

# Генерация дефектов при ударном сжатии металла

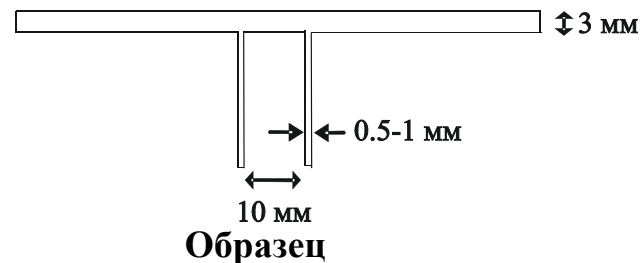
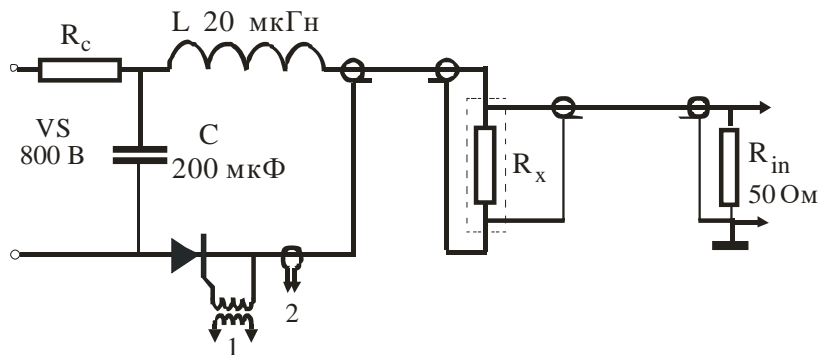


**Гилев С.Д.**

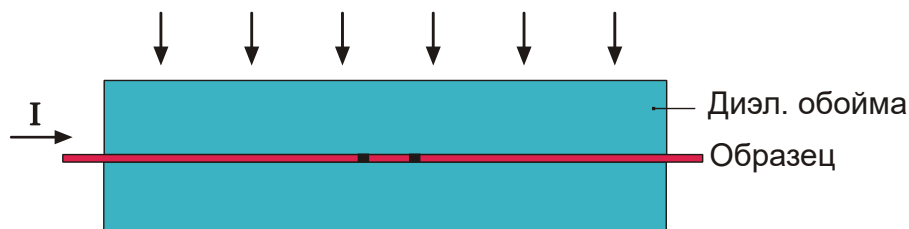
*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН*

- Физические свойства материалов сильно зависят от наличия дефектов
- Ударная волна - генератор дефектов кристаллической структуры (*Кормер1968*)
- Концентрация дефектов в ударно-сжатой меди в экспериментах *in situ*:
  - ~ $10^2$  раз больше, чем в сохраненных образцах,
  - ~ $10^{10}$  раз больше своего равновесного значения.
- Физическое состояние ударно-сжатой меди неравновесно (*Гилев2021*)
- Модель генерации дефектов при ударном сжатии отсутствует
- *Цель исследования*: поиск параметров, определяющих концентрацию дефектов в ударно-сжатом металле

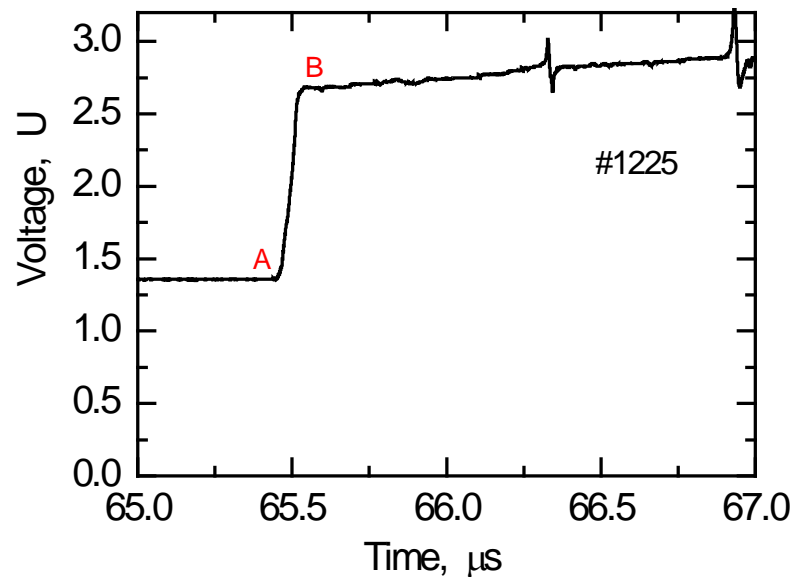
# Измерение электросопротивления меди при ударном сжатии



Электротехническая схема измерений

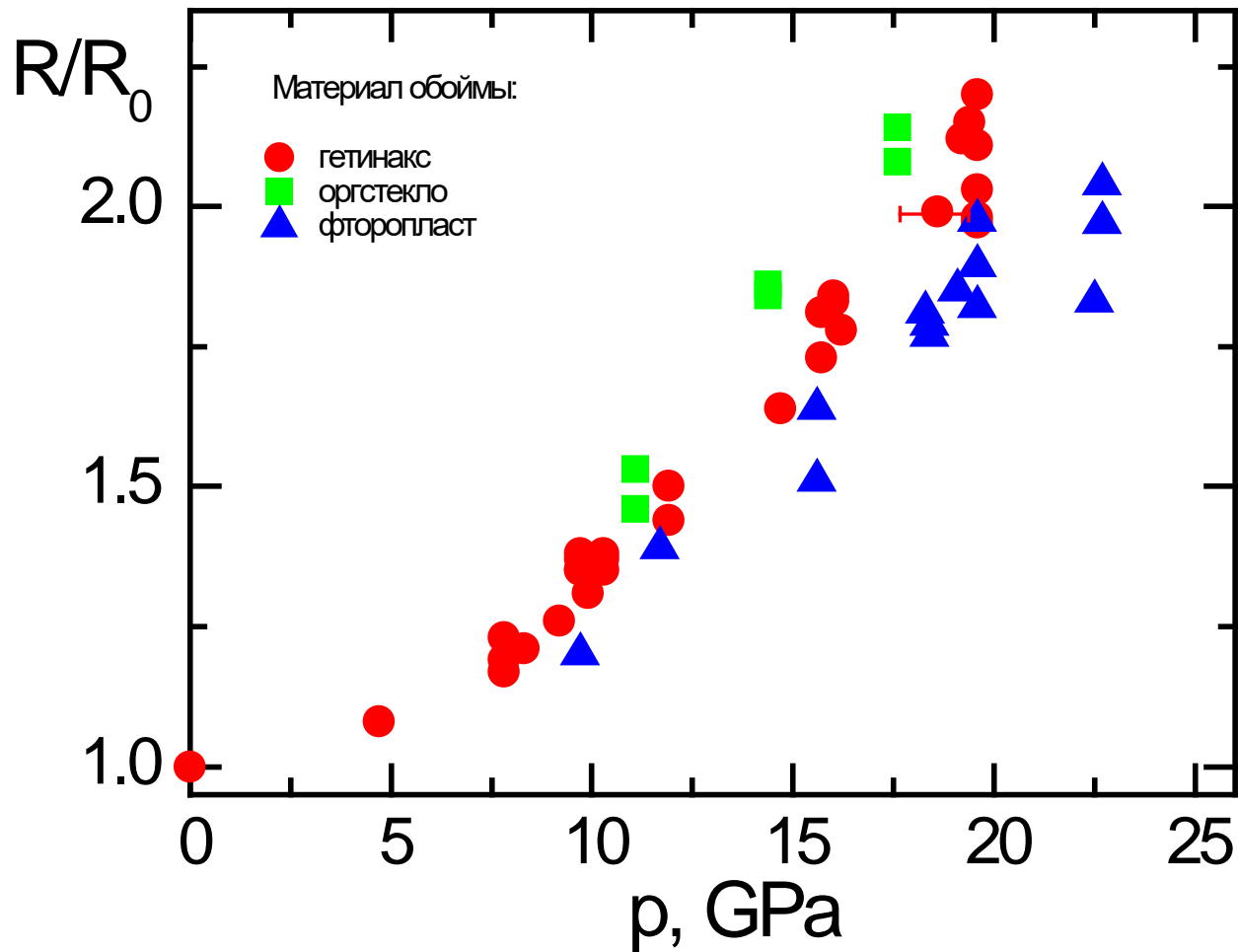


Образец в диэлектрической обойме



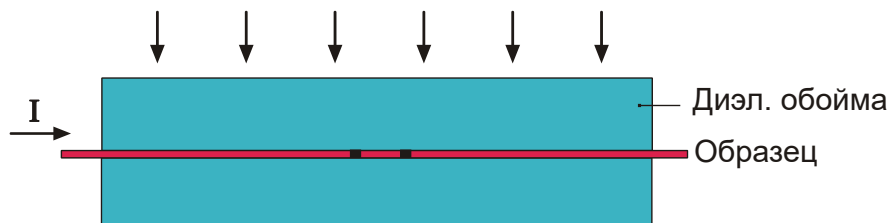
Экспериментальная запись

# Электросопротивление медной фольги

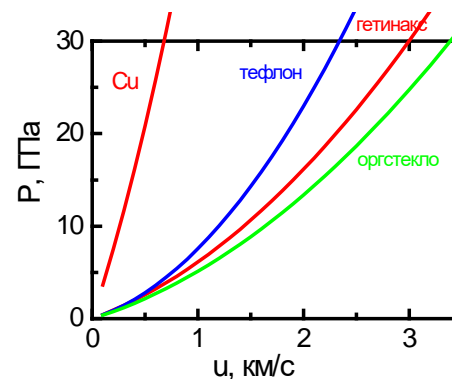


- Электросопротивление зависит от давления УВ и жесткости обоймы

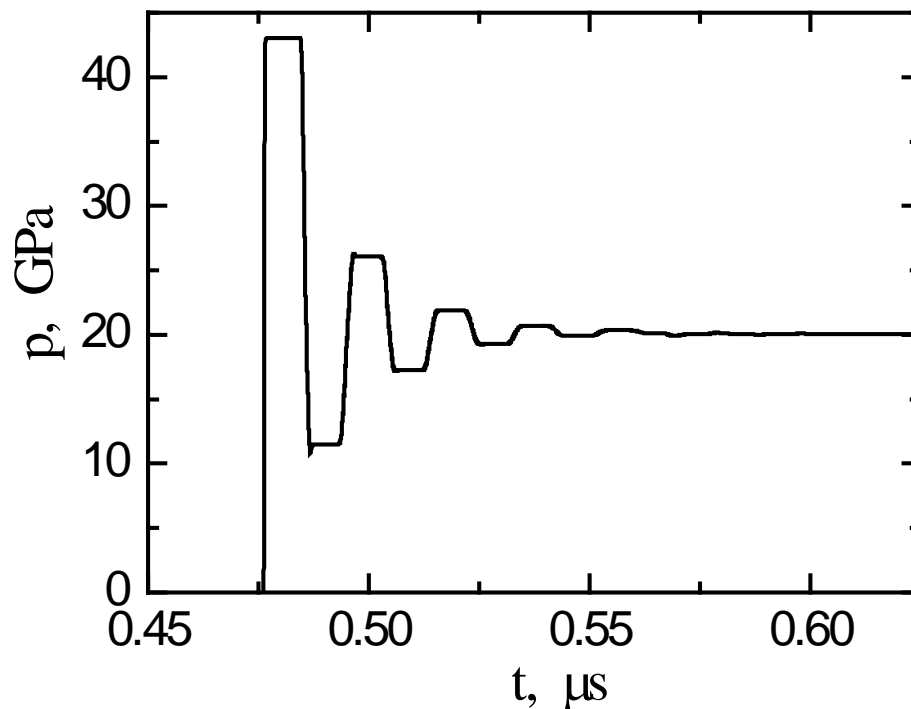
# Численный анализ состояния образца



Образец в диэлектрической обойме



Ударные адиабаты материалов



История давления в металлическом образце

# Модель равновесного электросопротивления металла при высоких $p, T$

- Уравнение Блоха-Грюнайзена  $\rho_{BG}(V, T) = \frac{A(V)}{\theta_D} \left( \frac{T}{\theta_D} \right)^5 \int_0^{\frac{\theta_D}{T}} \frac{z^5 dz}{(e^z - 1)(1 - e^{-z})}$   
( $\theta_R = \theta_D$ )

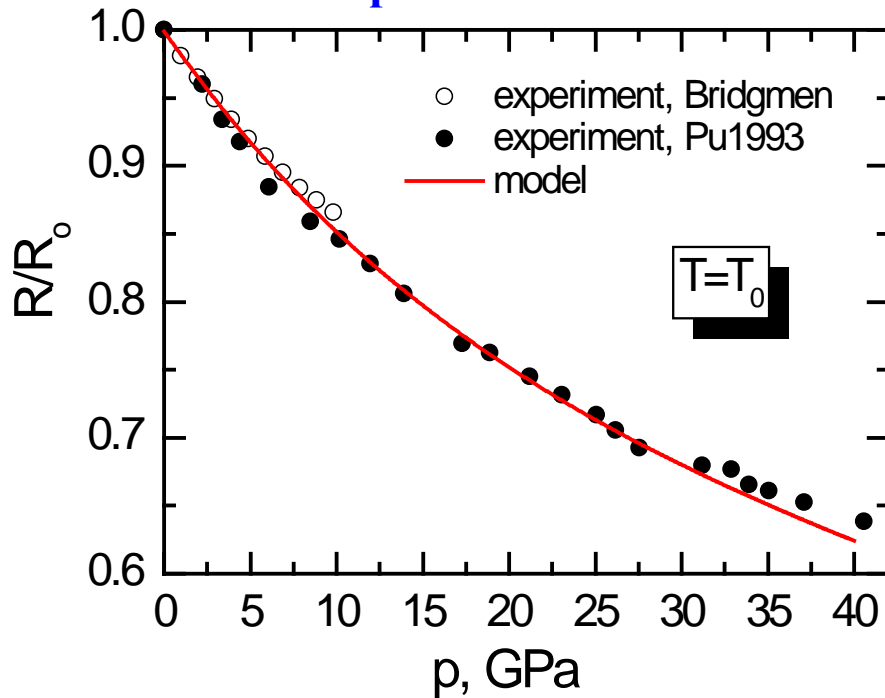
- Функция  $A(V)$   $A(V) = A_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^\eta$  - 2 свободных параметра ( $A_0, \eta$ )

- Температура Дебая  $\theta_D(V, T) = \theta_{D0} \left( \frac{V_0}{V} \right)^{\Gamma_\infty} \exp \left[ \frac{(\Gamma_0 - \Gamma_\infty)(1 + \beta T_0)}{\alpha(1 + \beta T)} \left( 1 - \left( \frac{V}{V_0} \right)^\alpha \right) \right]$

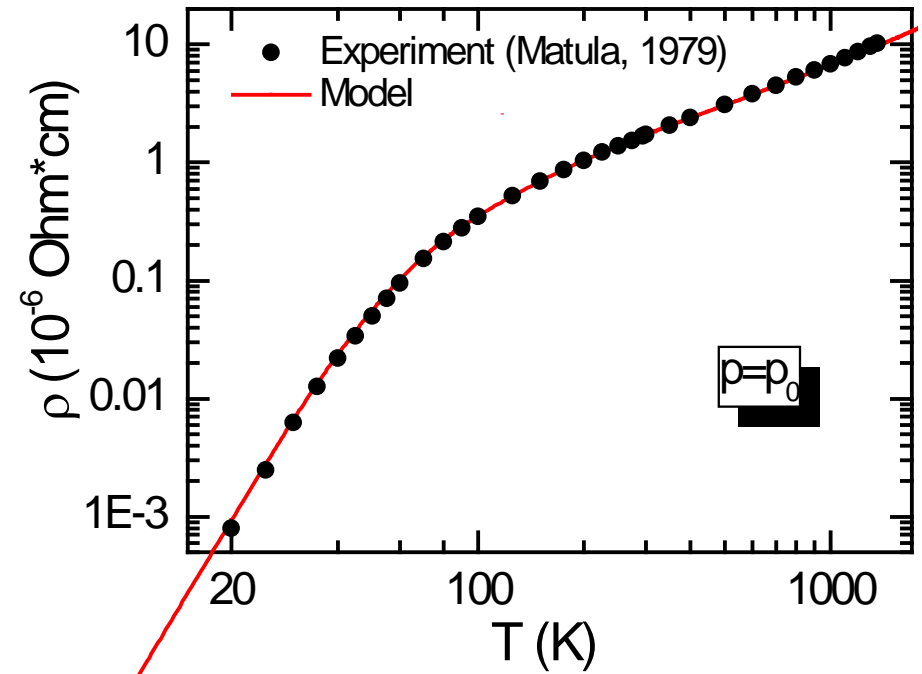
Малопараметрическое  
УРС: Гилев, ФГВ, 2018)

# Модель равновесного электросопротивления

## Изотермическое сжатие

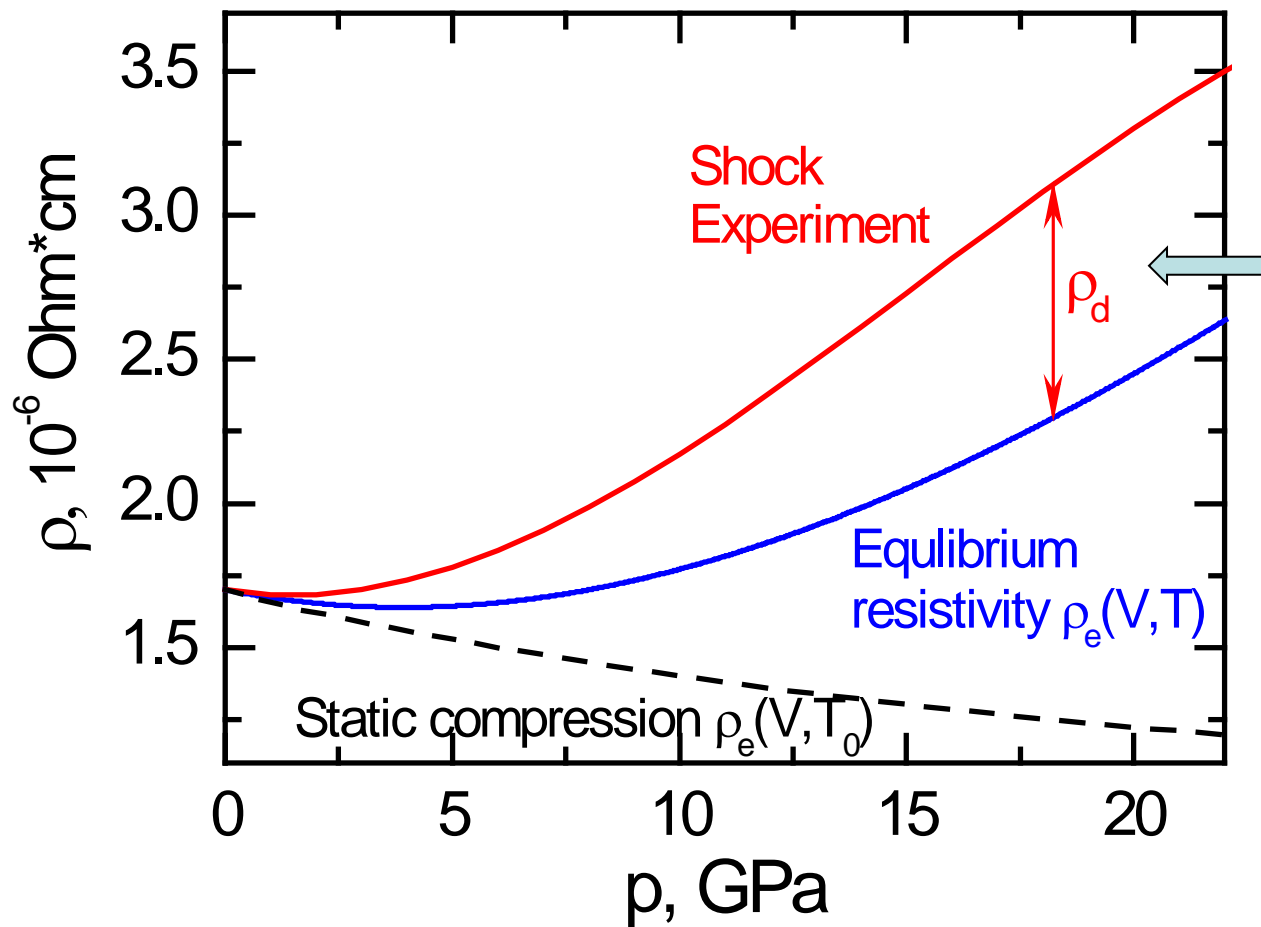


## Изобарический нагрев



- Модель описывает результаты равновесных экспериментов
- Рабочая область модели шире экспериментальной области ударно-волнового исследования по  $p$ ,  $T$

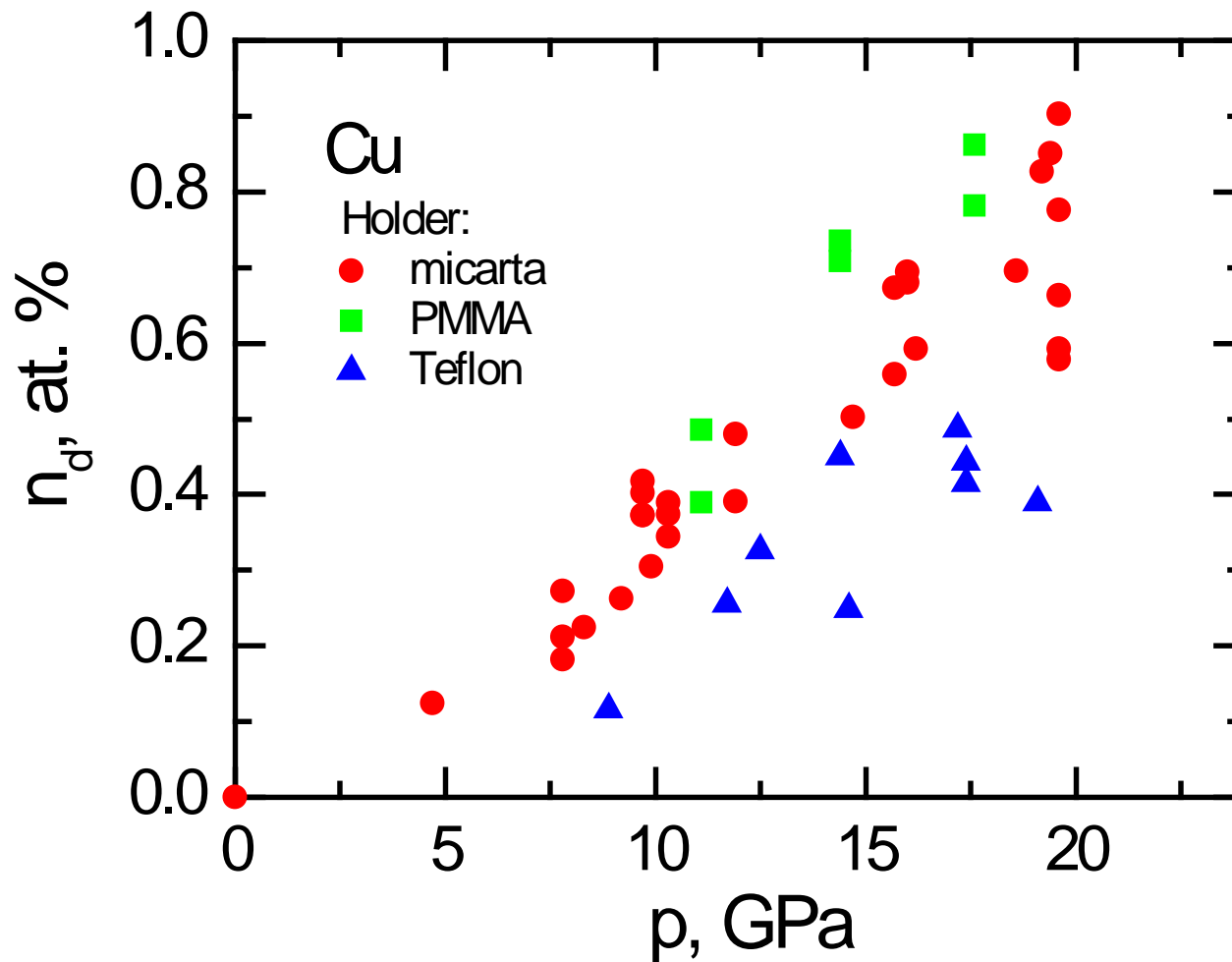
# Компонента электросопротивления, обусловленная дефектами



Влияние дефектов

Концентрация дефектов  $n_d \approx \frac{\rho_d}{\rho_v}$

# Зависимость концентрации дефектов от давления УВ



- Количество дефектов зависит от давления УВ и жесткости обоймы



# Физическая модель генерации дефектов в УВ

---

1. Дефекты кристаллической структуры генерируются во фронте ударной волны.

2. Возникшие дефекты остаются «замороженными» в течение времени ударно-волнового эксперимента ( $\sim 1 \mu\text{s}$ ).

3. Концентрация возникающих дефектов определяется деформацией металла в элементарном акте сжатия. В качестве меры деформации вещества можно принять величину

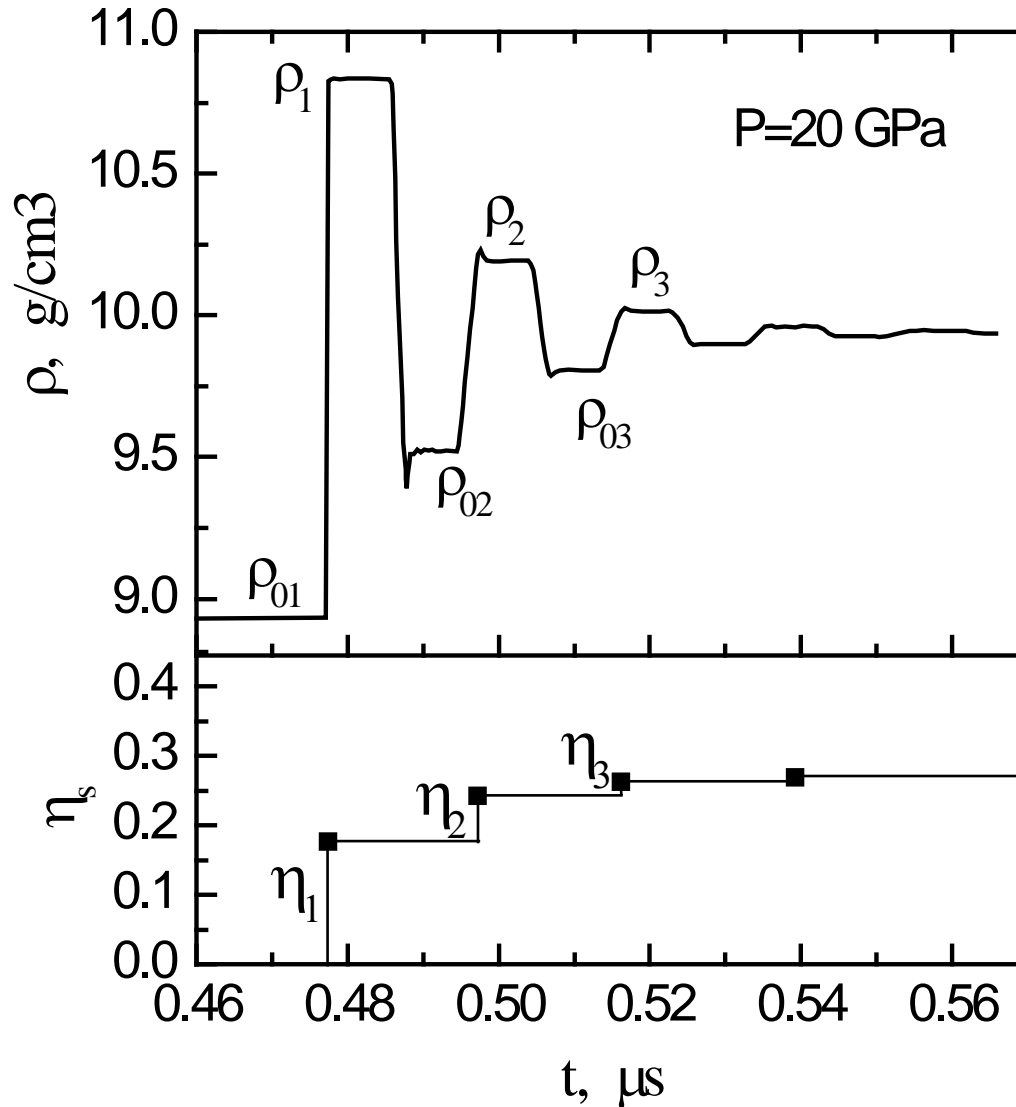
$$\eta_i = 1 - \frac{\rho_{i0}}{\rho_i}$$

4. Каждая последовательная стадия ударного сжатия дает свой независимый вклад в концентрацию дефектов. Общее количество дефектов, генерируемых в процессе сложного нагружения, определяется суммой деформаций

$$\eta_s = \eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \eta_4 + \dots$$

на всех стадиях сжатия.

# Численный анализ: $\rho(t)$ в образце



Временная зависимость плотности  
медного образца в диэлектрической  
обойме

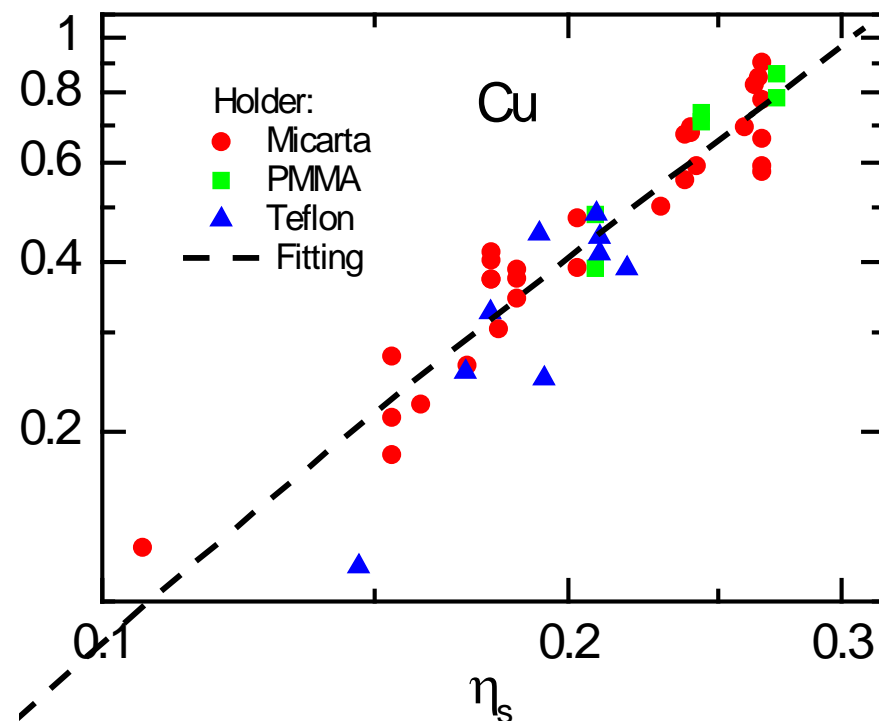
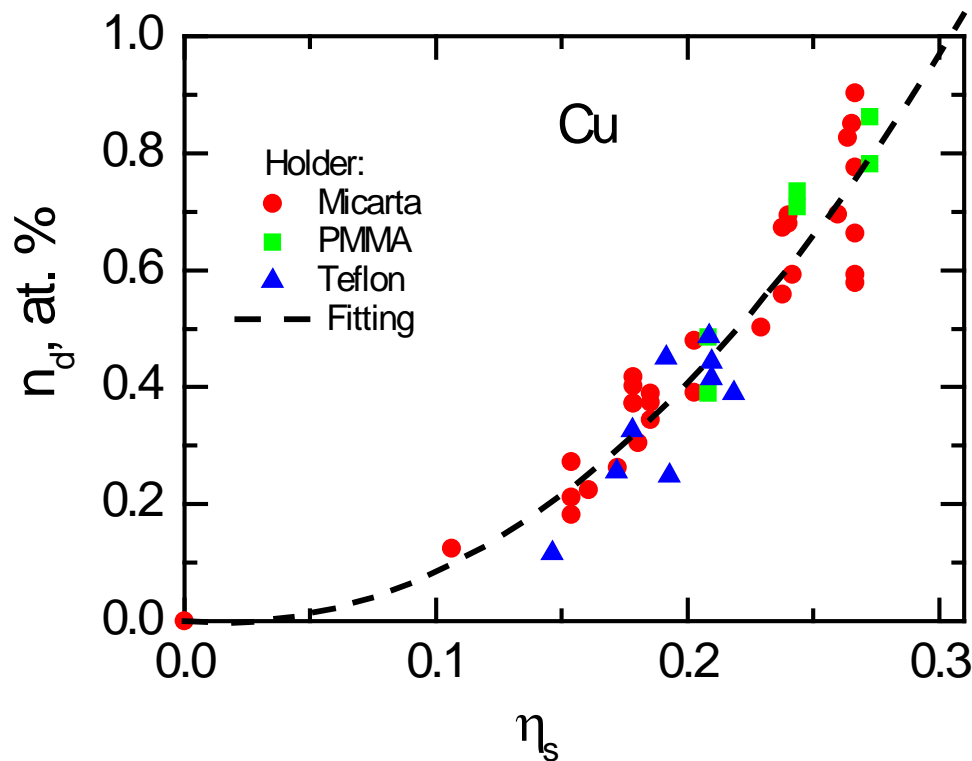
Деформация при  $i$ -ом сжатии:

$$\eta_i = 1 - \frac{\rho_{0i}}{\rho_i}$$

Суммарная деформация:

$$\eta_s = \eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \eta_4 + \dots$$

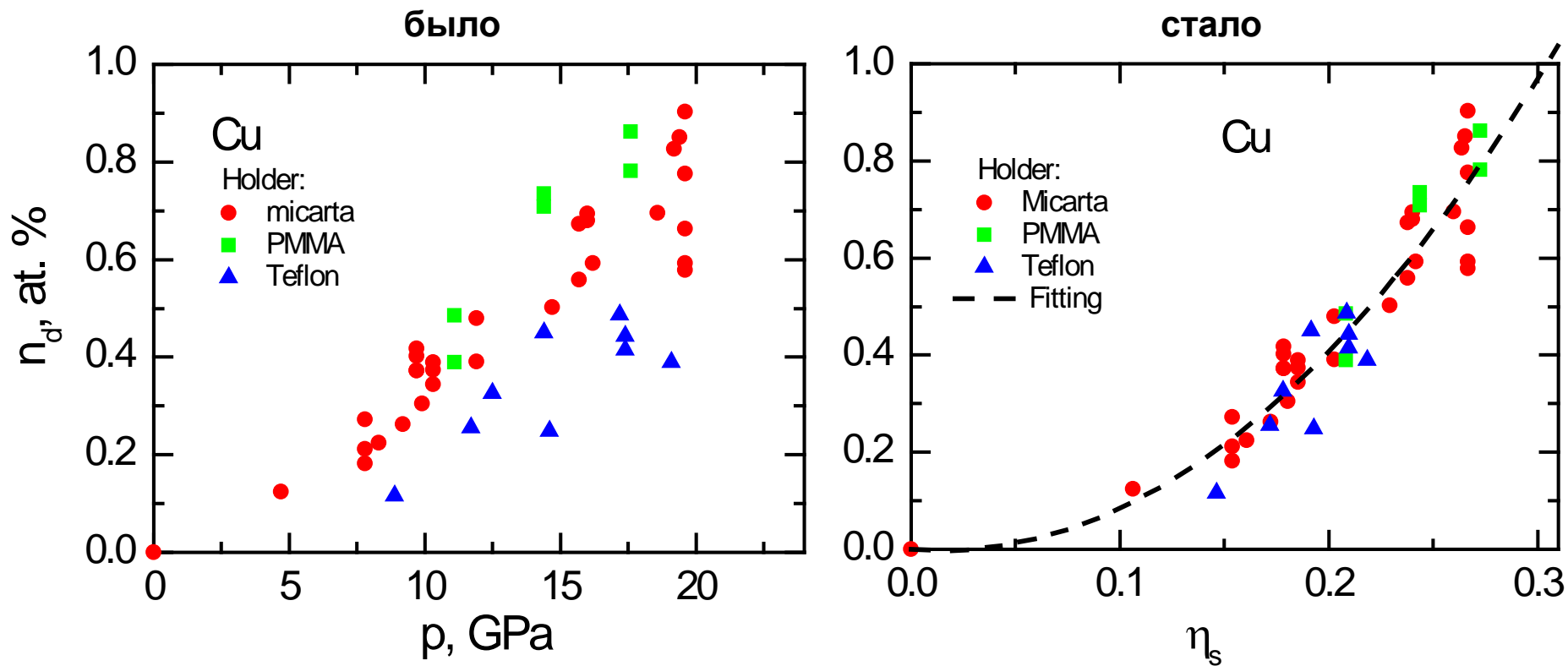
# Зависимость концентрации дефектов от суммарной деформации $\eta_s$



$$n_d = A \cdot (\eta_s)^\alpha \quad \alpha \approx 2.2$$

- Универсальная зависимость для меди, которая нивелирует разницу в материале обоймы и истории нагружения образца

# Сравнение



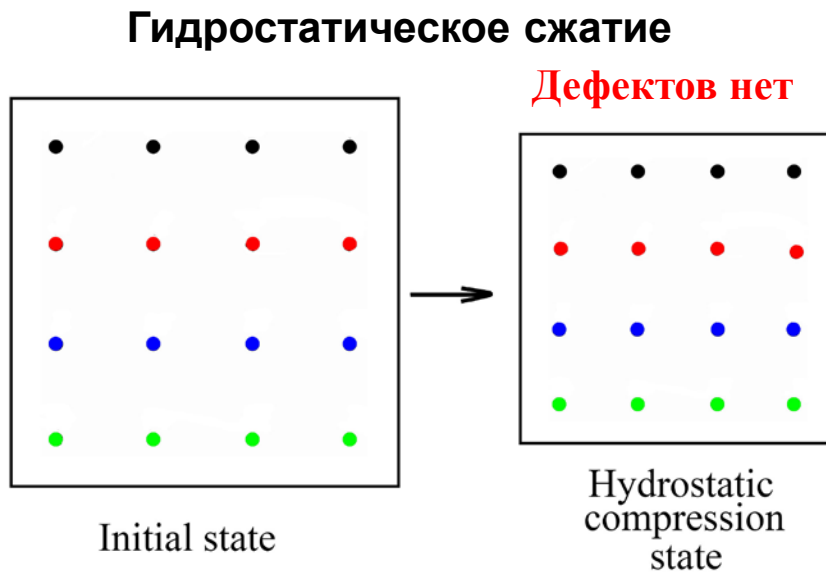
- Найден *управляющий* параметр процесса генерации дефектов кристаллической структуры при ударном сжатии меди

# Вывод

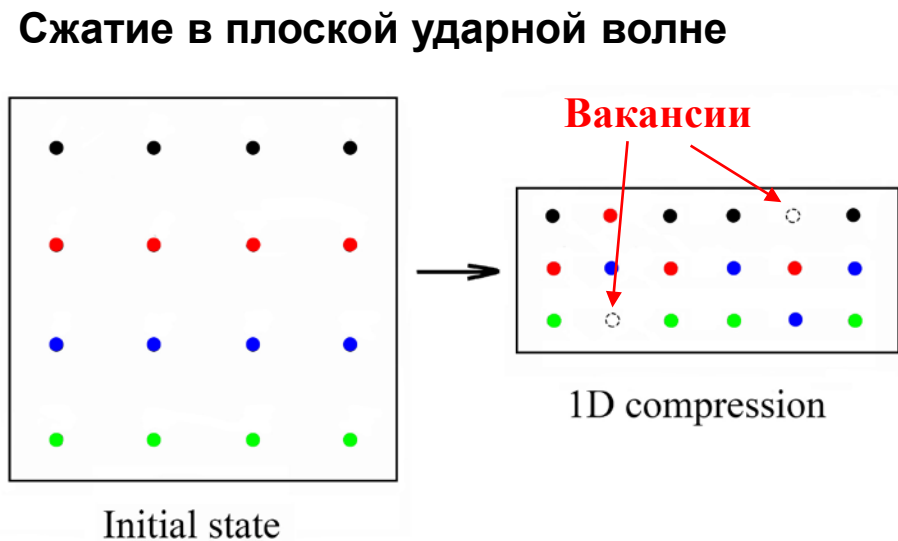
---

- Сумма деформаций  $\eta_s$  определяет концентрацию возникающих дефектов в медной фольге для разных условий ударного нагружения в пластиковой обойме
- Концентрация дефектов описывается степенной зависимостью от деформации с показателем степени  $\alpha \approx 2.2$
- Желательно обобщение настоящего подхода на другие металлы, расширение рассматриваемого диапазона деформаций, исследование других режимов нагружения

# Как возникают дефекты?



Время сжатия  $t \sim 10^2 - 10^3$  с



Время сжатия  $t \sim 10^{-9}$  с

- Генерация дефектов при ударном сжатии может быть связана с перемещением атомов в другие слои кристаллической решетки и малым временем наблюдения, недостаточным для теплового “залечивания” возникшего дефекта