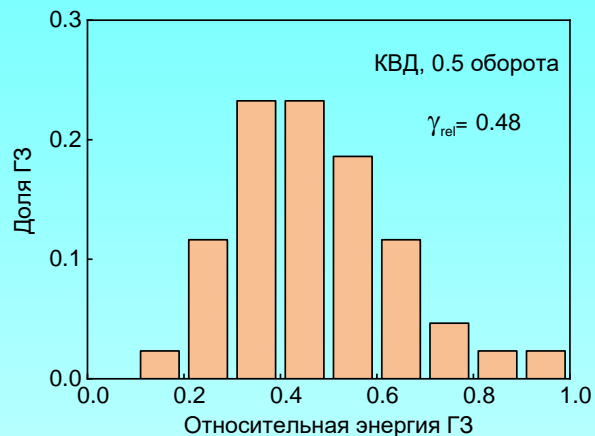
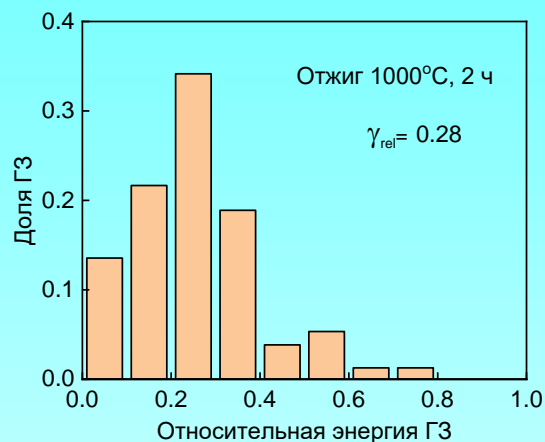


$$\gamma_{\text{rel}} = \frac{\gamma_{\text{gb}}}{\gamma_{\text{s}}} = 2 \cos \frac{\Psi}{2}$$

γ_{rel} , γ_{gb} , γ_{s} – безразмерная относительная энергия границы зерна, энергия границы зерна и энергия свободной поверхности соответственно, Ψ – угол у дна канавки.

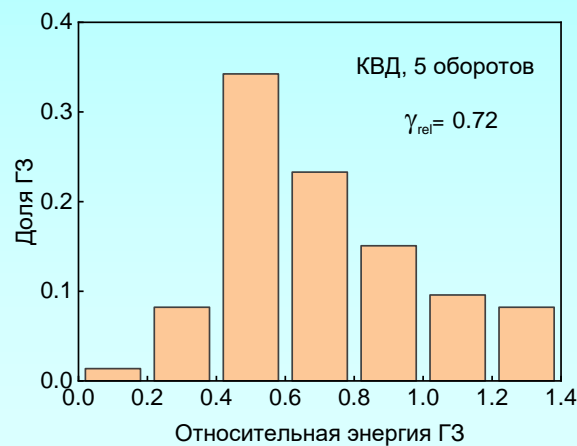
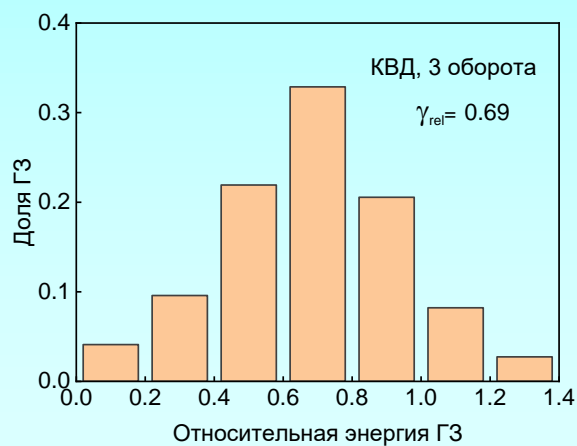
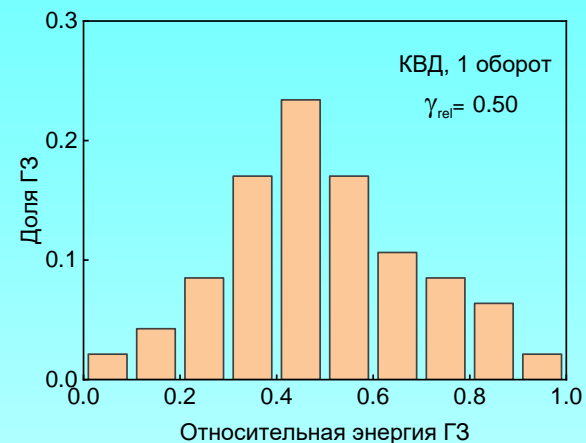
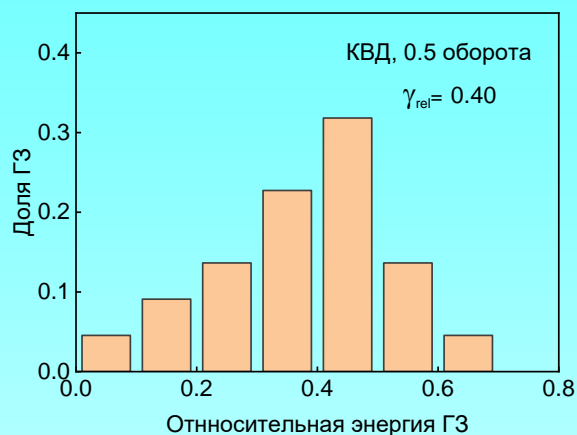
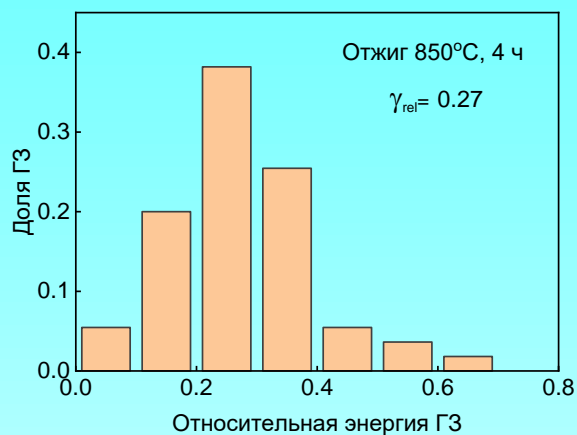


Относительная энергия границ зерен в никеле, деформированном КВД



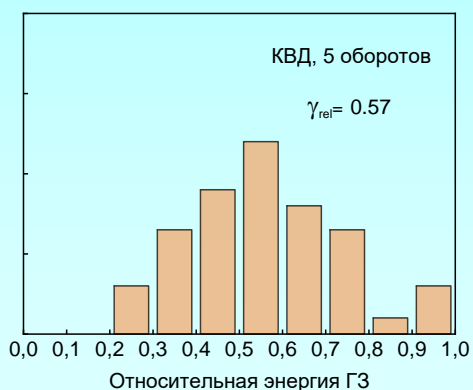
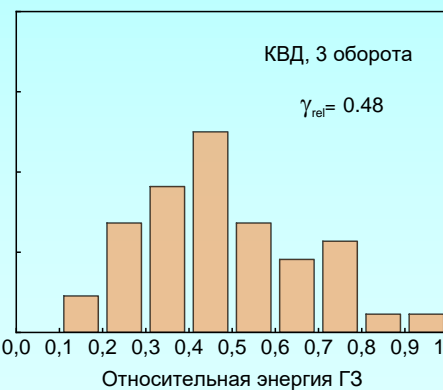
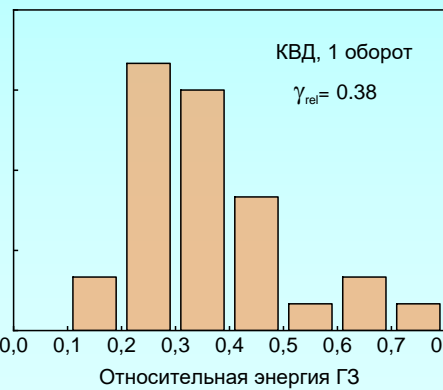
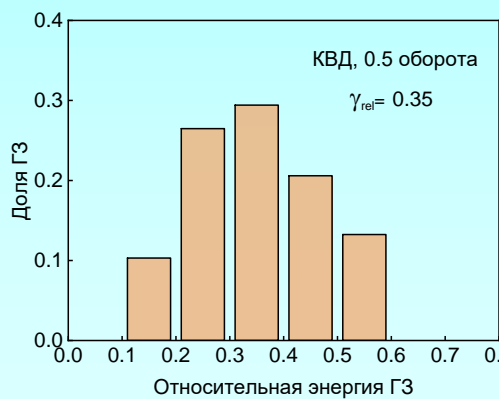
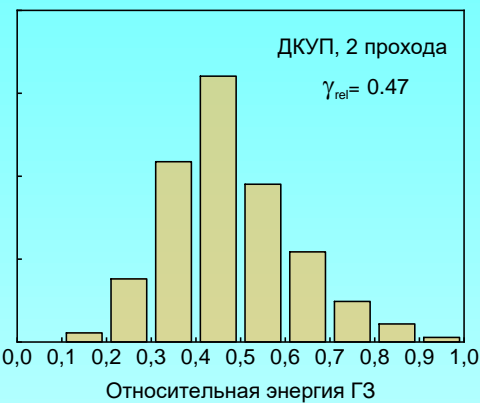
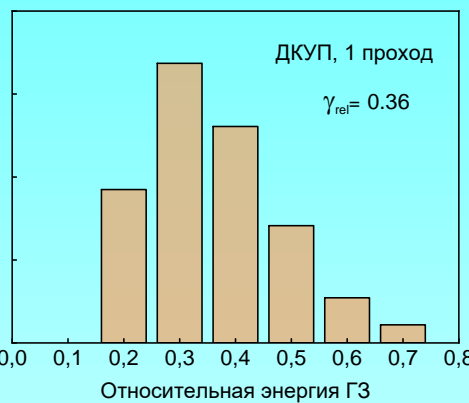
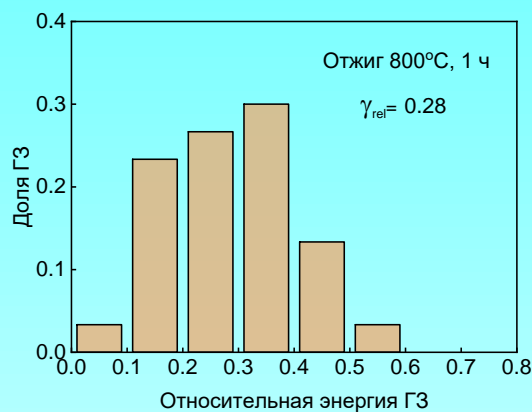


Относительная энергия границ зерен в ниобие, деформированном КВД



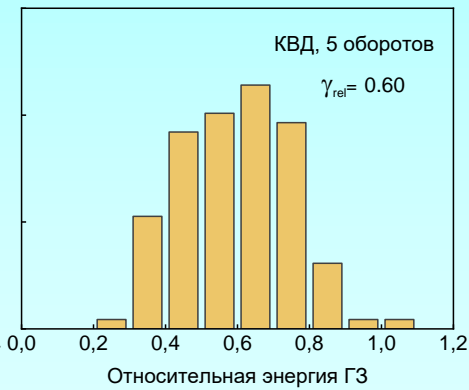
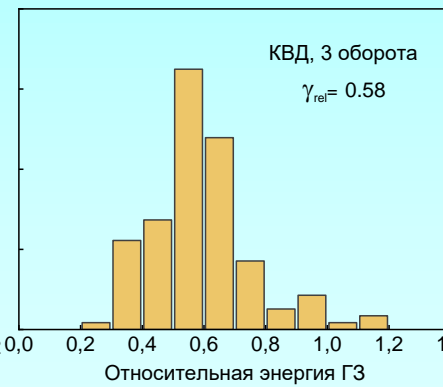
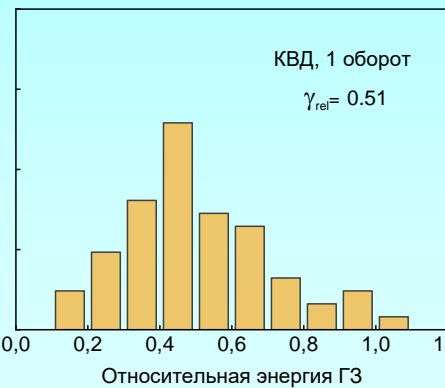
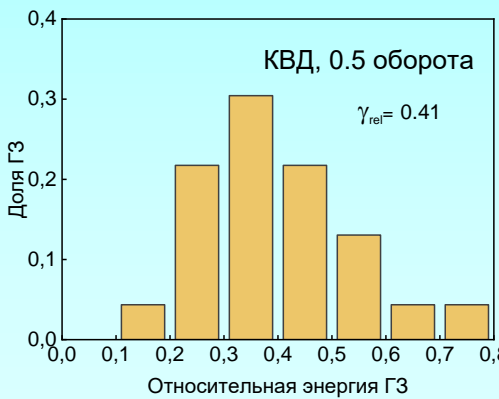
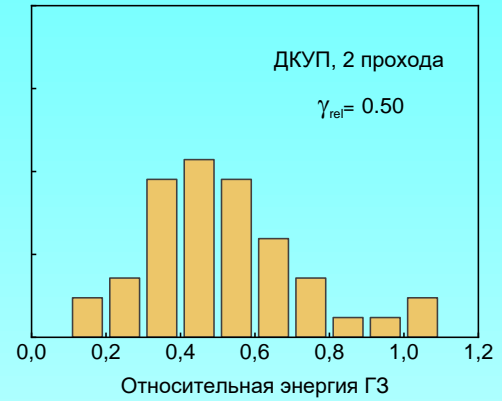
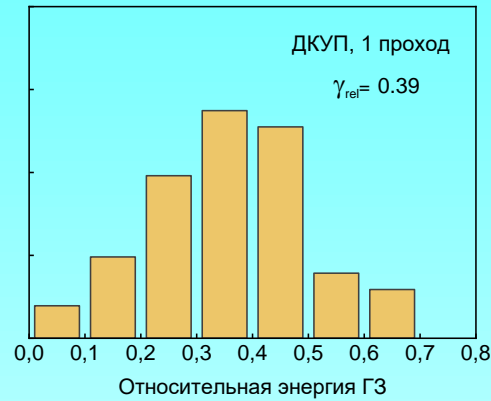
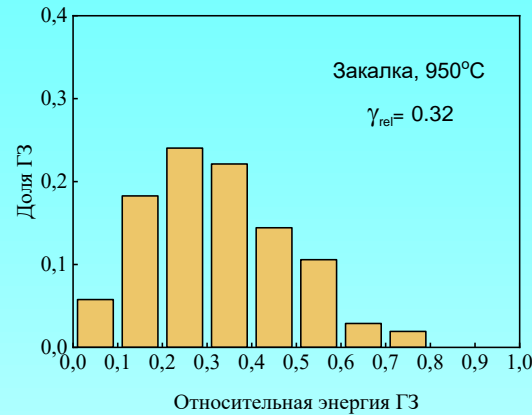


Относительная энергия границ зерен в оловянистой бронзе, деформированной ДКУП и КВД





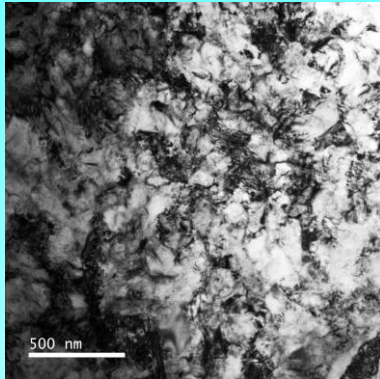
Относительная энергия границ зерен в гафниевой бронзе, продеформированной ДКУП и КВД



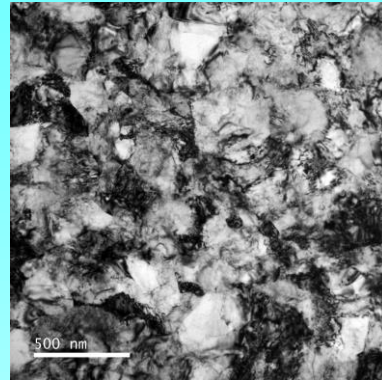


Влияние деформации на упрочнение Ni

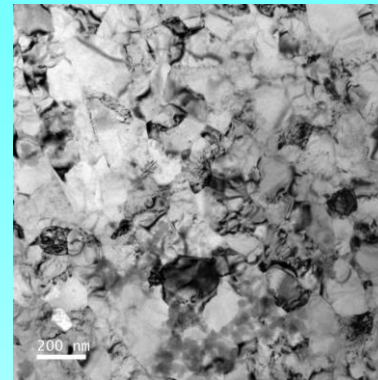
КВД, 0.5 оборота



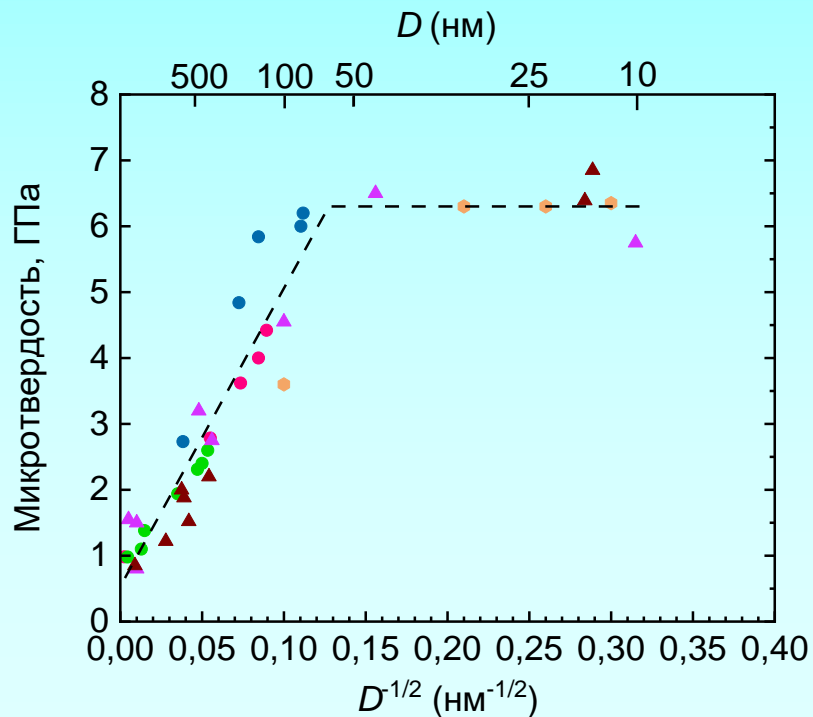
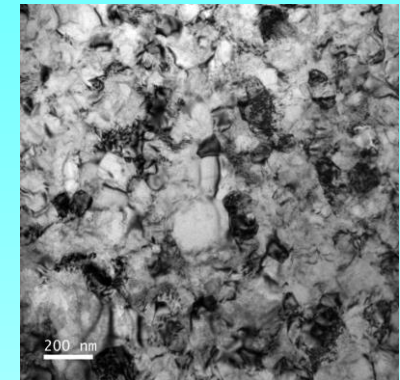
КВД, 1 оборот



КВД, 3 оборота



КВД, 5 оборотов

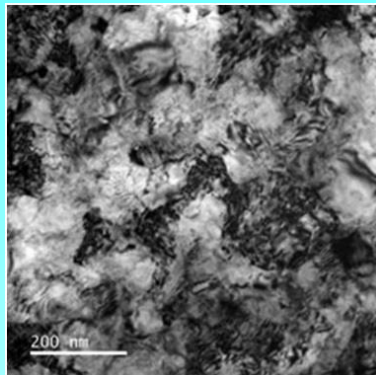


Обработка	ε	σ , МПа
КВД, 0.5 об.	0.11	230
КВД, 1 об.	0.14	290
КВД, 3 об.	0.15	310
КВД, 5 об.	0.17	350

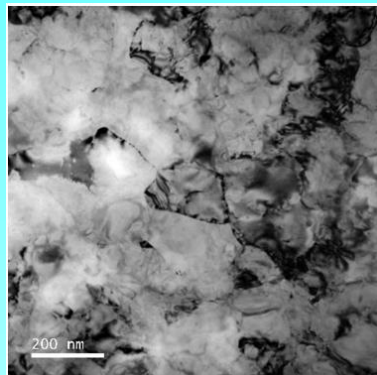
Влияние деформации на упрочнение Nb



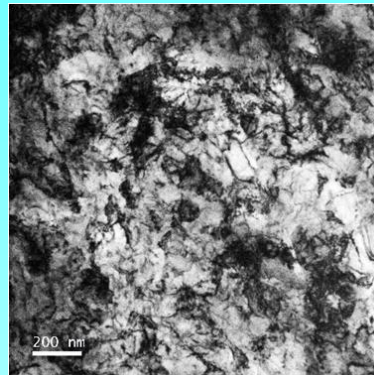
КВД, 0.5 оборота



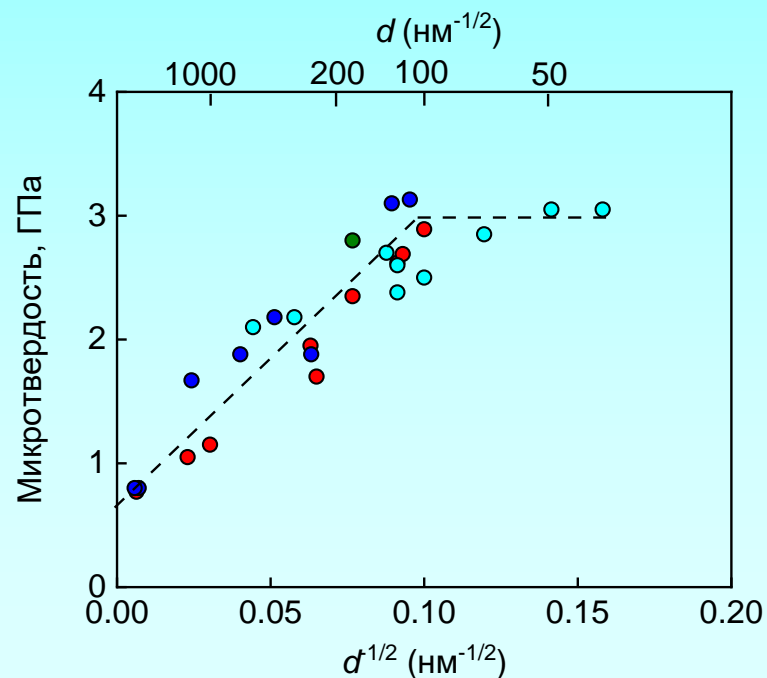
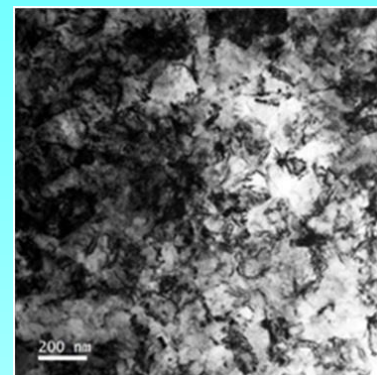
КВД, 1 оборот



КВД, 3 оборота



КВД, 5 оборотов

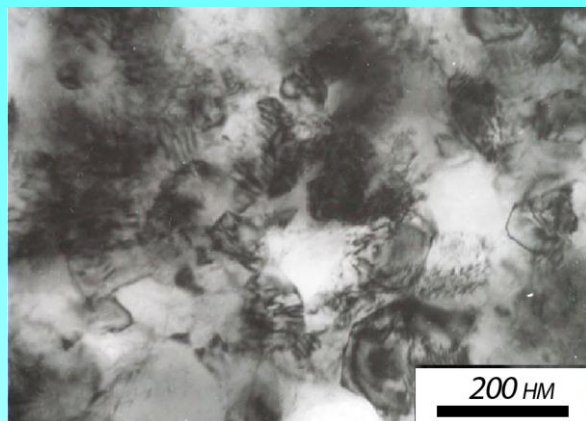


Обработка	ε	σ , МПа
КВД, 0.5 об.	0.19	210
КВД, 1 об.	0.24	270
КВД, 3 об.	0.40	440
КВД, 5 об.	0.43	470

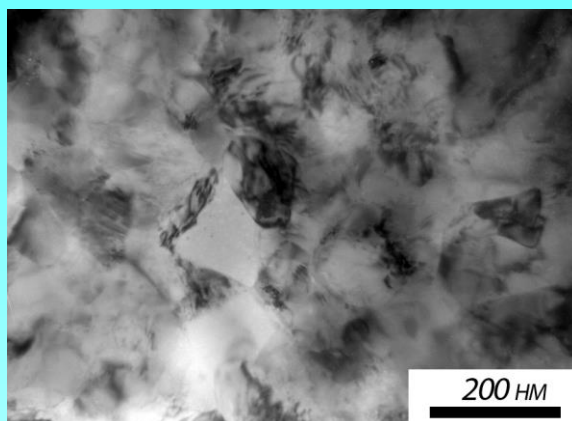
Влияние деформации КВД на упрочнение оловянистой бронзы



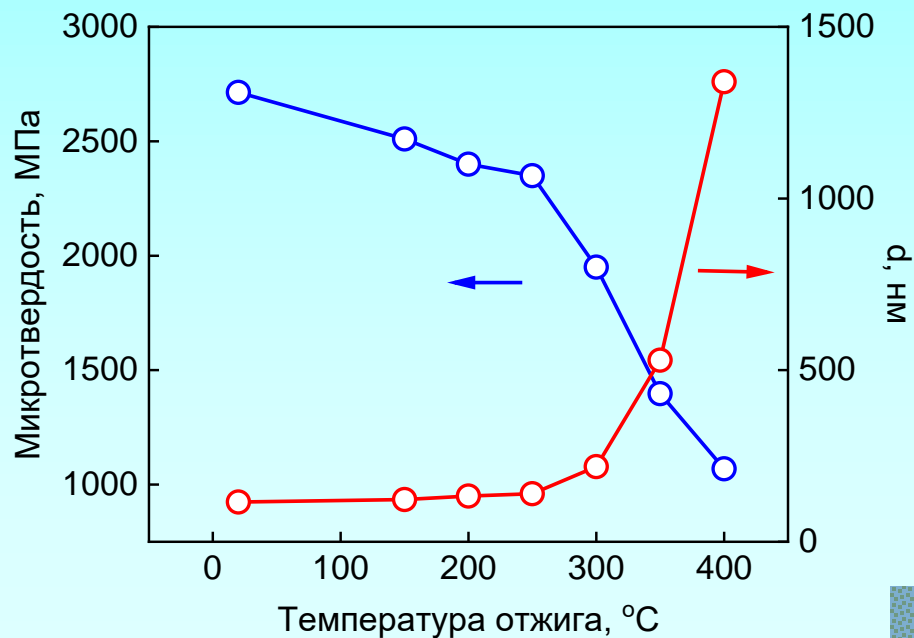
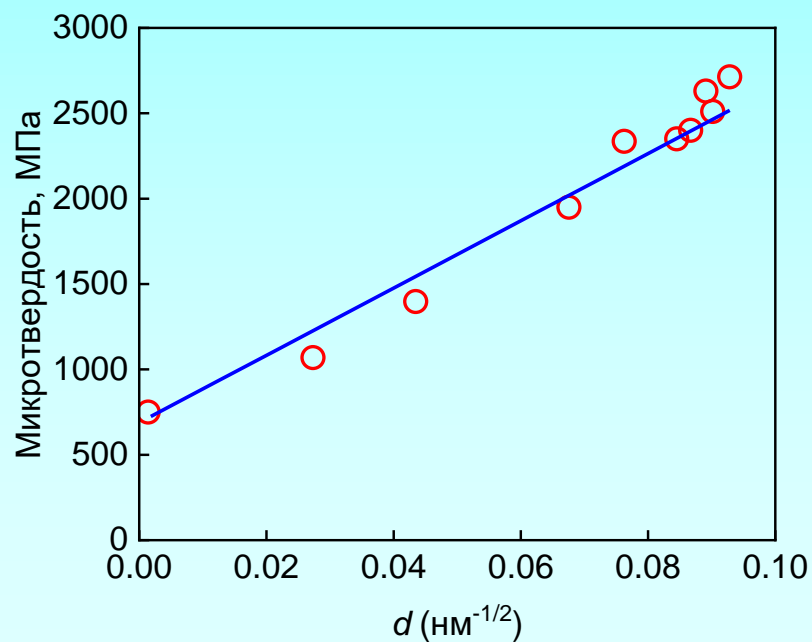
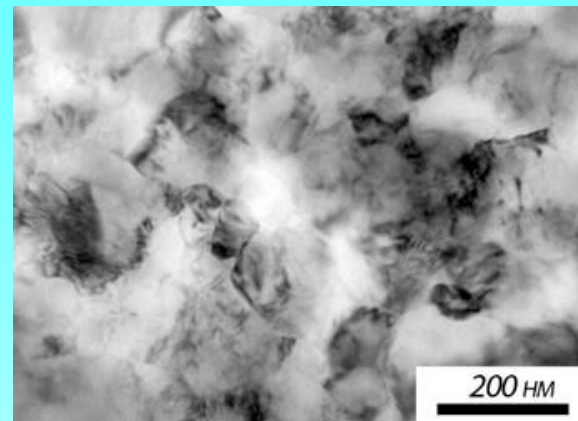
КВД, 1 оборот



КВД, 3 оборота



КВД, 5 оборотов

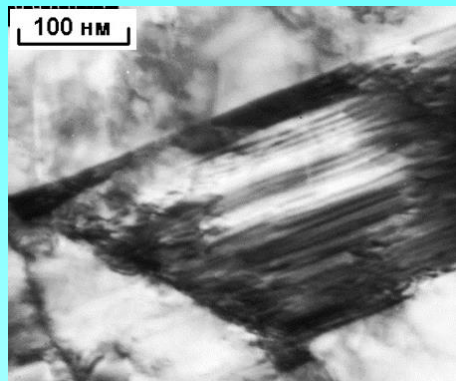


$\Delta\sigma = \sim 350 \text{ МПа.}$

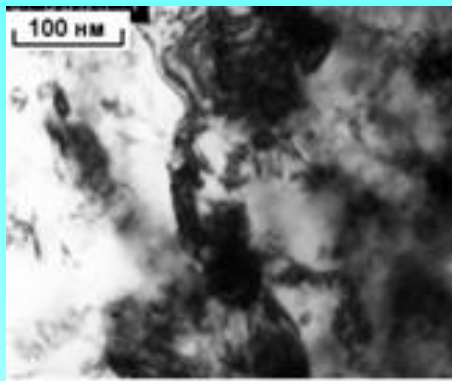


Влияние деформации КВД на упрочнение гафниевой бронзы

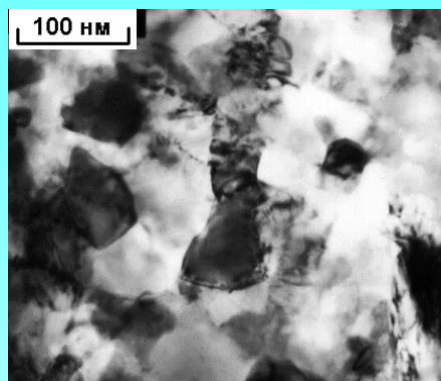
КВД, 0.5 оборота



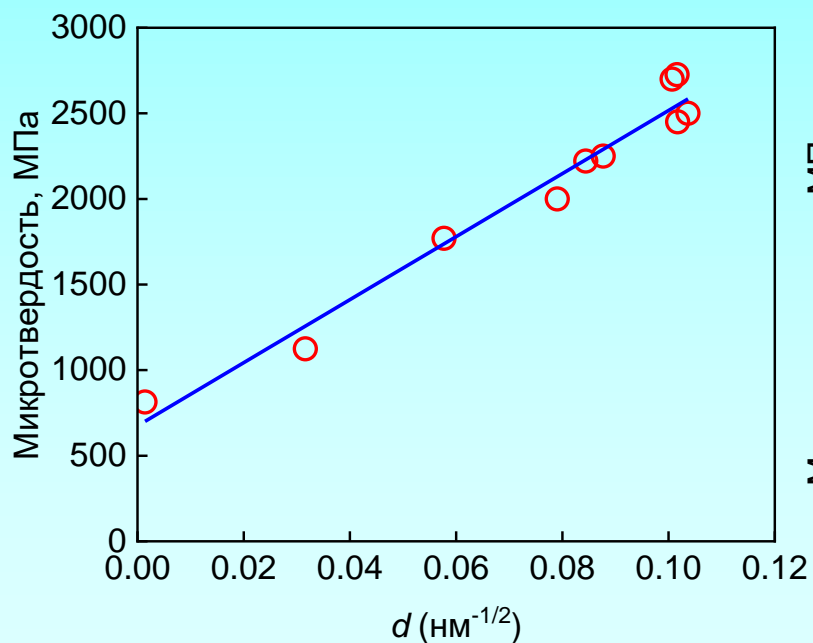
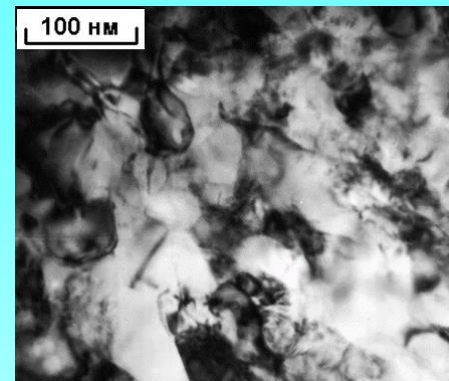
КВД, 1 оборот



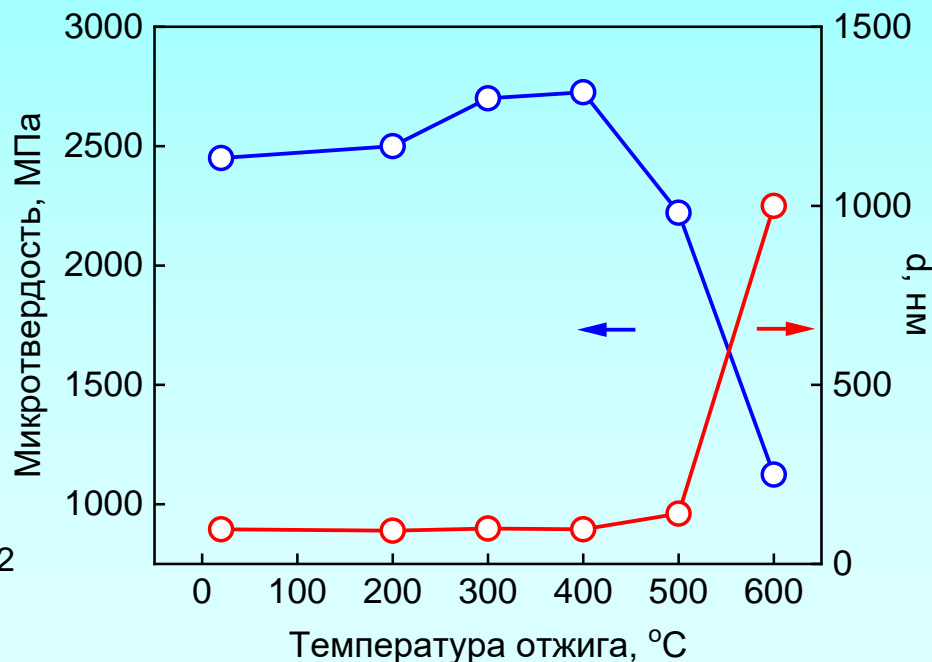
КВД, 3 оборота



КВД, 5 оборотов



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

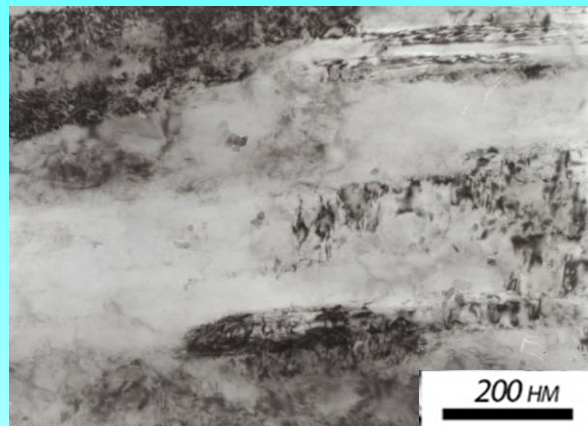
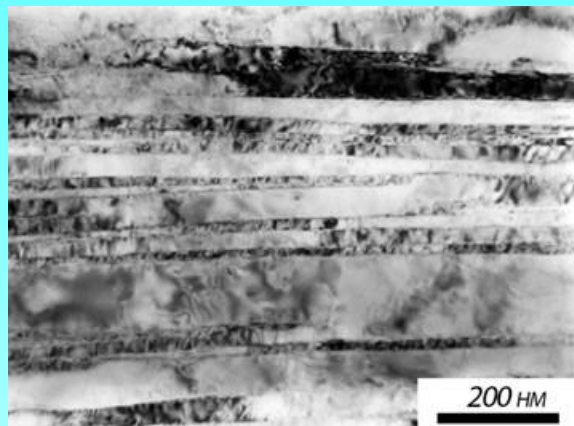


$\Delta\sigma_{\text{д.ч.}} = \sim 300 \text{ МПа}$

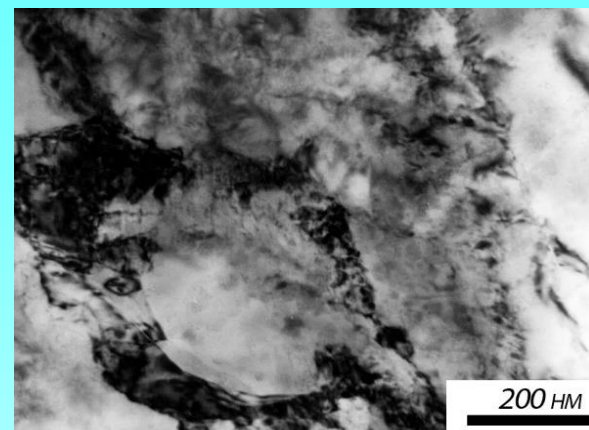


Влияние деформации ДКУП на упрочнение оловянистой бронзы

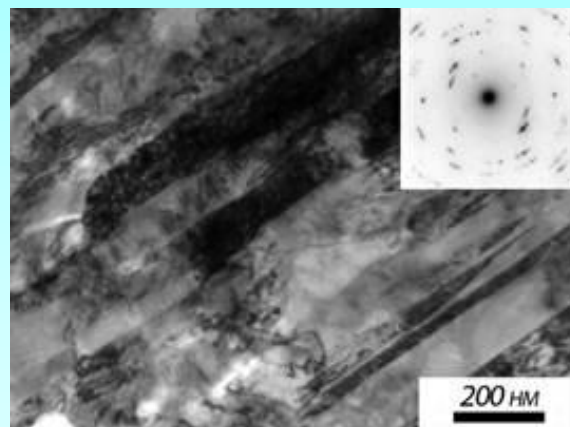
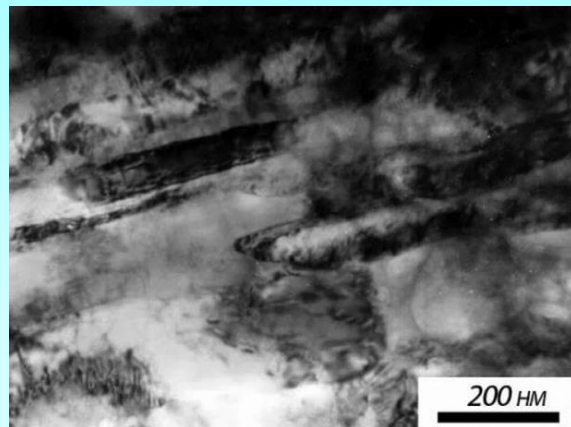
Cu-Sn, ДКУП, 1 проход



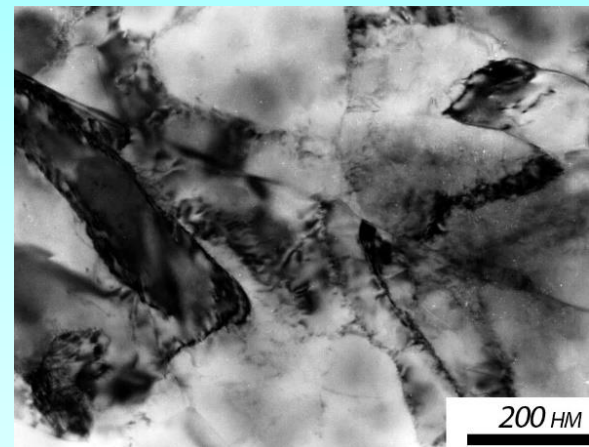
Cu, 1 проход



Cu-Sn, ДКУП, 2 прохода



Cu, 2 прохода



Оловянистая бронза

Медь М1

Отжиг 800°C

ДКУП, 1 проход

ДКУП, 2 прохода

Отжиг 800°C

ДКУП, 1 проход

ДКУП, 2 прохода

810 МПа

1890 МПа

2250 МПа

750 МПа

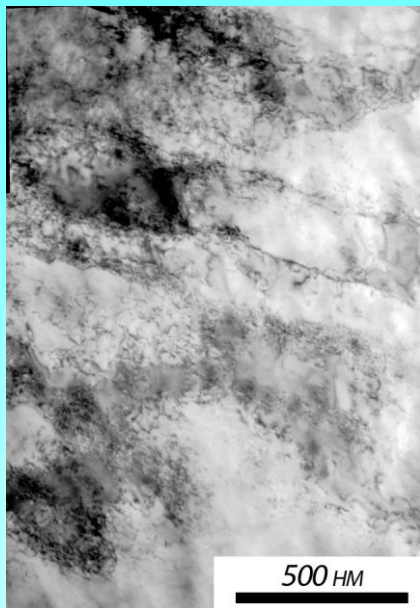
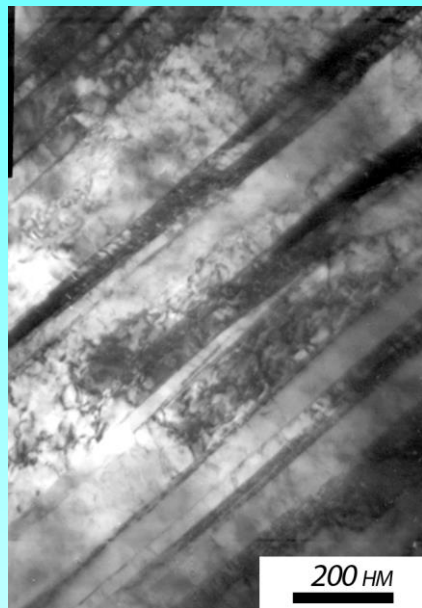
1570 МПа

1710 МПа

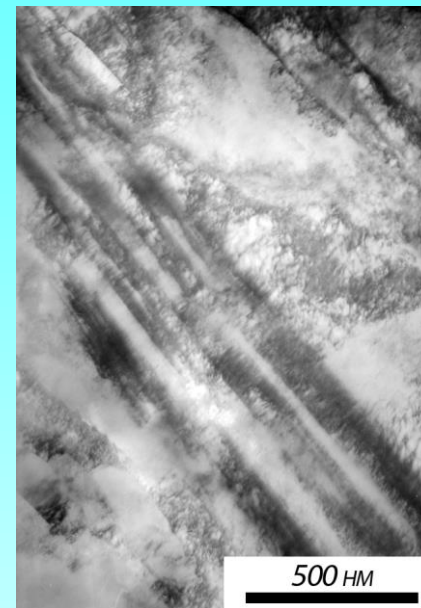
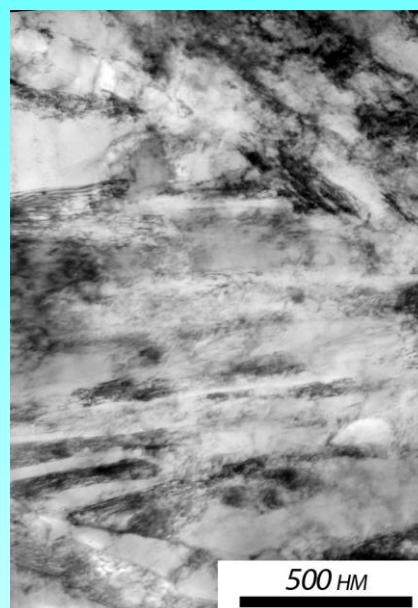


Влияние деформации ДКУП на упрочнение гафниевой бронзы

ДКУП 1, проход

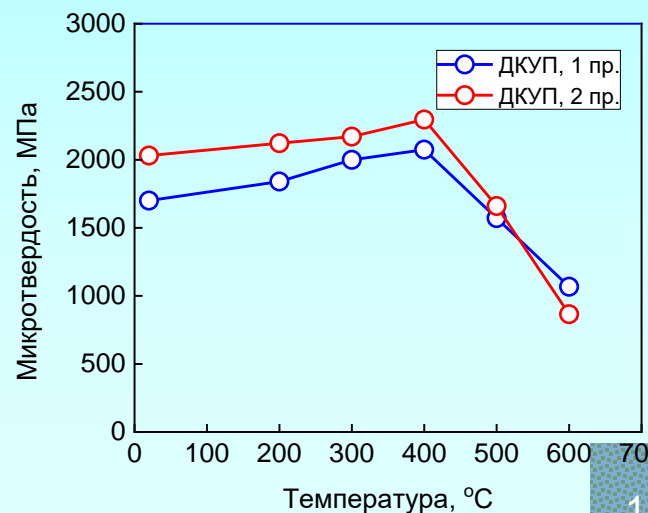


ДКУП, 2 прохода



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 гафниева 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 гафнием – элементами понижающими энергию дефектов упаковки, основным фактором упрочнения при деформации методом ДКУП является интенсивное развитие двойникования.

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



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !