

# **МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СХЛОПЫВАНИЯ МЕДНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК**

*В.И.Зельдович<sup>1</sup>, Н.Ю.Фролова<sup>1</sup>, А.Э.Хейфец<sup>1</sup>, И.В.Хомская<sup>1</sup>,  
А.А.Дегтярев<sup>2</sup>, А.В.Коваль<sup>2</sup>, Е.Б.Смирнов<sup>2</sup>, Е.В.Шорохов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов им. М.Н.Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

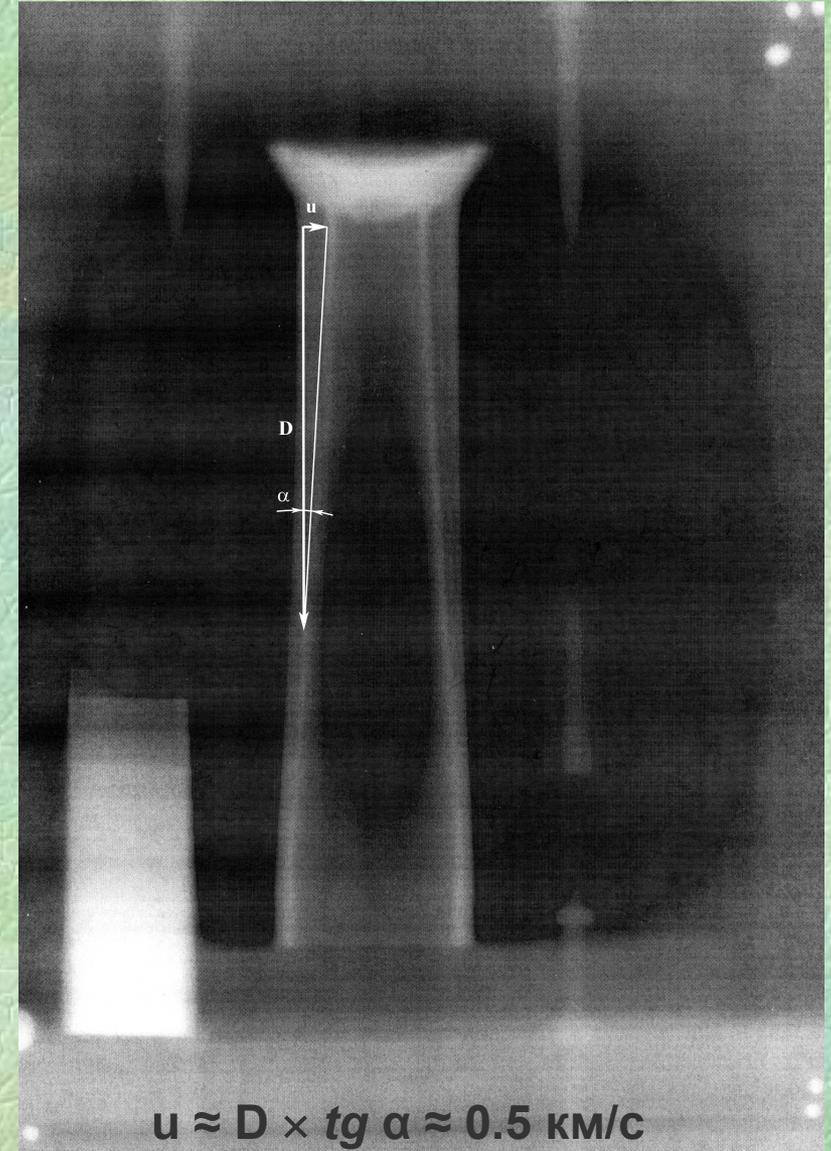
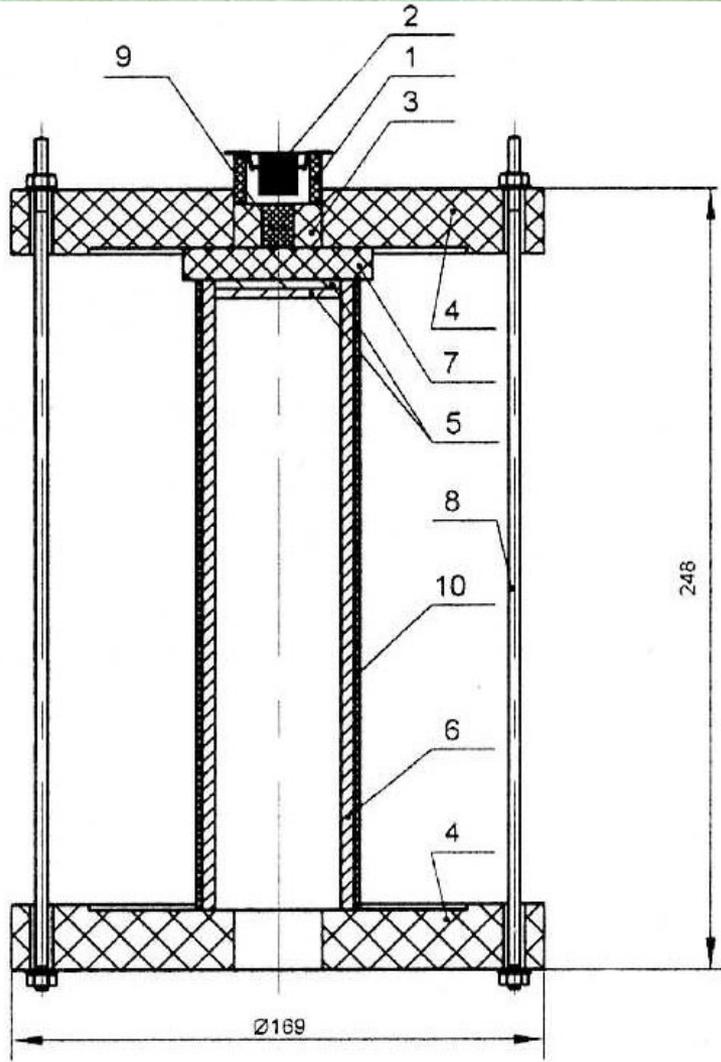
<sup>2</sup>Российский Федеральный ядерный центр –  
ВНИИ технической физики, Снежинск, Россия

# **Схлопывание цилиндрических оболочек**

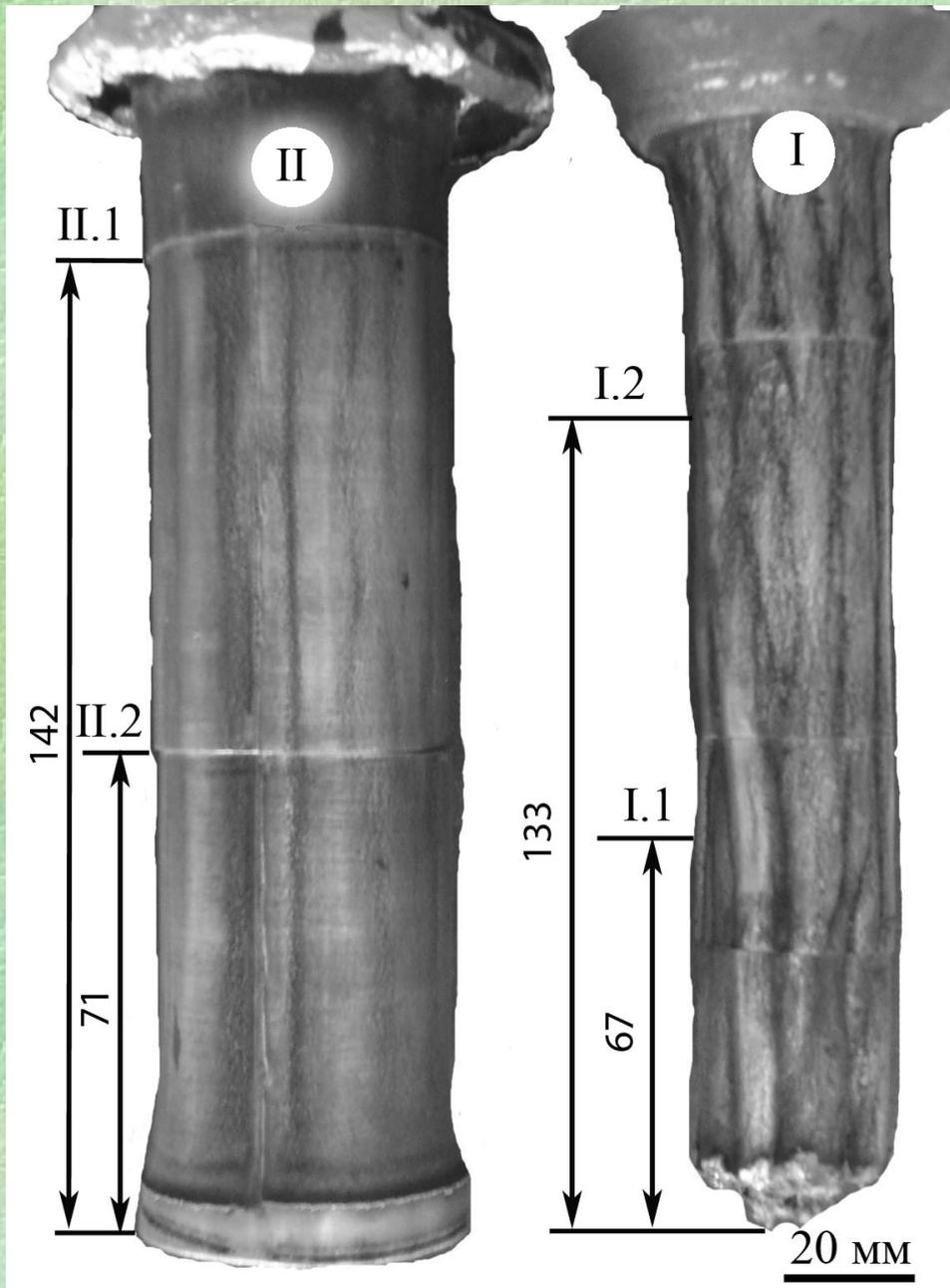
**Выполнены эксперименты по схождению двух медных оболочек внутренним диаметром 40 мм и с толщиной стенки 4 мм. Толщина цилиндрического заряда, окружающего оболочки, была 4 мм (первая оболочка) и 2 мм (вторая). В первом эксперименте был получен цилиндр диаметром ~28-30 мм, во втором – схлопывание оболочки не произошло.**

**Выполнена рентгеновская регистрация процесса схождения, определена начальная скорость радиального схождения.**

# Схема сборки и регистрация процесса схождения



# Внешний вид полученных цилиндров



Боковая поверхность  
цилиндров –  
«волнистая»

# Поперечные сечения медных оболочек

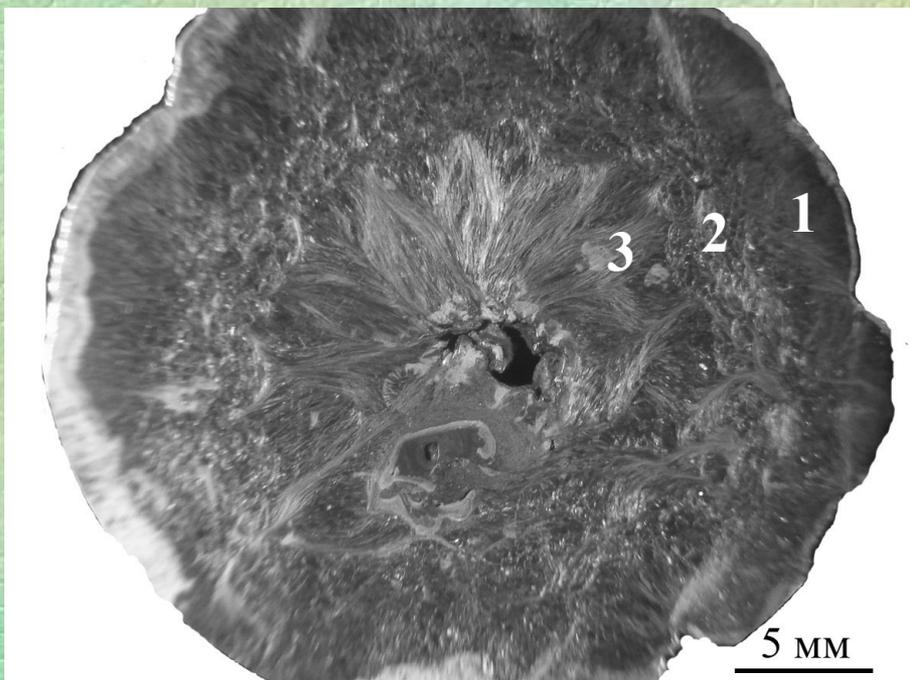


схлопнувшаяся оболочка



не сошедшая оболочка

# Схлопнувшаяся оболочка. Поперечное сечение



1 и 3 – зоны радиальной деформации, 2 – зона хаотической деформации

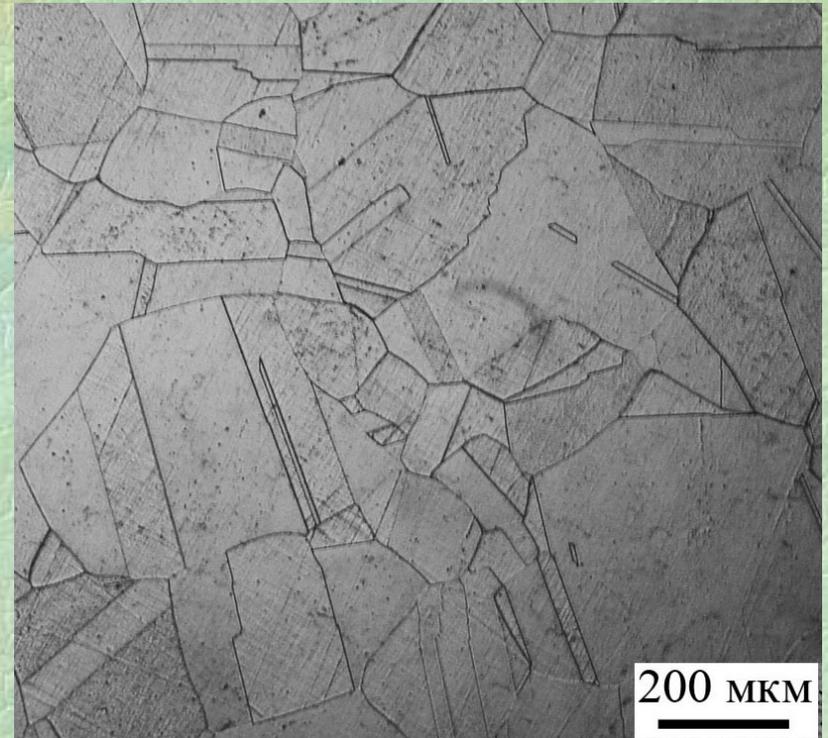
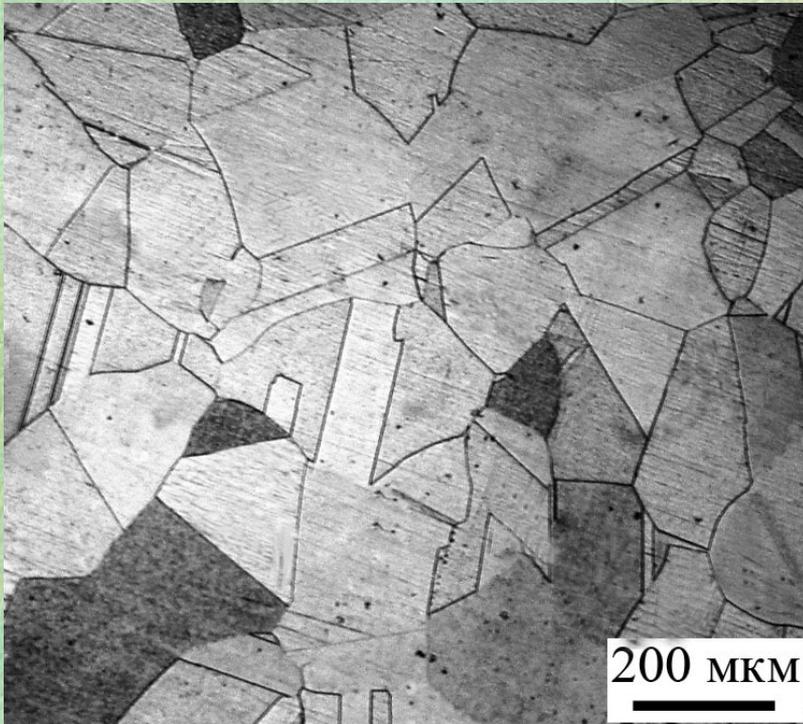
На поверхности цилиндра выступы и вмятины

# Схлопнувшаяся оболочка. Поперечное сечение

1 и 3 – зоны радиальной деформации, 2 – зона хаотической деформации

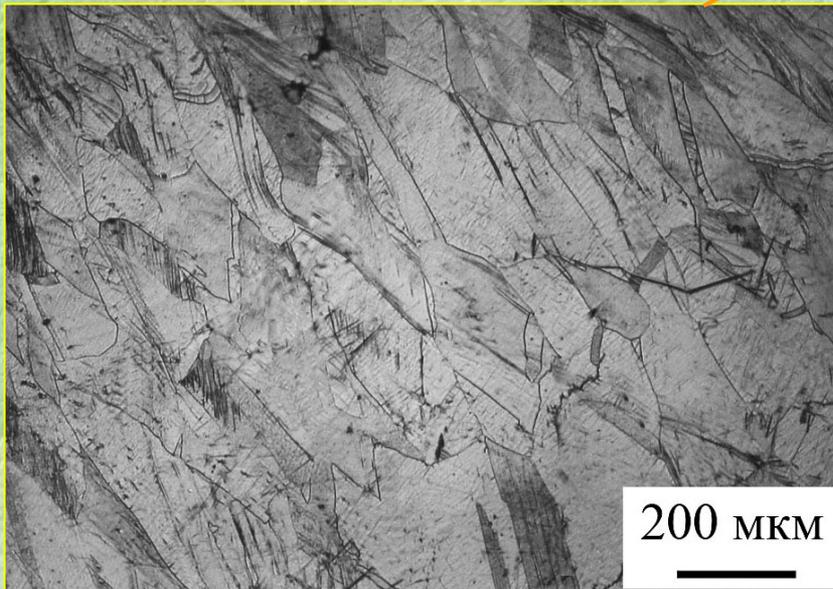
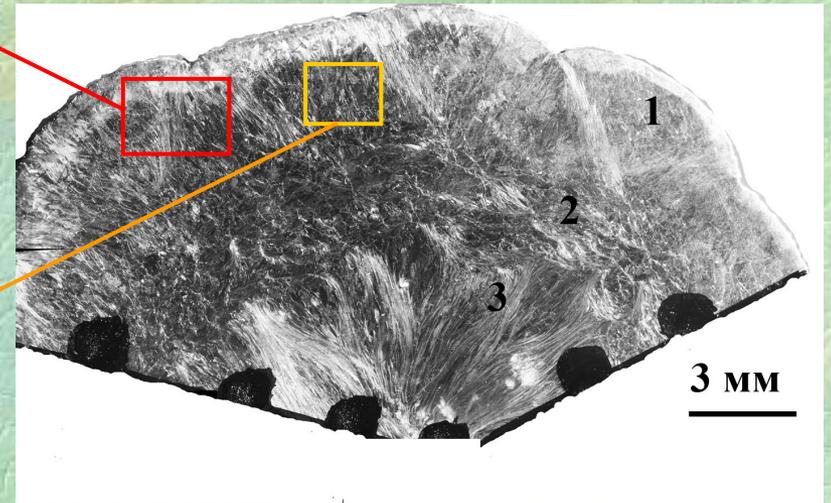
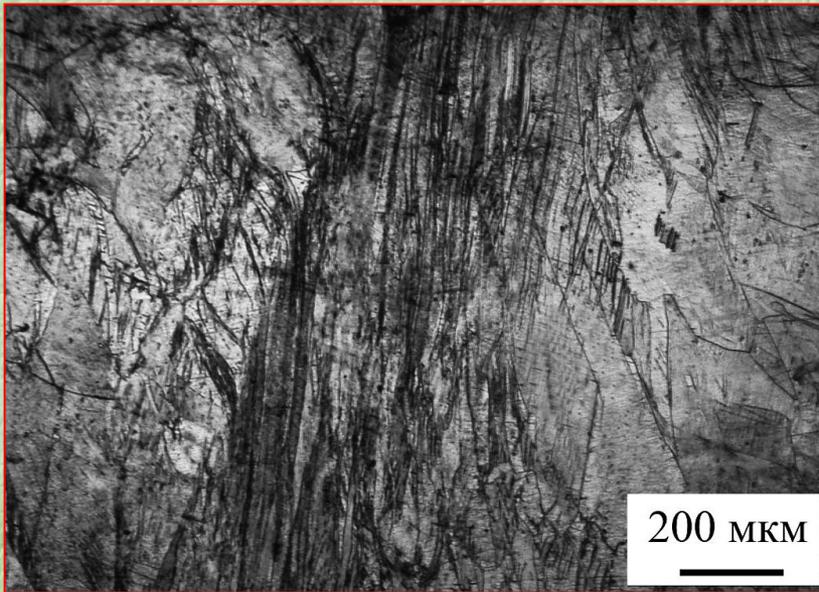


# Исходная микроструктура



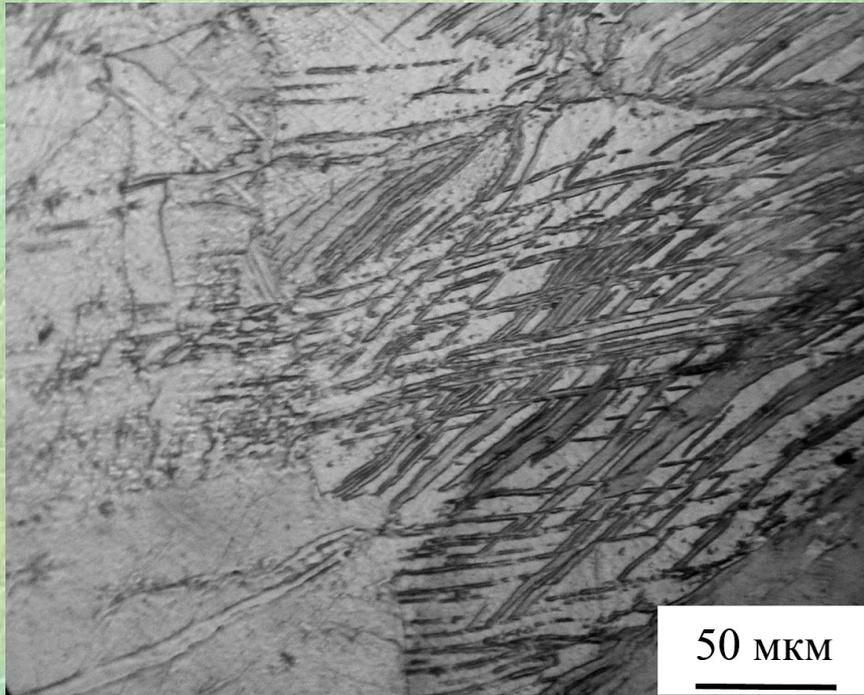
Поперечное и продольное сечения.  
Полиэдрические, равноосные зёрна

# Внешняя зона

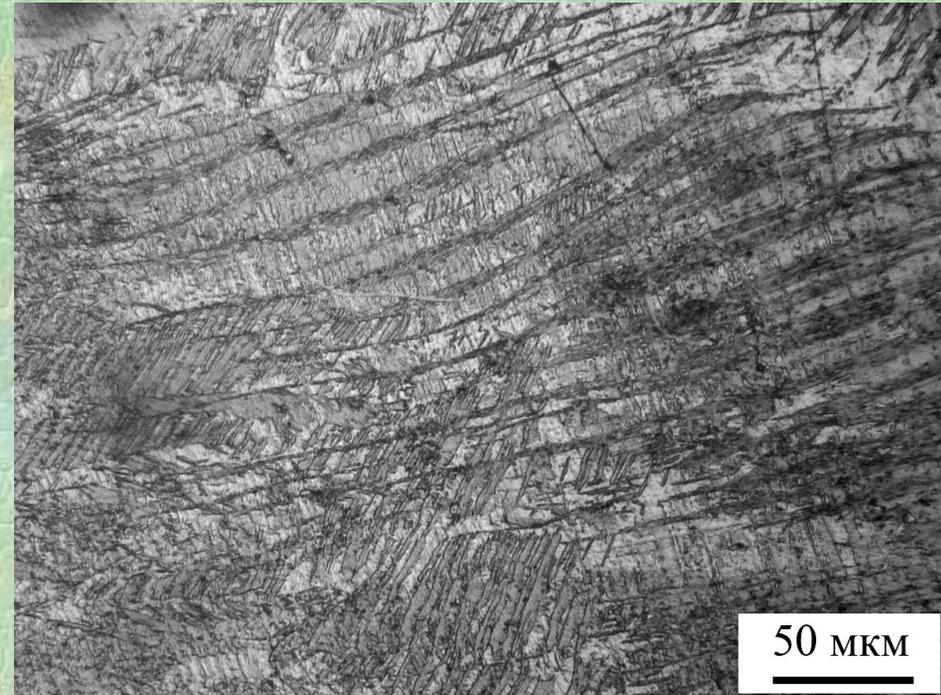


Структура наклонных  
полос локализованного  
течения и участков между  
полосами

# Двойникование во внешней зоне

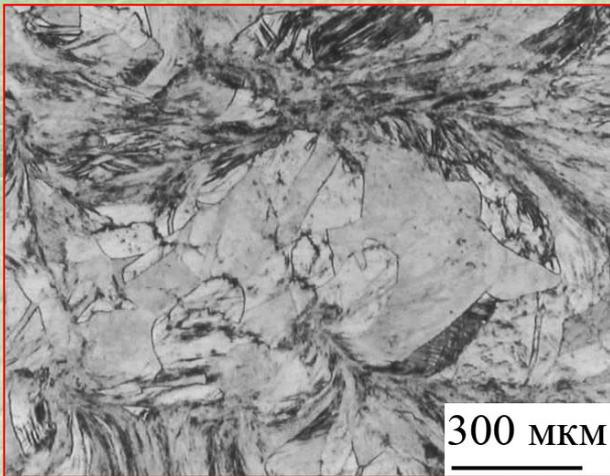
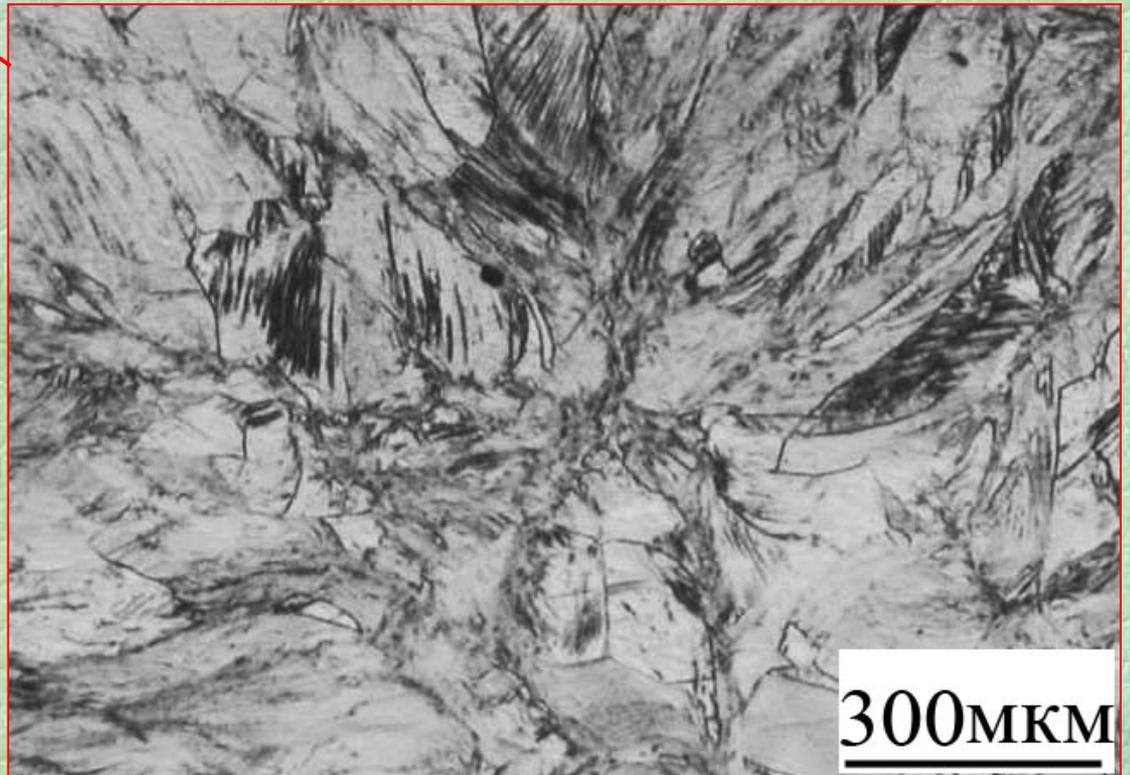
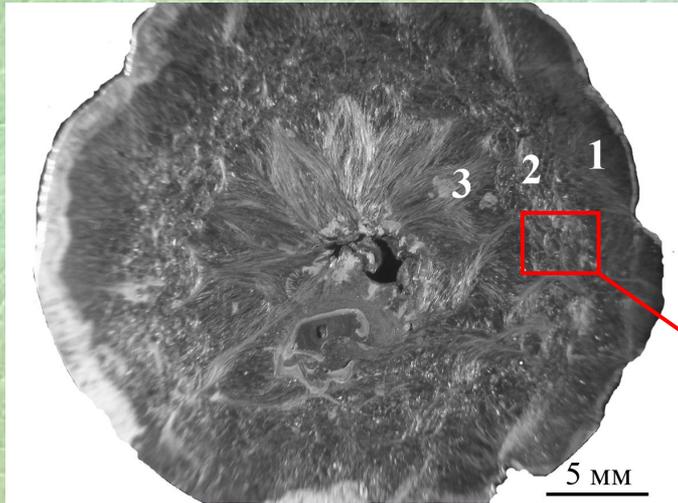


Тонкие пересекающиеся двойники двух систем, имеющие искривленную форму



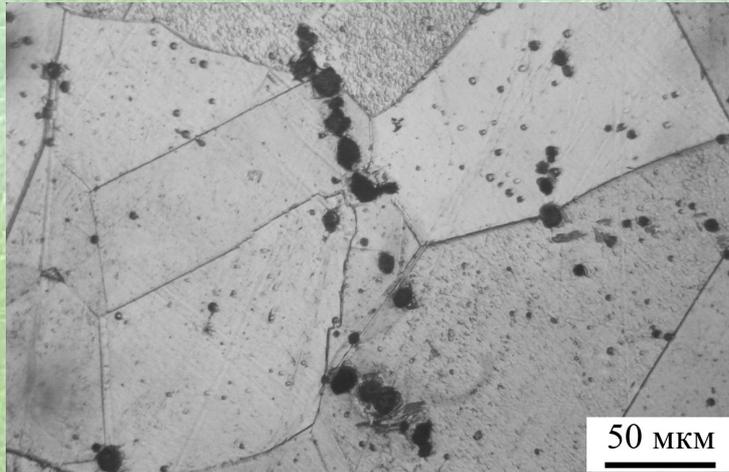
Между длинными двойниками изогнутой формы образуются многочисленные короткие тонкие двойники других систем

# Зона откола

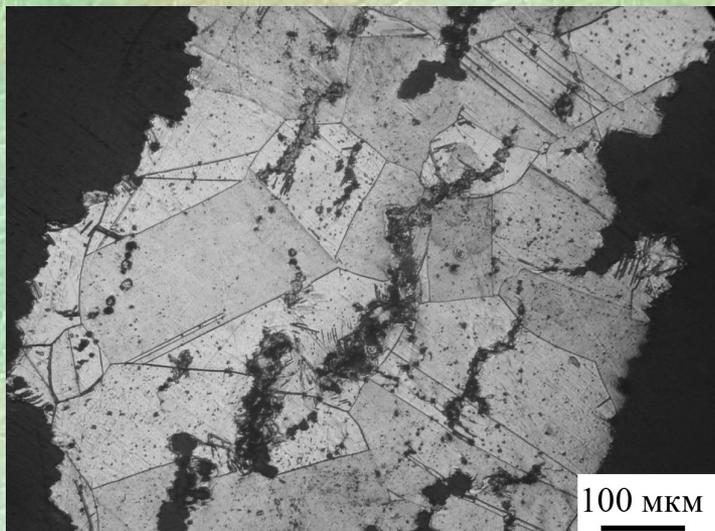
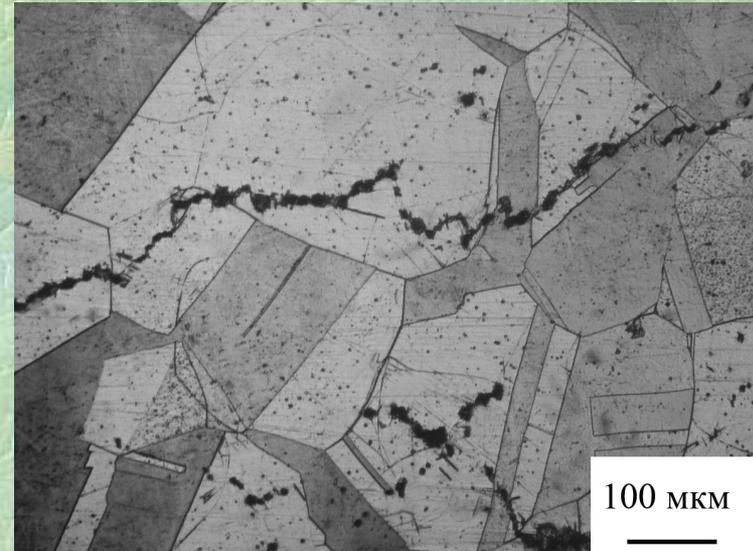


# Откольные явления в наружной части несхлопнувшей оболочки

микропоры

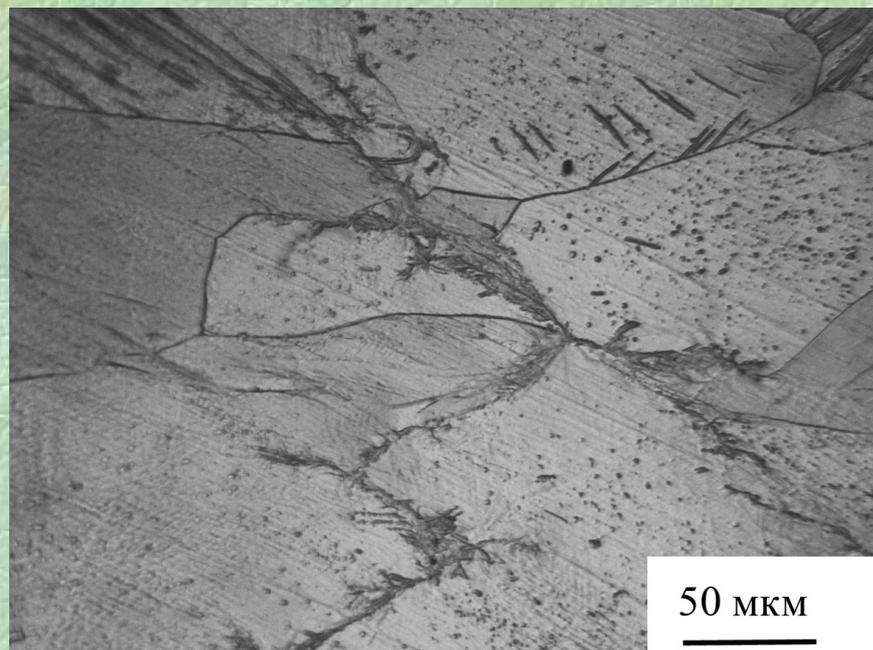
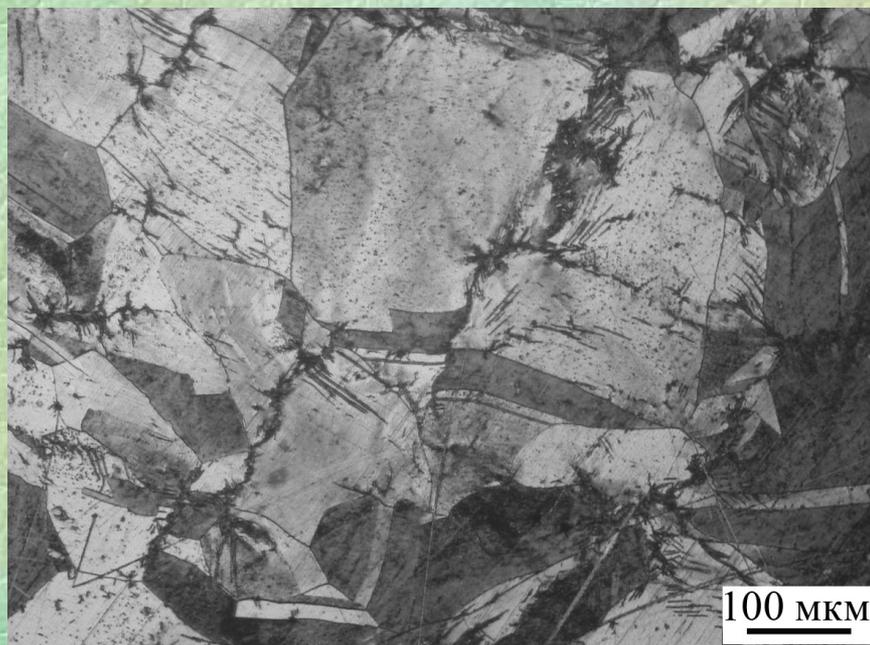


цепочки микропор



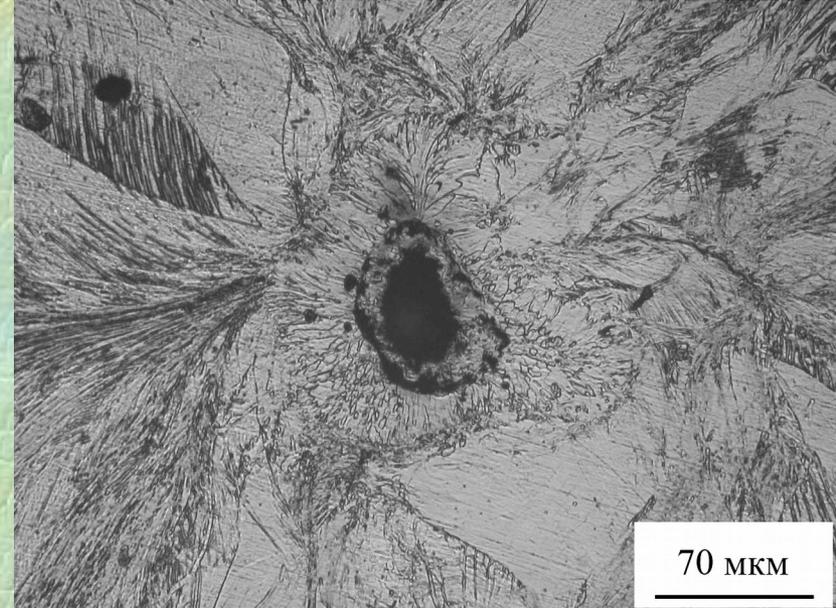
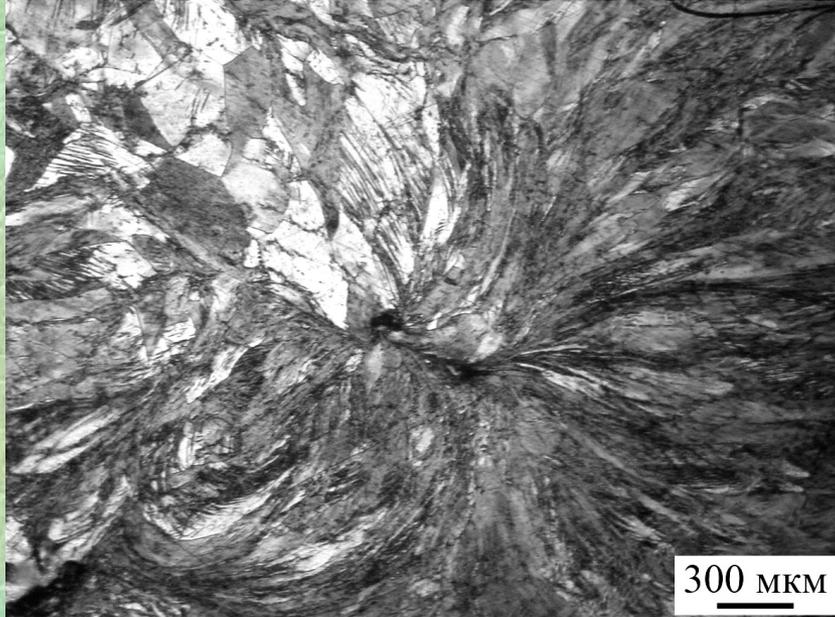
трещины и край магистральной трещины

# Залечивание трещин в схлопнувшейся оболочке



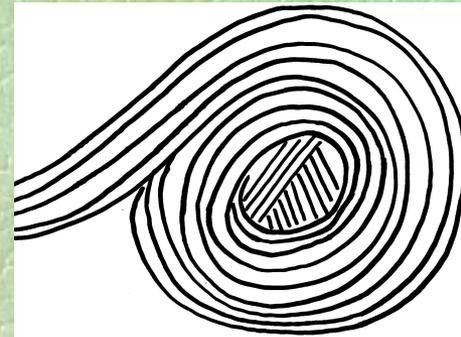
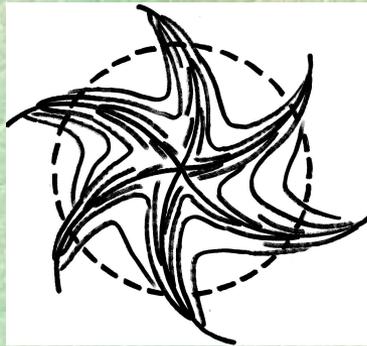
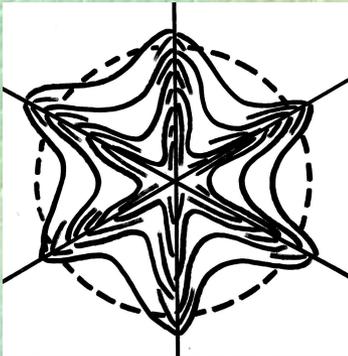
Ломаные темные линии – следы залеченных трещин.

# Деформация и плавление при залечивании пор. Поперечное сечение

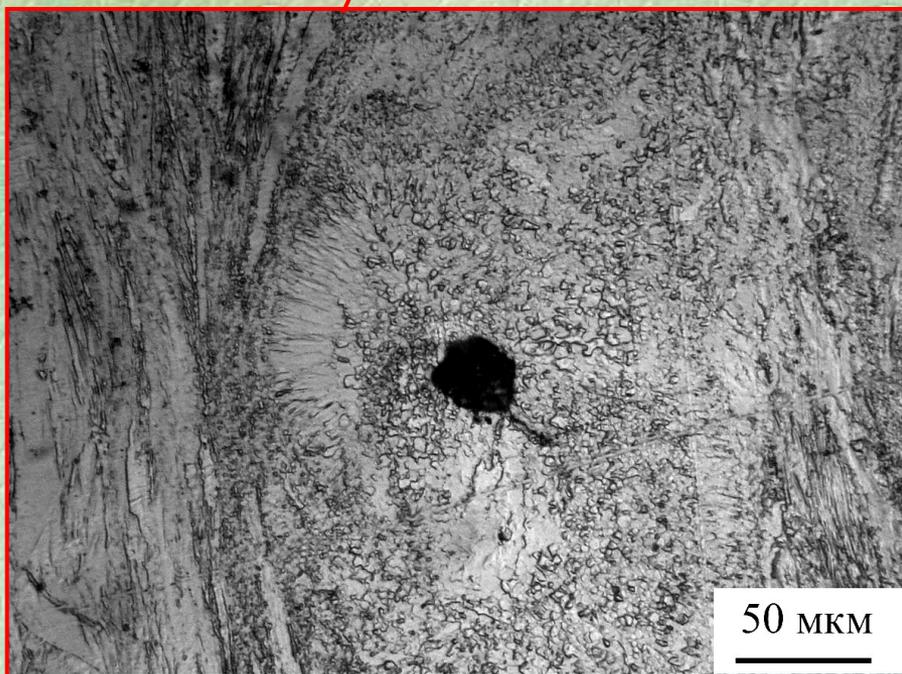
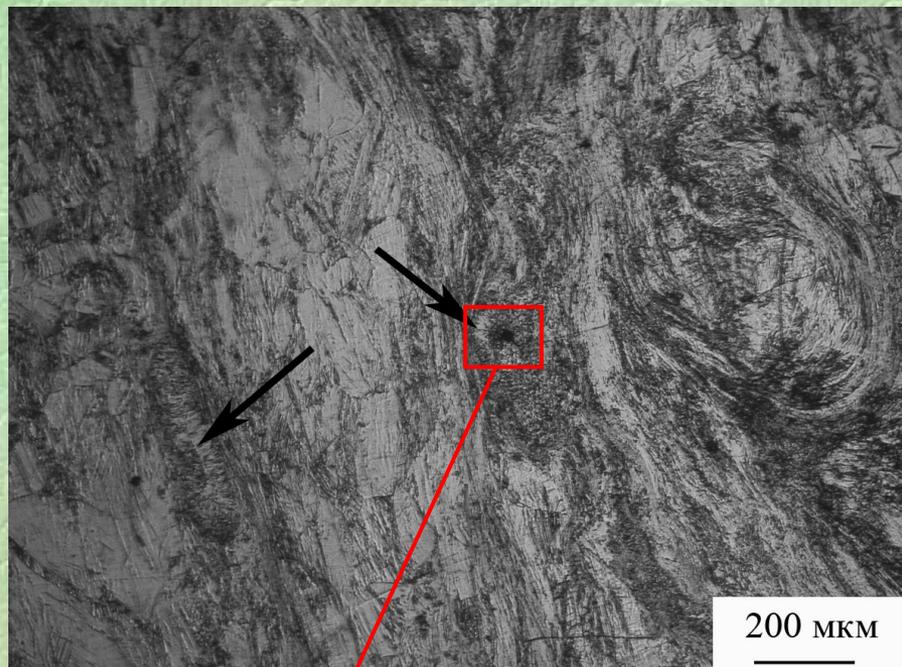


деформация при залечивании микропоры

плавление вокруг поры

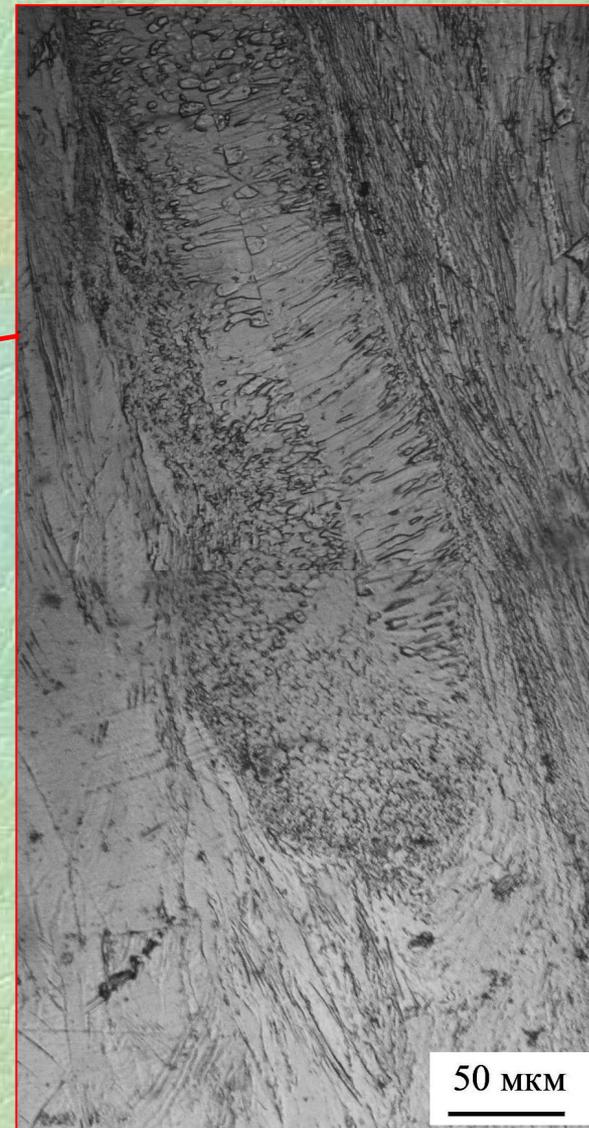
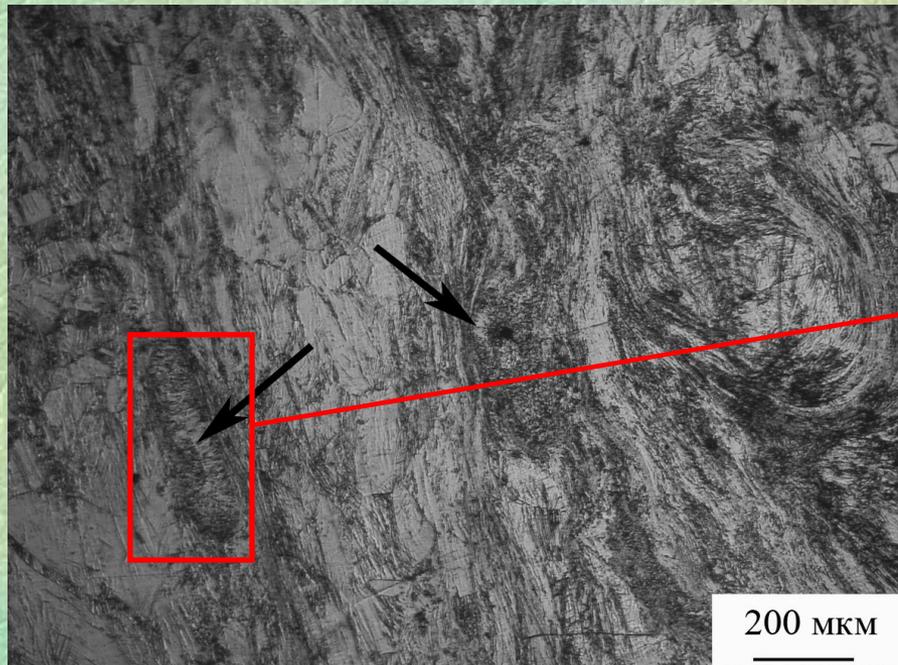


# Деформация и плавление при залечивании пор. Продольное сечение



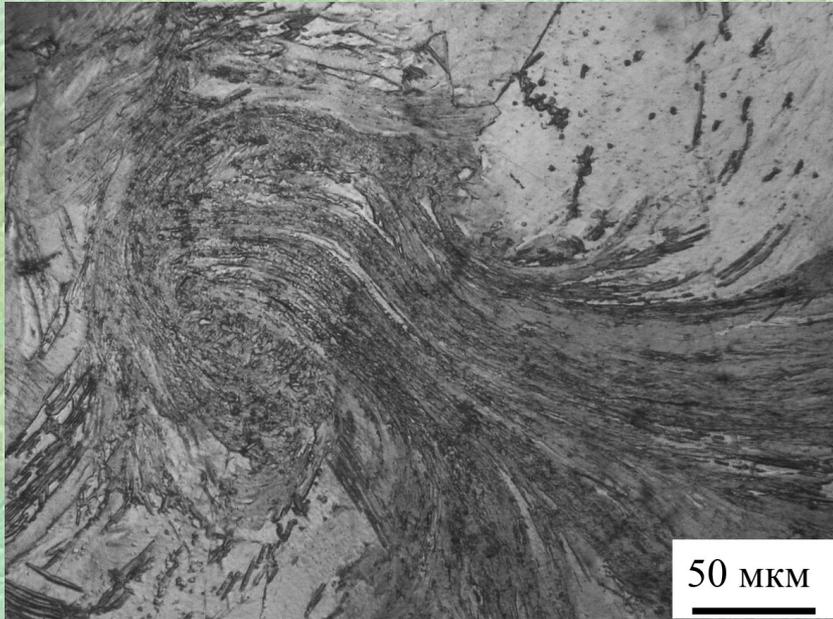
Плавление вблизи поры

# Плавление при локализации деформации. Продольное сечение

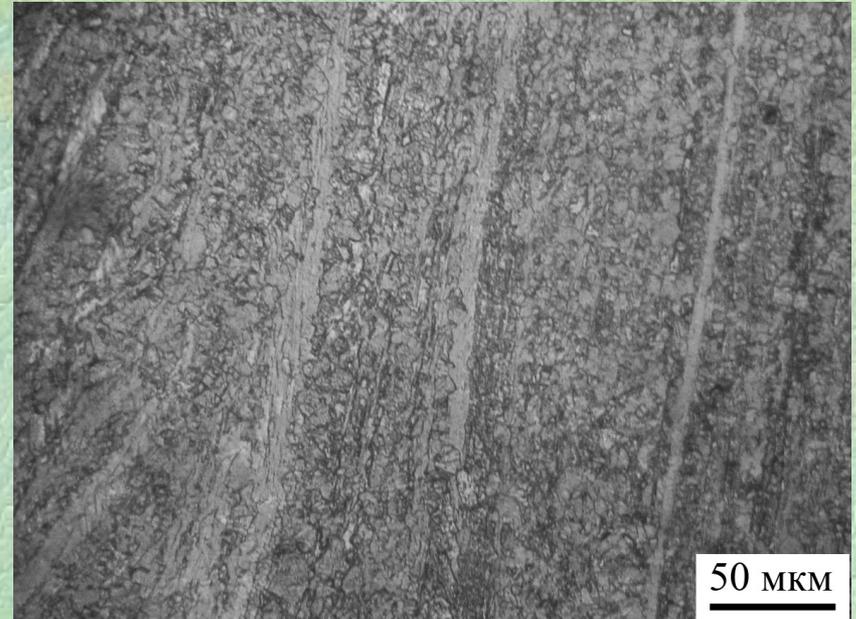


Продолговатый участок плавления  
в полосе осевой локализованной  
деформации

# Структуры локализованного течения при переходе к третьей зоне. Вихрь и рекристаллизация

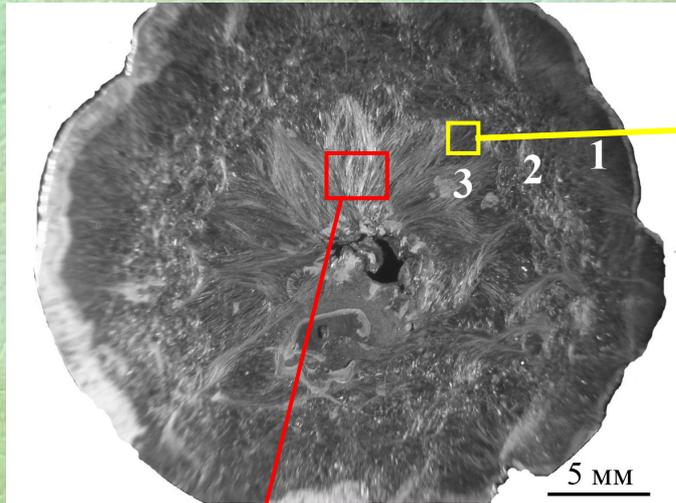


Участок сильного радиального течения

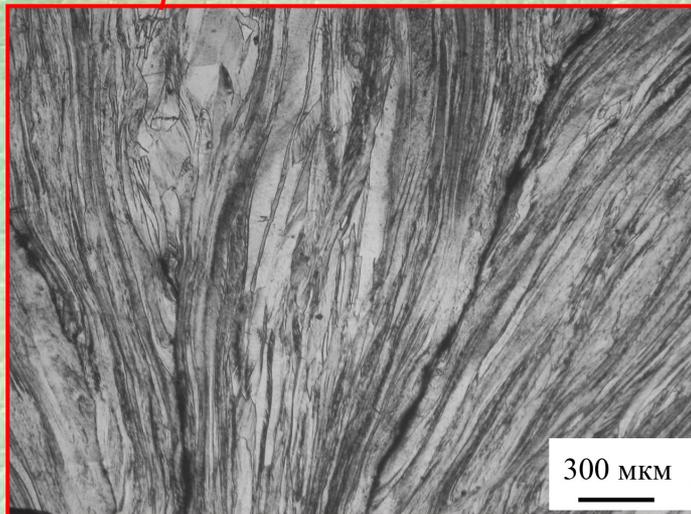
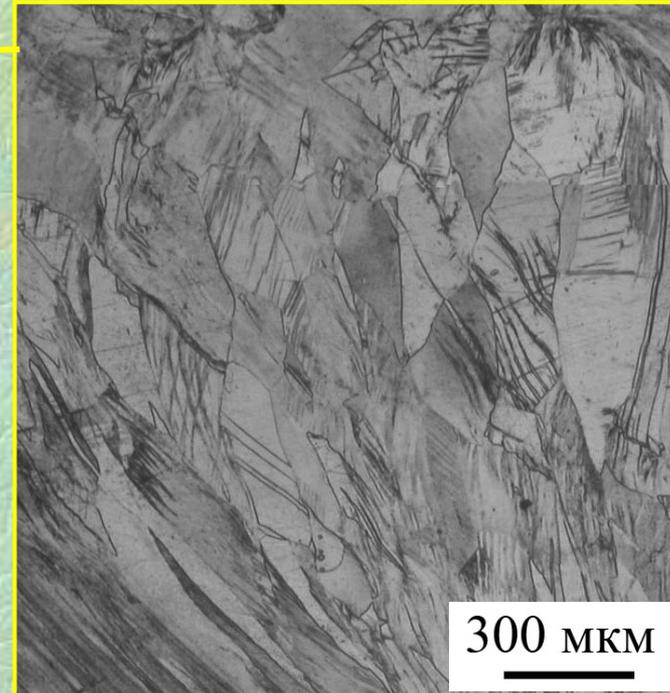


Рекристаллизация

# Внутренняя зона

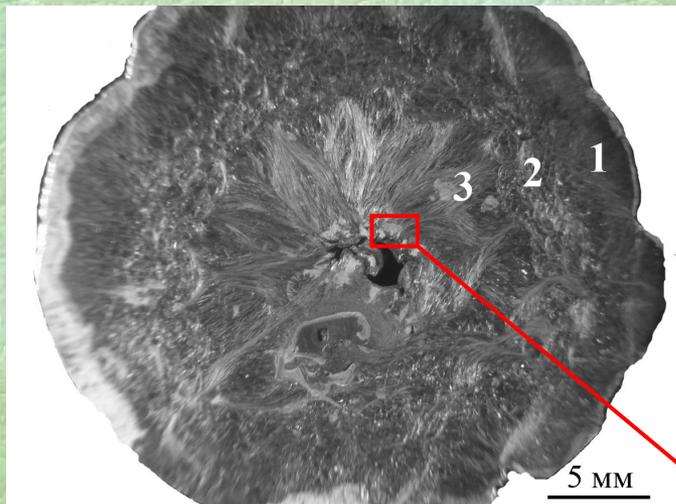


деформированная структура

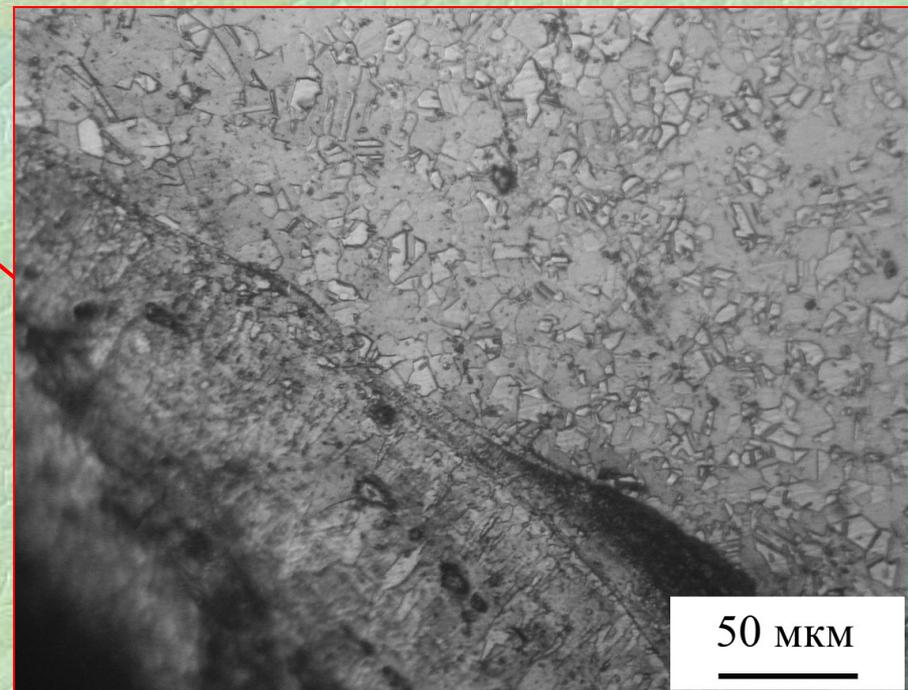
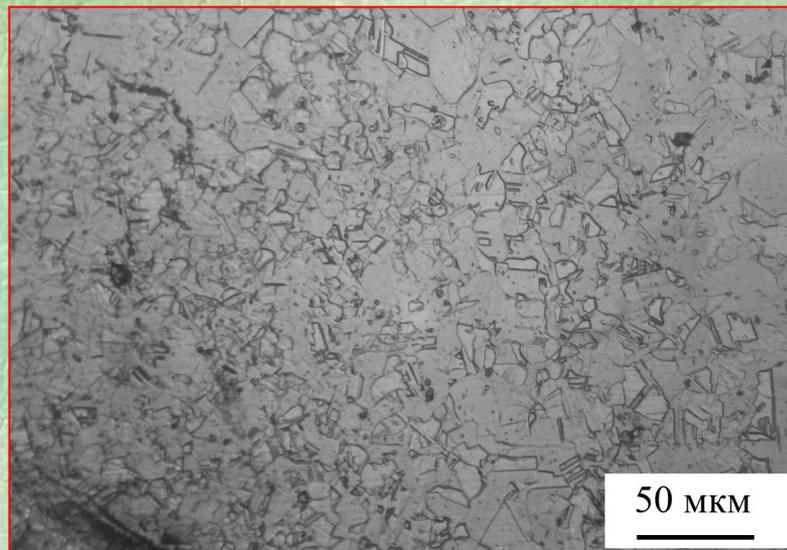


локализованное течение

# Внутренняя зона



Плавление и рекристаллизация  
вблизи оси цилиндра



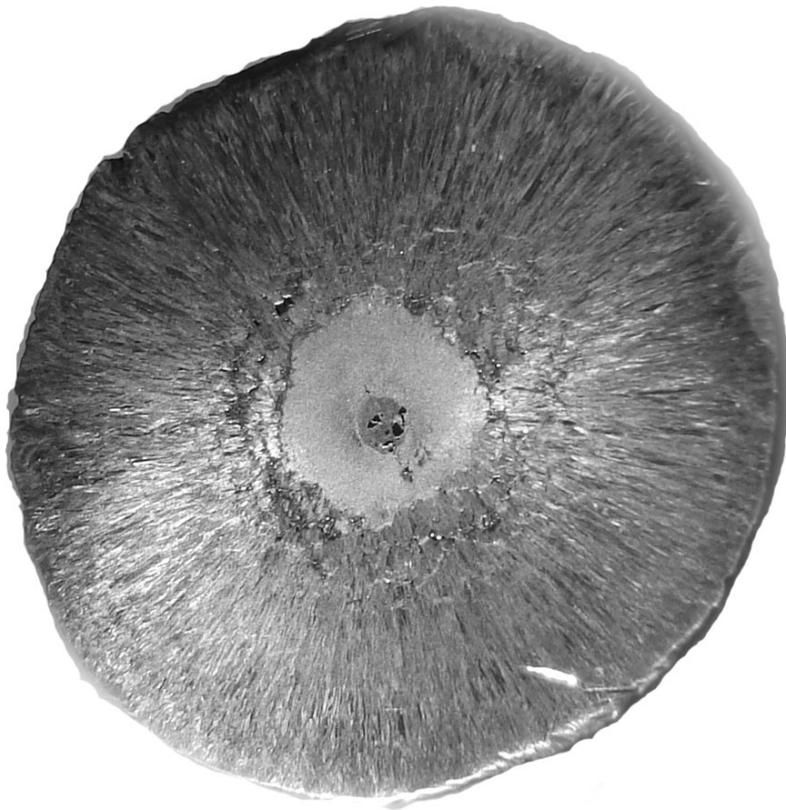
## Заключение

Металлографические исследования макро- и микроструктуры оболочек показали, как происходит деформация и течение материала оболочек при схлопывании.

Предложено описание процессов, происходящих при сжатии исследованных оболочек. Действие детонационной волны на оболочки разделено на два этапа. На первом этапе действует ударная волна, которая вызывает откольные явления в средней зоне материала оболочек. Продолжительность этого этапа составляет 1-2 мкс. На втором этапе происходит инерционное сжатие оболочек. Время сжатия на порядок больше, чем действие ударной волны, и составляет 40-50 мкс. Сжатие осуществляется за счет радиальной деформации, при этом существенную роль играют эффекты локализации деформации. Кроме радиальной деформации, наблюдается деформация в осевом направлении. При деформации происходит залечивание (полное или частичное) микропор и трещин откольного происхождения. Залечивание создает эффекты турбулентности деформации, и она становится хаотической.

***Благодарю за внимание !***

# Схлопывание массивной медной оболочки (С.М.Долгих, К.В.Гаан, Е.В.Шорохов)



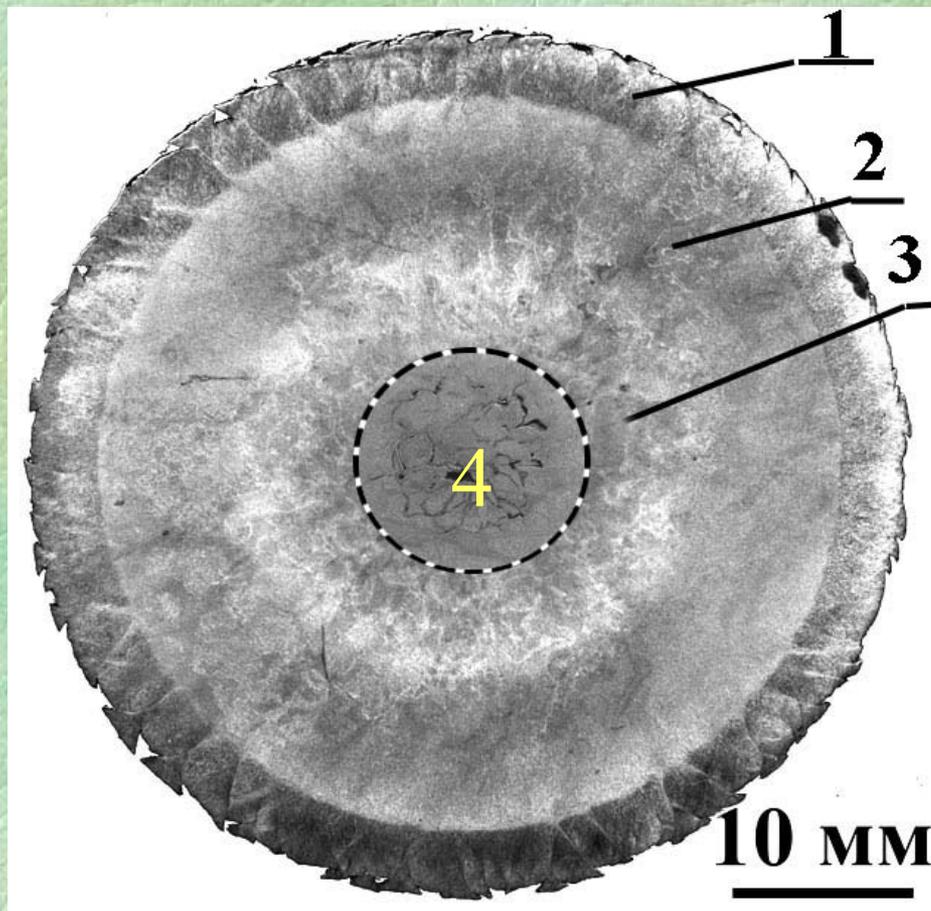
Исходная оболочка имела внутренний диаметр 118 мм и толщину стенки 5.9 мм..

Схлопнутый цилиндр получился диаметром.57-58 мм.

Три зоны в поперечном сечении: в центре зона плавления диаметром 4 мм, далее кольцевая зона рекристаллизации внешним диаметром 16 мм и широкая наружная зона деформации.

Деформация радиальная – механизм деформации – двойникование..

# Схлопывание массивной стальной оболочки (С.М.Долгих, К.В.Гаан, Е.В.Шорохов)



1 – зона с локализованной деформацией

2 – зона «баротермической закалки»

3 – зона рекристаллизации

4 – зона неустойчивости