

«XIII ЗАБАБАХИНСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ»

20–24 марта 2017 г. Снежинск, Челябинская область, Россия

СТРУКТУРНАЯ ФРАГМЕНТАЦИЯ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ Ni_3X ($X=Ge, Al, Fe$) ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ

Юлия Владимировна Соловьёва², В. П. Пилюгин¹, А. И. Анчаров³,
В. А. Старенченко², С. В. Старенченко², Б. А. Гринберг¹, А. М. Пацелов¹, Т. П. Толмачёв¹, А. В. Плотников¹

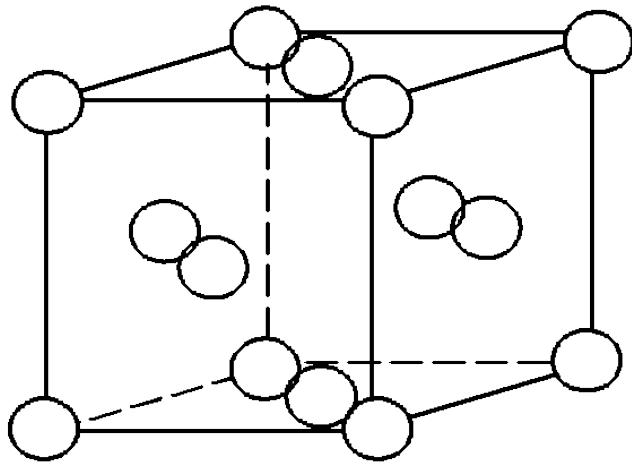
¹ Институт физики металлов им. М.Н. Михеева, УрО РАН, Екатеринбург, Россия

² Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия

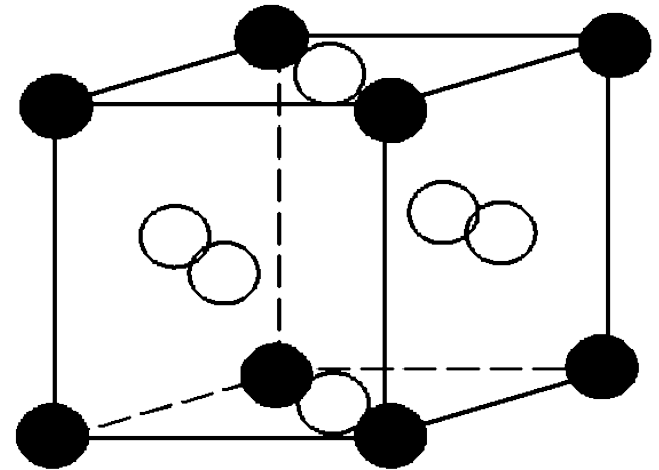
³ Институт химии твердого тела и механосинтеза СО РАН, Новосибирск, Россия

Сверхструктура $L1_2$

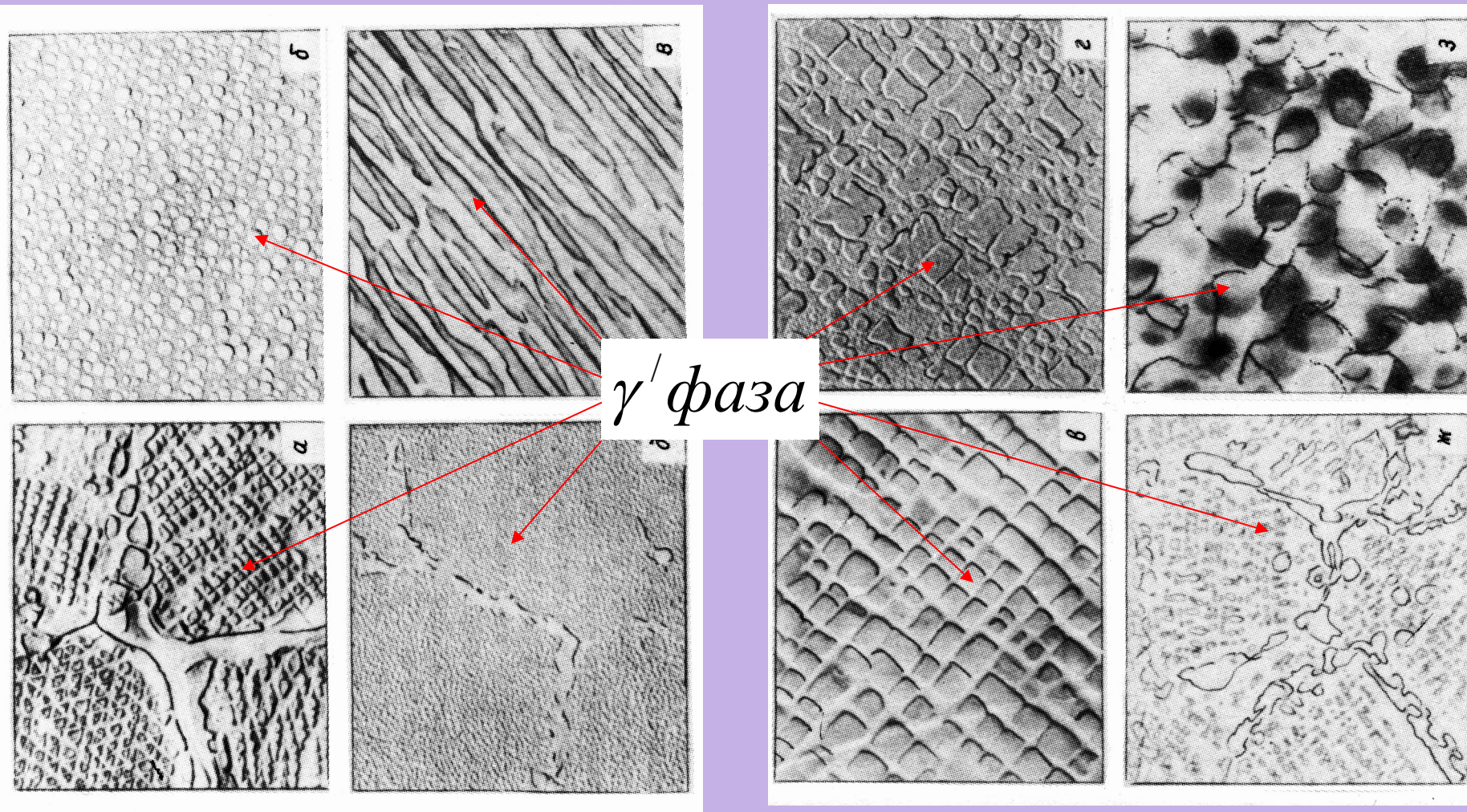
ГЦК-решётка



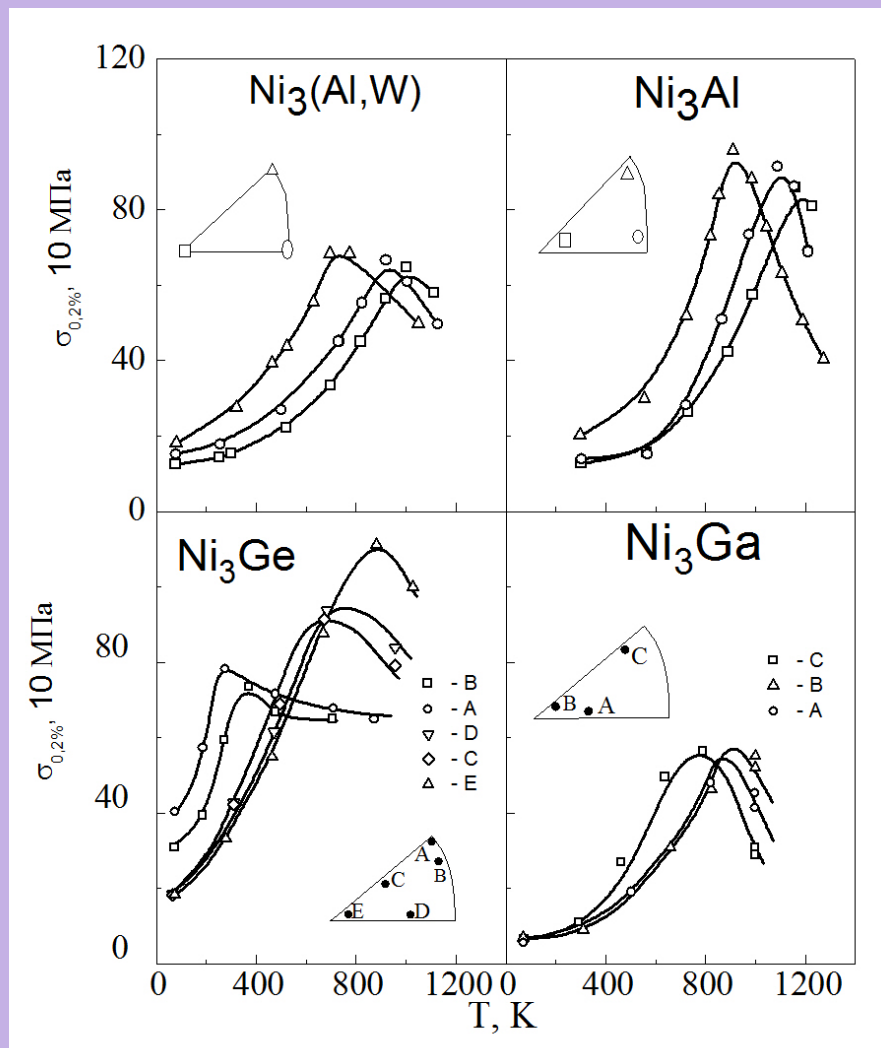
● – атомы сорта А
○ – атомы сорта В



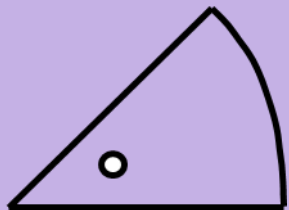
Микроструктура суперсплавов



Аномалия температурной зависимости предела текучести

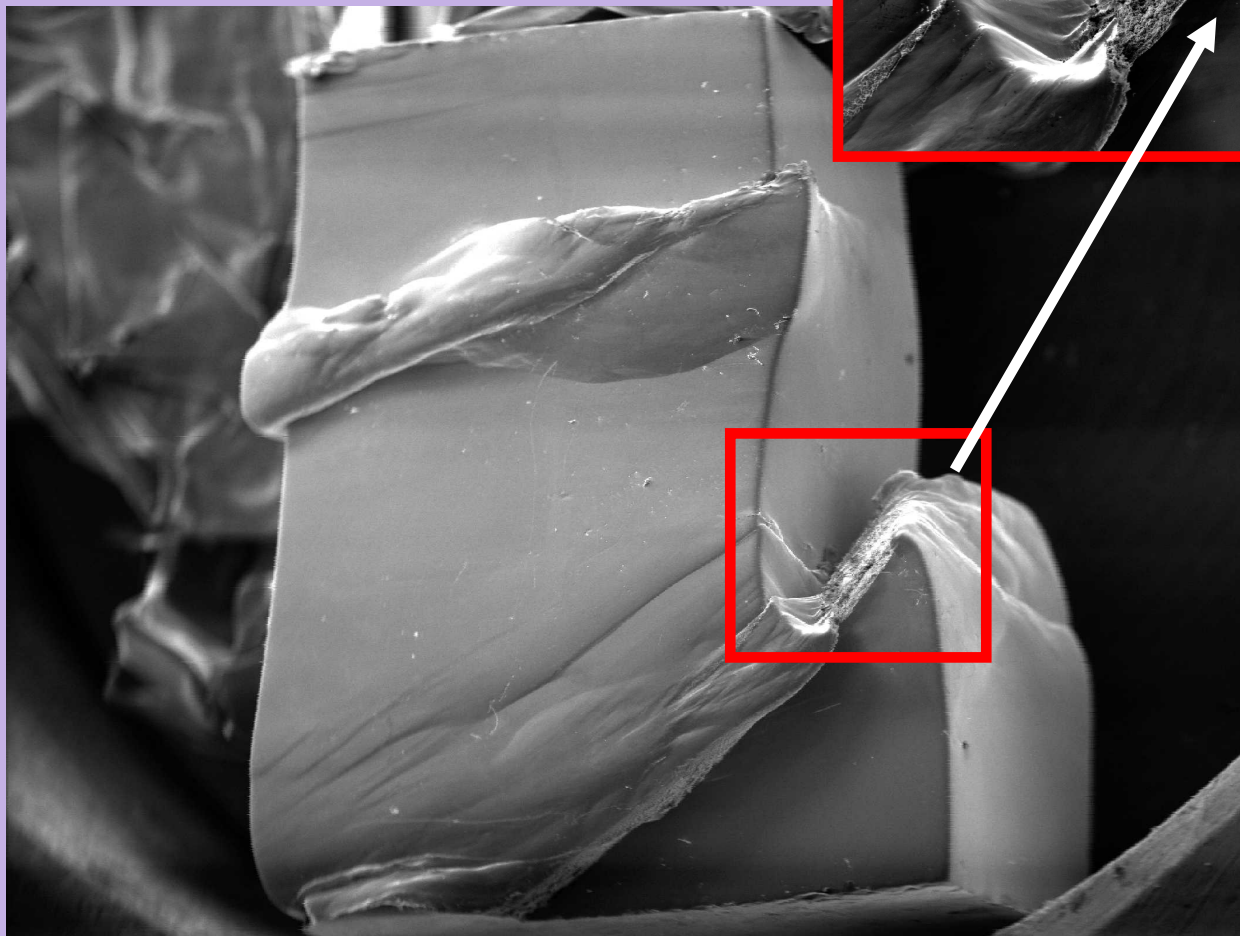


СТРУКТУРНАЯ ФРАГМЕНТАЦИЯ В ПОЛОСЕ СУПЕРЛОКАЛИЗАЦИИ



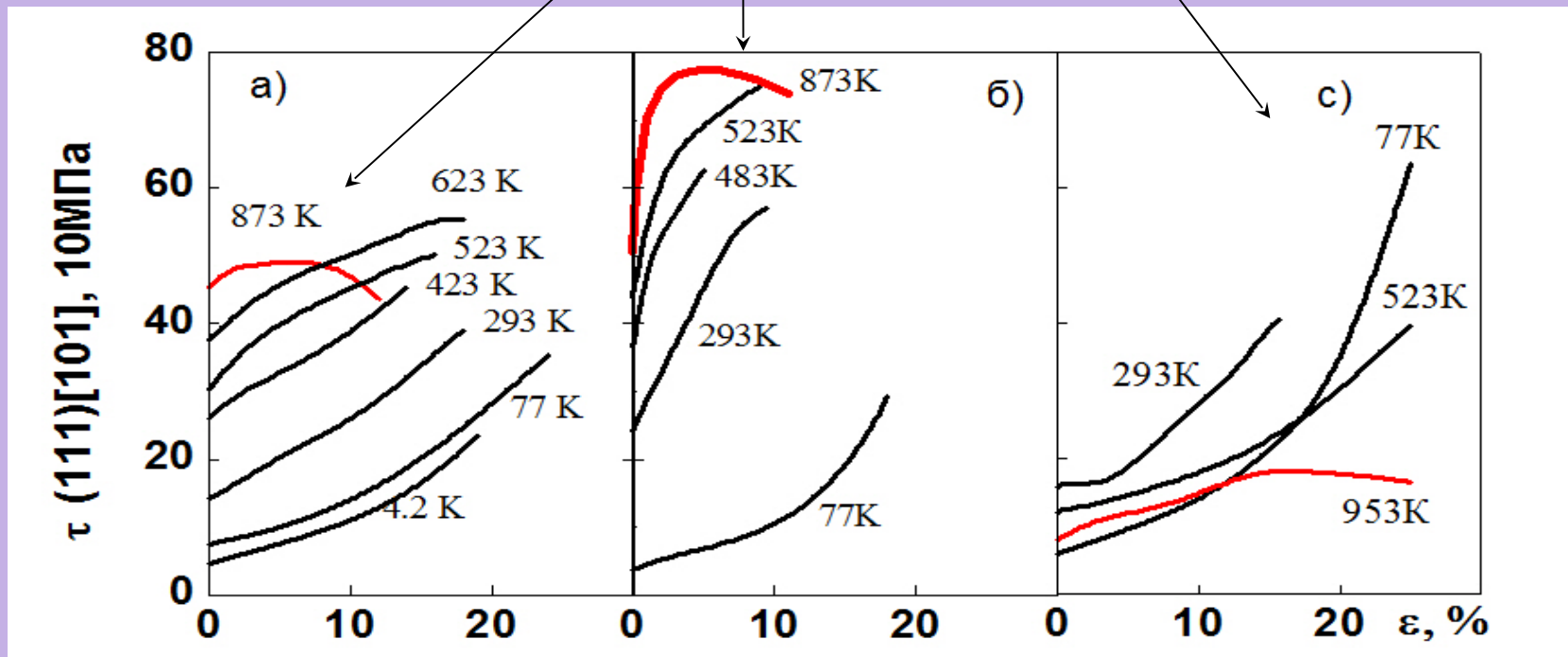
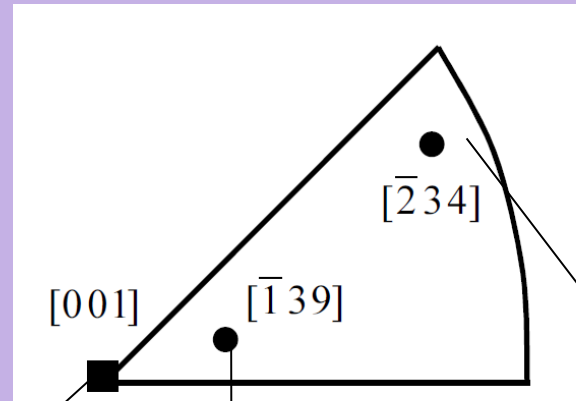
[1 3 9]

Ni_3Ge



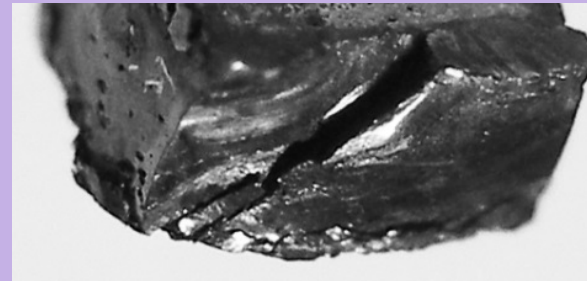
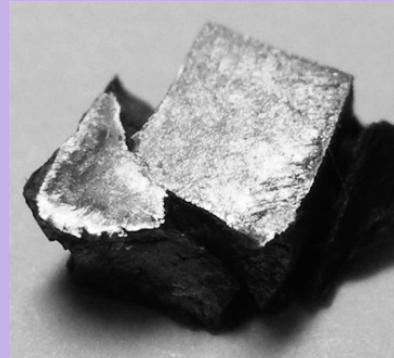
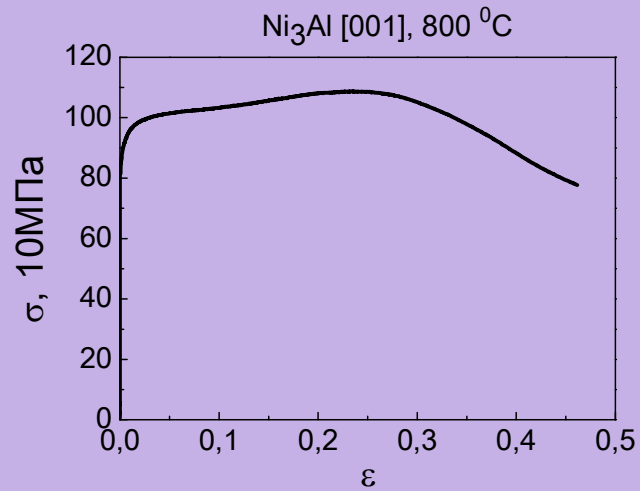
ДЕФОРМАЦИОННОЕ РАЗУПРОЧНЕНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ Ni_3Ge ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

$$\frac{T}{T_{пл}} \geq 0,6$$



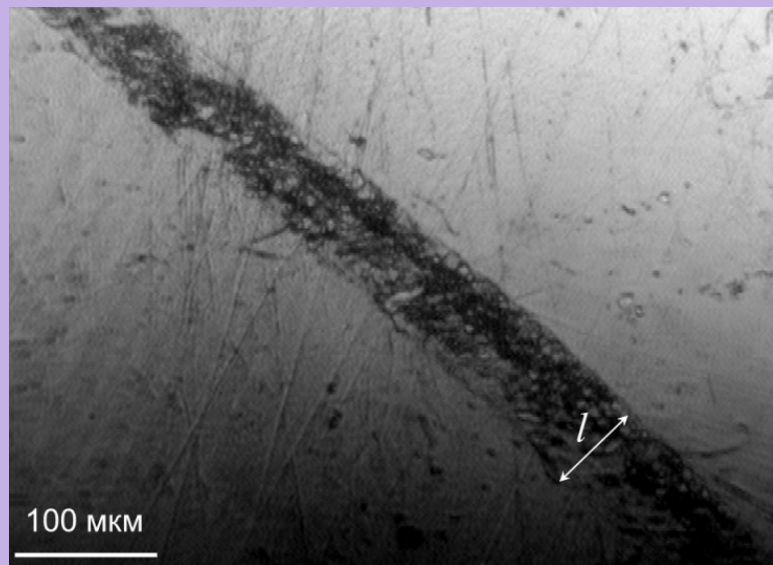
- Ширина полосы 50÷70 мкм
- Скорость деформации в полосе в 100 раз выше средней по образцу
- Степень деформации в полосе может возрасти практически неограниченно (сотни процентов)
- Давление ≈ 1 ГПа

Суперлокализация Ni₃Al при сжатии

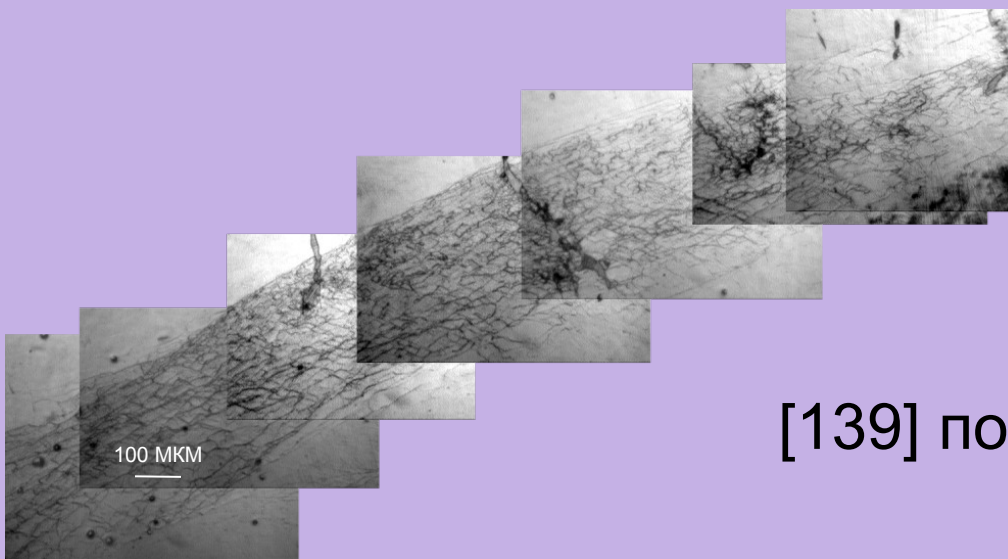
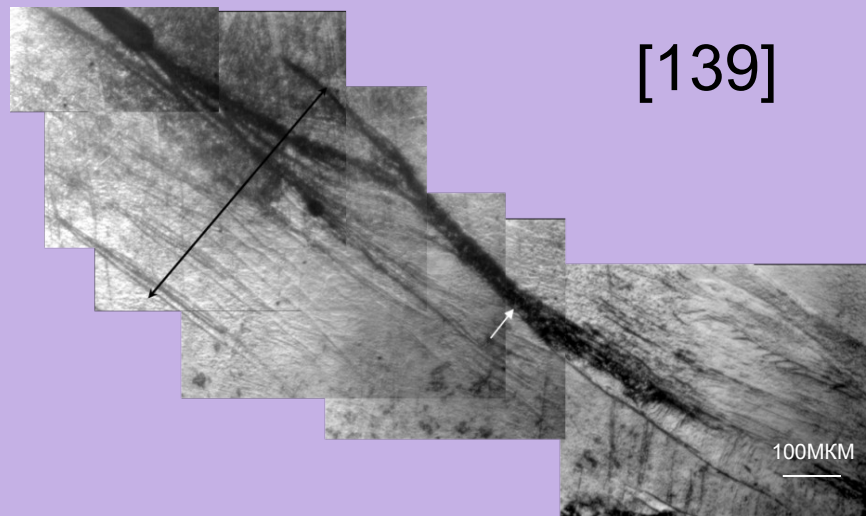


Структура полосы суперлокализации (металлография)

[001]

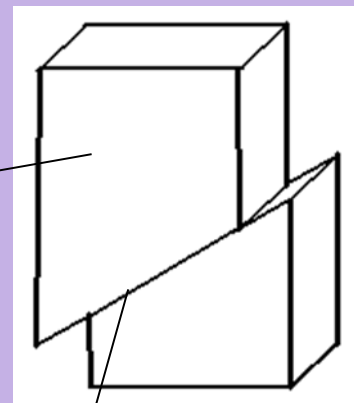


[139]

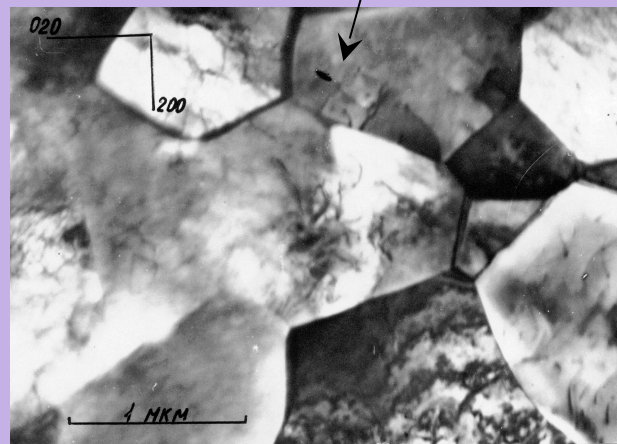


[139] ползучесть

Структура полосы суперлокализации (ПЭМ)



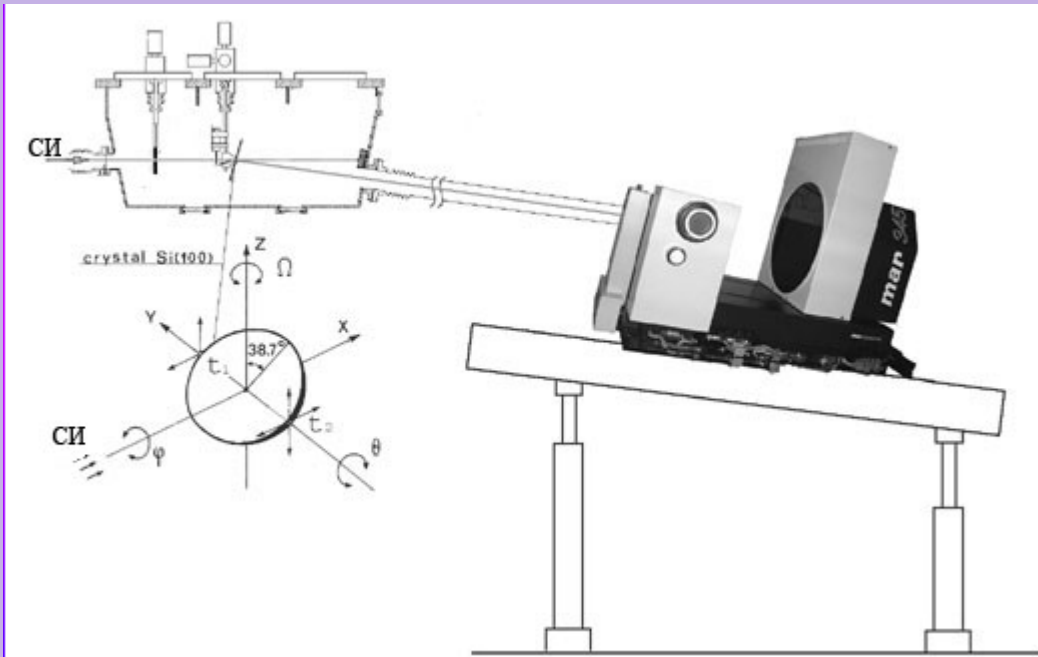
873K, $\varepsilon = 13\%$



"Сибирский Центр Синхротронного и Терагерцового Излучения"

Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН, г.Новосибирск

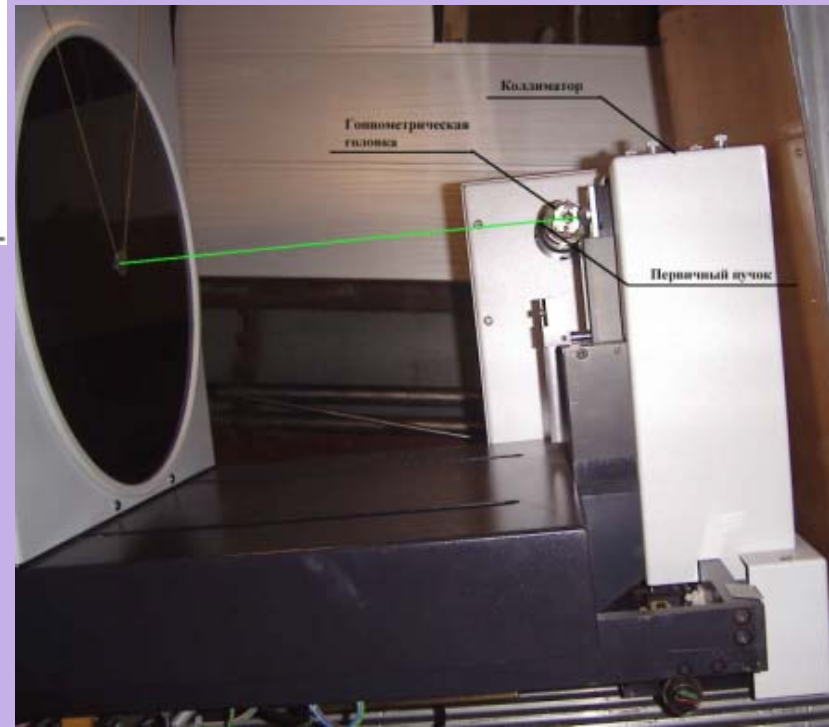
Дифрактометрия в «жестком» рентгеновском диапазоне

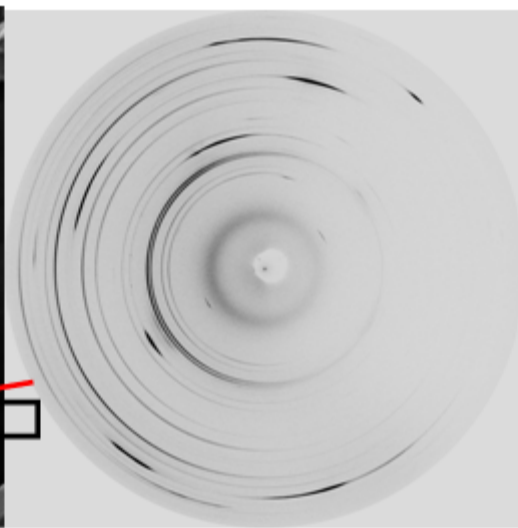
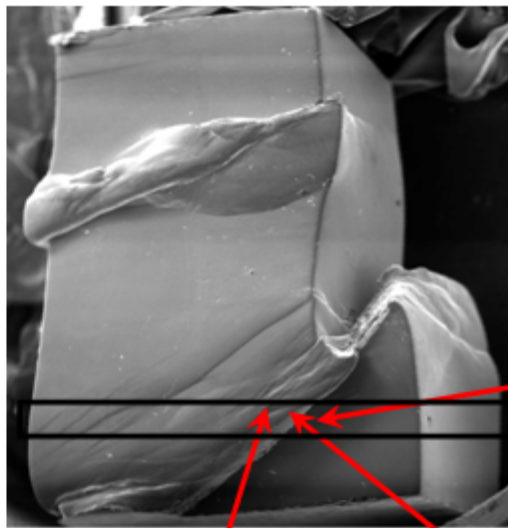


Детектирующая система mar345

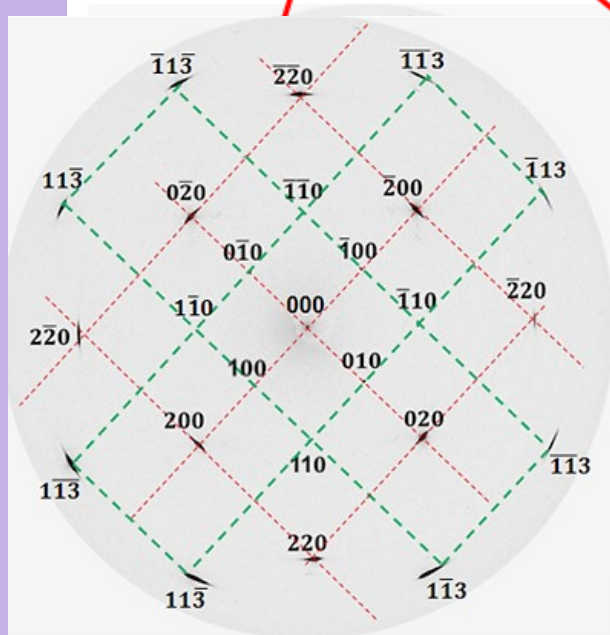
Энергия рентгеновских квантов: 33.7 кэВ (длина волны 0.3685 А)

Размер выходного пучка: От 0.1 x 0.1 мм до 0.8 x 3 мм

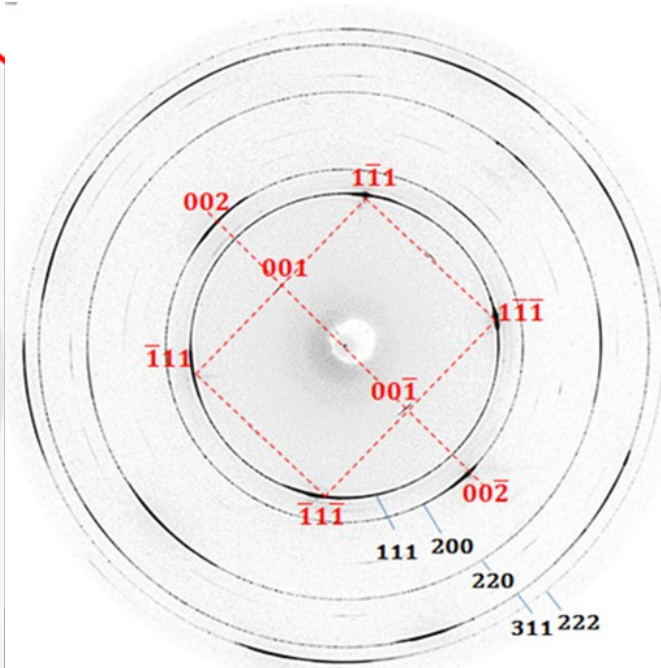




ГАЛО



Монокристалл: (001) (031) (301)
18,4°

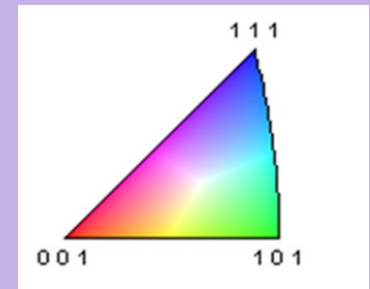
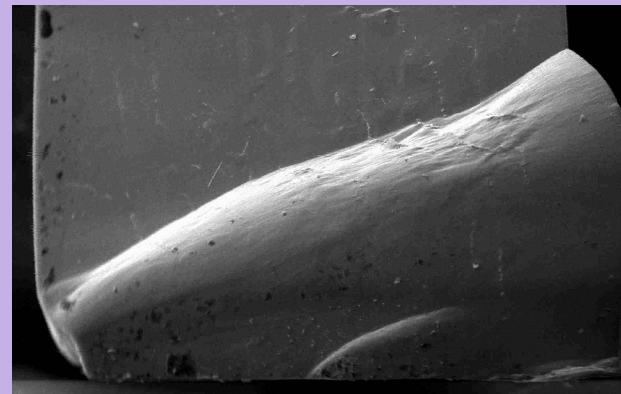
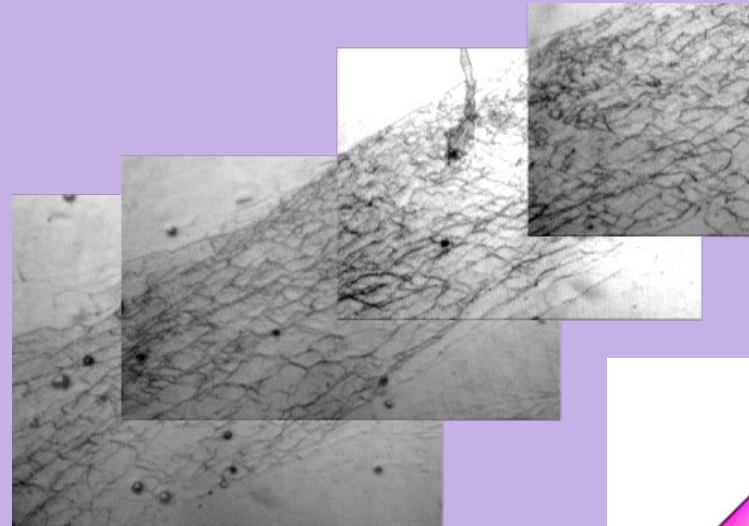
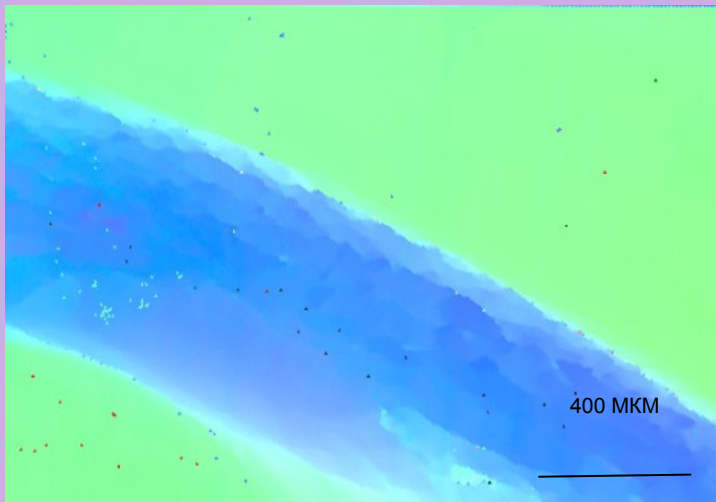


Поликристалл (110)

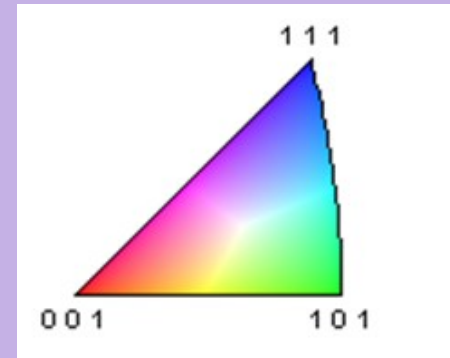
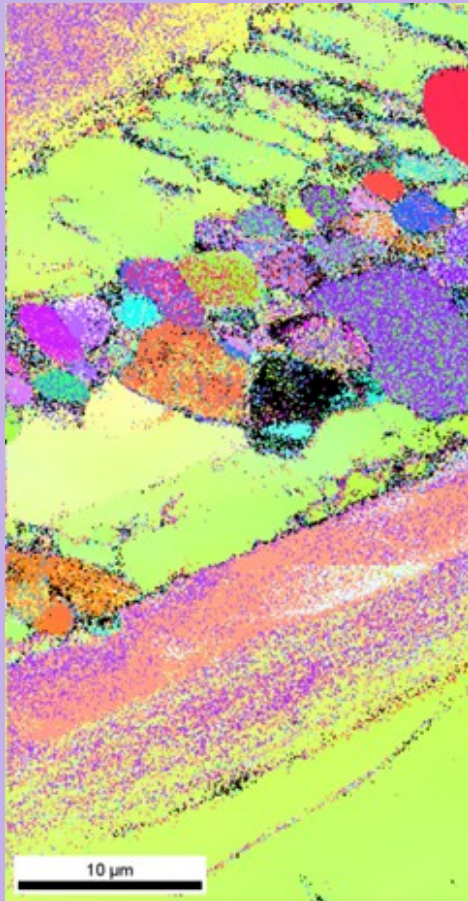
Структура полосы суперлокализации (EBSD)

Ползучесть

$T=923\text{K}$; $\sigma=300\text{ МПа}$;
 $t=29\text{ час}$; $\varepsilon\approx 3,5\%$



Структура полосы суперлокализации (EBSD)



многоуровневое моделирование процессов деформации и макролокализации монокристаллоов с ГЦК структурой

Дислокационная модель элемента деформационной среды в условиях однородного напряженного состояния

движение дислокаций. м-д взаимодействие

формирование зон сдвига

эволюция д.с. как результат мезонного взаимодействия

система д.у., описывающая элемент среды

сценарии эволюции элемента деформационной среды

описания монокристалла, как 3D объекта, состоящего из элементов деформационной среды, описываемой сценариями дислокационной модели
в терминах механики сплошной среды.
(законы сохранения + дислокационная диссипации)

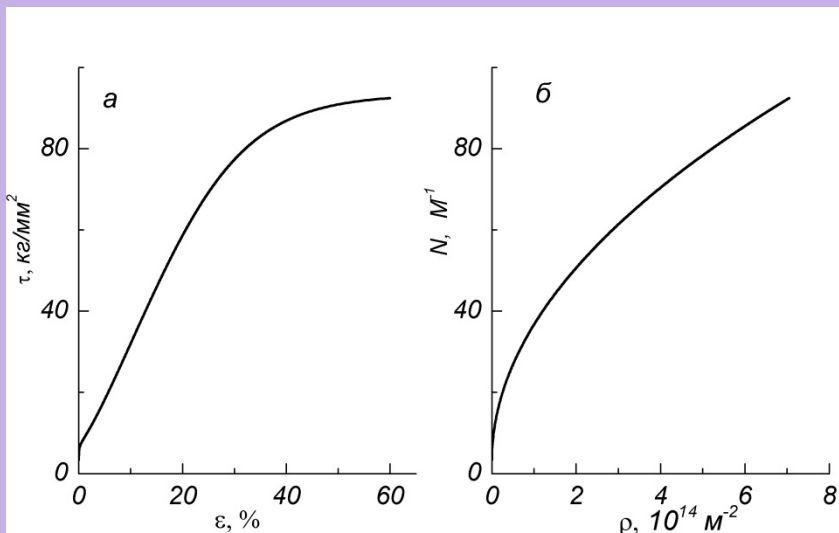
Модель дислокационной кинетики деформационного и термического упрочнения

$$\frac{d\rho}{d\varepsilon} = C_1 \frac{(\alpha G b)^2 \rho}{\tau} \omega + \frac{C_2 e^{-U_1/kT} + C_3 e^{-U_2/kT}}{G b \rho^{1/2}} - \frac{1}{\dot{\varepsilon}} A \frac{\rho^2}{\tau} - \frac{1}{\dot{\varepsilon}} R \rho N + \xi \frac{N}{\Delta h},$$

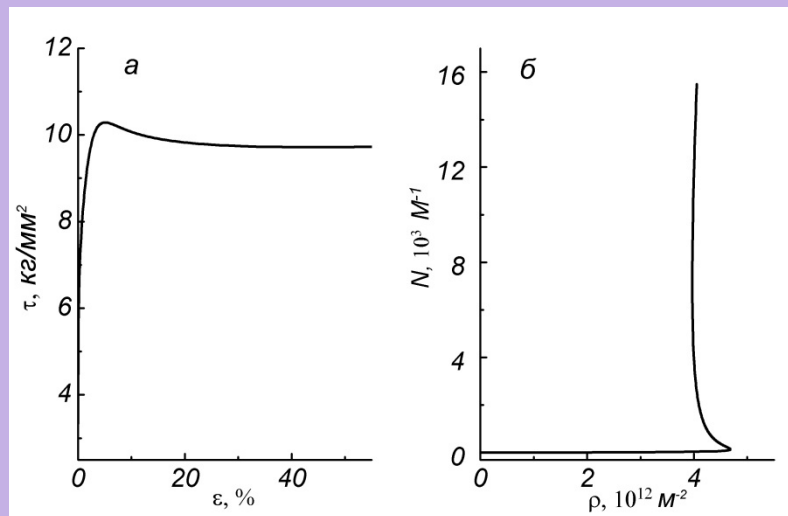
$$\frac{dN}{d\varepsilon} = I \rho N - \xi N$$

$$\tau = \tau_f^0 + \gamma_1 \tau_0^{(1)} \exp(-U_1/kT) + \gamma_2 \tau_0^{(2)} \exp(-U_2/kT) + (\alpha_0 - \beta T) G b \rho^{1/2} + \frac{G b N}{4\pi} \lg\left(\frac{l}{N b}\right)$$

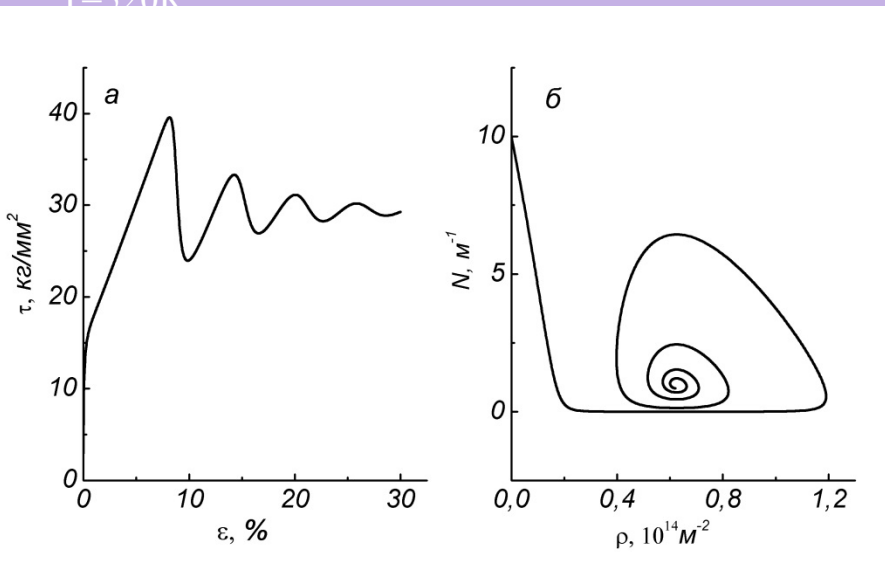
Кривые упрочнения и фазовые портреты, полученные при решении уравнений модели дислокационной кинетики



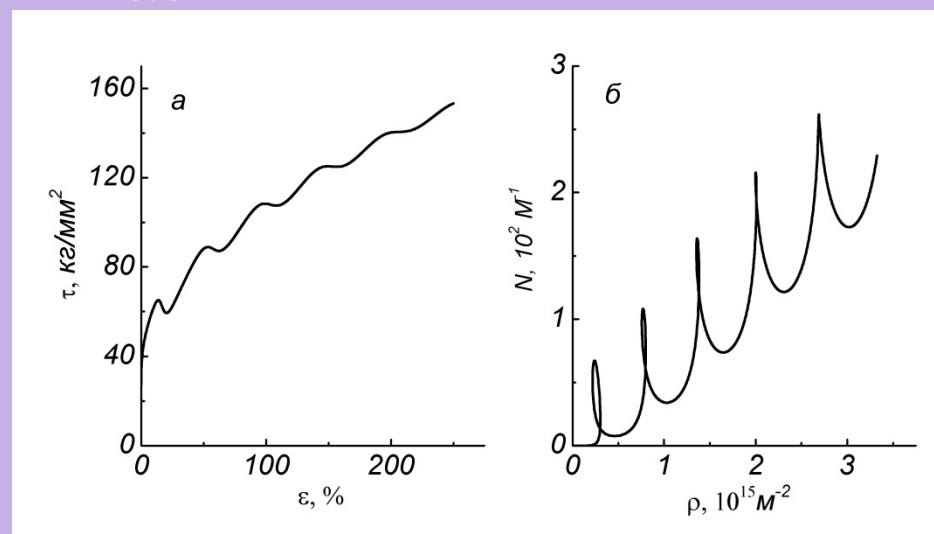
$\rho_0=10^{10}M^{-2}$, $\xi=0,01$, $\Delta h=10^{-6}M$, $R=0,4$, $I=7 \cdot 10^{-14}$,
 $T=520K$



$\rho_0=10^{10}M^{-2}$, $\xi=0,01$, $\Delta h=10^{-8}M$, $R=0,4$, $I=5 \cdot 10^{-13}$,
 $T=870K$



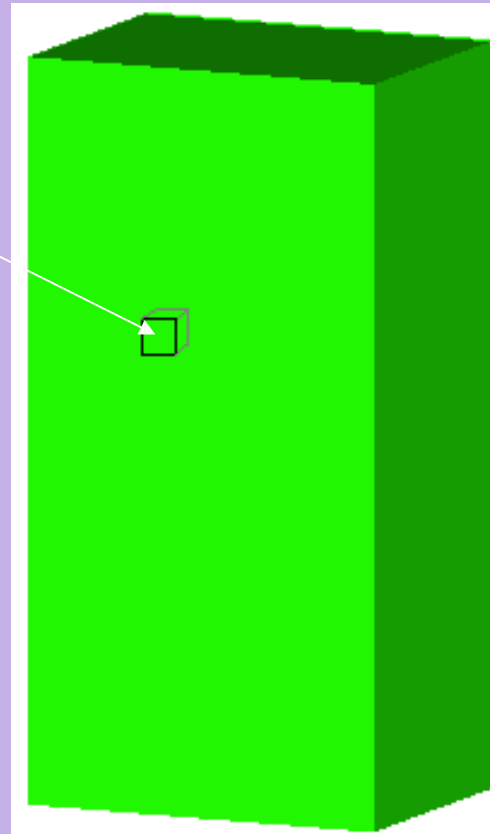
$\rho_0=10^8 M^{-2}$, $\xi=0,5$, $\Delta h=10^{-6} M$, $R=0,4$, $I=7 \cdot 10^{-14}$,
 $T=870K$



$\rho_0=10^8 M^{-2}$, $\xi=0,5$, $\Delta h=10^{-6} M$, $R=0,4$, $I=7 \cdot 10^{-14}$,
 $T=870K$

Учет сценариев развития дефектной структуры в макроскопическом объеме деформируемого объекта

Микрообъем
однородного
напряженного
состояния



Модель упругопластической среды

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV = 0$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \bar{u} dV = \int_{\Sigma} \bar{n} \cdot \hat{\sigma} dS$$

$\sigma_{ij} = S_{ij} - P\delta_{ij}$ - компоненты тензора напряжений

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho E dV = \int_V \sigma_{ij} e_{ij} dV$$

$e_{ij} = 0.5(\nabla_i v_j + \nabla_j v_i)$ - компоненты тензора скоростей деформаций

$$2\mu \left(e_{ij} - \frac{1}{3} e_{kk} \delta_{ij} \right) = \frac{dS_{ij}}{dt} - S_{ik} \omega_{jk} - S_{jk} \omega_{ik} + \lambda S_{ij}$$

$$S_{ij} S_{ij} = \frac{2}{3} (\sigma_s)^2$$

$\sigma_s = \sigma_s(P, e_{ij}, T, \dots)$ - предел текучести

$\rho_0, c_0, \gamma_0, \mu_0, \eta$ - параметры материала

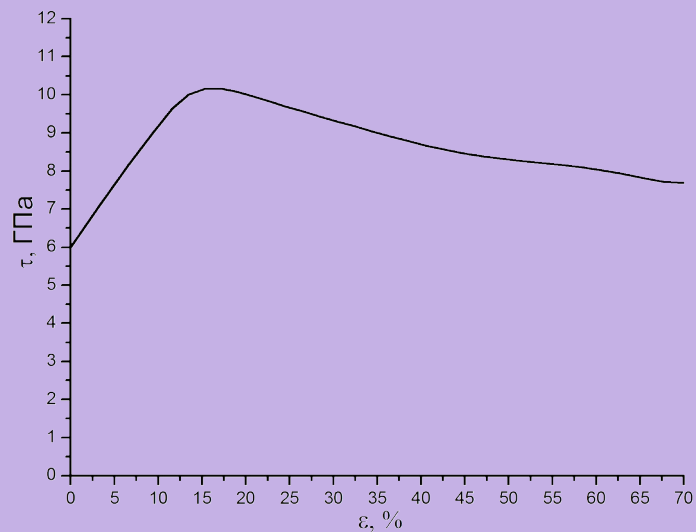
$$P = \rho_0 \left[\gamma_0 \varepsilon + \frac{c_0^2 \left(1 - \frac{\gamma_0 \eta}{2} \right) \eta}{(1 - S_0 \eta)^2} \right]$$

$$e_u = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{3T_2 - T_1^2} - \text{предельная величина}$$

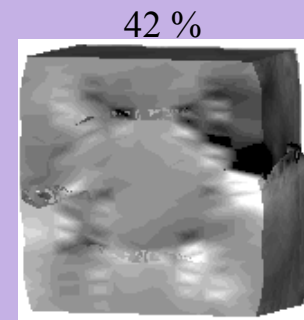
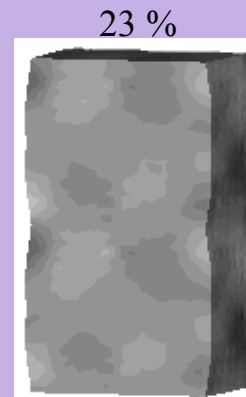
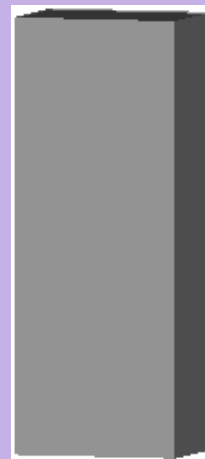
интенсивности пластических деформаций

$$T_1 = \varepsilon_{ij} \delta_{ij}, T_2 = \varepsilon_{ij} \varepsilon^{ij} - \text{первый и второй инварианты тензора деформаций}$$

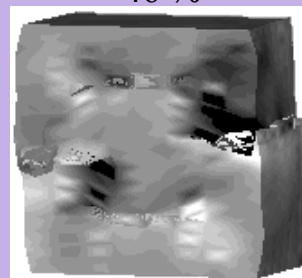
Результаты расчета для аperiodически затухающего упрочнения элементарного объема среды с высоким начальным пределом текучести



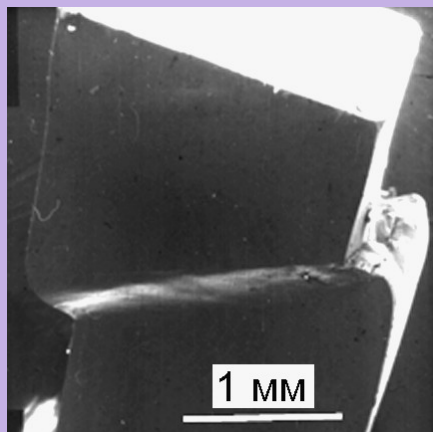
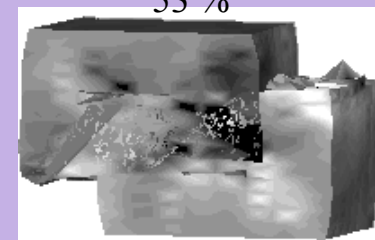
Отношение длины образца к высоте 1:2,6
0 %



46 %



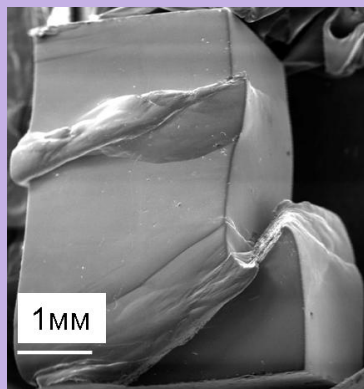
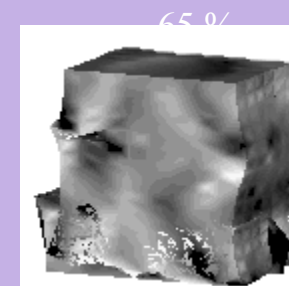
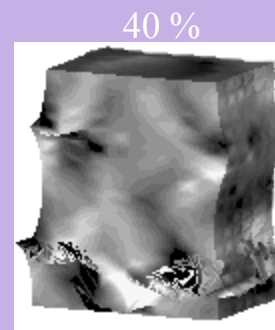
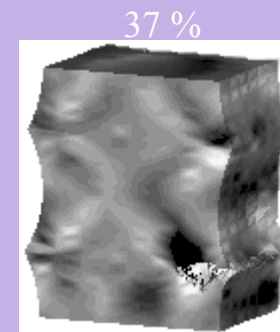
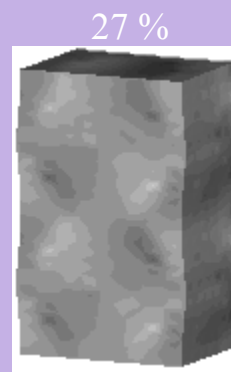
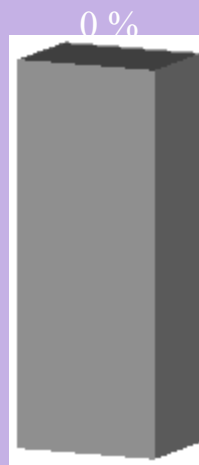
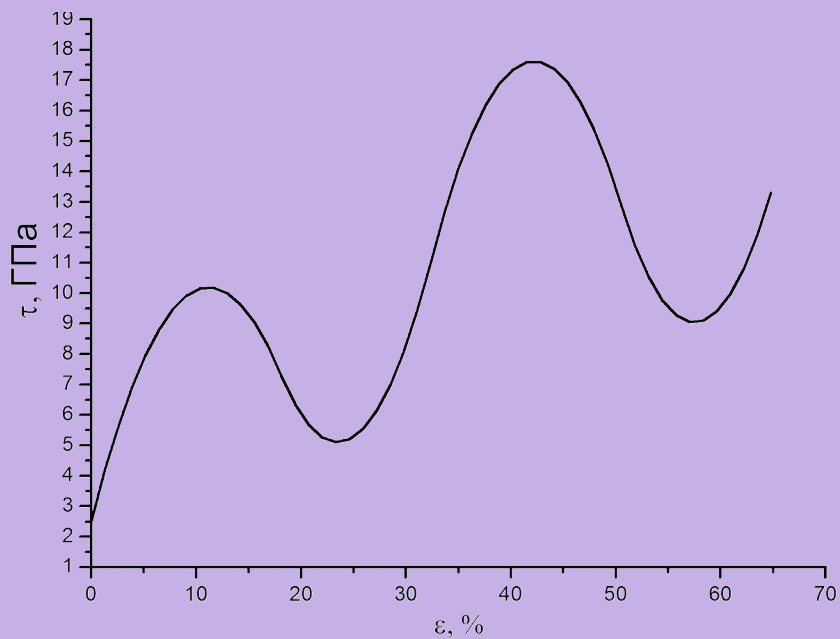
53 %



Полоса суперлокализации деформации монокристалла Ni_3Ge ориентации [001] при температуре 700 °C.

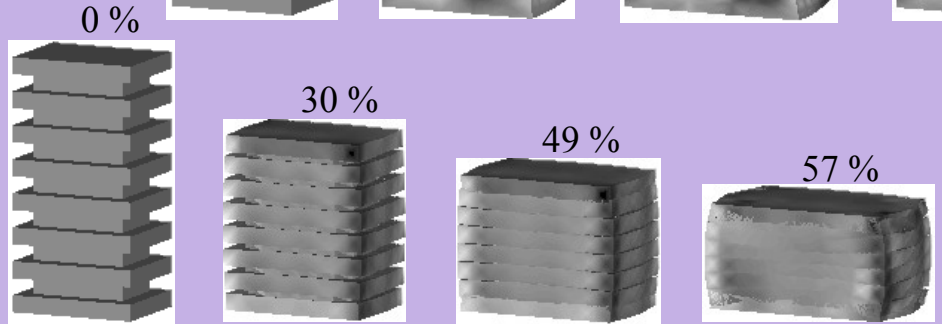
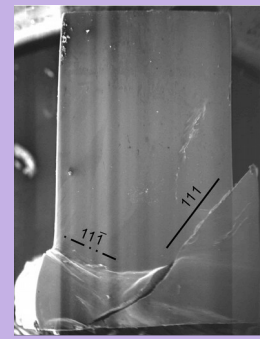
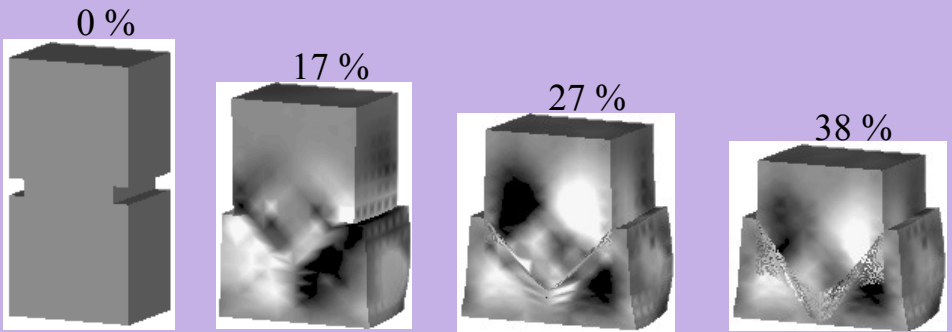
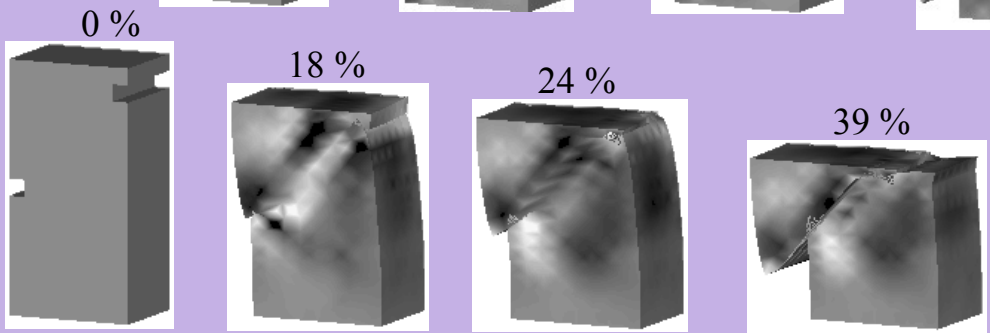
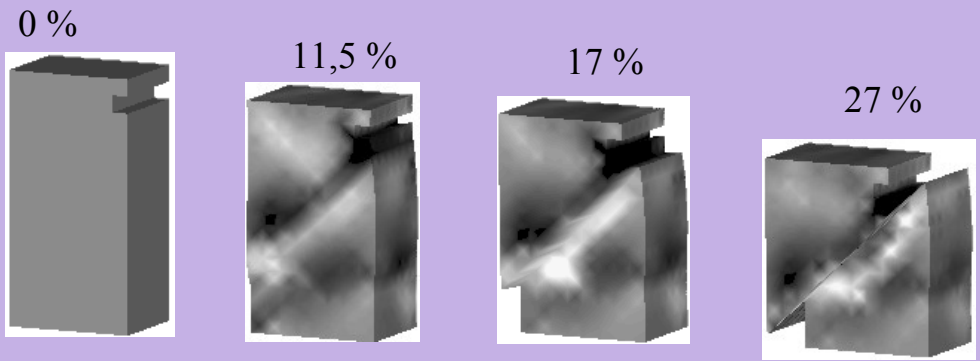
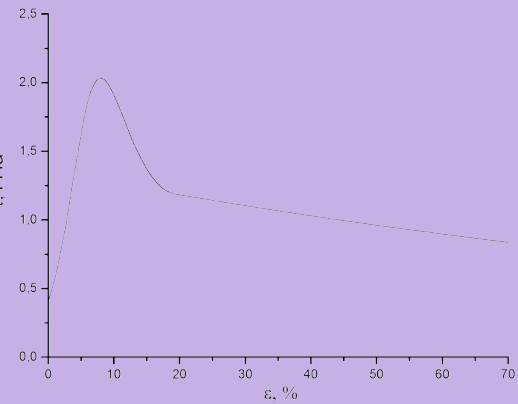
Распределение напряжений в прямоугольном образце для различных степеней деформации

Результаты расчета с периодическим упрочнением на фоне общего возрастания напряжения элементарного объема среды



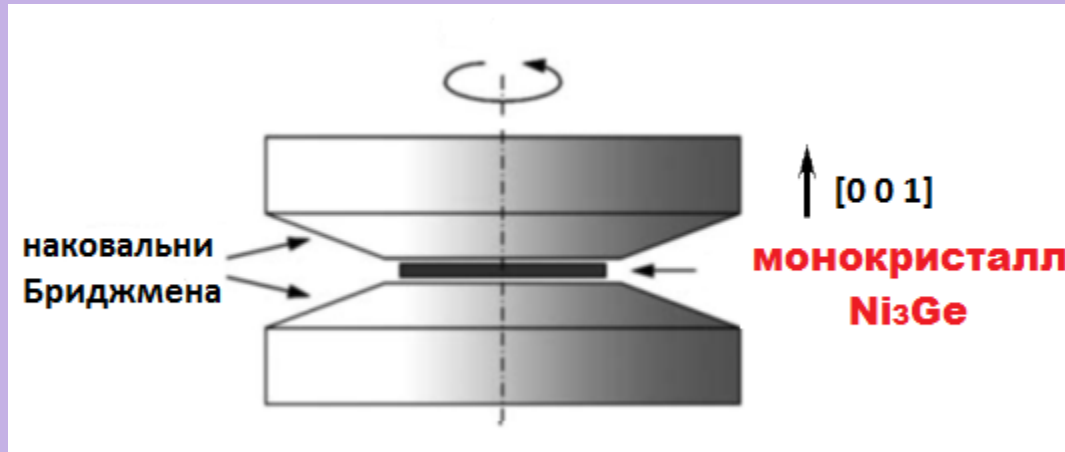
Распределение напряжений в прямоугольном образце для различных степеней деформации

Результаты расчета для аperiodически затухающего упрочнения элементарного объема среды при наличии концентраторов напряжения



СТРУКТУРНАЯ ФРАГМЕНТАЦИЯ
ПРИ КРУЧЕНИИ ПОД
ДАВЛЕНИЕМ В НАКОВАЛЬНЯХ
БРИДЖМЕНА

УСЛОВИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ



$$\epsilon_{\text{полная}} = \epsilon_{\text{сдвига}} + \epsilon_{\text{осадки}}$$

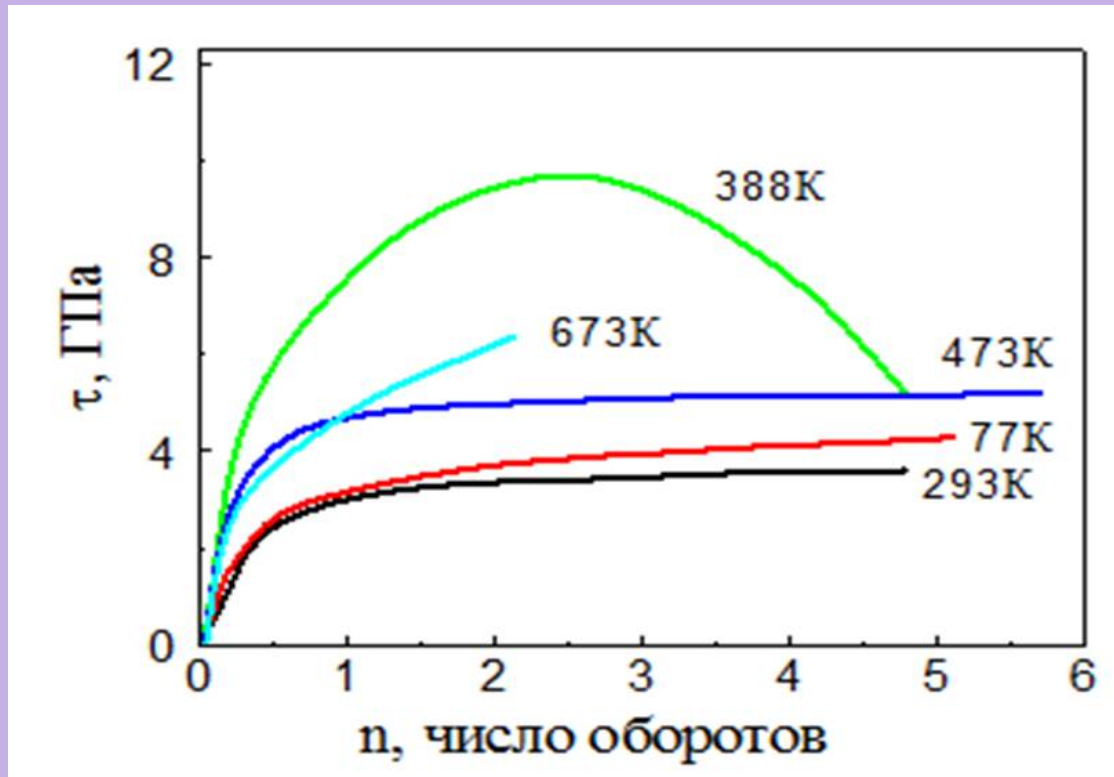
$$P = 8 \text{ ГПа}$$

$$\epsilon = 1-9 \text{ ед.}$$

$$\omega = 0,3 \text{ об/мин}$$

$$T = 77 \text{ К}, 293 \text{ К}, 388 \text{ К}, 473 \text{ К}, 673 \text{ К}$$

СОПРОТИВЛЕНИЕ СДВИГУ ОТ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ В ПРОЦЕССЕ КРУЧЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ СПЛАВА Ni_3Ge

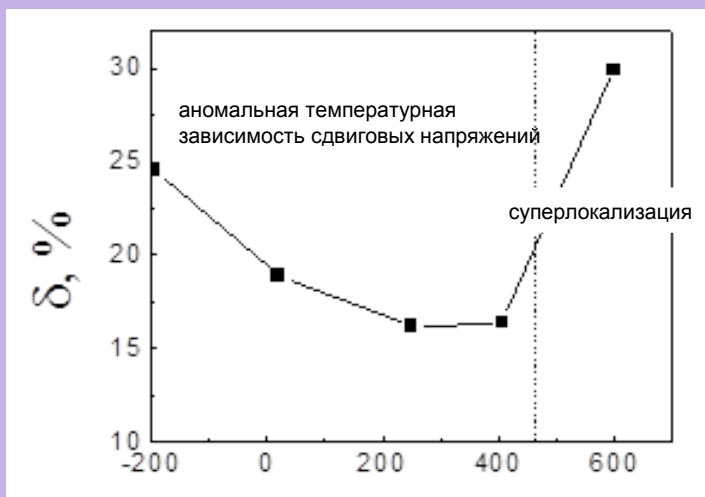


- Высокие сдвиговые напряжения (более, чем на порядок выше чистых металлов)
- Аномальная температурная зависимость сдвиговых напряжений

ПЛАСТИЧНОСТЬ МОНОКРИСТАЛЛОВ СПЛАВА Ni_3Ge ПРИ СДВИГЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

УМЕРЕННЫЕ ДЕФОРМАЦИИ

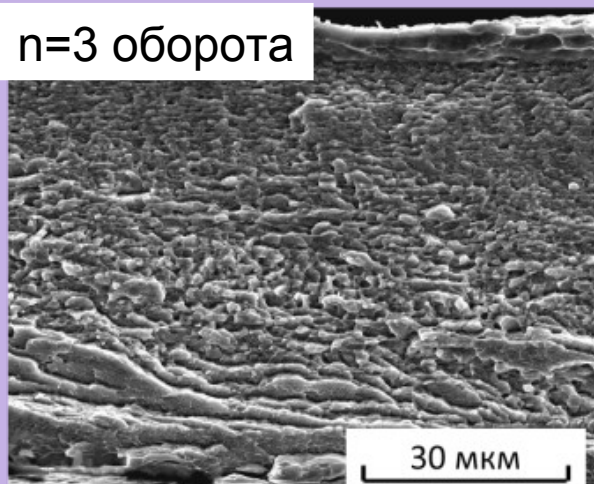
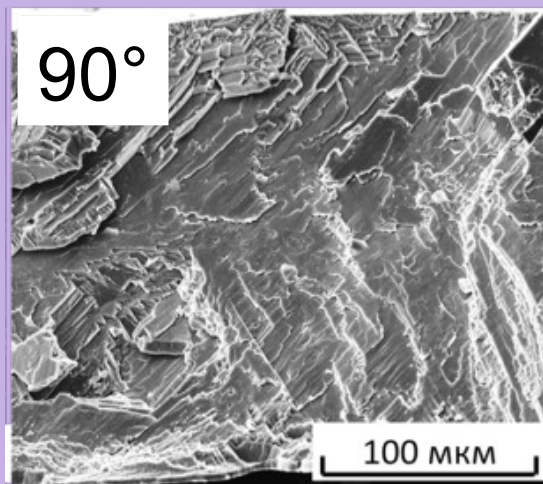
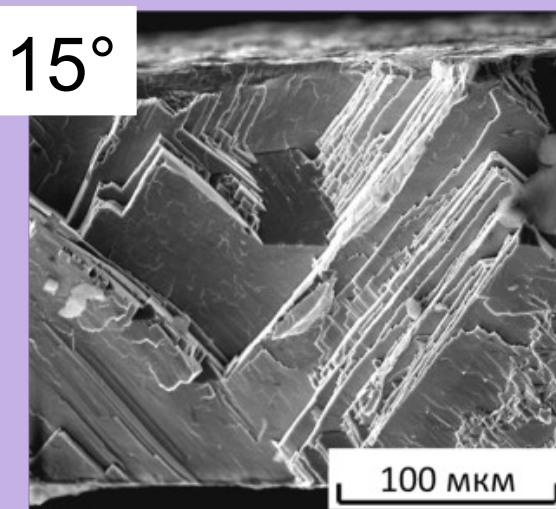
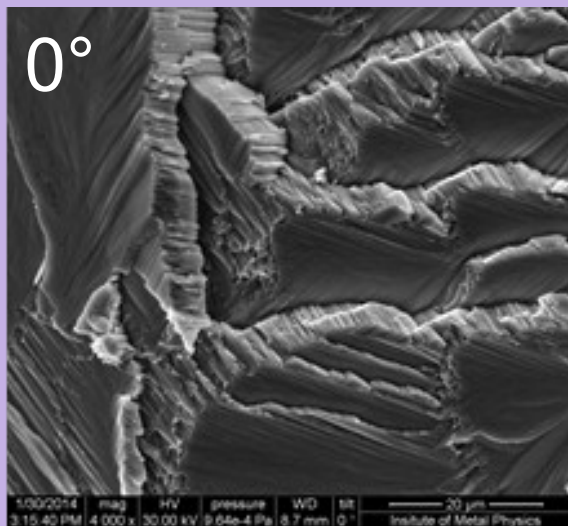
СТЕПЕНЬ ДЕФОРМАЦИИ ДО РАЗРУШЕНИЯ



ИНТЕНСИВНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ

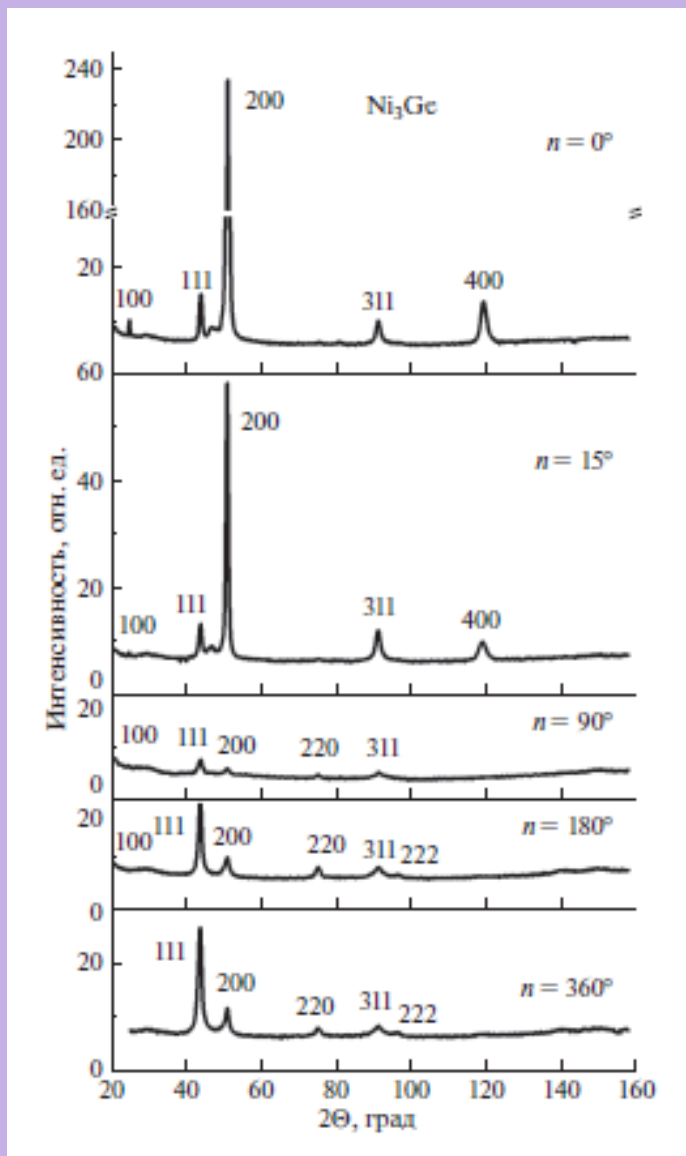
ТЕМП		
-1°		
2		
2 ^ε		
2 ^ε		
2 ^ε		
2 ^ε		

ФРАКТОГРАФИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ Ni_3Ge ПОСЛЕ ДЕФОРМАЦИИ СДВИГА ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ



$$\bar{d} = 0.56 \pm 0.08 \text{ мкм.}$$

Разрушение монокристалличности и дальнего порядка после деформации кручением под давлением



■ БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ !