



Институт физики металлов имени М. Н. Михеева
Уральского отделения Российской академии наук

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЗЕРНА Al-Mg-Mn СПЛАВА, ПОЛУЧЕННОГО ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ, НА ДИНАМИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ

**А. Н. Петрова, И. Г. Бродова, С. В. Разоренов,
Е. В. Шорохов**

Институт физики металлов УрО РАН имени М.Н. Михеева

Институт проблем химической физики РАН

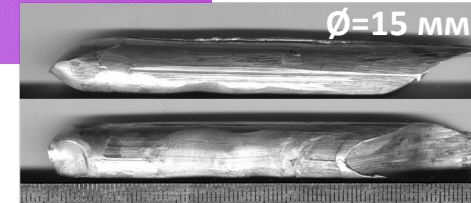
РФЯЦ – ВНИИТФ

Цель работы: изучить влияние размерного фактора на динамические свойства субмикроструктурного Al сплава А5083.

Получения СМК алюминиевых сплавов

Динамическое канально-угловое прессование

Материал: Al-Mg-Mn сплав А 5083



В экспериментах изменялась скорость деформации в зависимости от V и накопленная деформация в зависимости от N

Кручение под высоким давлением в наковальнях Бриджмена

Образцы диаметром 20 мм и толщиной 1 мм после 1, 5 и 10 оборотов наковальни, что соответствует накопленной деформации 7,0; 8,6; 9,3

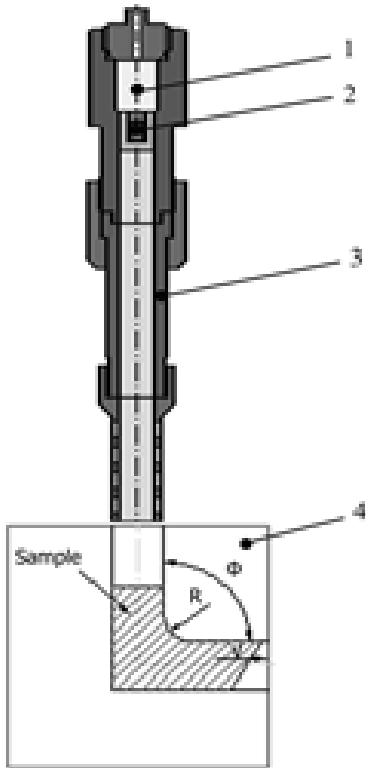
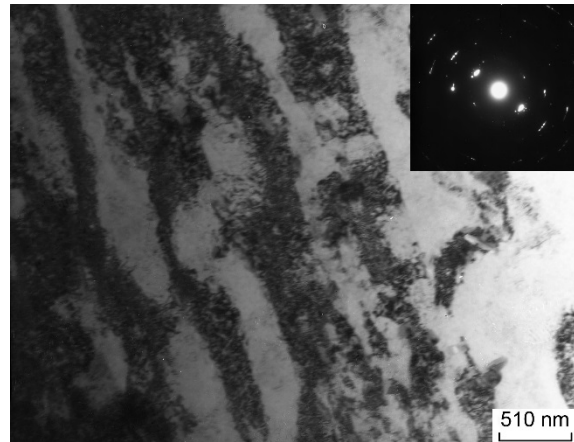
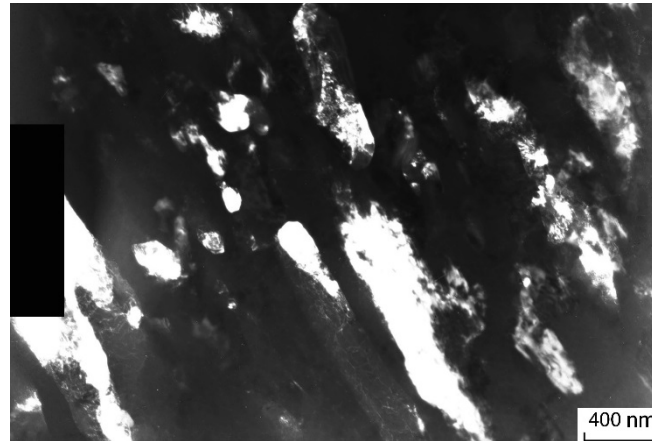
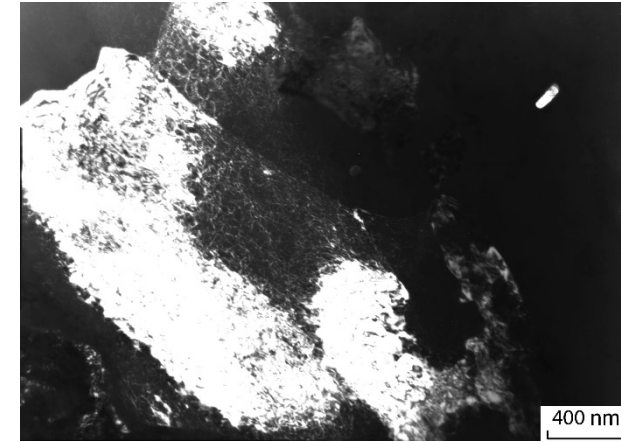
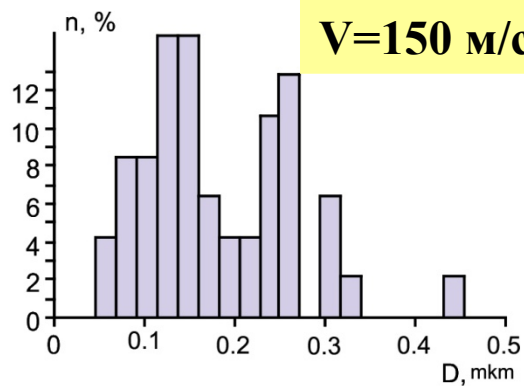
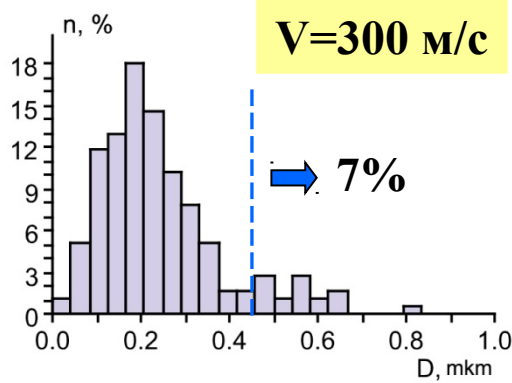
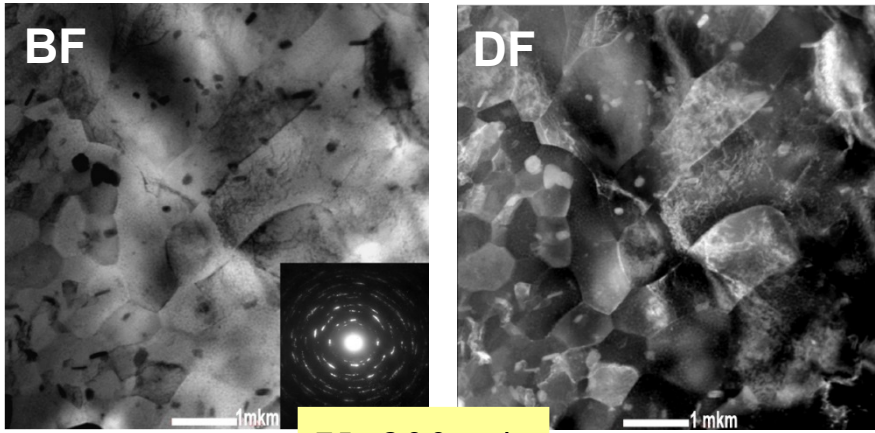


Схема метода:
1- пороховой заряд,
2 - образец,
3 - ствол, 4 - матрица

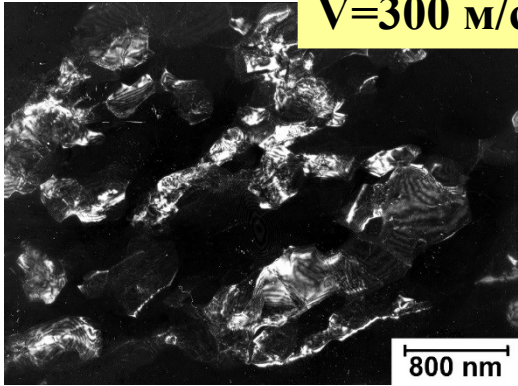


Микро-полосы сдвига

Вытянутые разориентированные
ячейкиКрупные нефрагментированные
субзёрна размером до 1,5 мкм с
повышенной относительно
исходного состояния плотностью
дислокаций $D_{cp} = 180 \text{ нм}$  $D_{cp} = 240 \text{ нм}$

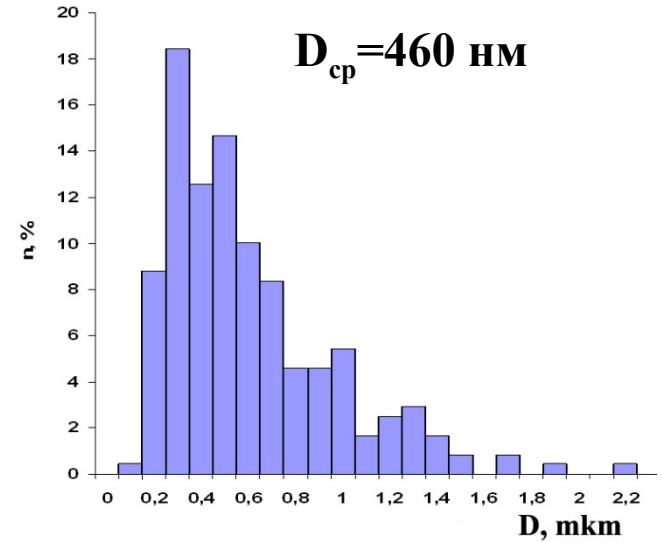


V=300 м/с



Неравномерный контраст внутри фрагментов структуры свидетельствует о высоком уровне внутренних напряжений

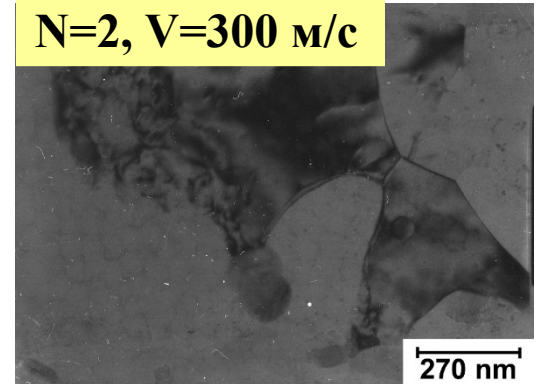
Ультрамелкокристаллическая структура

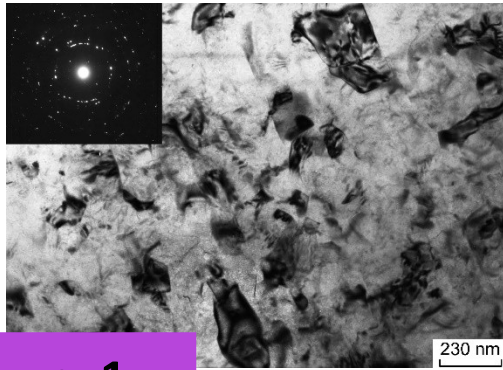


Твердость

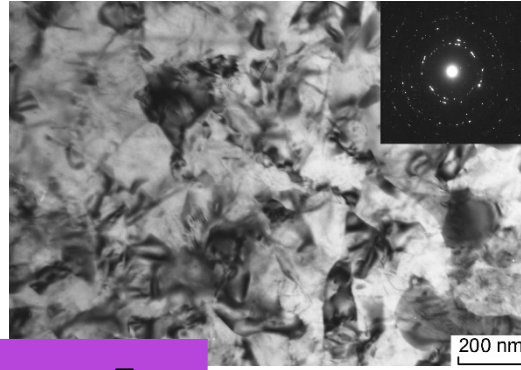
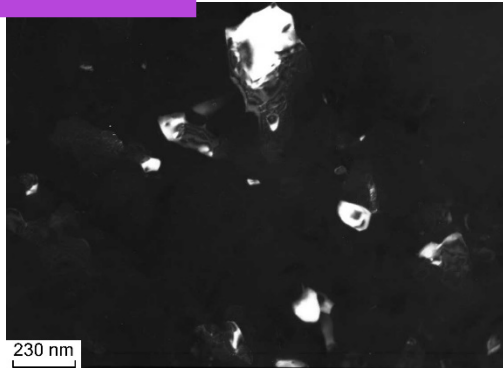
| Исходный | ДКУП N=1 | ДКУП N=2 |
|----------|----------|----------|
| 1000 МПа | 1200 МПа | 1200 МПа |

Динамический возврат

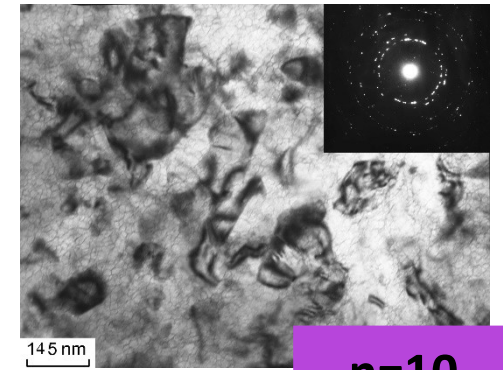




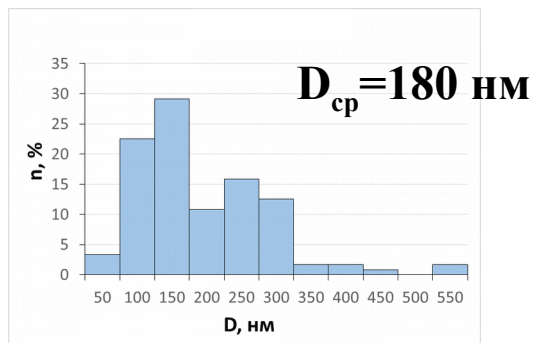
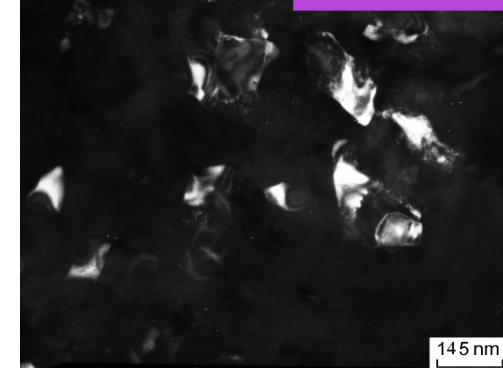
n=1



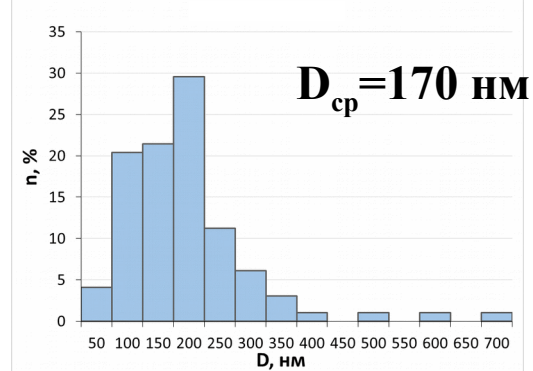
n=5



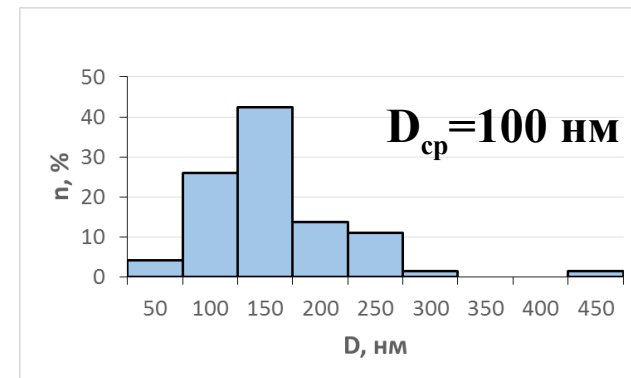
n=10



Твердость 2400 МПа



Твердость 2300 МПа



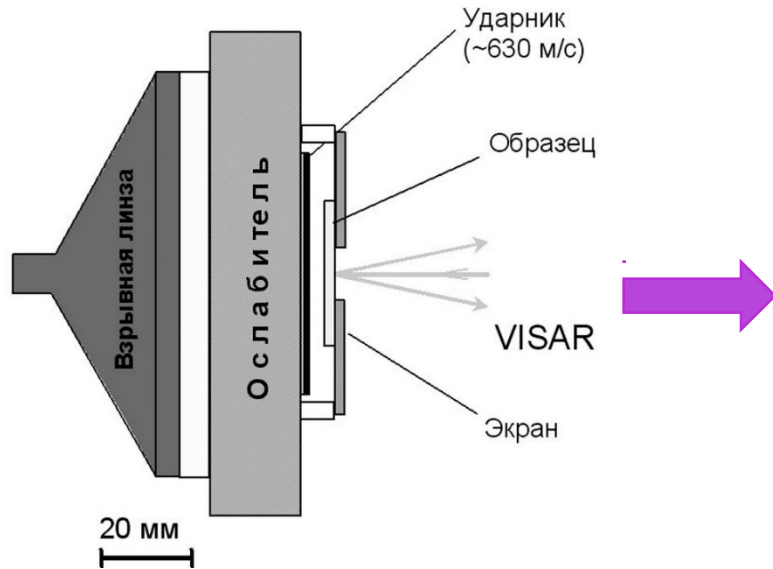
Твердость 2500 МПа

Ударно-волновое нагружение

Толщина образца ~ 2 мм, 1 мм+экран 1 мм

Нагружение ударом плоской алюминиевой пластины толщиной ~ 0.4 мм

Скорость деформации $1.6-2 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$



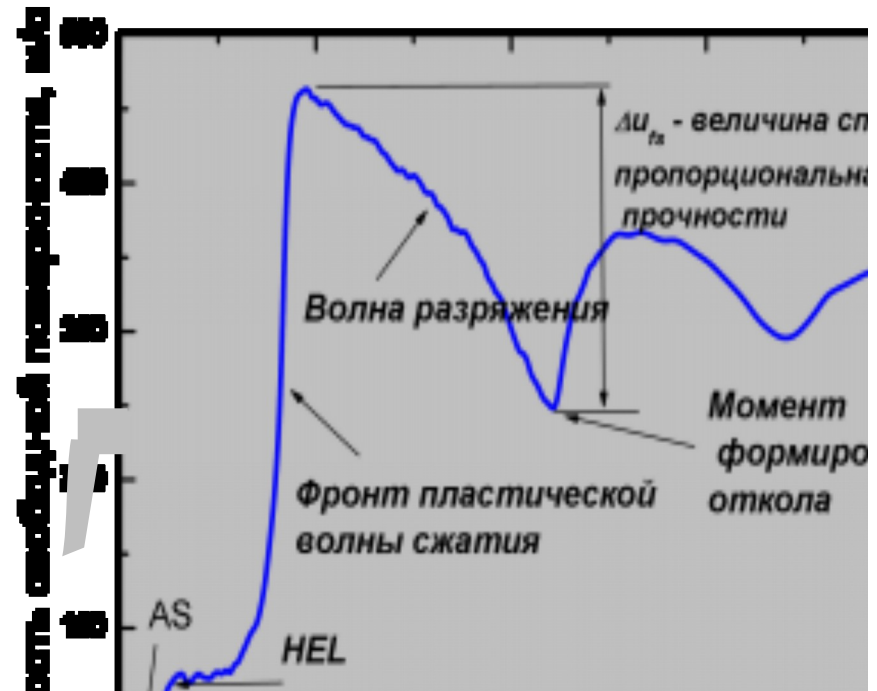
Предел упругости Гюгонио:

$$\sigma_{HEL} = \rho_0 c_l u_{fsHEL} / 2$$

Динамический предел текучести:

$$Y = \sigma_{HEL} (1-2\nu)/(1-\nu)$$

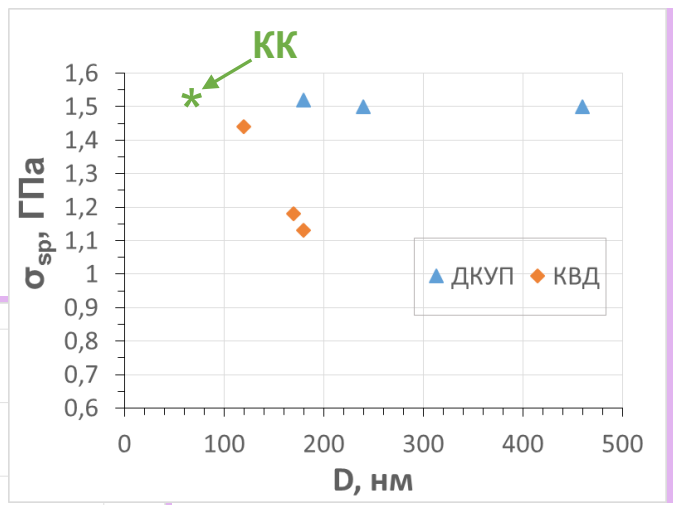
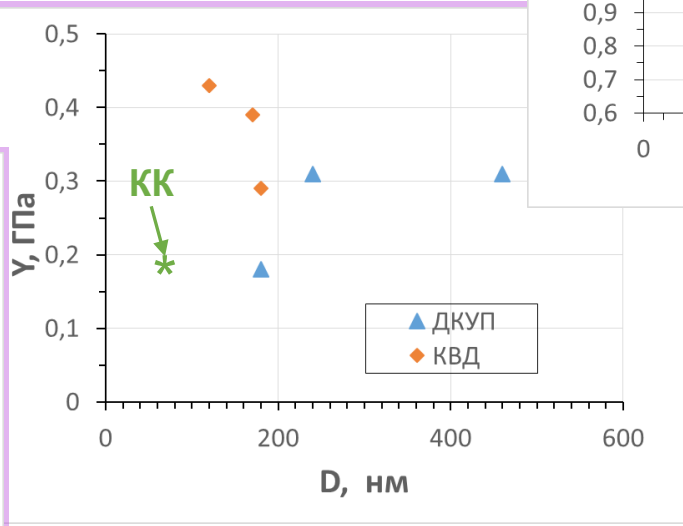
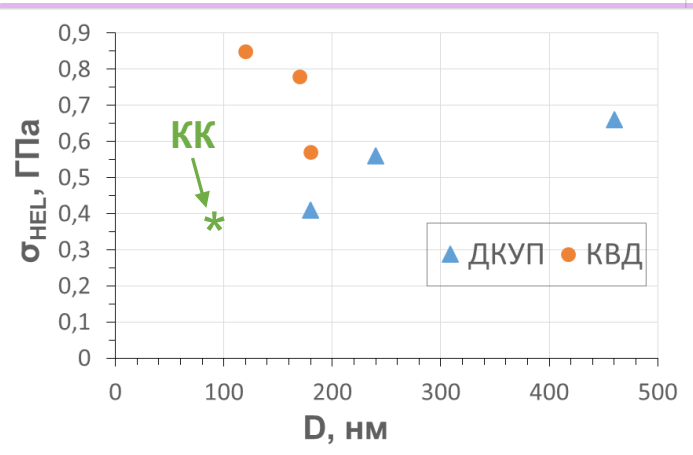
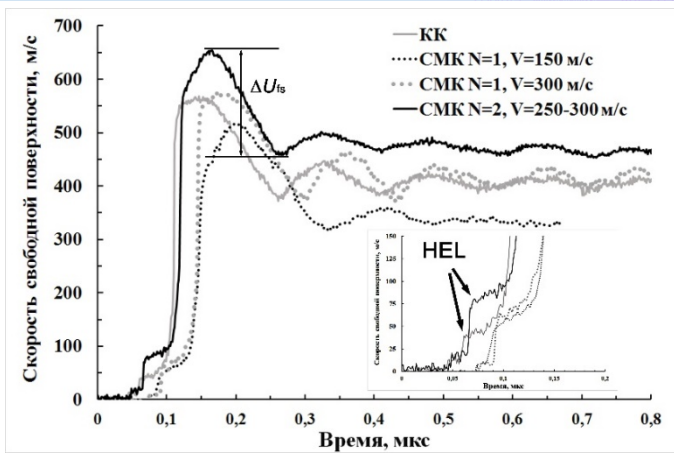
ν -коэффициент Пуассона



Откольная прочность:

$$\sigma_{sp} = \rho_0 c_b (\Delta u_{fs} + \delta) / 2$$

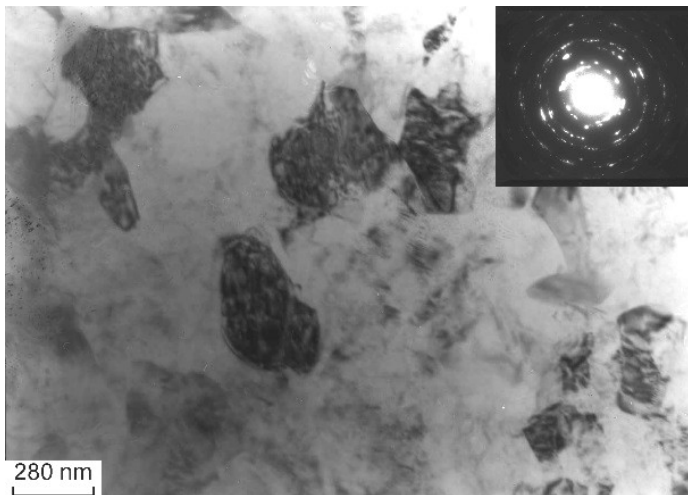
Динамические свойства



| | | | | | |
|---------------------|--|--|--|--|--|
| Материал | | | | | |
| Исходный КК образец | | | | | |
| СМК ДКУП N=1 V= 150 | | | | | |
| СМК ДКУП N=1 V= 300 | | | | | |
| СМК ДКУП N=2 V= 300 | | | | | |
| СМК КВД n=1 | | | | | |
| СМК КВД n=5 | | | | | |
| | | | | | |

Эволюция СМК структуры при ударном сжатии

Структура сплава А5083 после ДКУП $N=2$

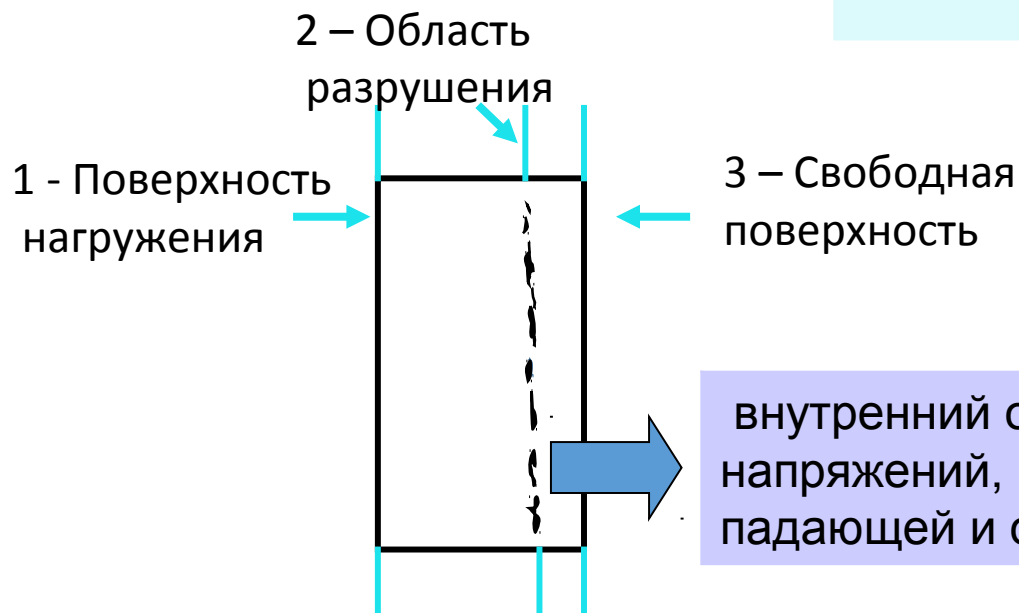


Размер зерен-субзерен – 450 нм

$$\rho_d = 8.5 \cdot 10^{13} \text{ 1/м}^2$$

$$H_u = 1200 \text{ МПа}$$

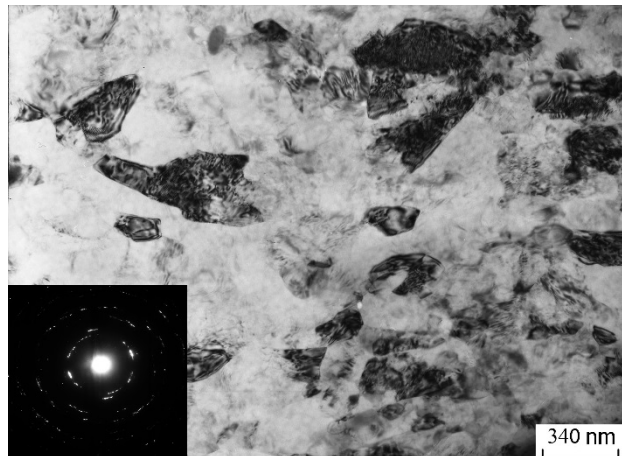
Специальные опыты с сохранением образцов – торможение до полной остановки в толстом слое снега



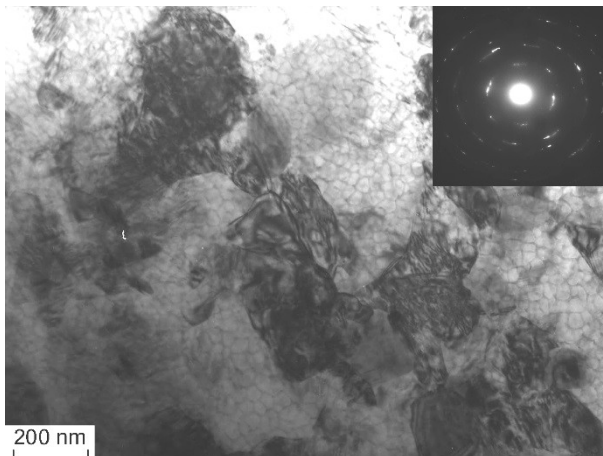
внутренний откол как следствие растягивающих напряжений, возникающих при интерференции падающей и отражённой волн разрежения

Эволюция СМК структуры при ударном сжатии⁹

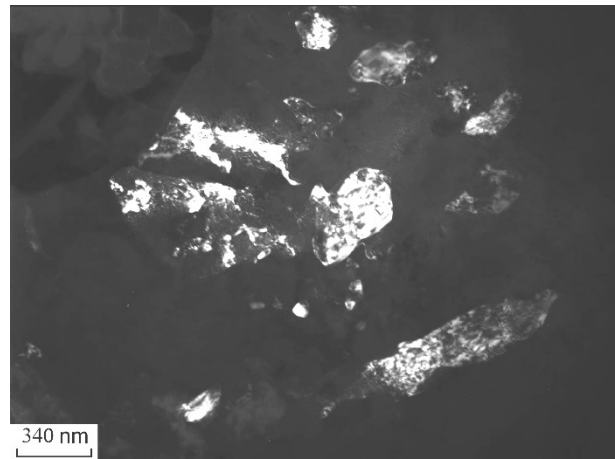
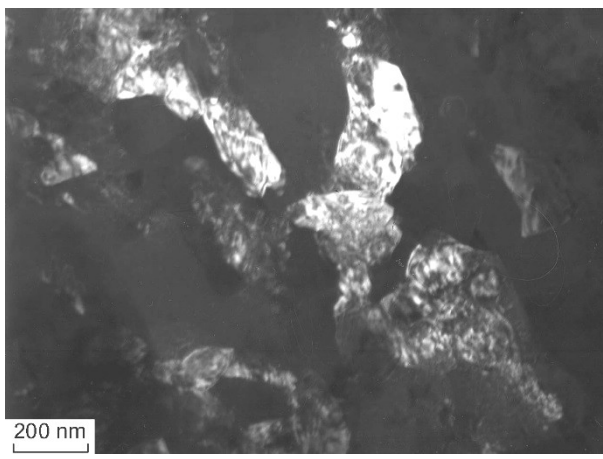
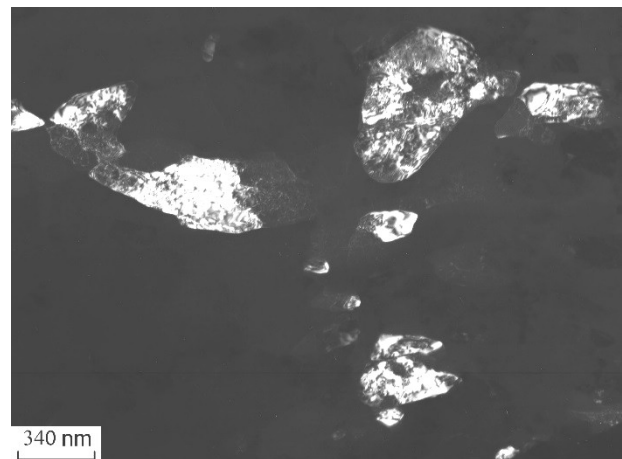
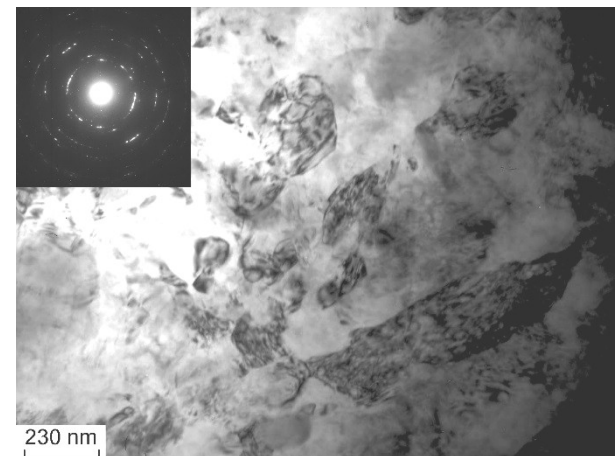
Поверхность нагружения



Зона разрушения



Свободная поверхность



Размер структурных фрагментов сохраняется - 450-500 нм.

$$\rho_d = 1.8 \cdot 10^{14} \text{ 1/м}^2$$

$$H\mu = 1400 \text{ МПа}$$

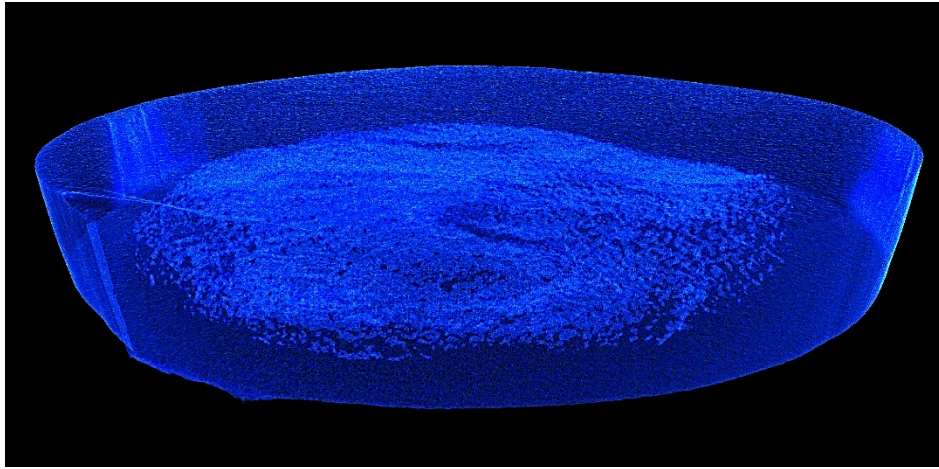
$$\rho_d = 2.2 \cdot 10^{14} \text{ 1/м}^2$$

$$H\mu = 1500 \text{ МПа}$$

$$\rho_d = 1.2 \cdot 10^{14} \text{ 1/м}^2$$

$$H\mu = 1300 \text{ МПа}$$

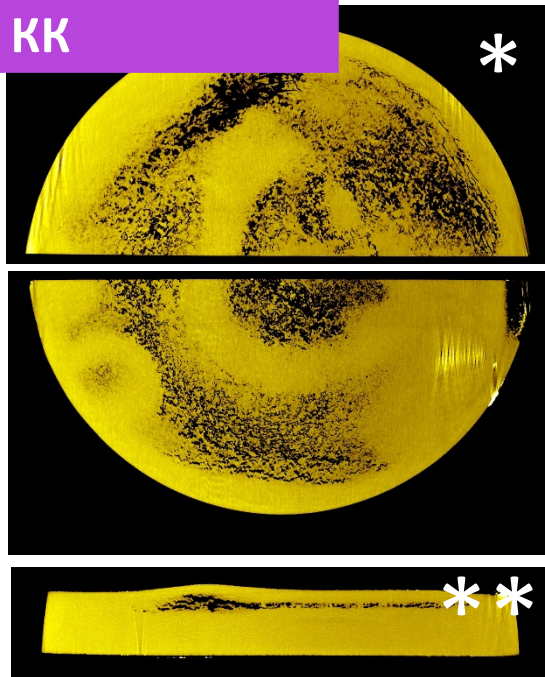
Исследование разрушения СМК сплава



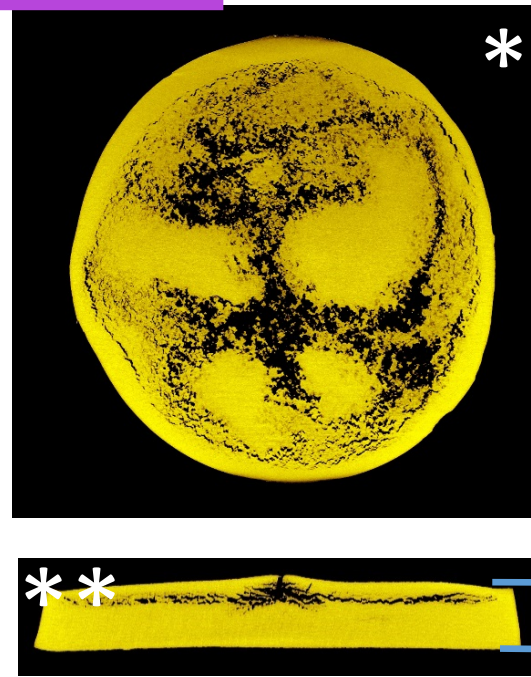
Объемное изображение сохраненного образца с внутренним разрушением, полученное с помощью рентгеновского томографа.

Изображения сечений образцов, перпендикулярных (*) и параллельных (***) направлению распространения ударной волны

Исходный
КК



СМК



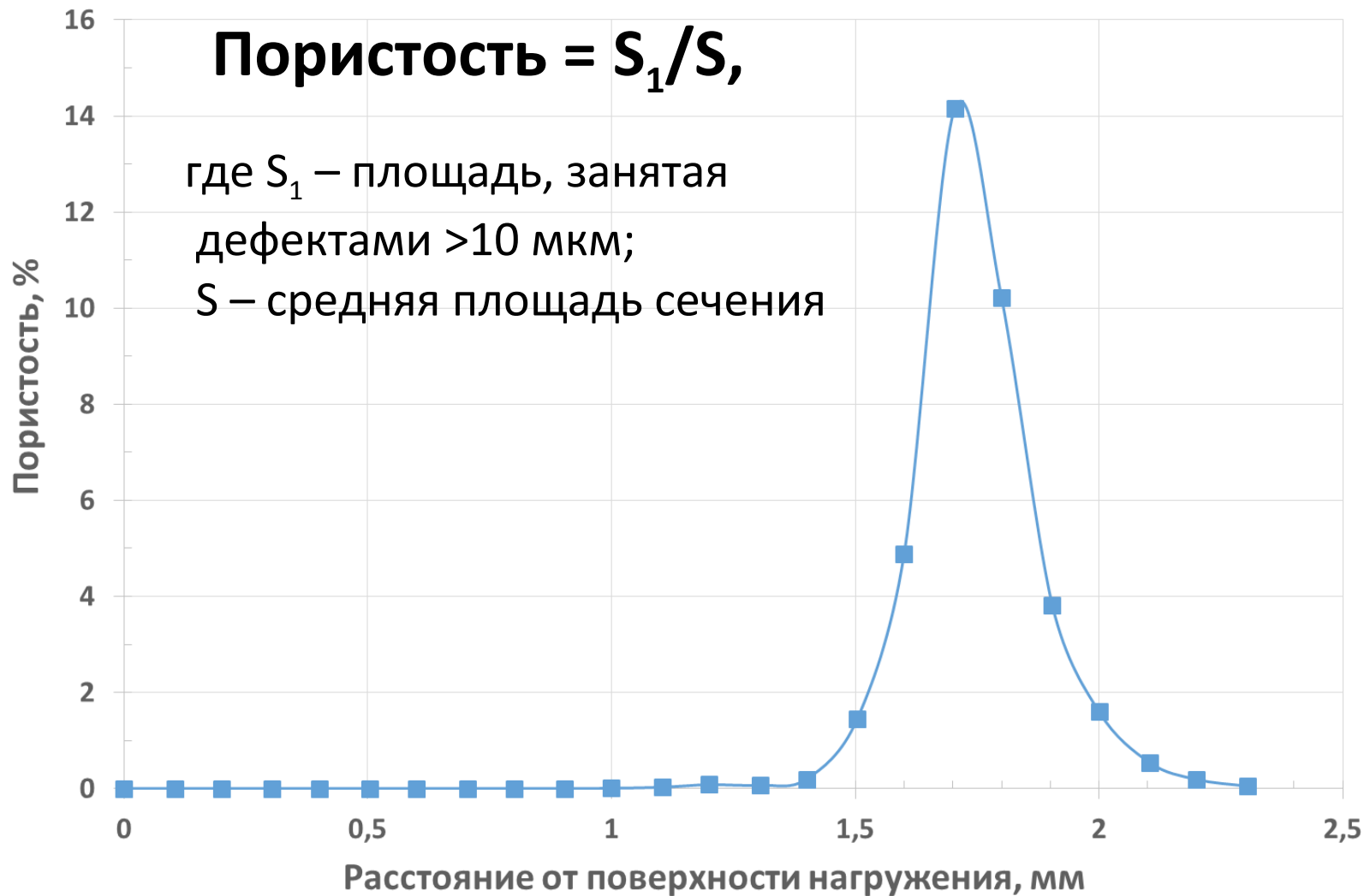
Свободная
поверхность

Поверхность нагружения

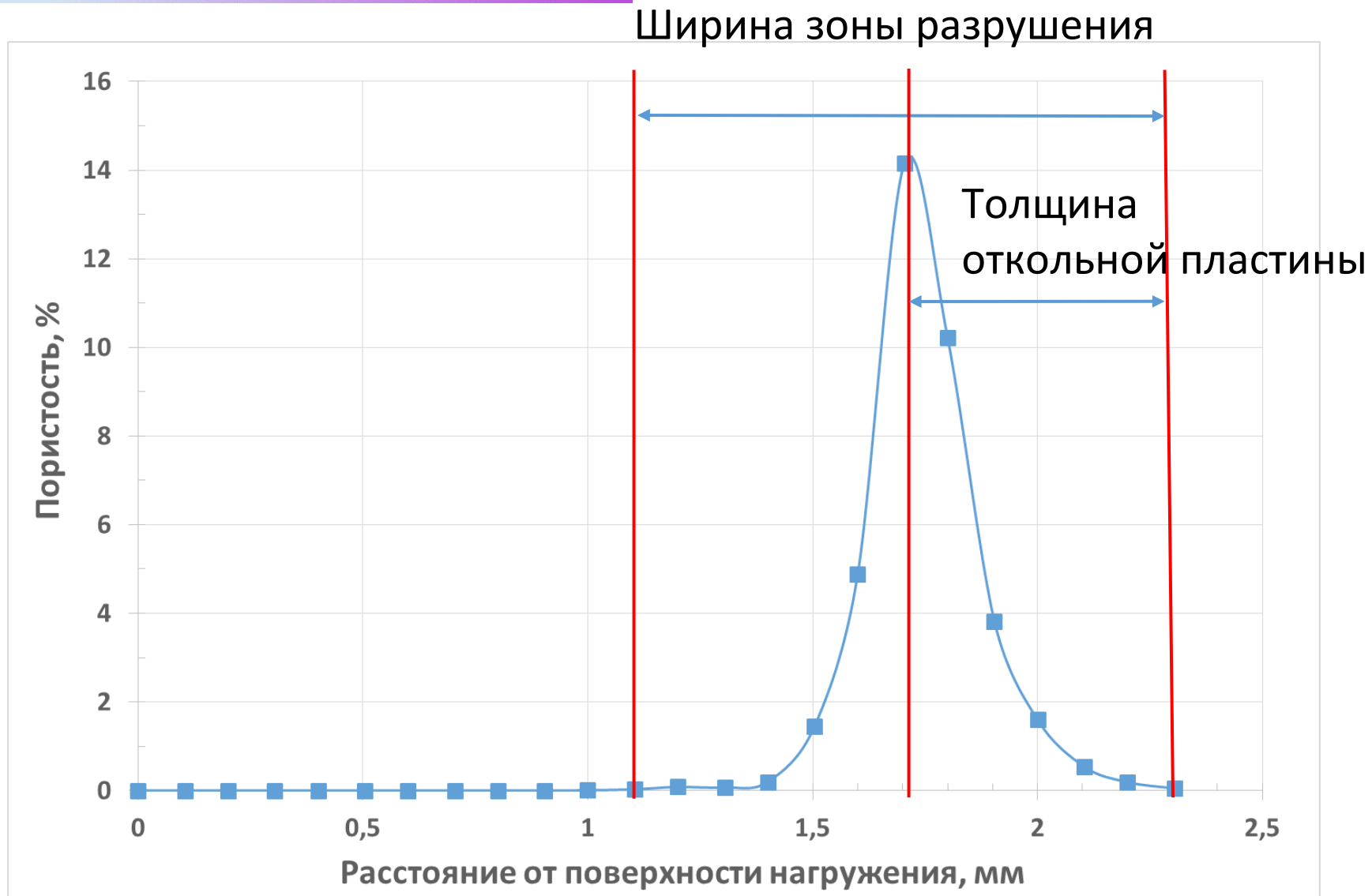
Мера поврежденности

$$\text{Пористость} = S_1/S,$$

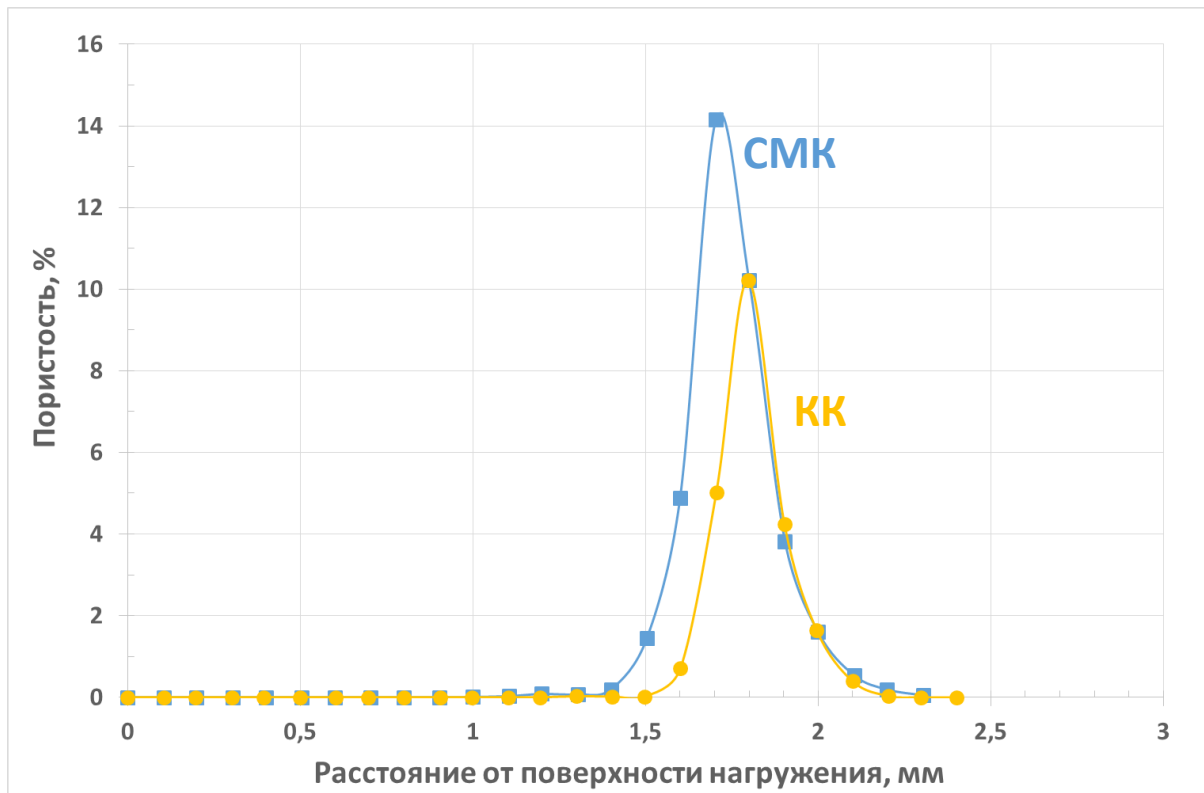
где S_1 – площадь, занятая
дефектами >10 мкм;
 S – средняя площадь сечения



Мера поврежденности



Количественные характеристики разрушения



Максимальная пористость

СМК – 14%

КК – 10%

Ширина зоны разрушения

СМК – 1300 ± 100 мкм

КК – 1000 ± 100 мкм

Толщина откольной пластины,

измеренная по
результатам томографии

СМК 600 ± 100 мкм
КК 600 ± 100 мкм

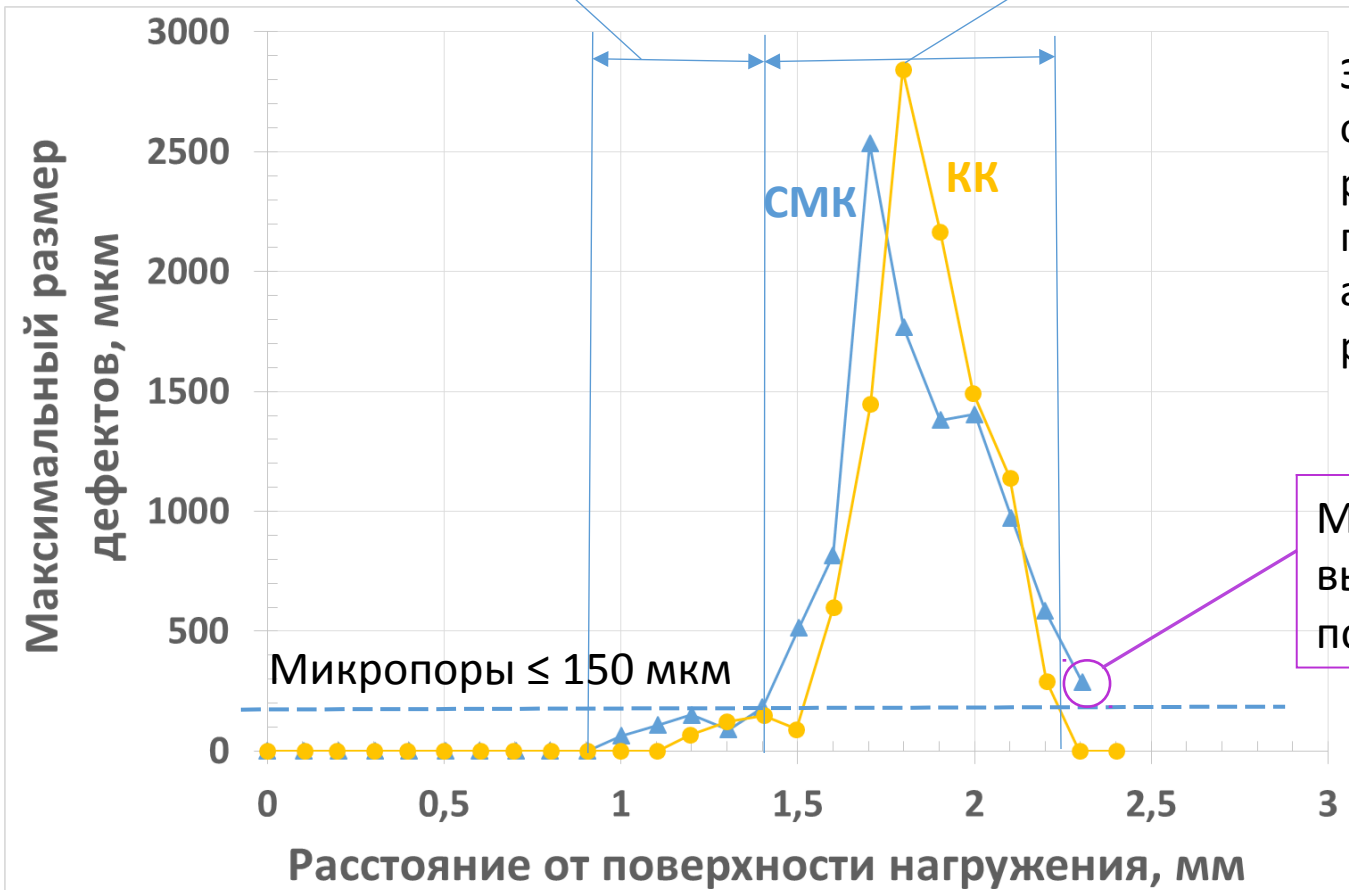
рассчитанная по
профилю скорости свободной поверхности

460 мкм
450 мкм

Размеры дефектов

Ширина зоны мезодефектов

Ширина зоны макродефектов



| | Ширина зон | |
|-----|----------------------------|-------------------|
| | мезодефектов (<150 мкм) | макродефектов |
| СМК | 300 ± 100 мкм | 900 ± 100 мкм |
| КК | 300 ± 100 мкм | 600 ± 100 мкм |

Заключение

Рассмотрено влияние величины накопленной деформации при кручении в наковальнях Бриджмена на динамические свойства сплава А5083. Показано, что с ростом деформации наблюдается увеличение всех динамических характеристик - динамического пределов упругости, текучести и откольной прочности.

Исследовано влияние размера зерна на величину динамического предела упругости и текучести и установлено, что измельчение структуры сплава до среднего размера зерен-субзерен порядка 100 нм увеличивает их в 2,3 раза.

Исследовано влияние структурного состояния сплава на откольную прочность и показано, что она зависит не только от размера фрагментов структуры, но и от степени ее дефектности (плотности дислокаций, соотношения малоугловых и большеугловых границ кристаллитов). Так при одном и том же размере зерен 180 нм, образцы после ДКУП имеют более высокую откольную прочность по сравнению с материалом после КВД, что связано с прохождением динамического возврата при ДКУП.

Основным упрочняющим механизмом при ударном сжатии является скольжение дислокаций. По данным ПЭМ и РСА количество дислокаций в объёме материала увеличивается по мере приближения к поверхности разрушения и снижается на свободной поверхности образца.

Для 3D визуализации зон разрушения в СМК и КК сплаве после ударно-волнового нагружения применён неразрушающий метод рентгеновской томографии. Рассчитаны размеры дефектов и пористость на разном расстоянии от поверхности нагружения. Показано, что, несмотря на равенство откольной прочности КК и СМК сплавов после ДКУП, количество дефектов и размеры зоны разрушения у СМК сплава больше.