

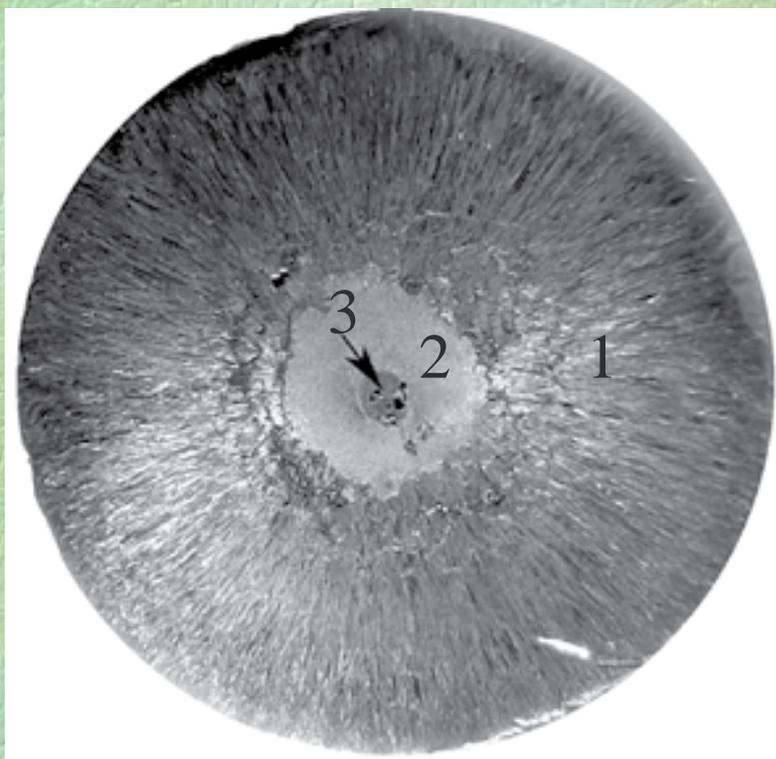
*XIV Забабахинские Научные Чтения 18-22 марта 2019 г.*

**Исследование процесса схождения медных  
цилиндрических оболочек под действием взрыва**

*В.И. Зельдович, Н.Ю. Фролова, А.Э. Хейфец, И.В. Хомская,  
Е.Б. Смирнов\*, А.А. Дегтярёв\*, Е.В. Шорохов\**

*ИФМ им.М.Н Михеева УрО РАН (Екатеринбург)  
\*РФЯЦ ВНИИ Технической Физики (Снежинск)*

## Радиальное схождение большой медной оболочки



Схлопнутая медная оболочка:  
1 – зона деформации;  
2 – зона рекристаллизации;  
3 – зона плавления

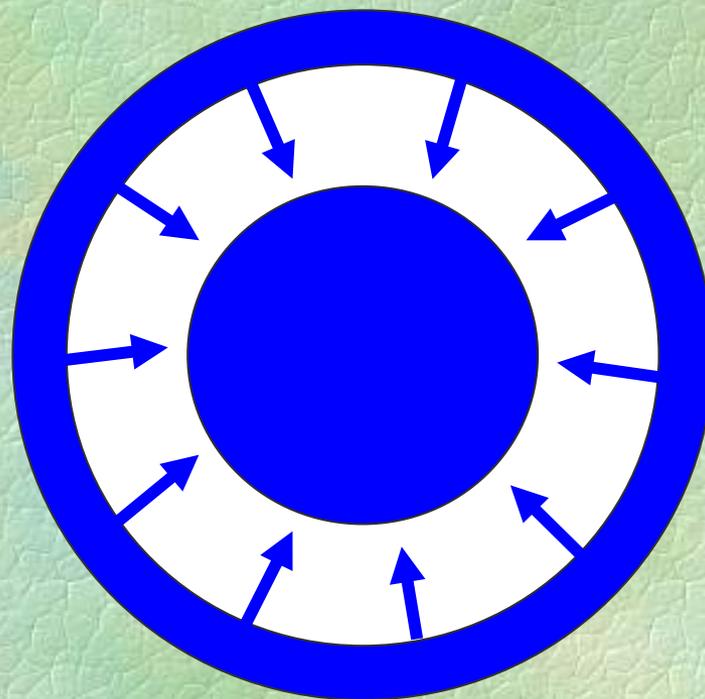


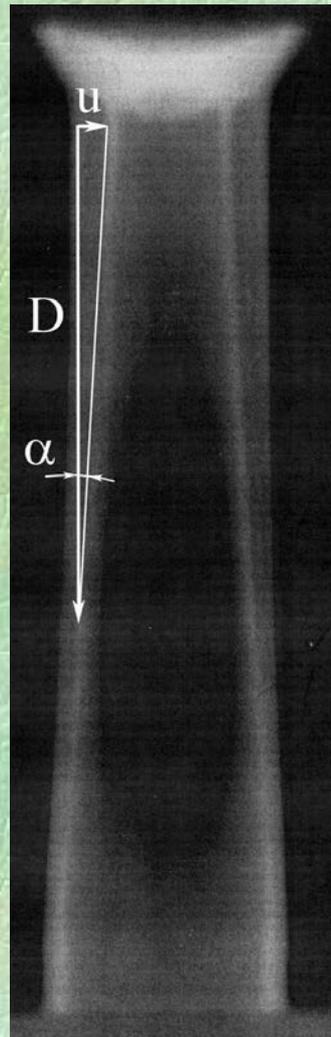
Схема строго радиального схождения оболочки в цилиндр

## Размеры исследованных медных оболочек. Толщина слоя ВВ

№№ оболочек	Наружный диаметр оболочки, мм	Толщина оболочки, мм	Толщина слоя ВВ, мм	Результат схождения оболочки
1	24	2	1	Откол. Скомкалась
2	48	4	2	Откол. Не схлопнулась
3	48	4	4	Немного не схлопнулась
4	48	4	4	Схлопнулась

**Регистрация схождения.  
Степень и скорость деформации**

## Рентгеновский снимок процесса схождения медной оболочки №4. Определение скорости деформации



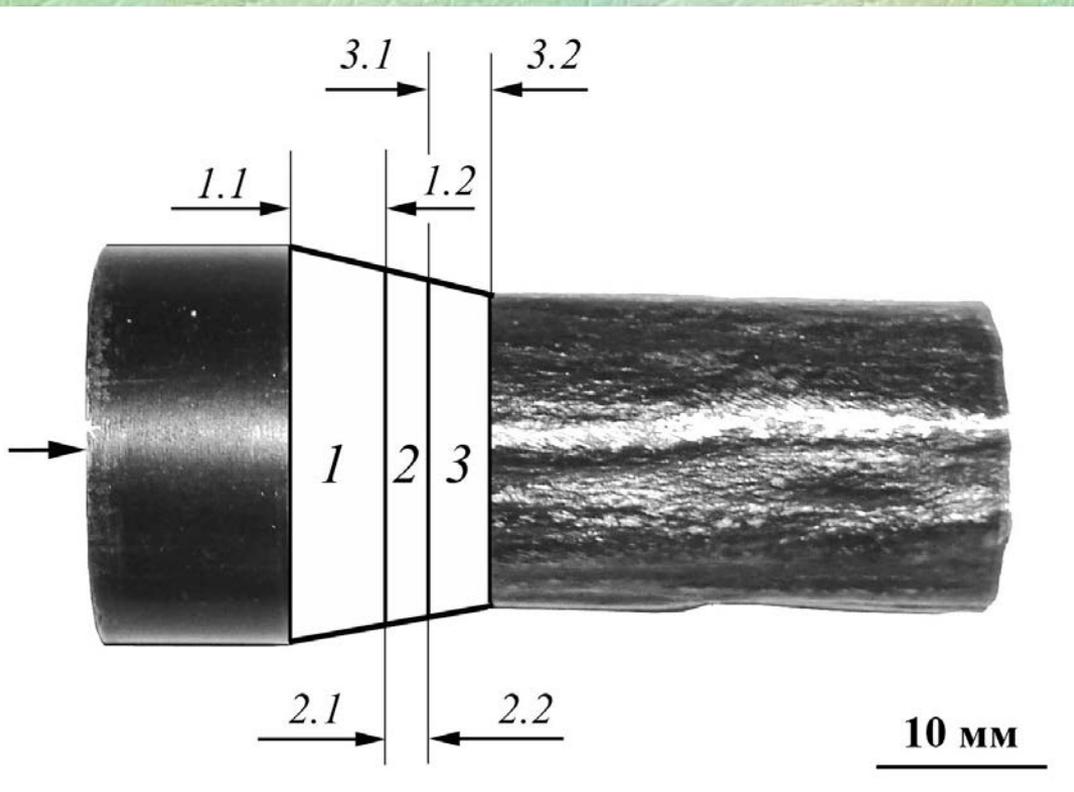
Поверхность сходящейся оболочки образует с осевым направлением угол  $\alpha$ . Зная скорость детонации ( $D=7.8$  км/с), находим среднюю скорость радиального схождения  $u$  по соотношению:  $u \approx D \times \operatorname{tg} \alpha \approx 0.5$  км/с.

Среднее время схождения составляет 30 мкс.

Истинная деформация  $e$  при радиальном схождении оболочки в цилиндр определяется по соотношению:  $e = \ln (d_0/d)$ , где  $d_0$  и  $d$  – диаметры, на которых расположены точки на оболочке и цилиндре. На поверхности цилиндра  $e = 0.5$ , но на расстоянии 1 мм от центра  $e = 3$ . Скорость деформации велика и составляет соответственно  $1.7 \times 10^4$  и  $10^5$  1/с.

# **Металлографическое исследование**

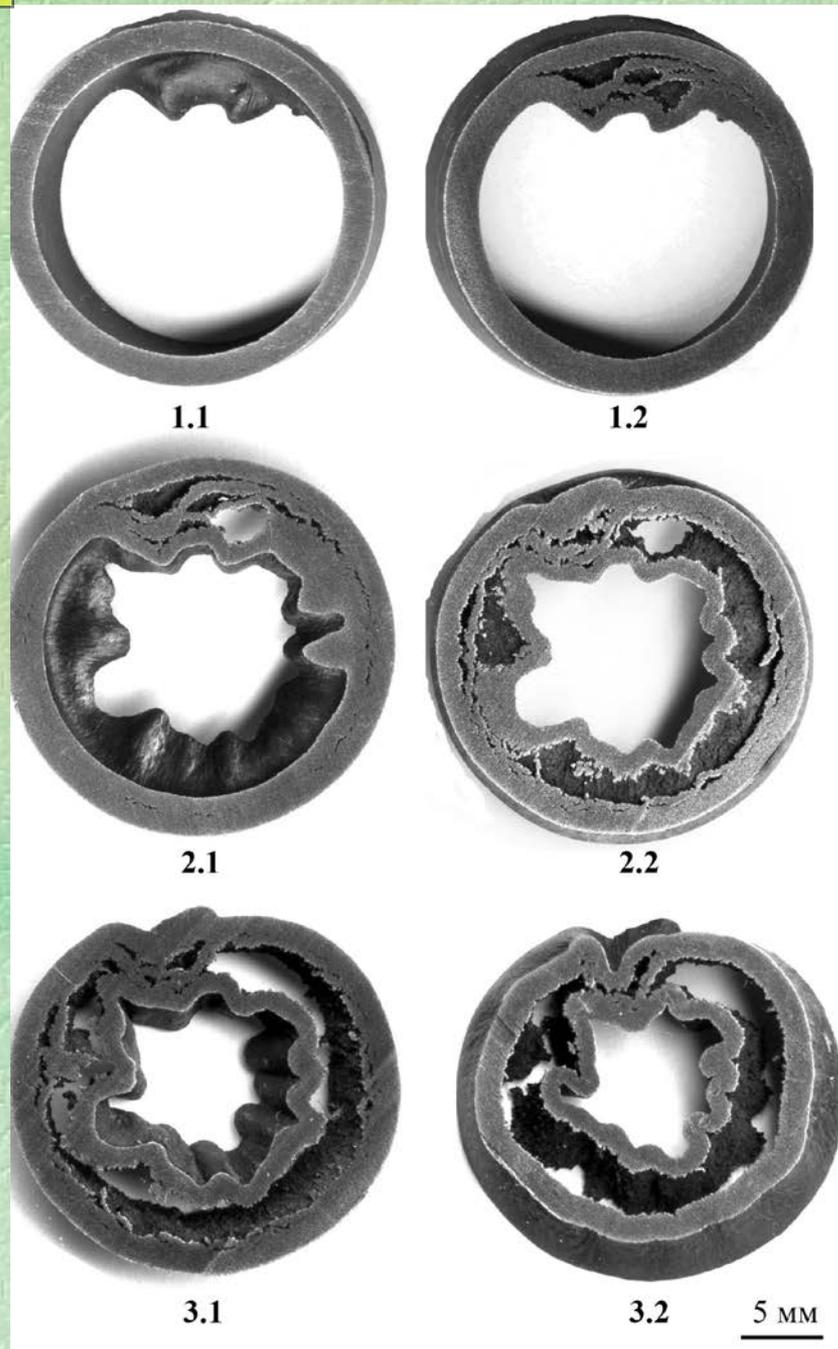
## Схождение малой оболочки №1 диаметром 24 мм



Переходной участок от ненагруженной части оболочки к нагруженной разрезан на 3 кольца.

Можно проследить формирование откола и деформацию при сжатии.

На следующем слайде представлен вид разрезов по стрелкам 1.1, 1.2, 2.1 и т.д.

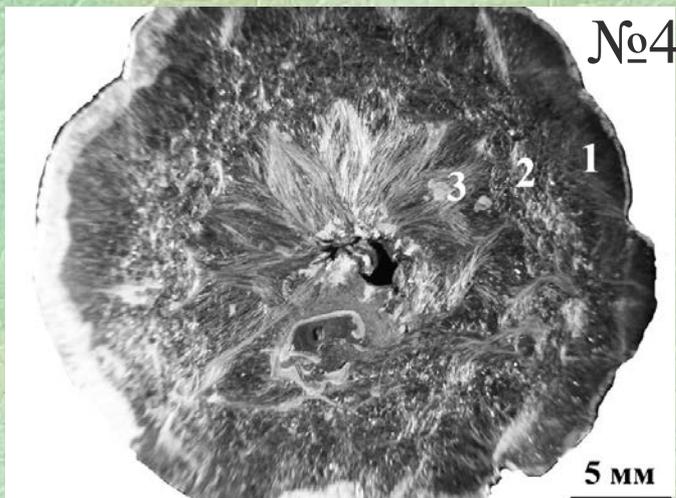
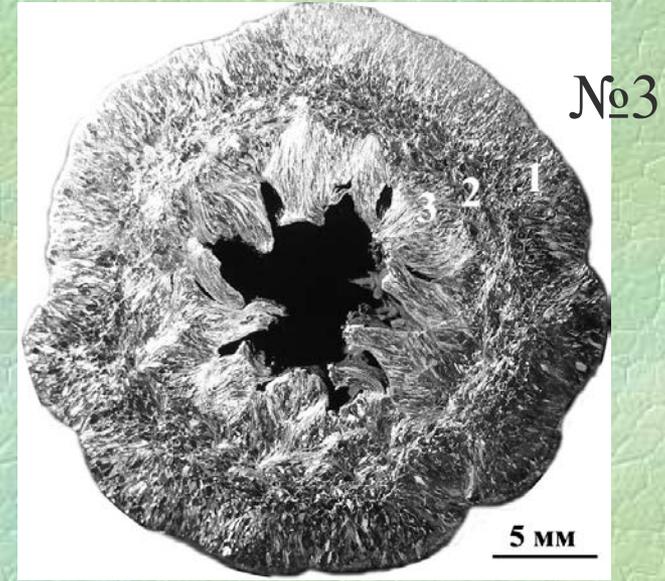
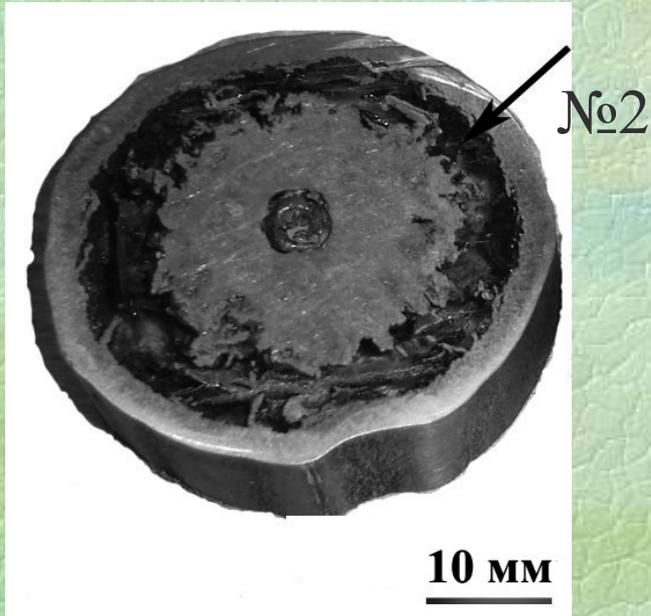


## Формирование откола и деформация при схождении в оболочке №1

Откол привёл к разделению оболочки на два кольца. Наружное кольцо слабо деформировалось, внутреннее – скомкалось. Потеря устойчивости при радиальном схождении внутреннего кольца началась с образования выступов. Количество выступов – 9-11. Таким образом, внутреннее кольцо при схождении испытывает деформацию изгибом.

**Схождение оболочек №№2-4  
диаметром 48 мм**

Макроструктура оболочек диаметром 48 мм после схождения.  
Поперечные сечения. Деформация сжатия и сдвиги



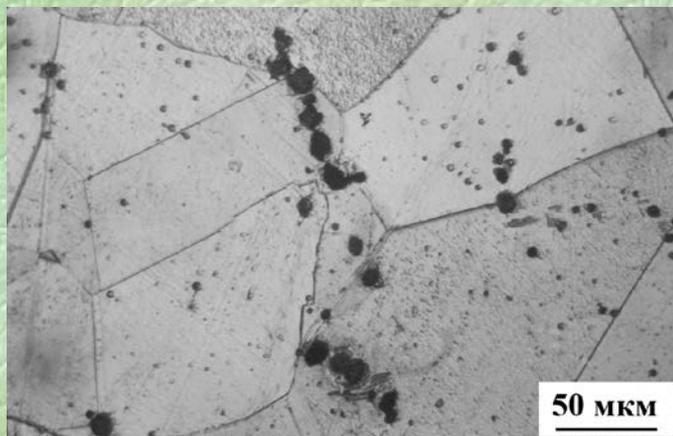
Надписи на оболочках №3 и №4

1 – наружная зона, радиальная деформация

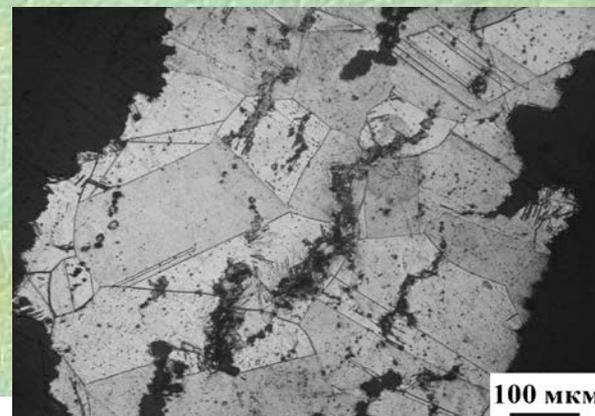
2 – средняя зона, турбулентная деформация

3 – внутренняя зона, радиальная деформация, «цветок»

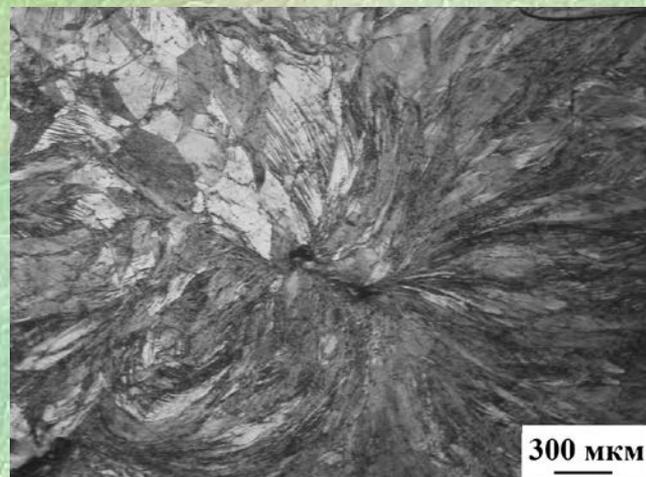
# Откольные явления в оболочке №2



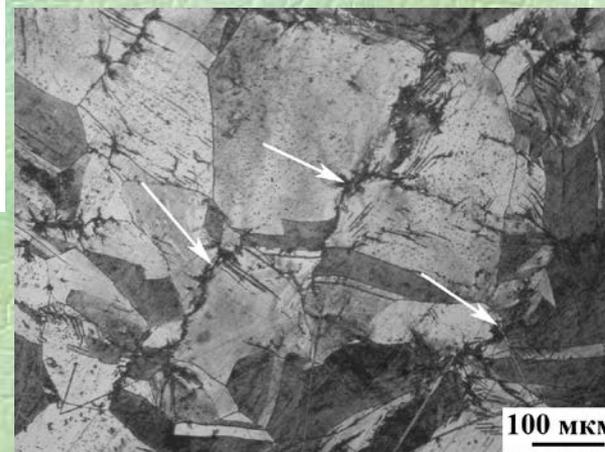
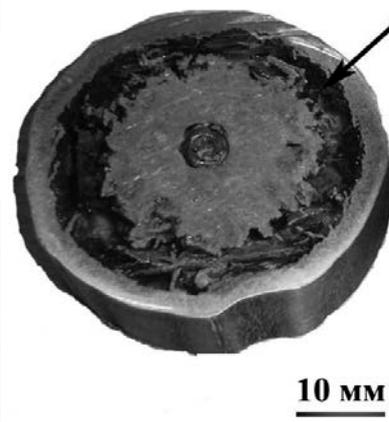
Поры в наружном кольце



Слияние пор. Трещины



Залечивание пор во внутренней части оболочки



Залечивание трещин

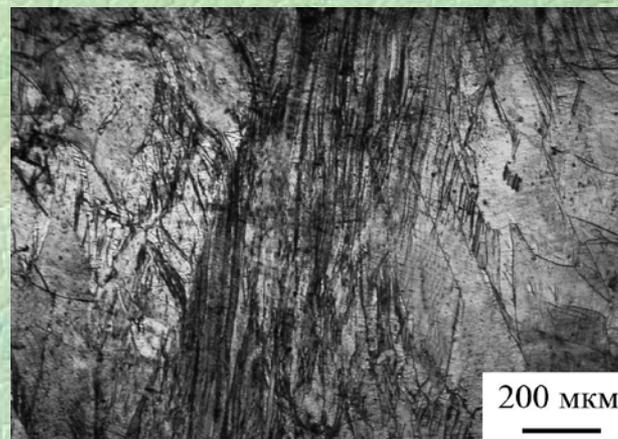
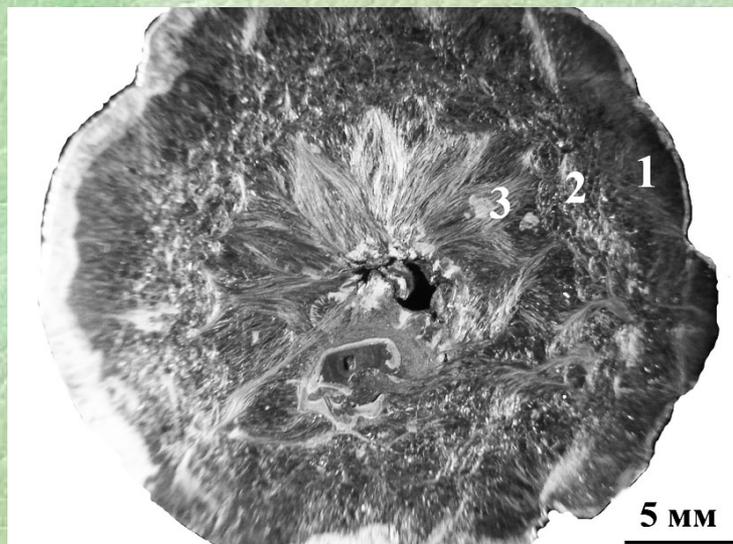
## Вопросы по макроструктуре оболочек №3 и №4

Схождение происходит за счёт деформации (высокоскоростной!), при которой материал оболочки движется по радиусу к оси.

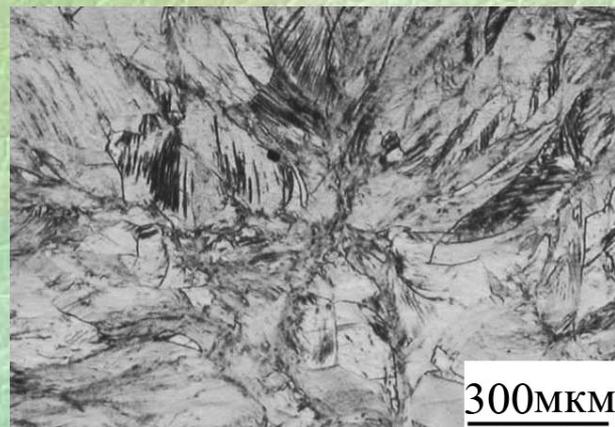
Почему в оболочках №3 и №4 нарушено строго радиальное схождение, почему образовалась средняя зона?

- 1) Каково происхождение зоны турбулентной (хаотической) деформации (средняя зона 2)?
- 2) Каково происхождение фигуры в виде «цветка» во внутренней зоне оболочки №4 (зона 3)?

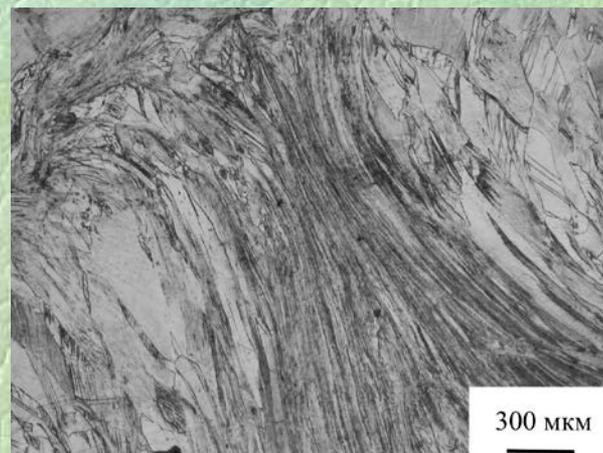
# Макро- и микроструктура трёх зон оболочки №4



Наружная зона (1)



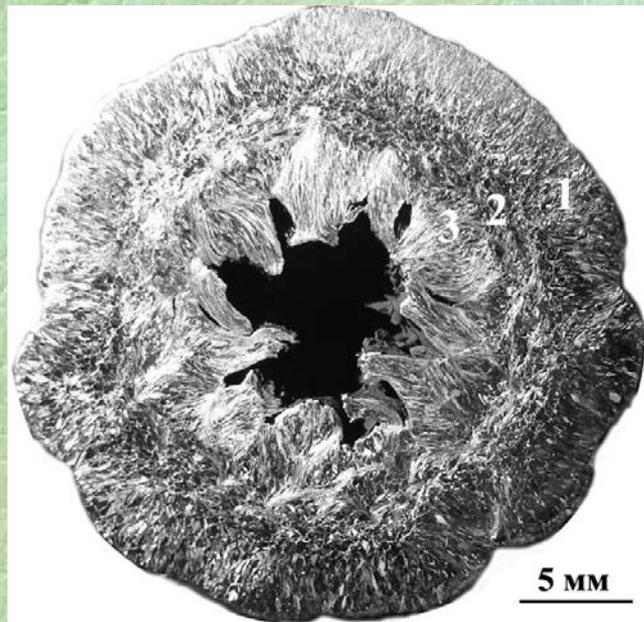
Средняя зона (2)



Внутренняя зона (3)

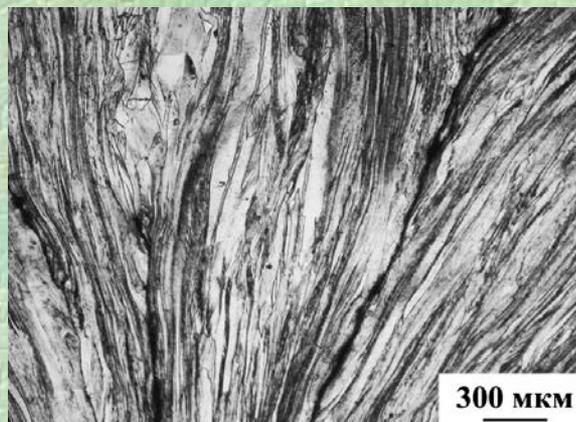
**Зона хаотической деформации возникает из-за откольных явлений и их залечивания**

## Оболочка №3. Потеря устойчивости

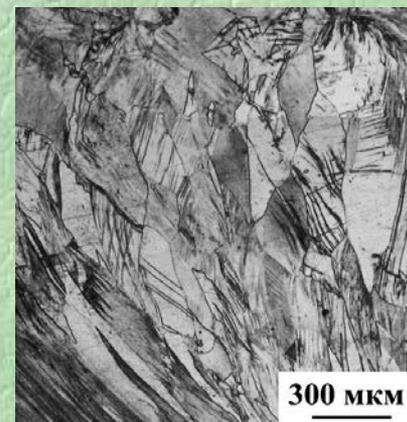


Выступы (выбросы) на  
внутренней поверхности

## Оболочка №4. Микрострук- туры во внутренней зоне



Локализованная деформация.  
След слияния выступов



Место рядом

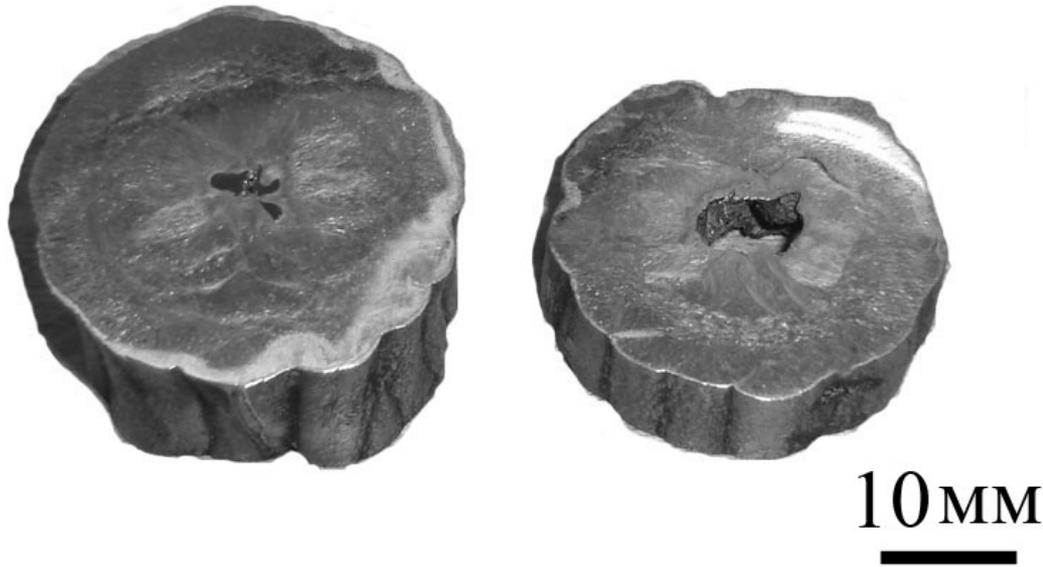
**Фигура в виде цветка в центре оболочки №4 возникает из-за потери устойчивости, образования выступов и их последующего слияния**



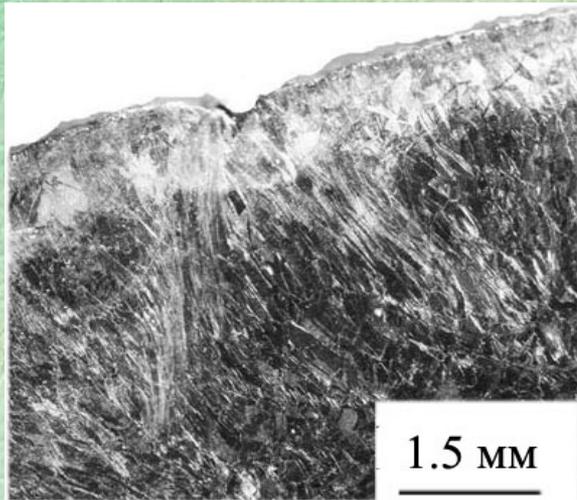
# **Гофрирование на поверхности оболочек**

**Гофрирование на наружной поверхности  
происходит из-за потери устойчивости**

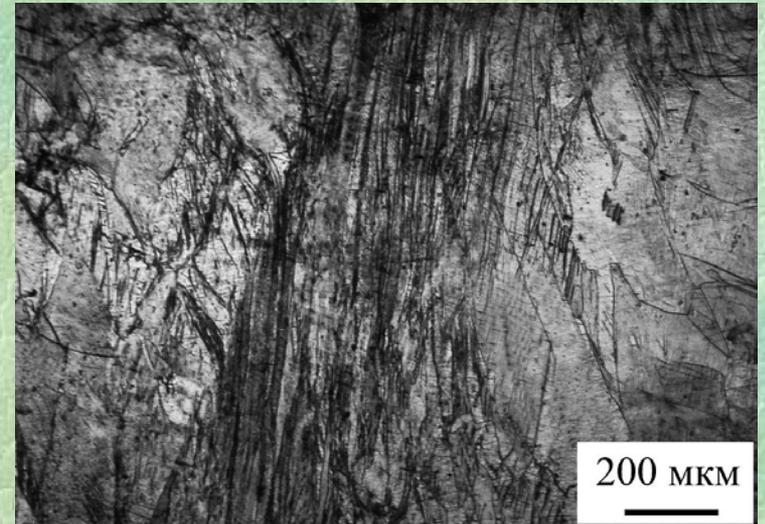
# Оболочка №4. Потеря устойчивости на наружной поверхности



Гофрирование поверхности.  
12 выступов и вмятин



Локализация деформации  
возле вмятины



## Заключение

1. Выполнены эксперименты по схождению под действием взрыва медных цилиндрических оболочек диаметром 48 мм и толщиной стенки 4 мм. Зарегистрированы последовательные этапы схождения. Определены степень и скорость радиальной деформации. Максимальная расчётная величина  $e = 3$ ; скорость  $10^4 - 10^5$  1/с.
2. В оболочках под действием ударных волн возникают откольные поры и трещины. Поры и трещины залечиваются при высокоскоростной деформации. Образование пор и их залечивание создают зону хаотической деформации.
3. Высокоскоростная деформация меди при схождении оболочек сопровождается эффектами локализации деформации и потерей устойчивости гладкого фронта схождения. На внутренней поверхности сходящейся оболочки возникают выступы (выбросы), которые сливаются в процессе дальнейшего схождения к центру. На наружной поверхности образуются периодически расположенные выступы и вмятины. Это приводит к гофрированию поверхности.

***Благодарю за внимание!***