

ТЕМПЕРАТУРНО-ДЕФОРМАЦИОННЫЕ  
ЭФФЕКТЫ  
ПРИ СХОЖДЕНИИ СТАЛЬНОЙ  
ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

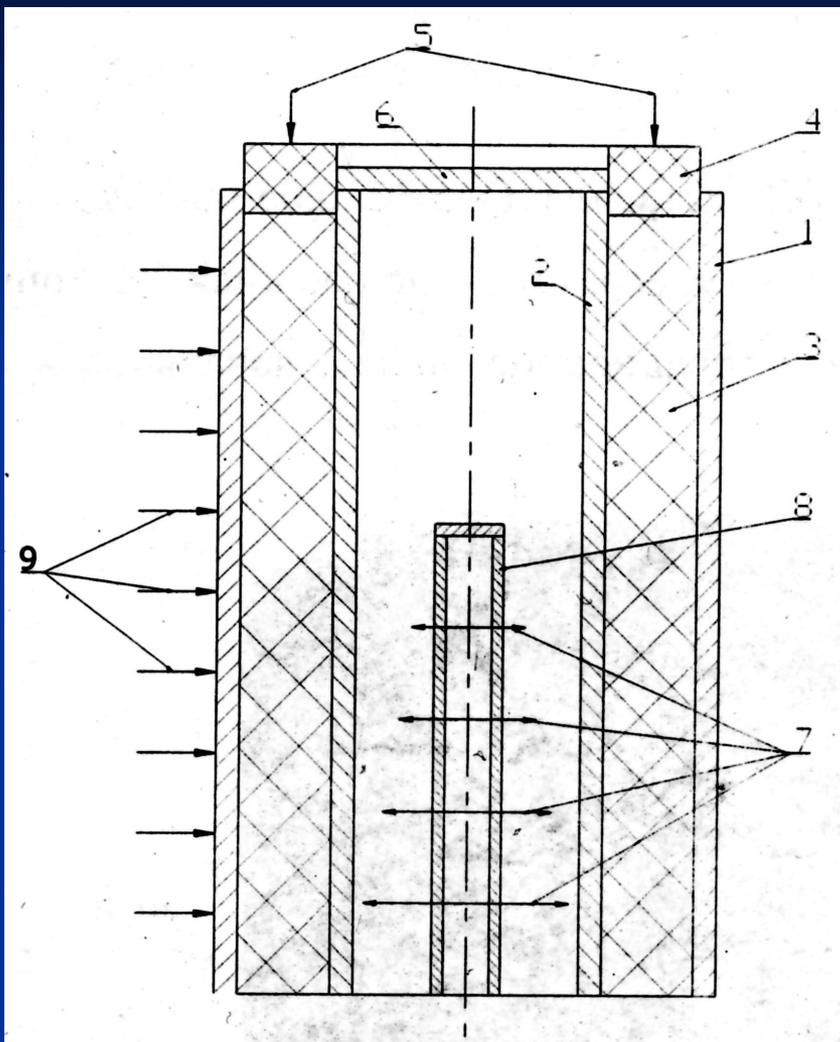
А.Э. Хейфец, В.И. Зельдович, Н.Ю. Фролова, С.М.  
Долгих\*, К.В. Гаан\*, Е.В. Шорохов\*

ИФМ УрО РАН (Екатеринбург)

\*РФЯЦ ВНИИ Технической Физики (Снежинск)

- **Методика проведения эксперимента**
- Регистрация схлопывания
- Исследование макро- и микроструктуры
- Расчет деформации и температуры
- О формировании структуры «баротермической закалки»
- Заключение

# Экспериментальный узел



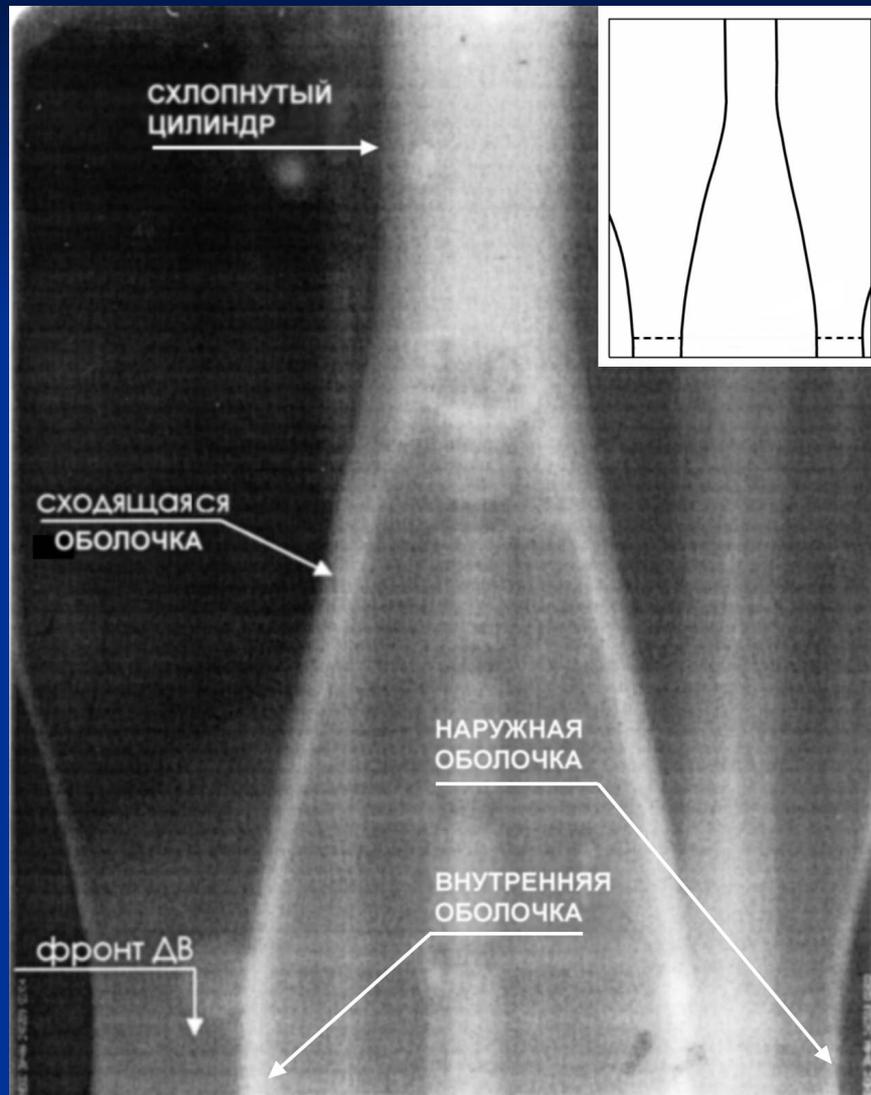
- 1 – наружная оболочка (сталь 20)
- 2 – внутренняя оболочка (сталь 20)
- 3 – ВВ
- 4 – высокочувствительное ВВ
- 5 – кольцевая система инициирования
- 6 – защитный диск
- 7 – электроконтактные датчики
- 8 – устройство крепления ЭК-датчиков
- 9 – волоконно-оптические датчики

# Особенности эксперимента

- Большая толщина стенок оболочки. Можно изучать эффекты локализации деформации на макроскопическом и мезоскопическом уровнях
- Величина заряда подобрана таким образом, что оболочка схлопывается до конца, но к моменту схлопывания вся энергия оказывается «израсходованной». Т.е. нет эффектов отражения
- Регистрация движения оболочки проведена с высокой точностью
- Использование хорошо изученного «модельного» материала (сталь 20) и «металловедческих» методов анализа остаточных изменений в микроструктуре позволяет получать дополнительные сведения, касающиеся динамики процесса

- Методика проведения эксперимента
- **Регистрация схлопывания**
- Исследование макро- и микроструктуры
- Расчет деформации и температуры
- О формировании структуры «баротермической закалки»
- Заключение

# Рентгеновский снимок процесса схождения оболочки и его схема

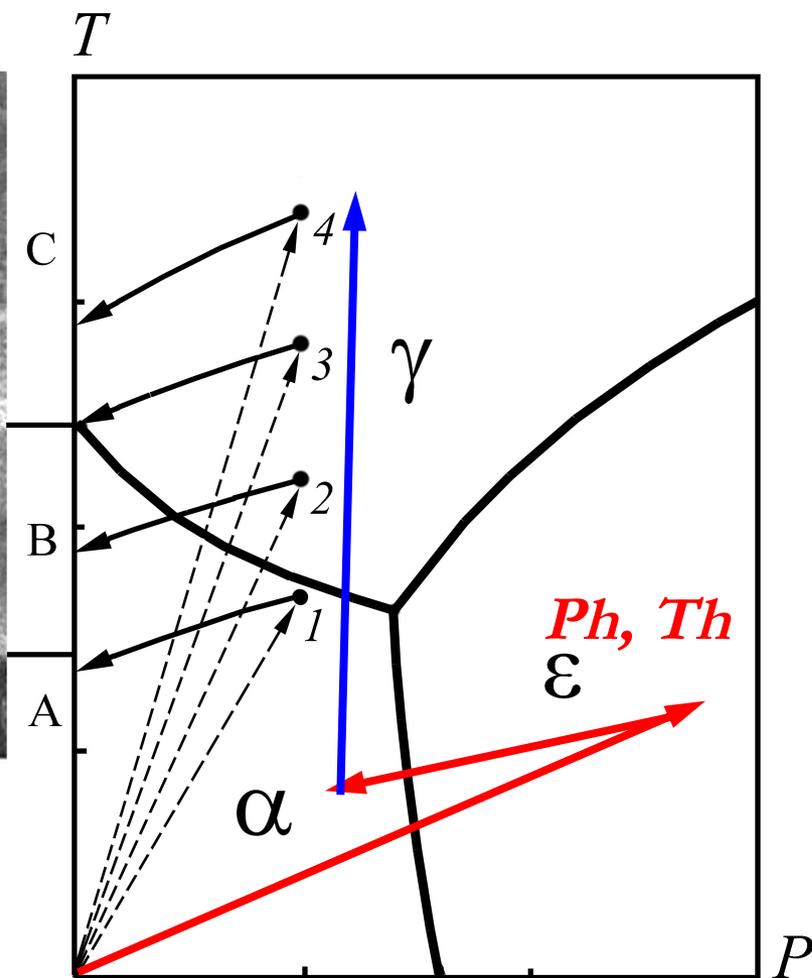
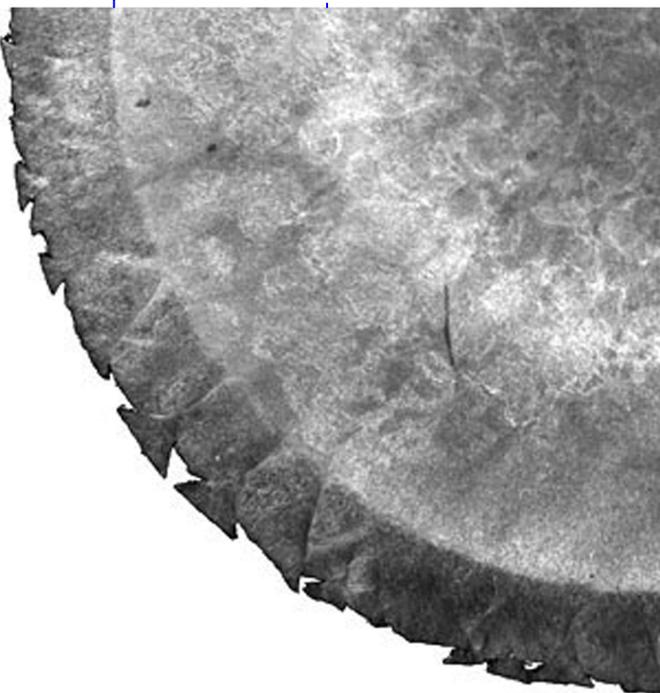
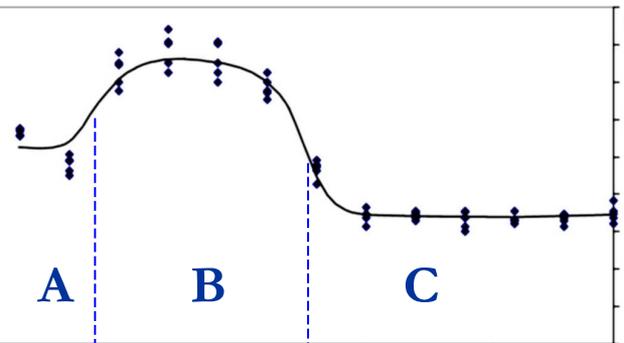


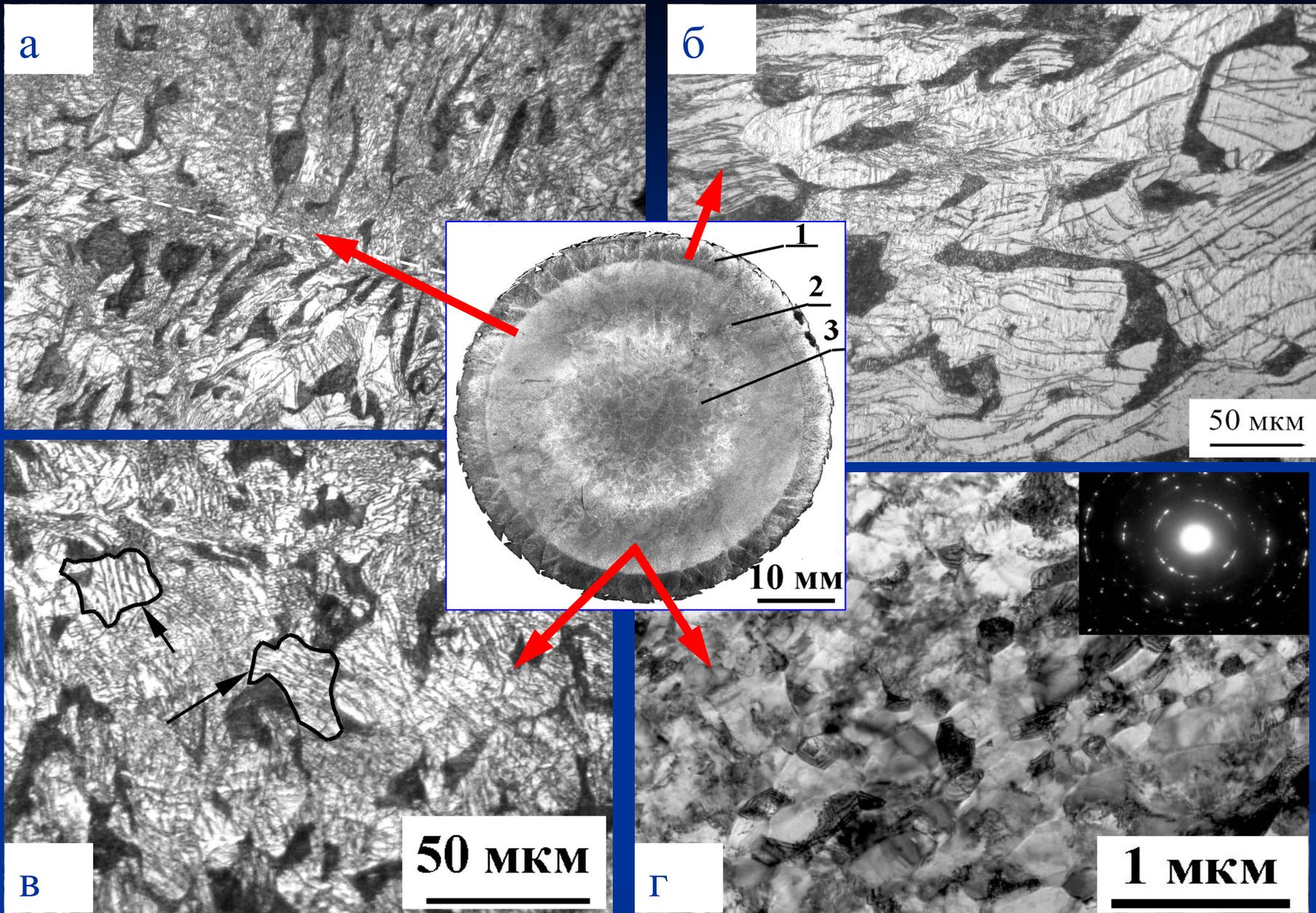
На схеме штриховыми линиями отмечен фронт детонационной волны. Перед фронтом видно положение внутренней и наружной оболочек (труб) до нагружения.

После нагружения получился сплошной цилиндр. Время схождения – 30 мкс

- Методика проведения эксперимента
- Регистрация схлопывания
- Исследование макро- и микроструктуры
- Расчет деформации и температуры
- О формировании структуры «баротермической закалки»
- Заключение

# Макроструктура и микротвердость образца в сопоставлении с Т-Р диаграммой

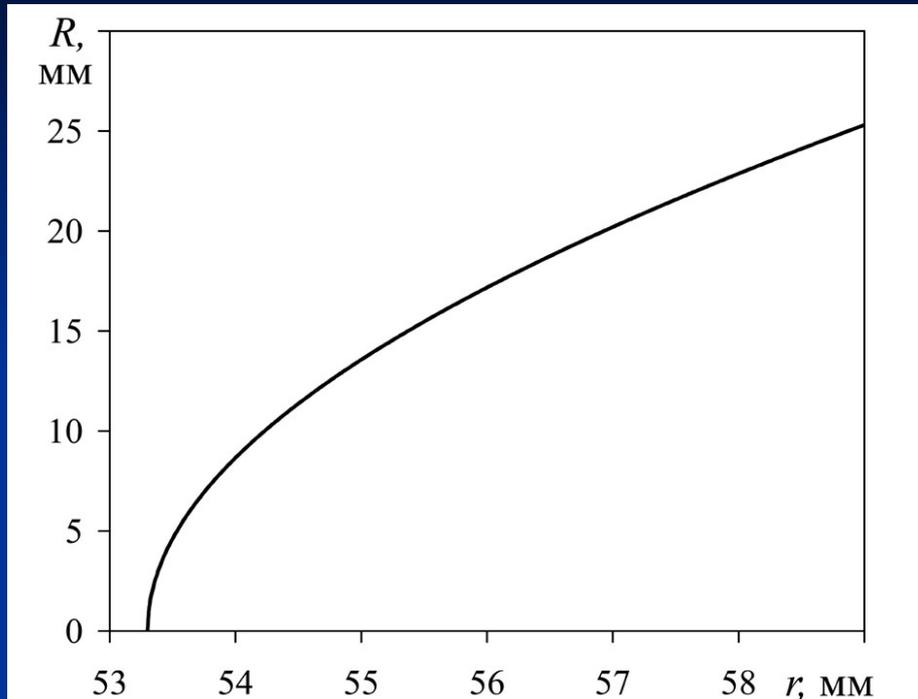




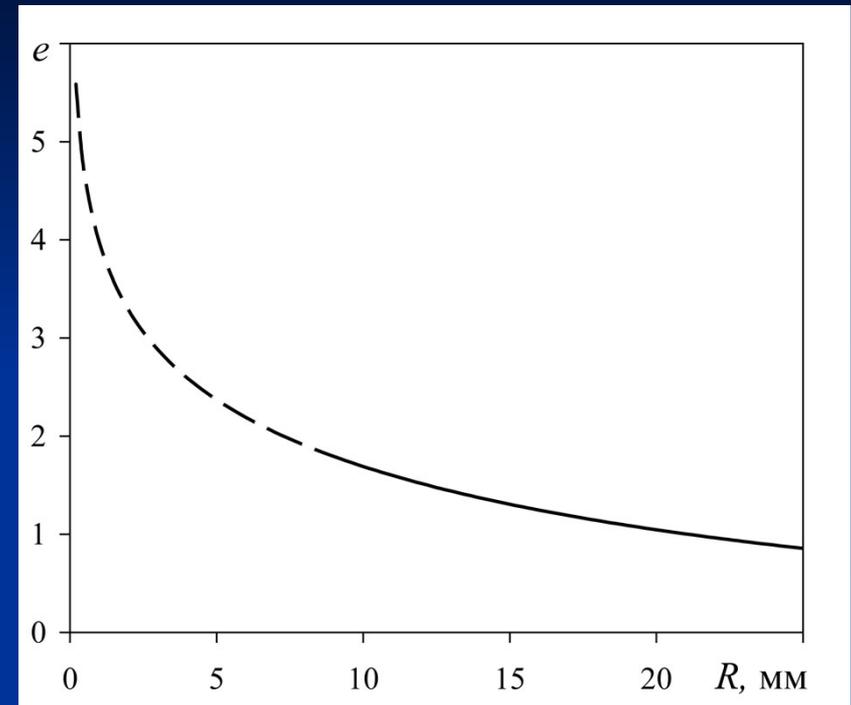
Граница 1-й и 2-й зон (а) и микроструктура 1-й(б) и 2-й зоны (в,г)

- Методика проведения эксперимента
- Регистрация схлопывания
- Исследование макро- и микроструктуры
- Расчет деформации и температуры
- О формировании структуры «баротермической закалки»
- Заключение

# Радиальная деформация

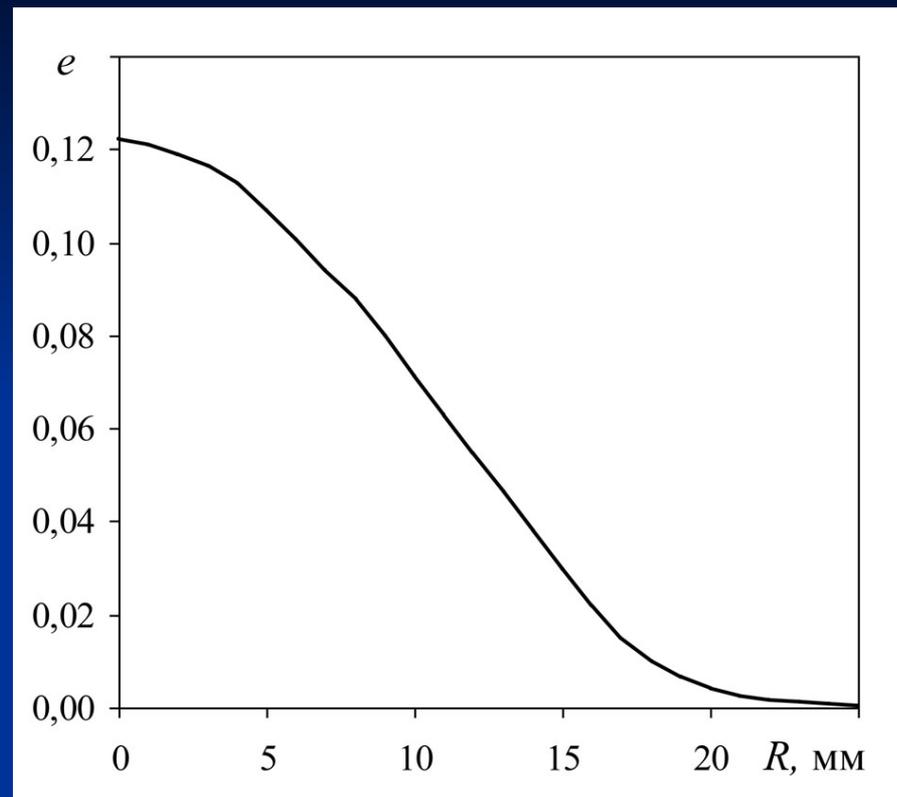
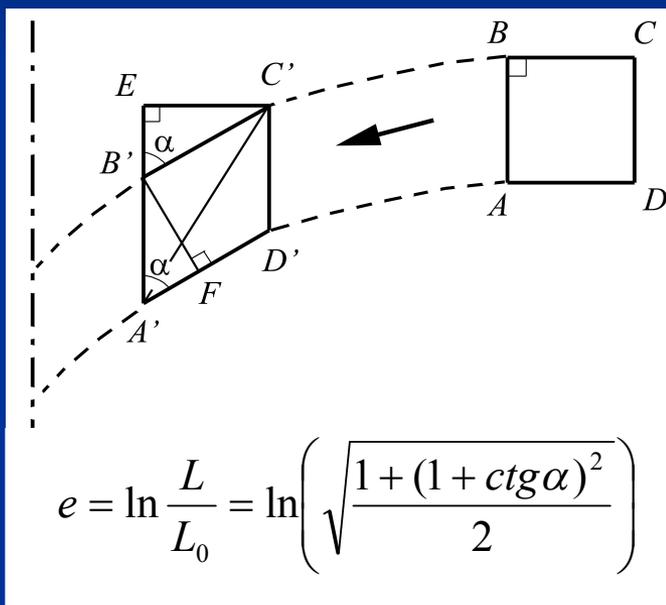
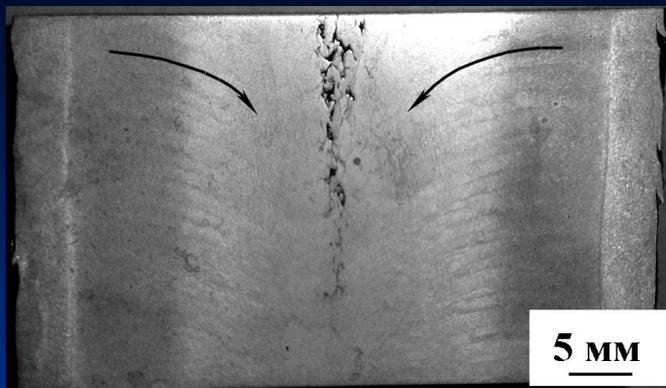


Взаимосвязь расположения материальных точек на оболочке ( $r$ ) и на цилиндре ( $R$ )



Зависимость истинной деформации от радиуса

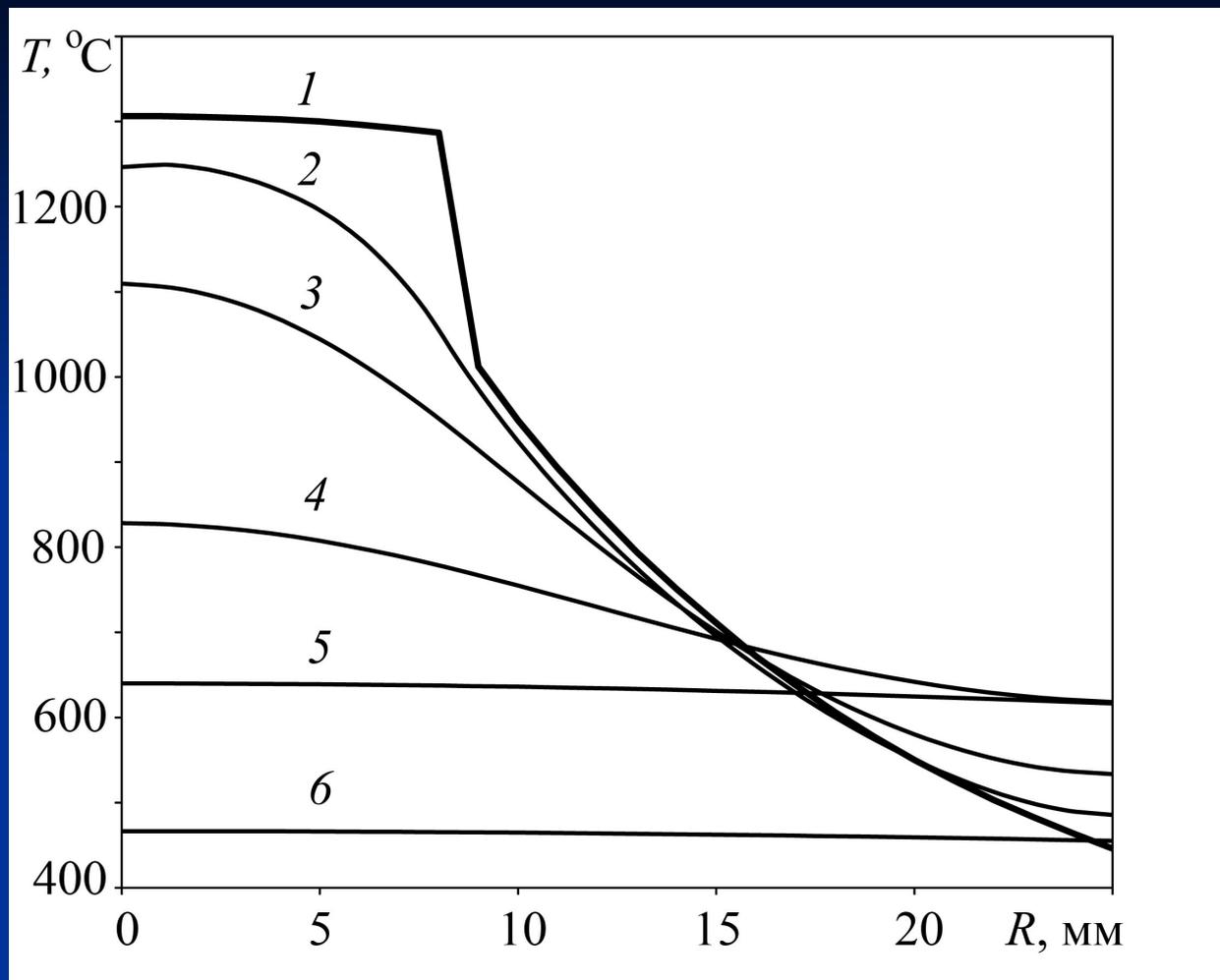
# Осевая деформация



Радиальная зависимость  
осевой деформации

Схема расчета осевой  
деформации

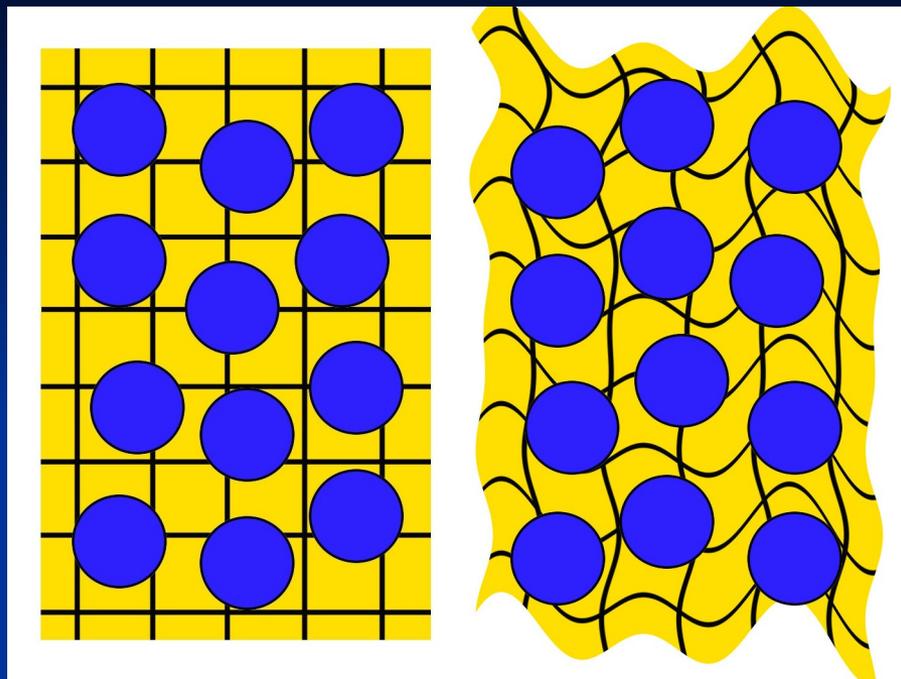
# Радиальная зависимость температуры



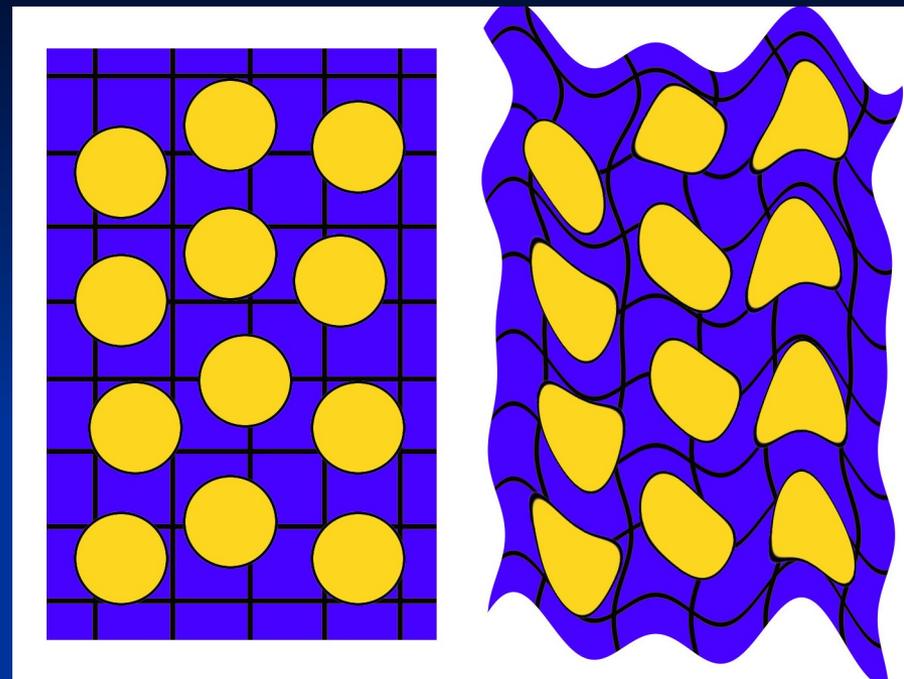
Температура непосредственно после нагружения (кривая 1), а также через 1, 3, 10, 60 и 300 секунд после нагружения (кривые 2 – 6)

- Методика проведения эксперимента
- Регистрация схлопывания
- Исследование макро- и микроструктуры
- Расчет деформации и температуры
- О формировании структуры «баротермической закалки»
- Заключение

# Деформация феррито-перлитной структуры



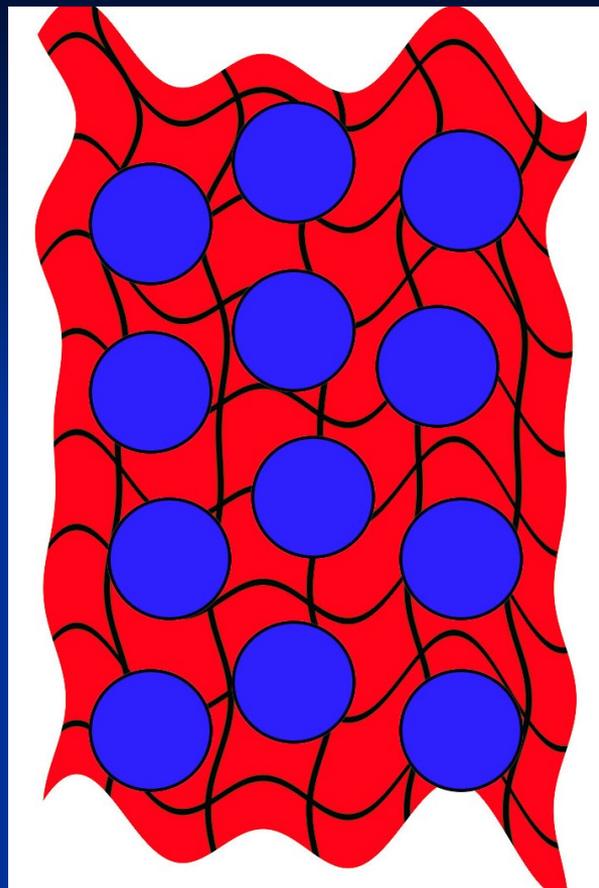
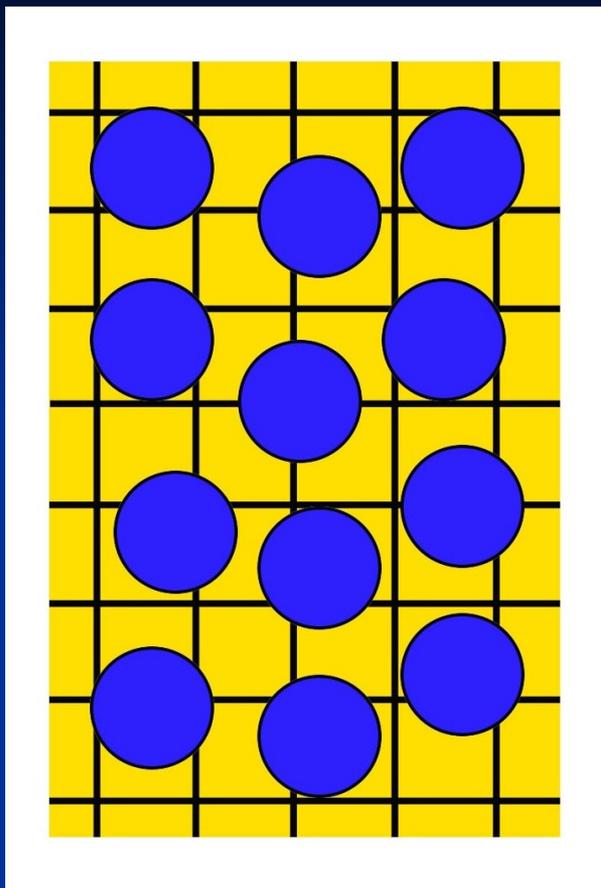
Сталь 20



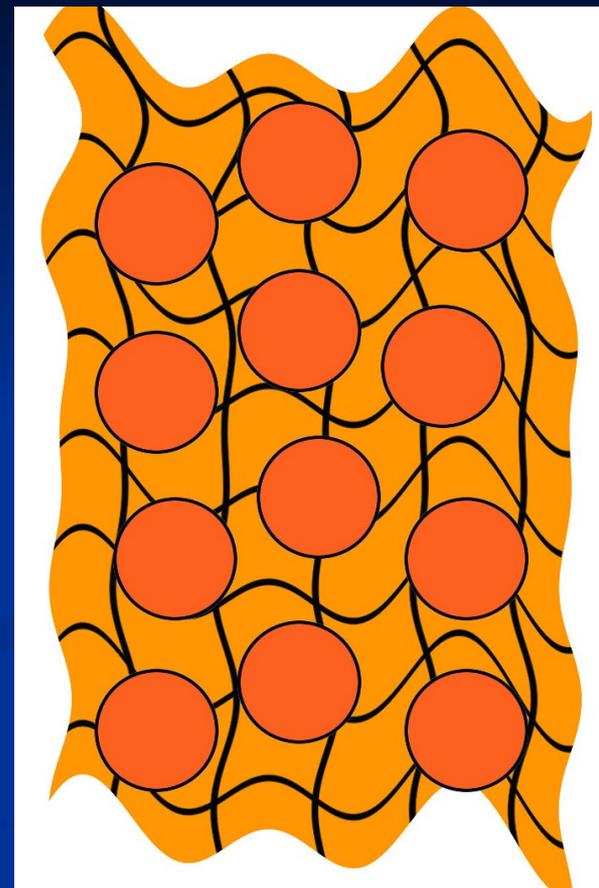
Сталь 40

*Бабич В.К., Гуль Ю.П., Долженков И.Е. Деформационное старение стали, 1972  
Maurer K.L. Berg. und Huttenmannische Monatshefte, 1965, Bd 110, N7, S.200*

# Высокоскоростная деформация



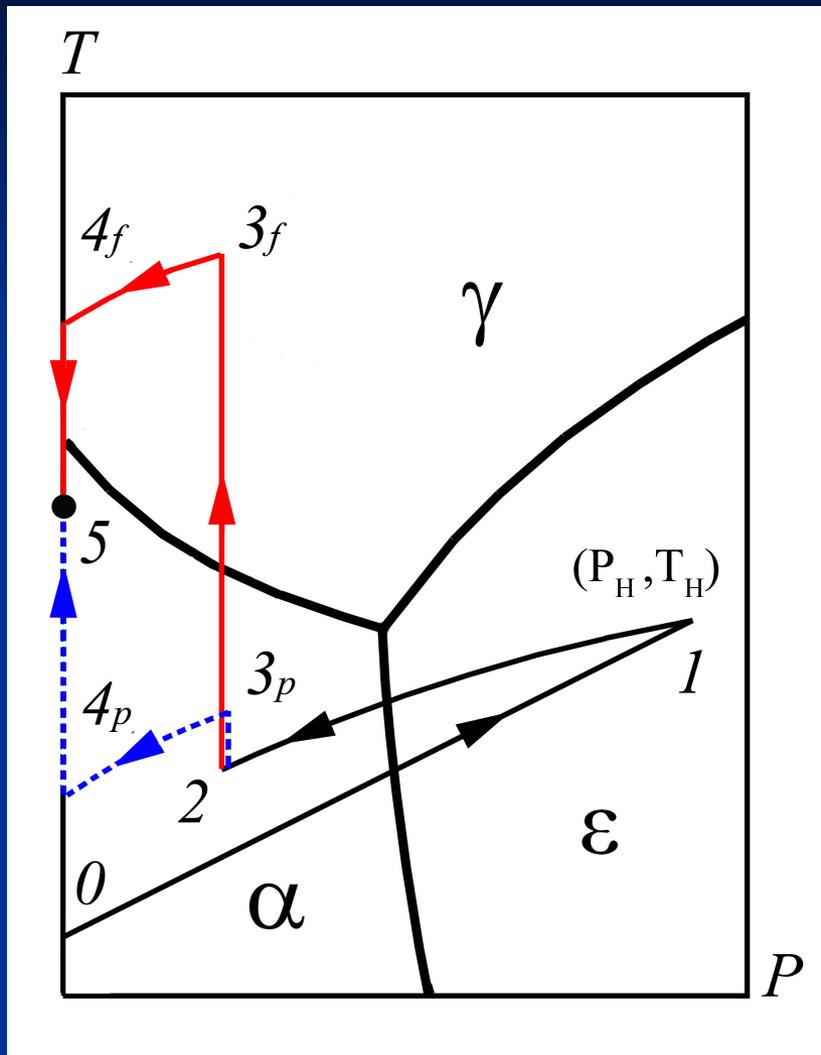
30 мкс, 900°C



100 мкс, 700°C

Селективный тепловой эффект  
деформации

# Высокоскоростная деформация



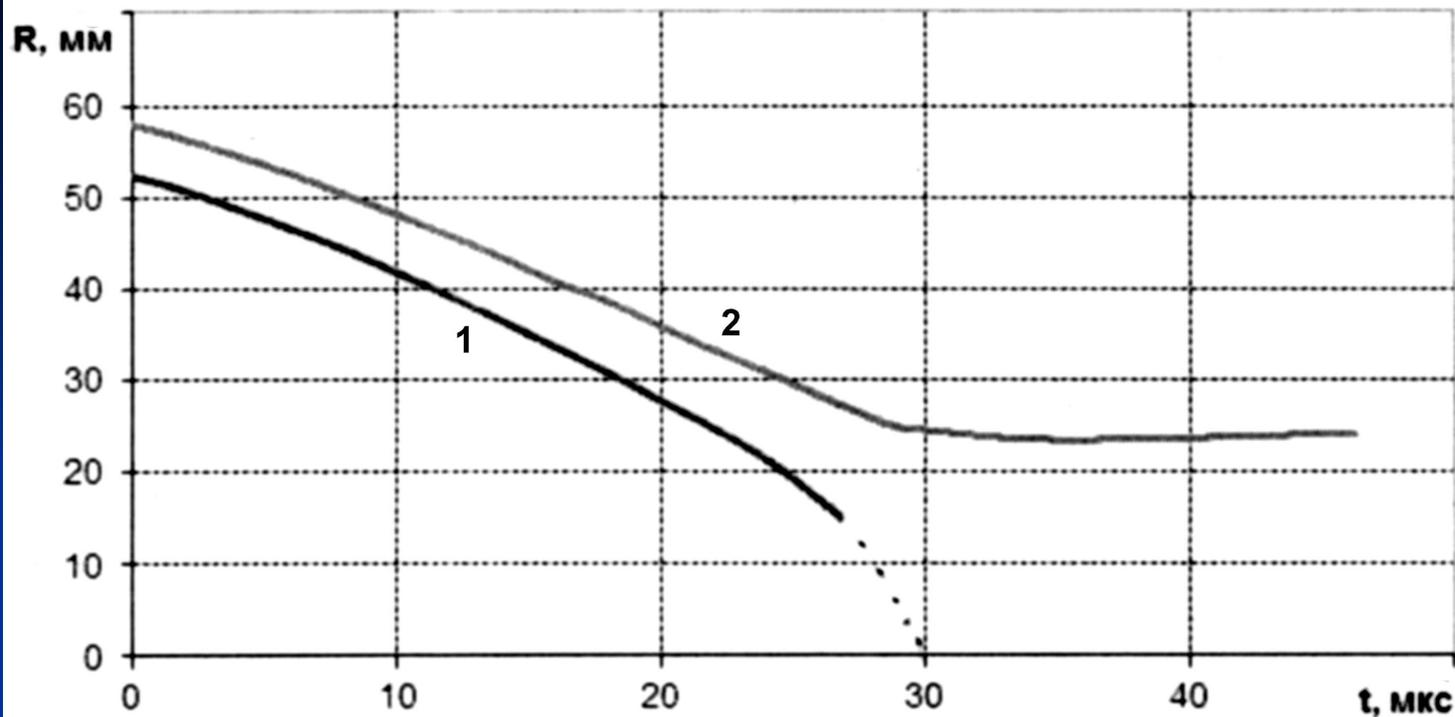
# Заключение

- Показано, что на стадии инерционного схождения оболочки деформация, скорость деформации и температура плавно увеличиваются при движении вдоль радиуса к оси полученного в результате схлопывания цилиндра. Это приводит к формированию концентрических кольцевых зон с измененной микроструктурой. Первая (внешняя) зона сохранила исходную феррито-перлитную структуру со следами деформации и  $\alpha \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha$  цикла превращений; микротвердость в этой зоне составляет 2000 – 2300 МПа. Вторая зона под действием реализованной в опыте специфической высокоскоростной деформации приобрела необычную структуру баротермической закалки, микротвёрдость которой соответствует микротвёрдости закалённой стали (~3500 МПа). В третьей (центральной) зоне дальнейшее увеличение деформации и, как следствие, температуры привело к разупрочнению материала до исходного уровня твёрдости отожженной стали (~1500 МПа).

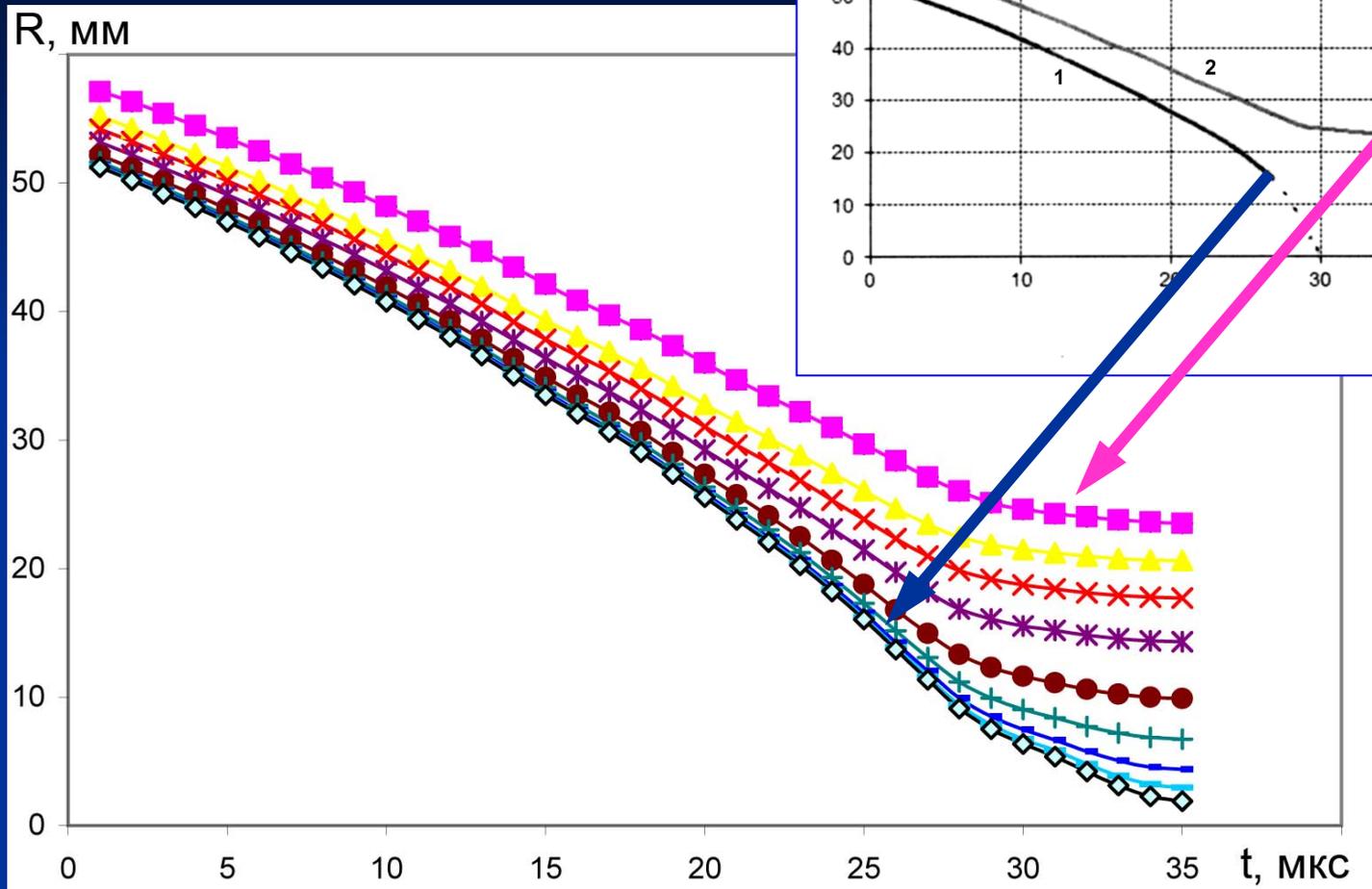
# Заключение

2. Установлено, что полученная во второй зоне структура баротермической закалки состоит из дисперсных кристаллов  $\alpha$ -фазы, возникших при закалке свободного феррита, и участков сохранившегося исходного перлита. Необычное поведение материала в этой зоне (нарушен «правильный» порядок протекания  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращения, при котором сначала превращение происходит в перлите) объясняется спецификой теплового эффекта реализованной в опыте высокоскоростной деформации. Различные структурные составляющие исходной феррито-перлитной структуры деформировались независимо. При этом, более мягкий феррит деформировался и, следовательно, нагревался значительно сильнее (вплоть до попадания  $\gamma$ -область T-P диаграммы), чем более твёрдый перлит. То есть, различные структурные составляющие стали (феррит и перлит) в ходе эксперимента подвергались разному воздействию и пересекали разные области T-P диаграммы.

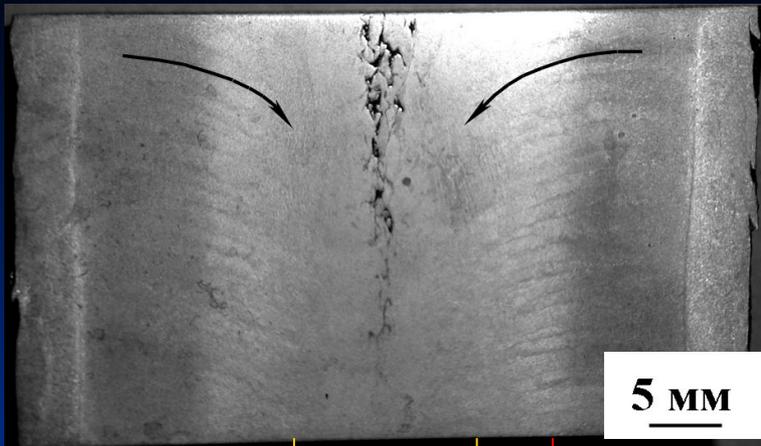
*Благодарю за внимание!*



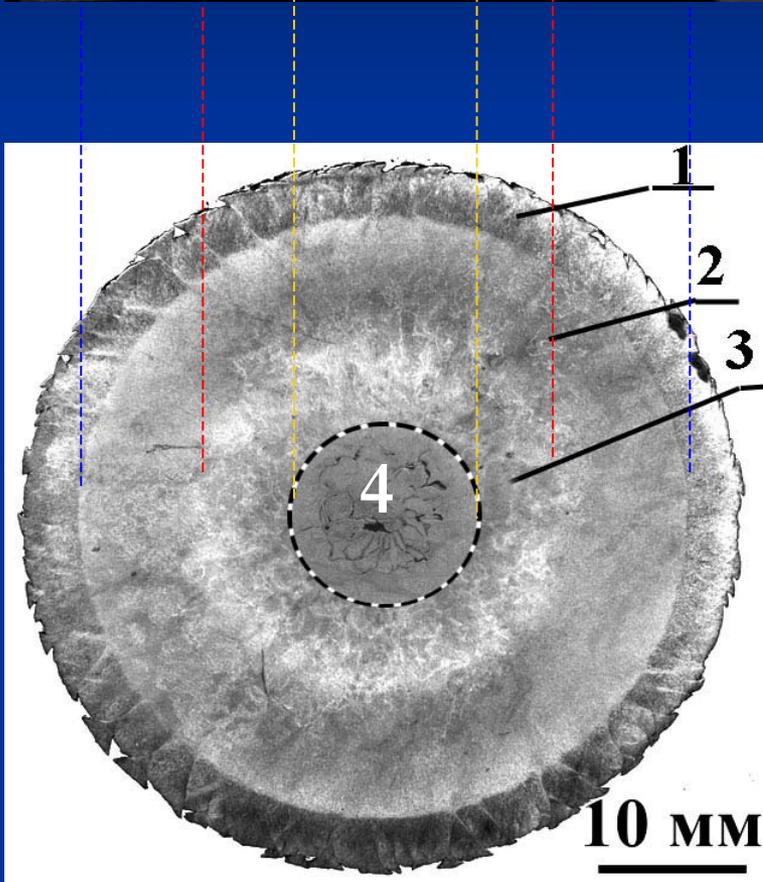
**Зависимость внутреннего (кривая 1) и  
наружного радиусов оболочки (кривая 2)  
в одном сечении от времени схождения  
(рентгеновская регистрация)**



**Зависимости положения точек оболочки, расположенных на различных радиусах, от времени схождения, полученные из кривой 2 и условия сохранения объема вещества**



Макроструктура продольного и поперечного сечений схлопнутого цилиндра. Стрелки показывают направление течения

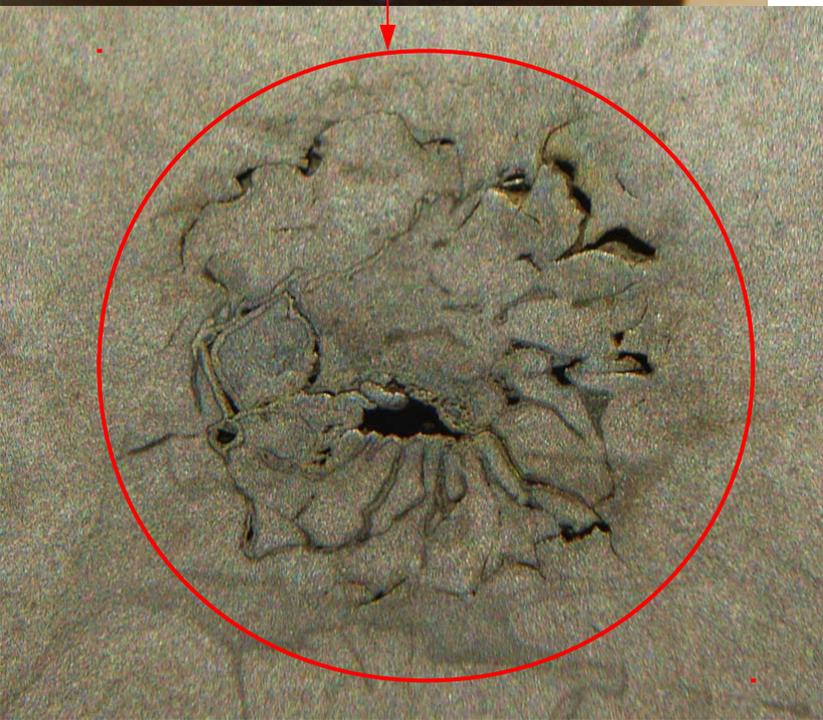
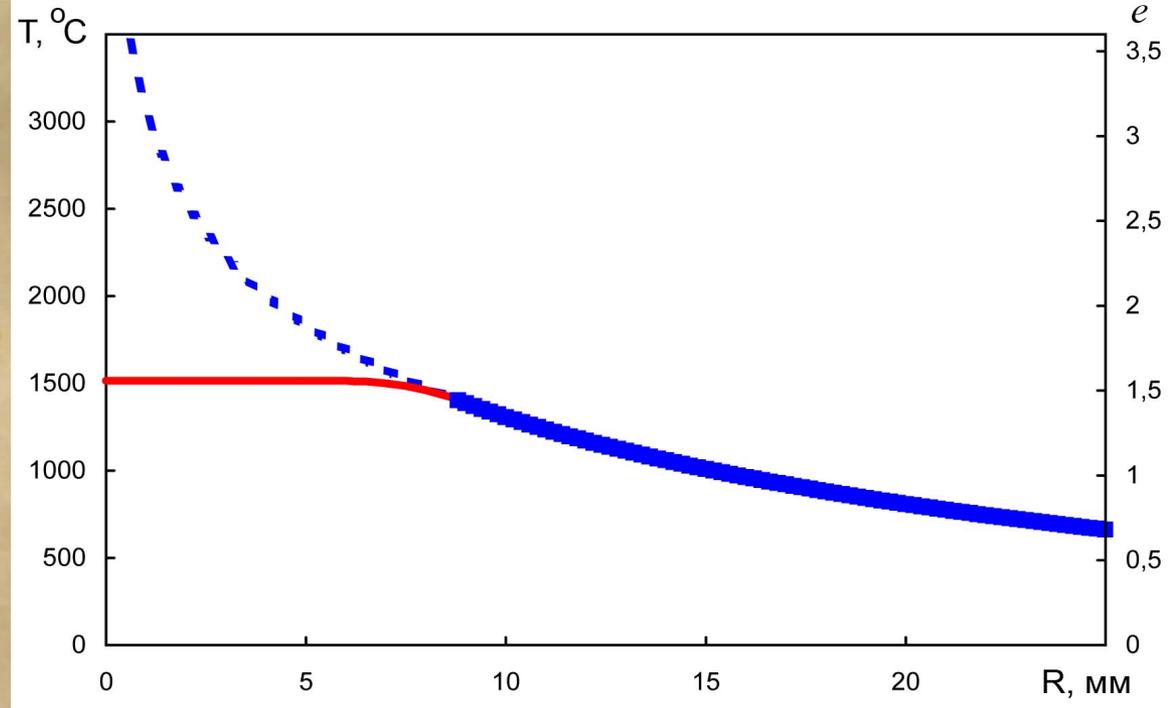
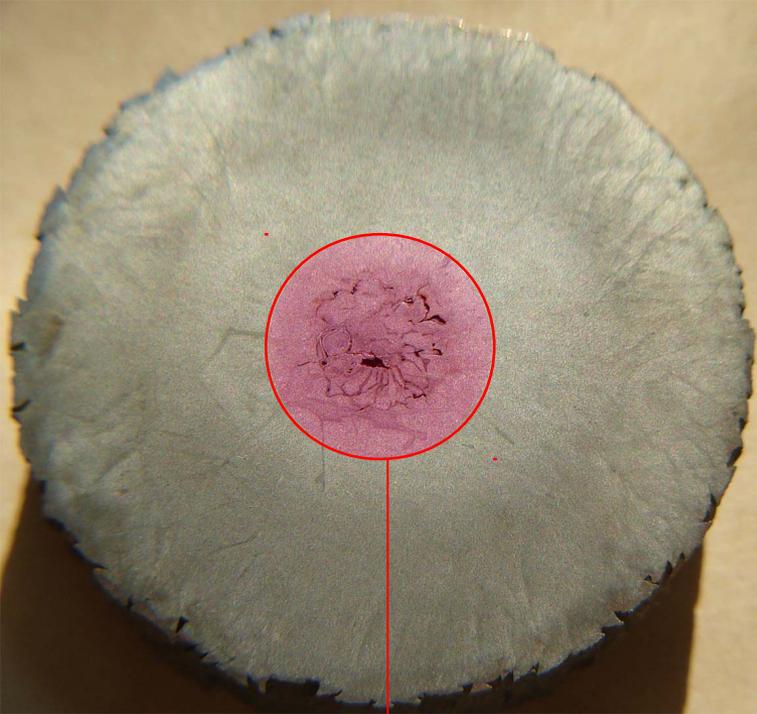


1 – зона с локализованной деформацией

2 – зона «баротермической закалки»

3 – зона рекристаллизации

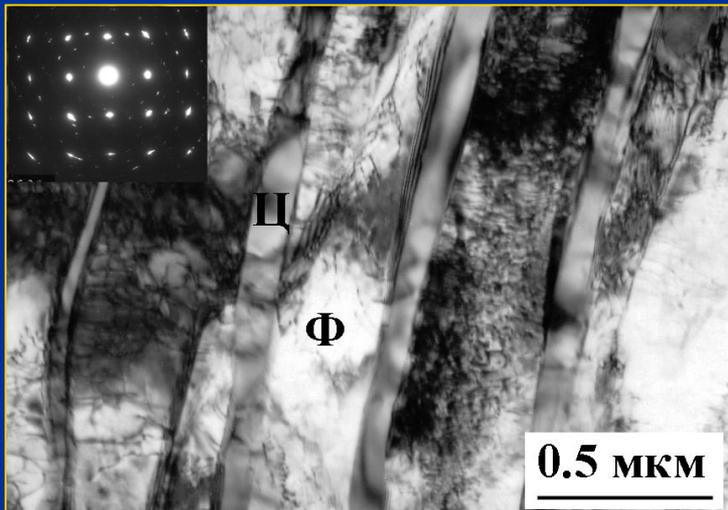
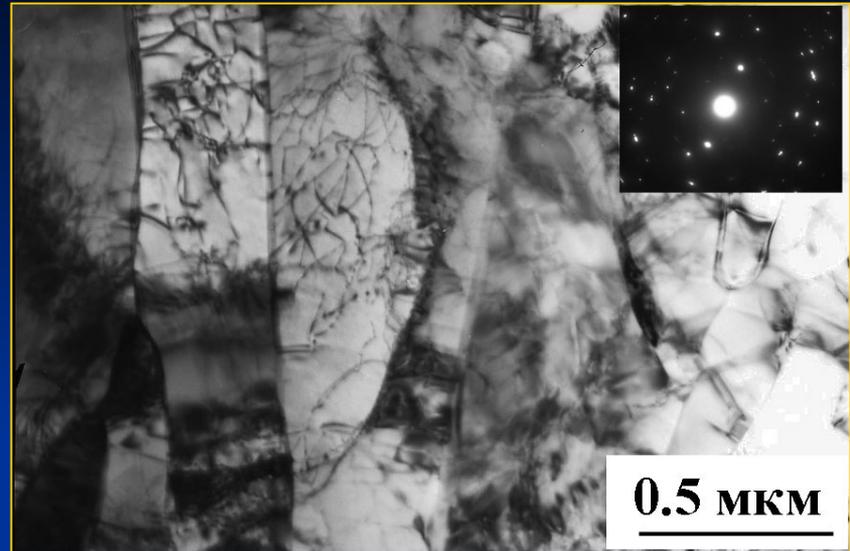
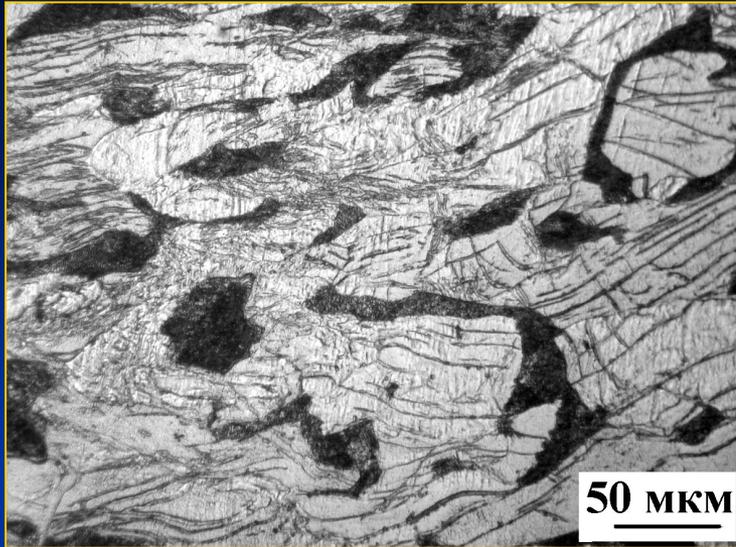
4 – зона неустойчивости



Радиальная зависимость температуры и логарифмической деформации.

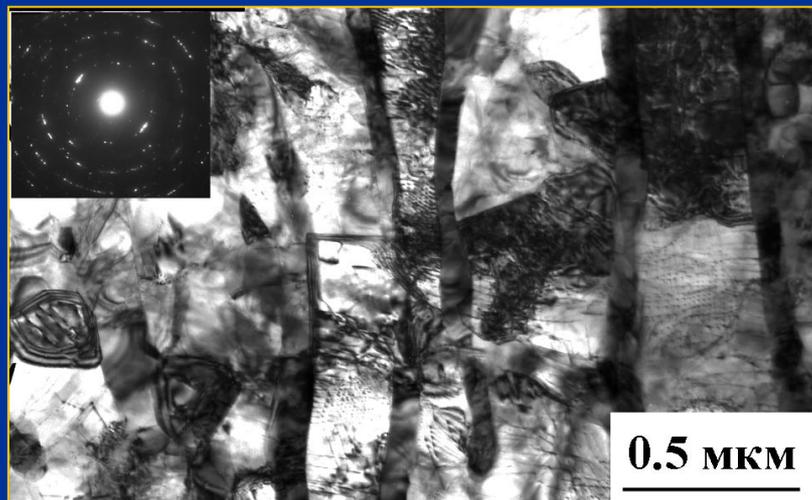
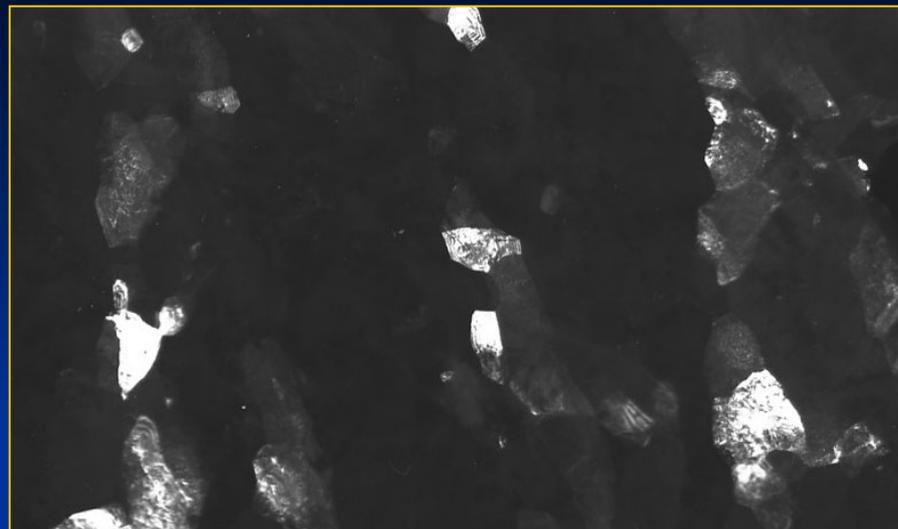
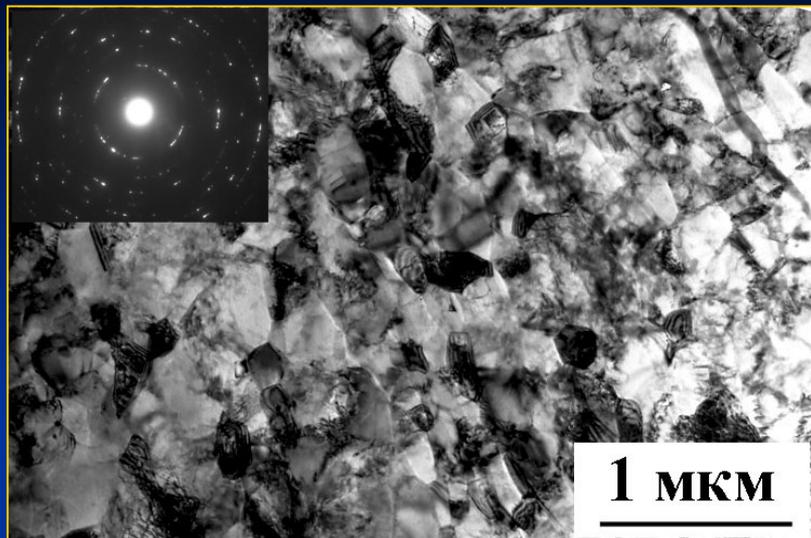
В центральной части образца – зона неустойчивого течения

# Структура первой зоны



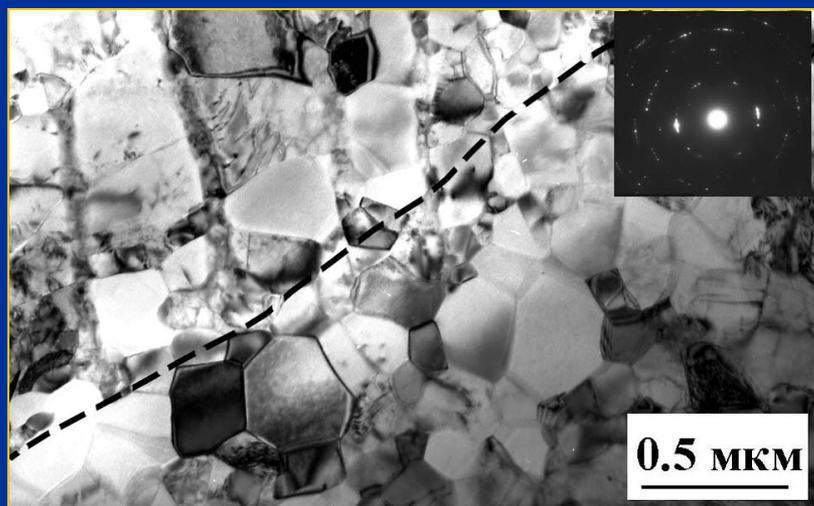
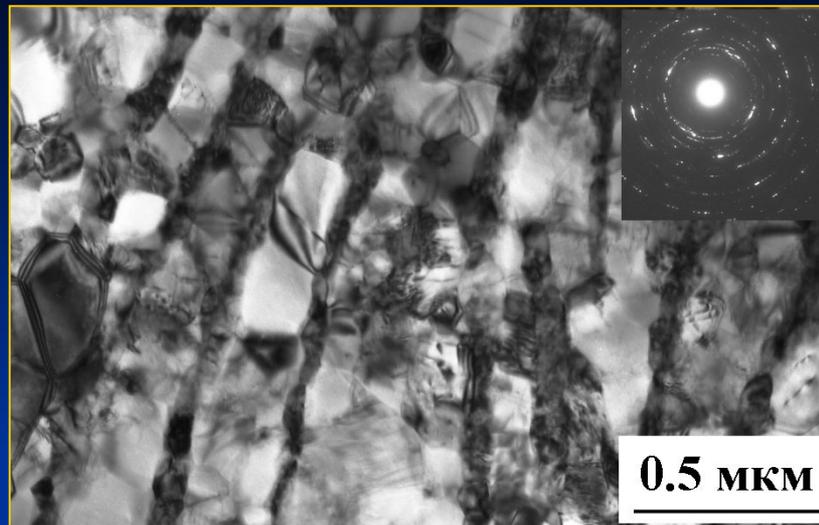
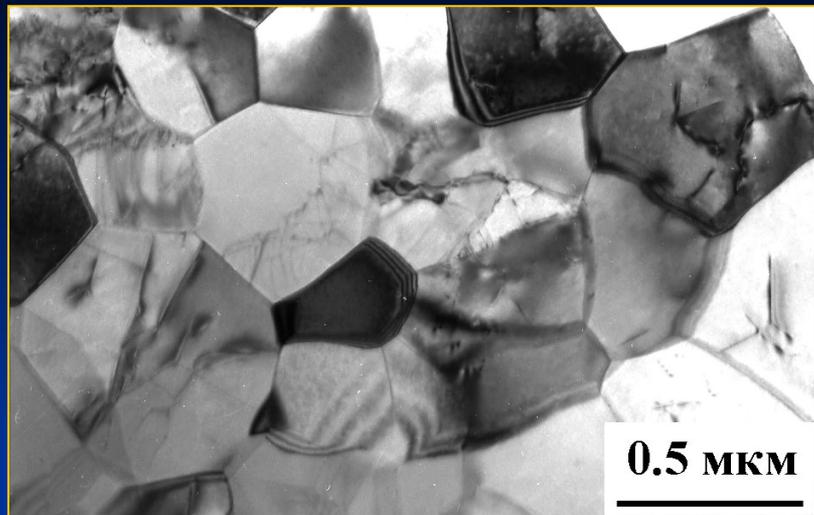
Общий вид, феррит со  
следами  $\alpha \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha$   
превращений и перлит

# Структура второй зоны



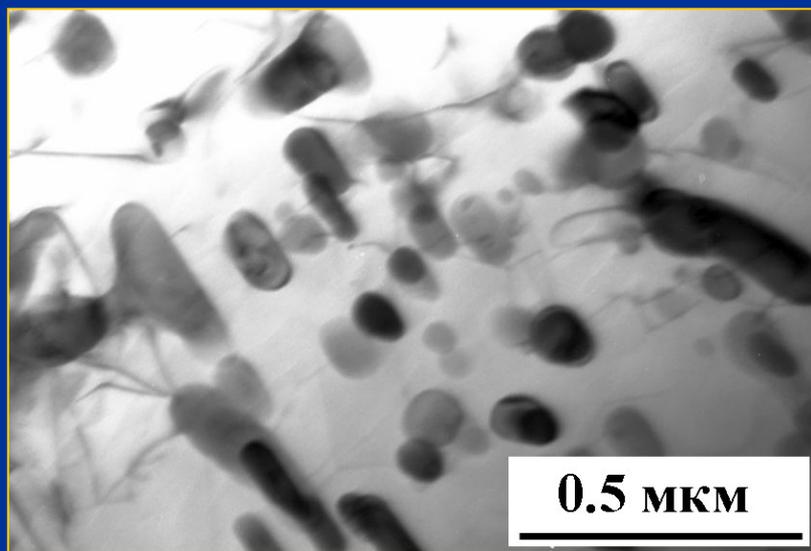
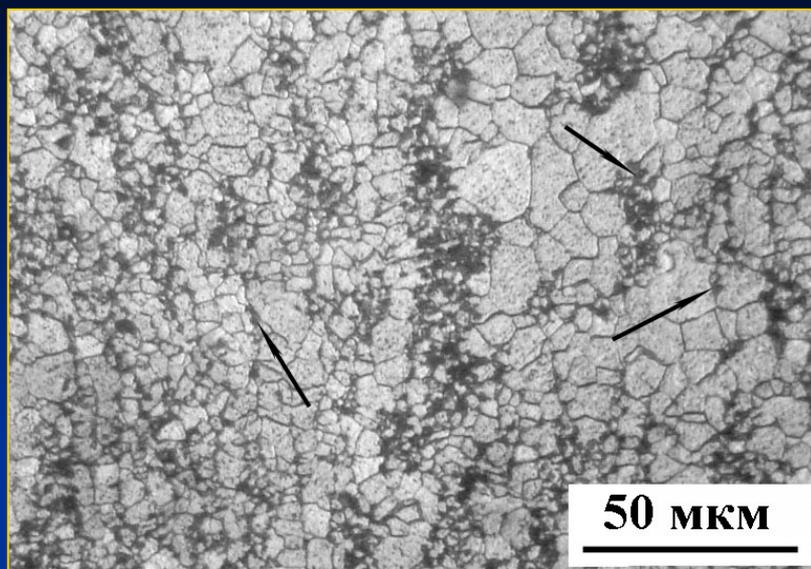
Субмикроструктурная  
структура  
феррита (светлопольный и  
темнопольный снимки)  
и перлит

# Переход к третьей зоне



Рекристаллизованные зерна  
феррита, перлит и граница  
феррит/перлит

# Структура третьей зоны



Образование нового перлита  
и сфероидизация цементита