



*Институт физики металлов им. М.Н. Михеева  
Уральского отделения РАН*

**СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В  
Al-Mg ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧКАХ ПРИ НАГРУЖЕНИИ  
СКОЛЬЗЯЩИМИ ДЕТОНАЦИОННЫМИ ВОЛНАМИ**

*И.Г. Бродова<sup>1</sup>, Е.Б. Смирнов<sup>2</sup>, И.Г. Ширинкина<sup>1</sup>, В.В. Астафьев<sup>1</sup>, Т.И. Яблонских<sup>1</sup>,  
А.В.Коваль.<sup>2</sup>, А.А.Дегтярев <sup>2</sup>*

*<sup>1</sup> Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Россия, г. Екатеринбург,*

*<sup>2</sup> РФЯЦ-ВНИИТФ, Россия, г. Снежинск*

[e-mail:brodova@imp.uran.ru](mailto:brodova@imp.uran.ru)

*Ударно-волновое нагружение дает возможность исследовать поведение металлов и сплавов в экстремальных условиях. Изучение особенностей схождения оболочек позволяет исследовать процессы кумуляции ударной волны и высокоскоростной деформации материала. Знание эволюции структуры сплавов даёт возможность прогнозировать пластические и прочностные свойства, а также выявить их механизмы упрочнения и разрушения.*

Целью данной работы является исследование влияние условий нагружения при схлопывании цилиндрических алюминиевых оболочек на их структуру и свойства.

### Схема нагружения

Нагружение осуществлялось методом скользящей детонации при инициировании накладного заряда ВВ.

Детонационная волна распространялась в зазоре между внутренней поверхностью кожуха и наружной поверхностью испытываемой цилиндрической оболочки.

# Внешний вид оболочек

Разные режимы нагружения оболочек (диаметр 22 мм, толщина стенки - 2 мм) осуществлялись за счёт отличия экспериментальных узлов

Отличие экспериментальных узлов заключалось в наличие или отсутствии дополнительного слоя на наружной поверхности оболочки, состоящего из 3 мм слоя бумаги, а также в изменении толщины слоя ВВ.

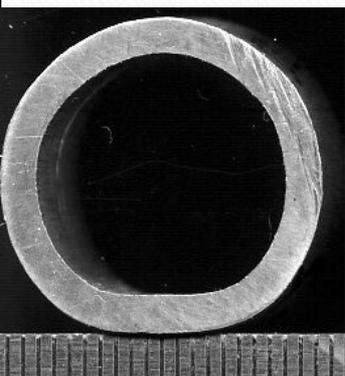
## Первая оболочка

Слой ВВ - 0.5 мм, слой бумаги - 3 мм



наружный диаметр уменьшился до 21,5 мм, толщина стенки возросла до 2,5 мм, т.е. относительная радиальная деформация составила ~ 25%.

Начало схождения и остановка



## Вторая оболочка

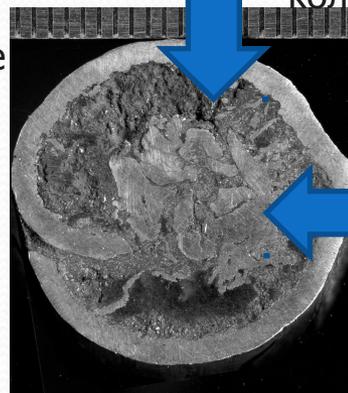
**Неустойчивое частичное схождение по радиусу и вдоль оси цилиндра, разрывы, нарушение сплошности**

Слой ВВ - 0.5 мм



Взаимодействие ударной волны и волн разрежения приводит к кольцевому отколу

Наружное кольцо



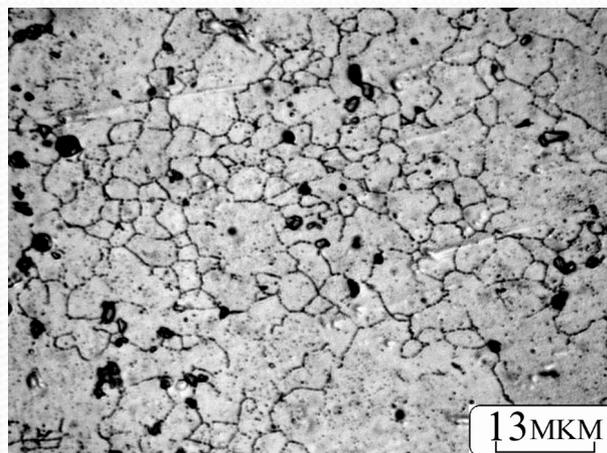
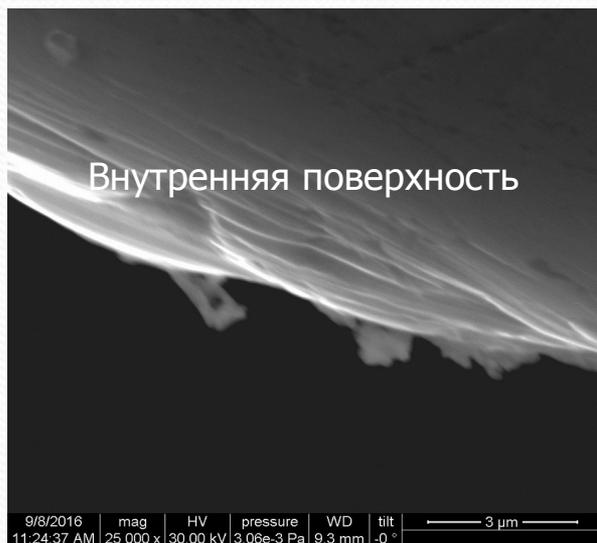
Центральные откольные фрагменты

При деформации схождения - потеря устойчивости, сжатие и разрушение материала

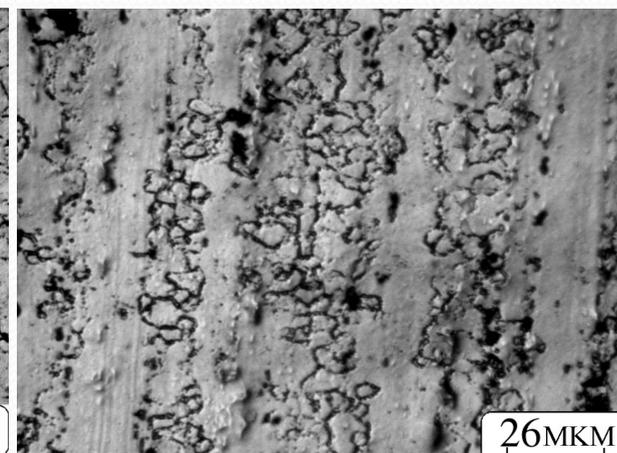
Анализ структуры проведен на трёх поперечных сечениях I, II и III

# Структура первой оболочки

Смешанная, частично рекристаллизованная  
полосовая структура, состоящая  
из вытянутых вдоль оси оболочки волокон



Поперечное сечение

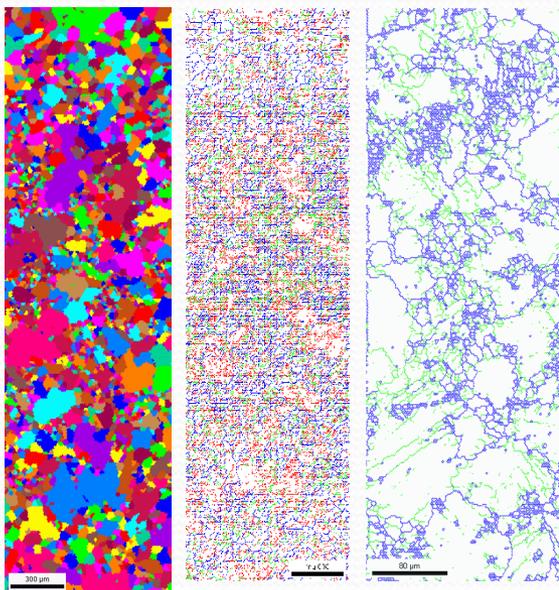


Продольное сечение

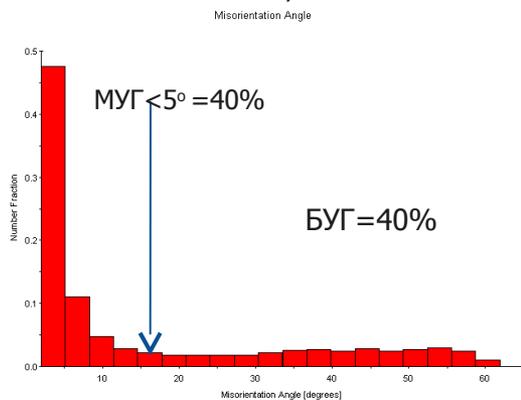
начальная стадия схождения оболочки,  
на внутренней поверхности  
формируются и «скользят» друг  
относительно друга несколько  
микрослоев (СЭМ).

Чередования структурных зон по радиусу  
и вдоль оси оболочки не обнаружено, т.е.  
деформация и температура менялись равномерно.

# Микроструктура первой оболочки

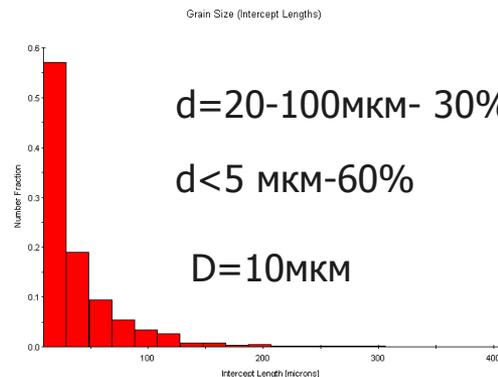


Карты ДОЭ  
(красные МУГ с разориентировкой 2-5°;  
зеленые МУГ – 5-15°; синие БУГ >15°)



Спектр разориентировок границ зёрен

## Распределение зерен по размерам



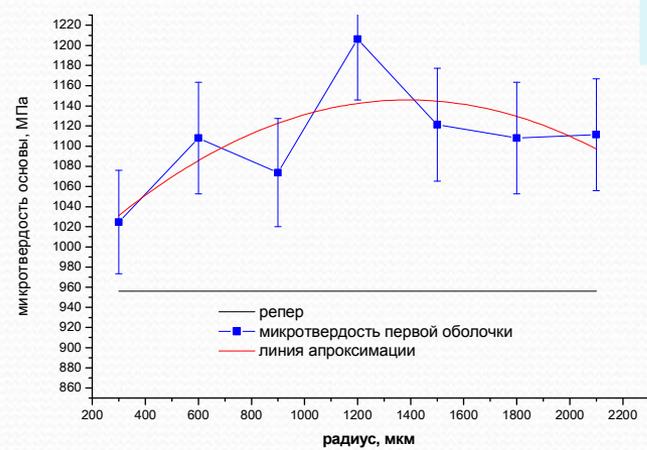
репер

d=20-100мкм -85%

D=30 мкм

Процессы, вызванные ударно-волновым нагружением

- Измельчение зерна в 3 раза ;
- Накопление дислокаций;
- Формирование ячеисто-субзёренной структуры.



Упрочнение материала относительно репера на 200 МПа

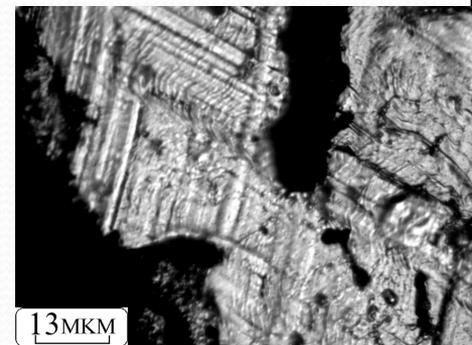
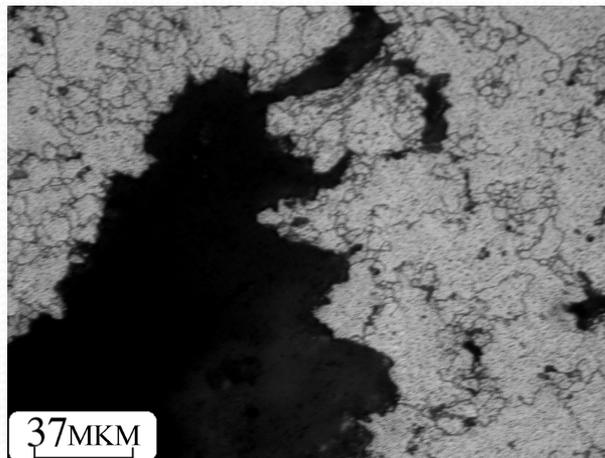
# Структура второй оболочки

Влияние ударной волны

Влияние ударной волны и высокоскоростной деформации схождения

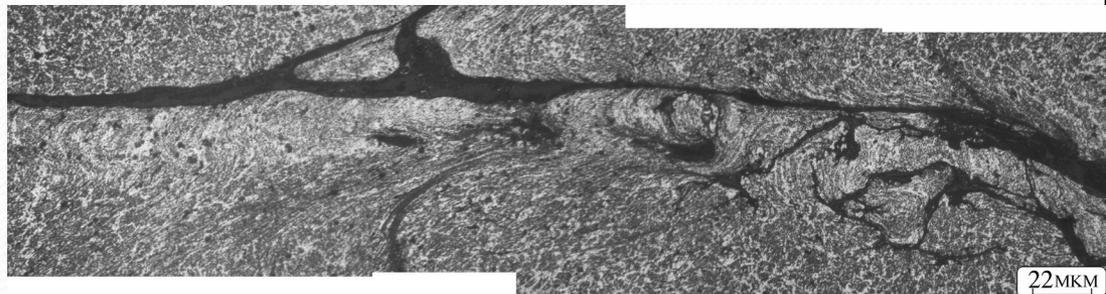
Кольцо

Центральные фрагменты



СЭМ

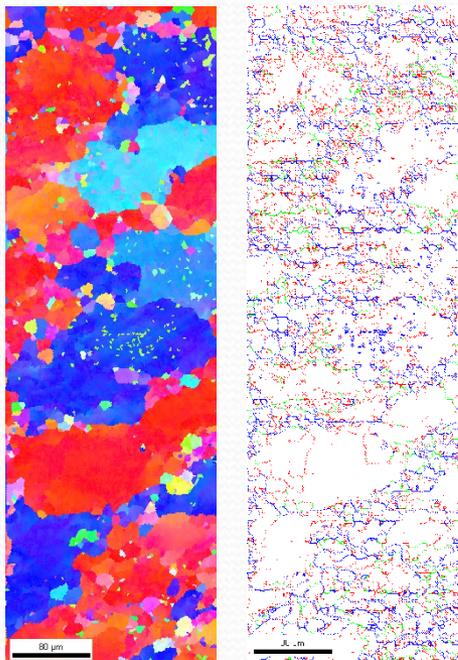
Зоны локализованной деформации



Трещины, вихревое течение материала

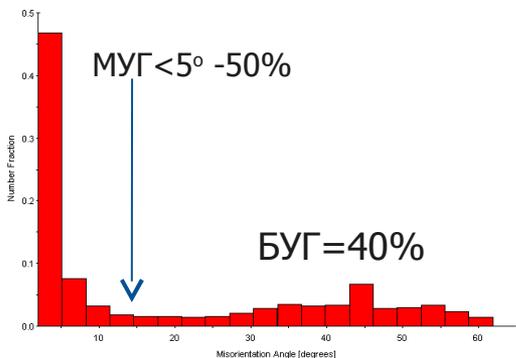
Поры, цепочки пор, трещины

# Микроструктура внешнего кольца

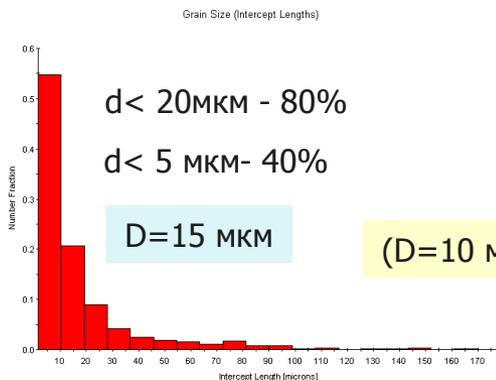


Карты ДОЭ

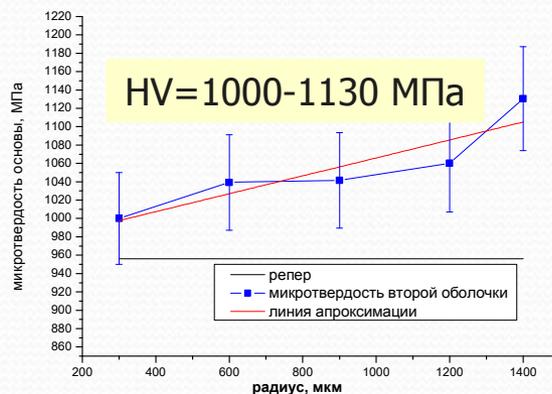
Misorientation Angle



Спектр разориентировок зёрен



Распределение зёрен по размерам



Изменение микротвердости по радиусу

Неравномерная структура, сокращение числа зёрен < 5 мкм, появление зёрен, способных к быстрому росту

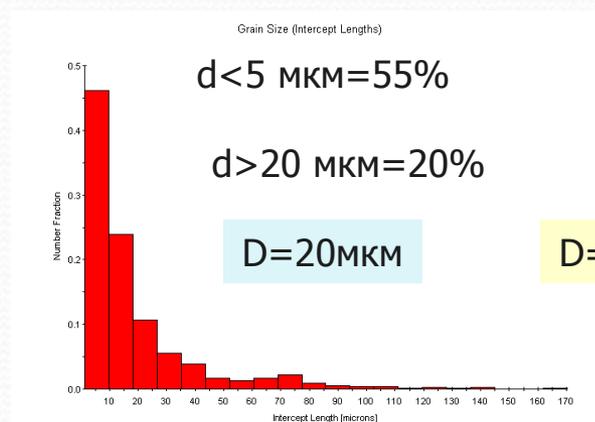
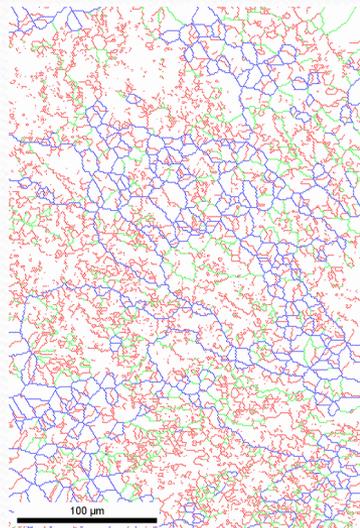
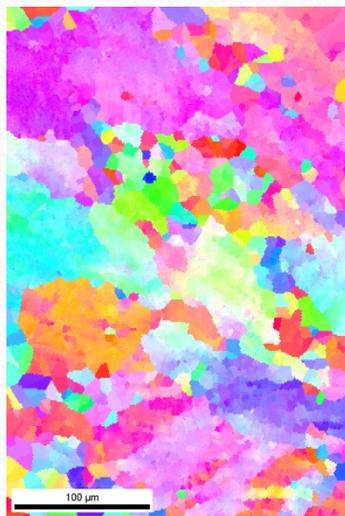
Процессы при ударно-волновом нагружении

- Формирование ячеисто-субзёрненной структуры
- Измельчение зерна в 2 раза

Упрочнение материала по сравнению с первой оболочкой ниже на 100 МПа, т.е. во второй оболочке произошло термическое разупрочнение

Наложение процессов упрочнения и диссипации энергии - переход кинетической в тепловую энергию

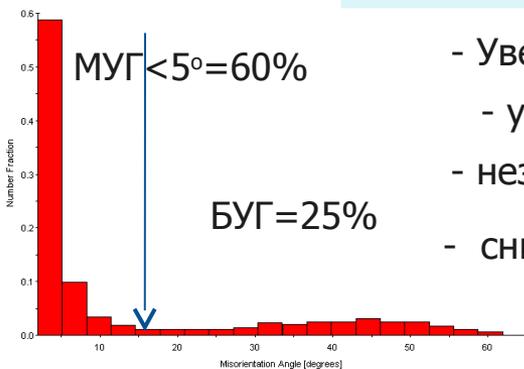
# Микроструктура центральных фрагментов



Распределение зёрен по размерам

## Карты ДОЭ

Misorientation Angle



В сравнении с наружным кольцом:

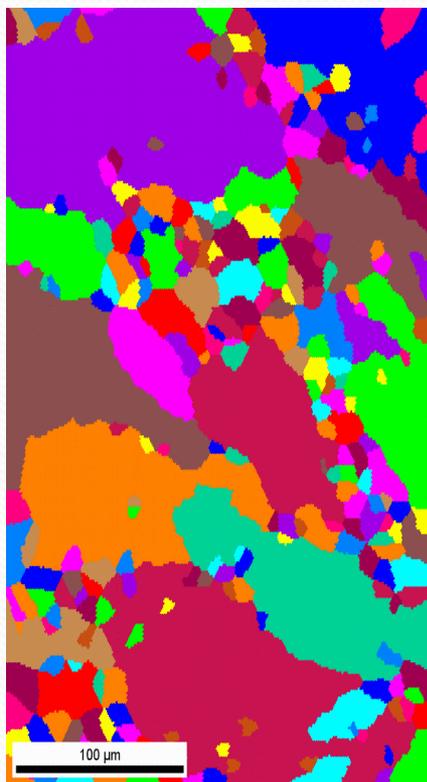
- Увеличение доли МУГ  $< 5^\circ$
- уменьшение доли БУГ,
- незначительный рост размера зерна,
- снижение упрочнения

Процессы при высокоскоростной деформационно-термической обработке

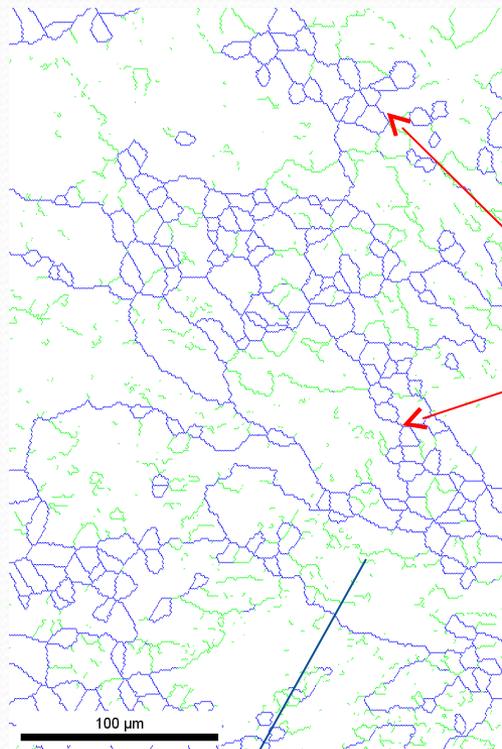
- образование развитой сетки МУГ в мелких и крупных зёрнах

Влияние деформации и температуры

# Микроструктура центральных фрагментов



Карта ДОЭ



полигонизованные зёрна с МУГ  
40 <math>d < 100 \mu\text{м}</math>, HV=1200 МПа

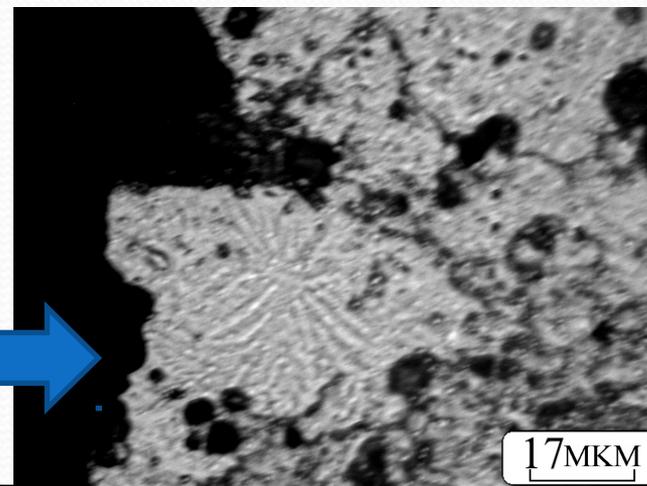
Смешанная неравномерная деформированная структура

Зоны локализованной деформации

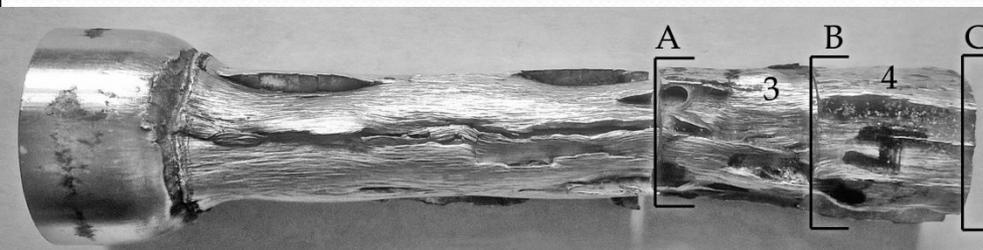
с рекристаллизованной структурой,  $d < 10 \mu\text{м}$

В центре оболочки усиливается влияние температуры – участки литой структуры,  $t > 660^\circ \text{C}$

HV=850 МПа



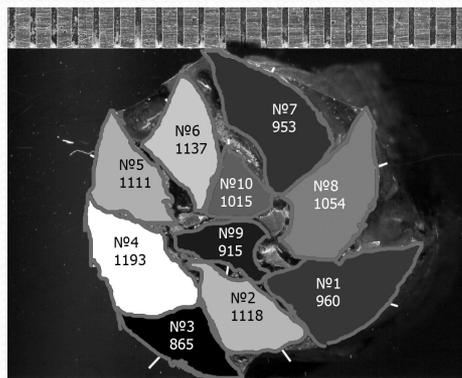
# Третья оболочка



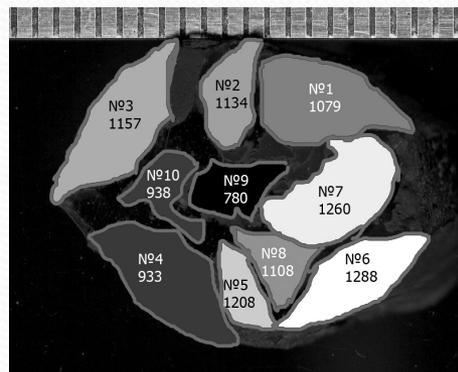
Слой ВВ=1 мм + слой бумаги 3 мм  
После частичного схождения  
оболочка разрушилась на 10 осколков,  
которые по инерции продолжают движение  
к центру.

Дефекты на внешней поверхности оболочки

Деформация в радиальном и в осевом направлениях неравномерная



поперечное сечение 3А;



поперечное сечение 4С.

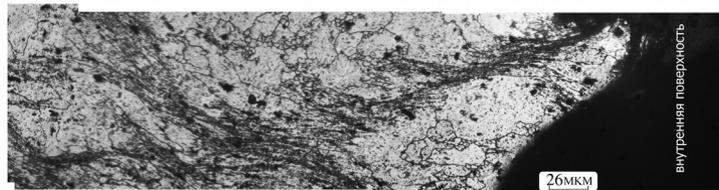
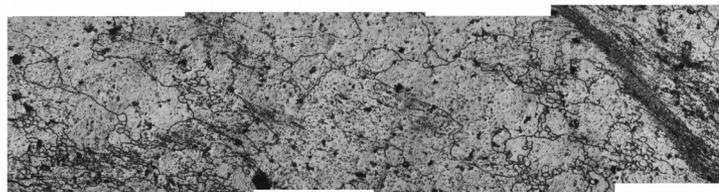
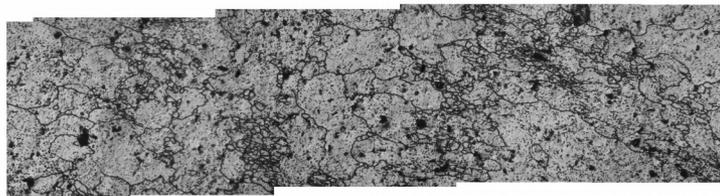
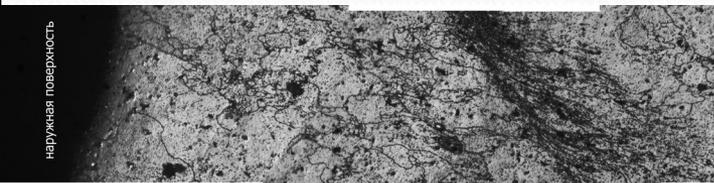
Судя по форме, площади и твёрдости осколков произошел их разворот при движении.

# Микроструктура третьей оболочки

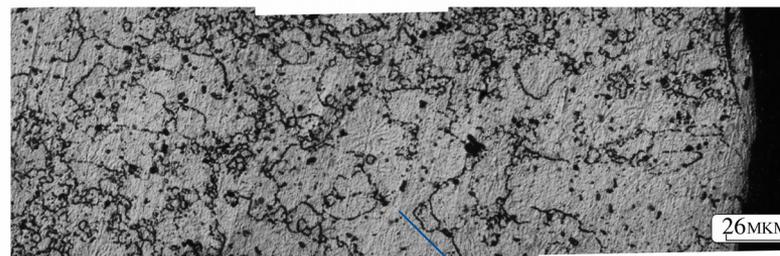
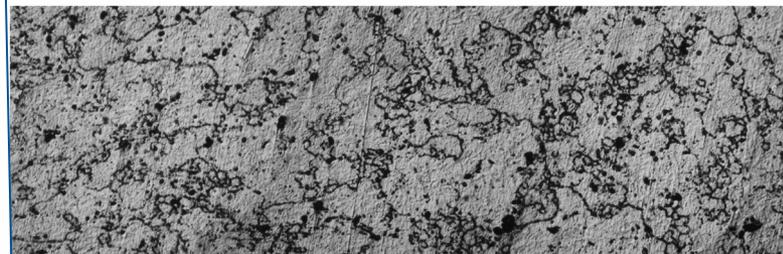
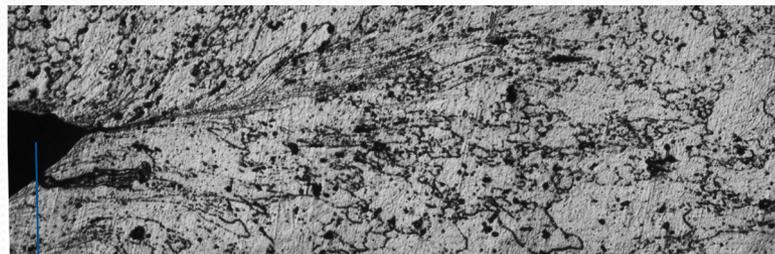
HV= 1200-1300 МПа

Наложение откольных явлений и высокоскоростной деформации

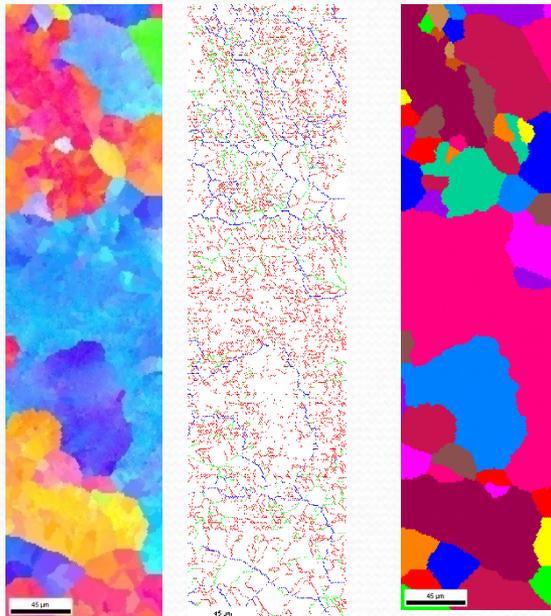
HV=750-900 МПа



Деформированная структура, полосы локализованной деформации

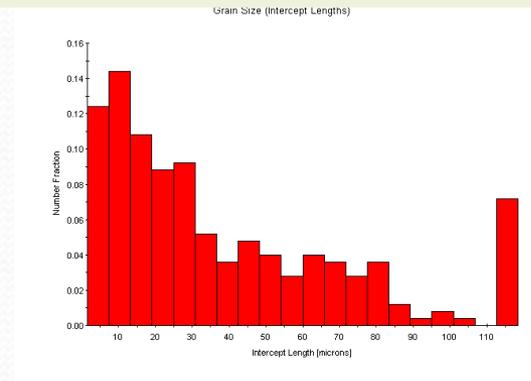


Залеченные откольные трещины, более крупное зерно, зоны плавления и дендритной кристаллизации



Карты ДОЭ

## Неоднородное распределение структуры на мезоуровне



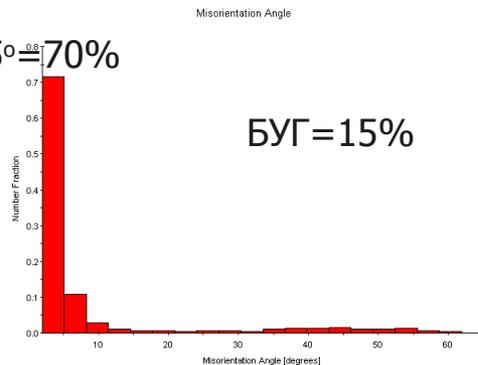
Распределения зёрен по размерам

Процессы, происходящие при сжатии оболочки:

- Накопление дислокаций;
  - Формирование протяжённой сетки МУГ;
  - Бимодальное распределение зёрен по размерам
- Рост среднего размера зерна до 30-40 мкм.

МУГ < 5° = 70%

БУГ = 15%



Спектр разориентировок  
границ зёрен-субзёрен

# Заключение

Рассмотрено влияние трёх режимов нагружения цилиндрических оболочек из Al сплава АМгб (диаметром 22 мм и толщиной стенки 2 мм) на их структуру и свойства. Показано, что величина подводимой энергии при слое ВВ=0.5 мм недостаточна для схлопывания оболочки в цилиндр. После начала схождения в оболочке формируется кольцевой откол.

Ослабление мощности подводимой энергии за счёт дополнительного промежуточного слоя бумаги между корпусом и оболочкой приводит к её радиальной деформации, уменьшению диаметра и росту толщины стенок.

При большей энергии взрыва (слой ВВ=1 мм) происходит разрушение оболочки на осколки разных размеров и форм.

На разных масштабных уровнях установлены особенности структурообразования при инерционном схождении оболочек, и определены деформационно-термические процессы, происходящие при ударно-волновом воздействии.

Показано, что при воздействии скользящими детонационными волнами механизмом деформации Al сплава является дислокационное скольжение, приводящее к накоплению дислокаций, формированию широкой сетки МУГ и развитой субструктуры. Происходит измельчение зерна и упрочнение материала.



Спасибо за внимание!