

# ЛОКАЛИЗАЦИЯ ХРУПКИХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ МИКРОСТРУКТУРАХ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ

Ташкинов А.А., Шавшуков В.Е.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

[tash@pstu.ru](mailto:tash@pstu.ru), [shavshukov@pstu.ru](mailto:shavshukov@pstu.ru)

В поликристаллических материалах хрупкие повреждения подразделяют на внутризеренные и межзеренные. В работе рассматривается внутризеренный механизм инициации хрупких разрушений. Физическим механизмом хрупкого разрушения зерен является скол по плоскостям спайности.

Первые повреждения, по тем или иным критериям, возникают в зернах с экстремальными значениями мезонапряжений. Такие состояния реализуются в случайно появляющихся при образовании поликристалла специфических группах зерен, названных экстремальными кластерами.

## 1. Математический формализм.

Для вычисления вероятностей повреждений в таких зернах строятся плотности вероятностей распределения мезонапряжений в зернах с помощью метода интегральных уравнений для тензоров мезодеформаций [1]:

$$\varepsilon_{ij}^{(\xi)}(\vec{r}_\xi) = \varepsilon_{ij}^* + \int_{\sigma_\xi} d\vec{r}'_\xi g_{ijkl}(\vec{r}_\xi - \vec{r}'_\xi) (C_{klmn}^{(\xi)}(\vec{r}'_\xi) - \langle C_{klmn}^{(\xi)} \rangle) \varepsilon_{mn}^{(\xi)}(\vec{r}'_\xi) + \sum_{\eta \neq \xi} \int_{\sigma_\eta} d\vec{r}'_\eta g_{ijkl}(\vec{r}_\xi - \vec{r}'_\eta) (C_{klmn}^{(\eta)}(\vec{r}'_\eta) - \langle C_{klmn}^{(\eta)} \rangle) \varepsilon_{mn}^{(\eta)}(\vec{r}'_\eta) \quad (1)$$

Для приближенного решения применяется кусочно-постоянная аппроксимация для полей  $\varepsilon_{ij}^{(\xi)}(\vec{r})$ , которая трансформирует систему интегральных уравнений в систему линейных алгебраических:

$$[I_{ijmn} - B_{ijmn}^{(a\xi)}] \varepsilon_{ij}^{(a\xi)} = \varepsilon_{ij}^* + \sum_{b=a}^n B_{ijmn}^{(ab\xi)} \varepsilon_{mn}^{(b\xi)} + \sum_{\eta \neq \xi} \sum_{\varepsilon=1}^n B_{ijmn}^{(a\varepsilon\eta)} \varepsilon_{mn}^{(\varepsilon\eta)} \quad (2)$$

Система (2) решается с помощью теории возмущений по взаимодействиям зерен, описываемых тензорными коэффициентами  $B_{ijmn}^{(a\xi)}$ .

По массивам решений (2) для очень большого количества случайных зеренных структур поликристаллического тела восстанавливаются распределения для мезодеформаций и мезонапряжений.

## 2. Приложение к разрушению пироуглеродной матрицы в УУКМ.

Разрушение УУКМ почти всегда начинается в ПУ матрице, особенно при сдвиговых нагрузках.

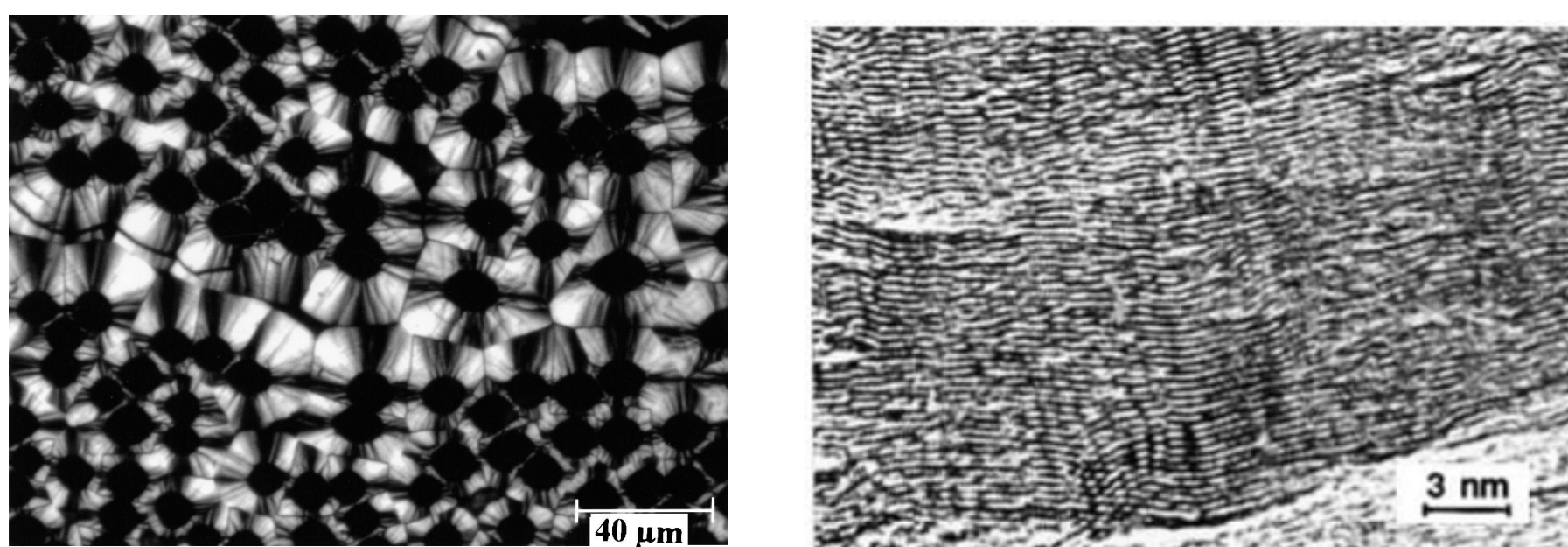


Рис.1. Структура ПУ матрицы и отдельного ПУ зерна УУКМ.

Упругие и прочностные свойства зерна ПУ:

$$c_{11} = 342 \text{ GPa}, c_{12} = 4.32 \text{ GPa}, c_{13} = 5.80 \text{ GPa}, c_{33} = 12.2 \text{ GPa}, c_{44} = 2.30 \text{ GPa}, c_{66} = 15.0 \text{ GPa}$$

$$\sigma_1^* = 31.8 \text{ MPa}, \sigma_3^* = 5.0 \text{ MPa}, \tau_{13}^* = 5.0 \text{ MPa}, \tau_{12}^* = 32.8 \text{ MPa}$$

Инженерные критерии повреждений зерен (в мезонапряжениях):

$$\begin{aligned} \sigma_{33} &\geq \sigma_3^*, \\ \sqrt{\sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2} &\geq \tau_{13}^*, \\ (\sigma_{11} + \sigma_{22})/2 + \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2/4 + \sigma_{12}^2} &\geq \sigma_1^*, \\ \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2/4 + \sigma_{12}^2} &\geq \tau_{12}^*. \end{aligned} \quad (3)$$

В нетекстурированном поликристалле значения комбинаций компонентов напряжений, входящих в критерии (3), являются случайными величинами. Повреждаются зерна, в которых удовлетворяются критерии (3). Вероятности повреждений вычисляются по найденным плотностям распределения мезонапряжений.

## 2.1. Плотности распределения мезонапряжений и их комбинаций в зернах ПУ.

а) Одноосное растяжение поликристалла с макронапряжением  $\langle \sigma_{13} \rangle > 0$  с учетом взаимодействий зерен:

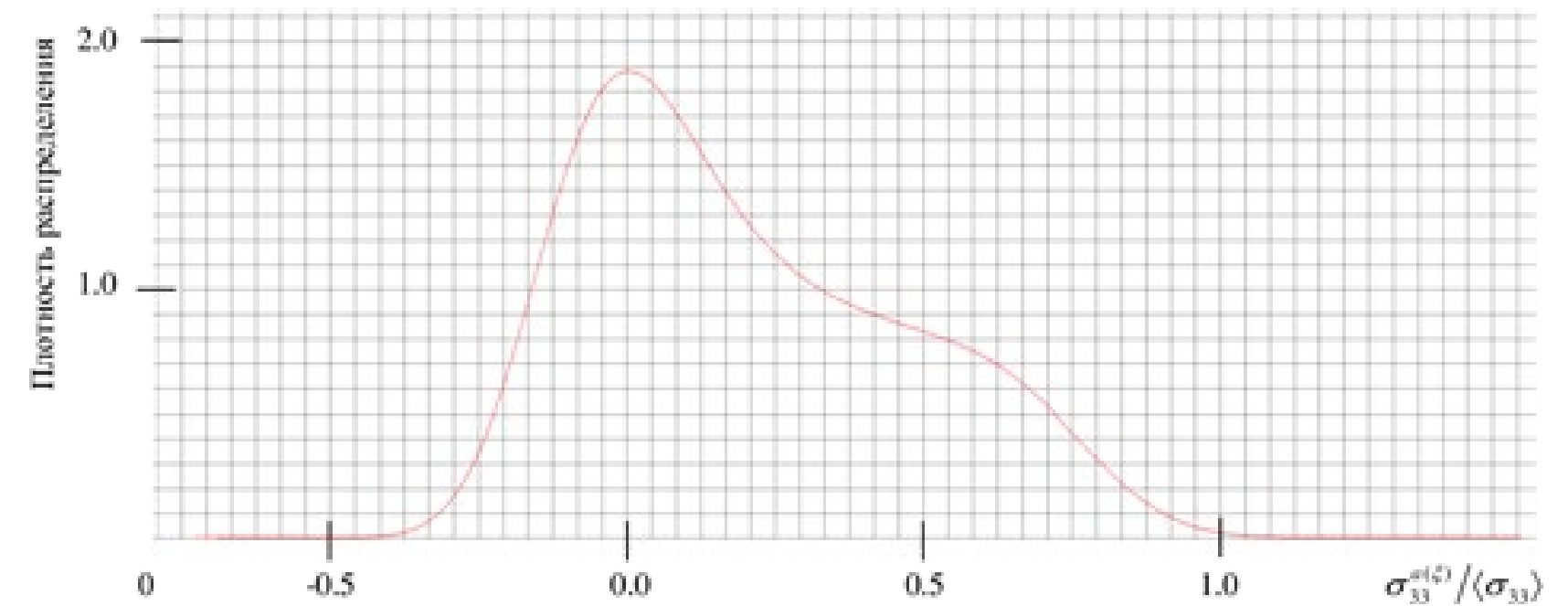


Рис.2. Плотность распределения  $\sigma_{33}^{(\xi)} / \langle \sigma_{33} \rangle$  с учетом взаимодействий зерен.

б) Макросдвиг с напряжением  $\langle \sigma_{13} \rangle$  с учетом взаимодействий зерен.

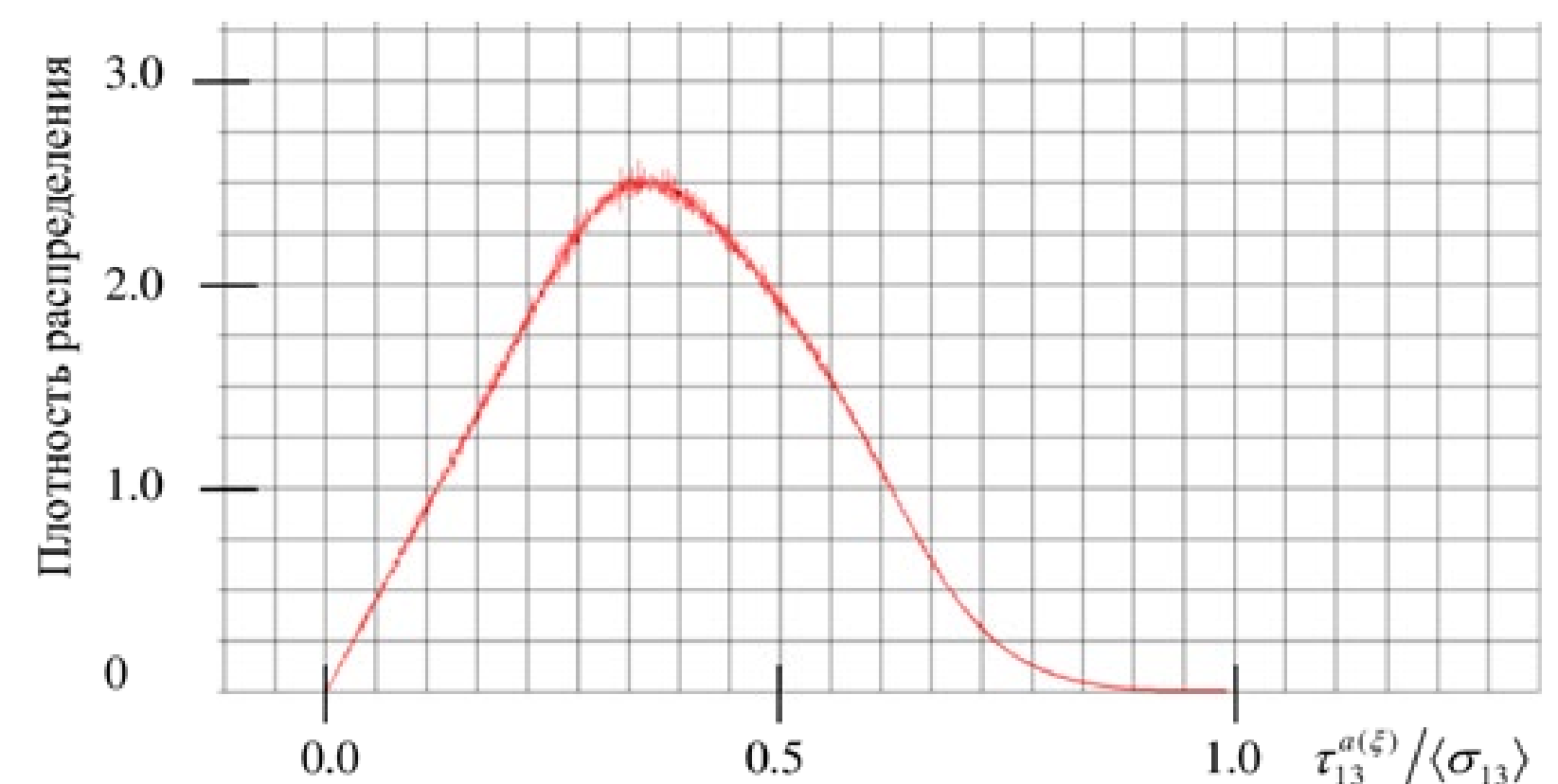


Рис.3. Плотность распределения для  $\tau_{13} = \sqrt{\sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2}$  в относительных единицах.

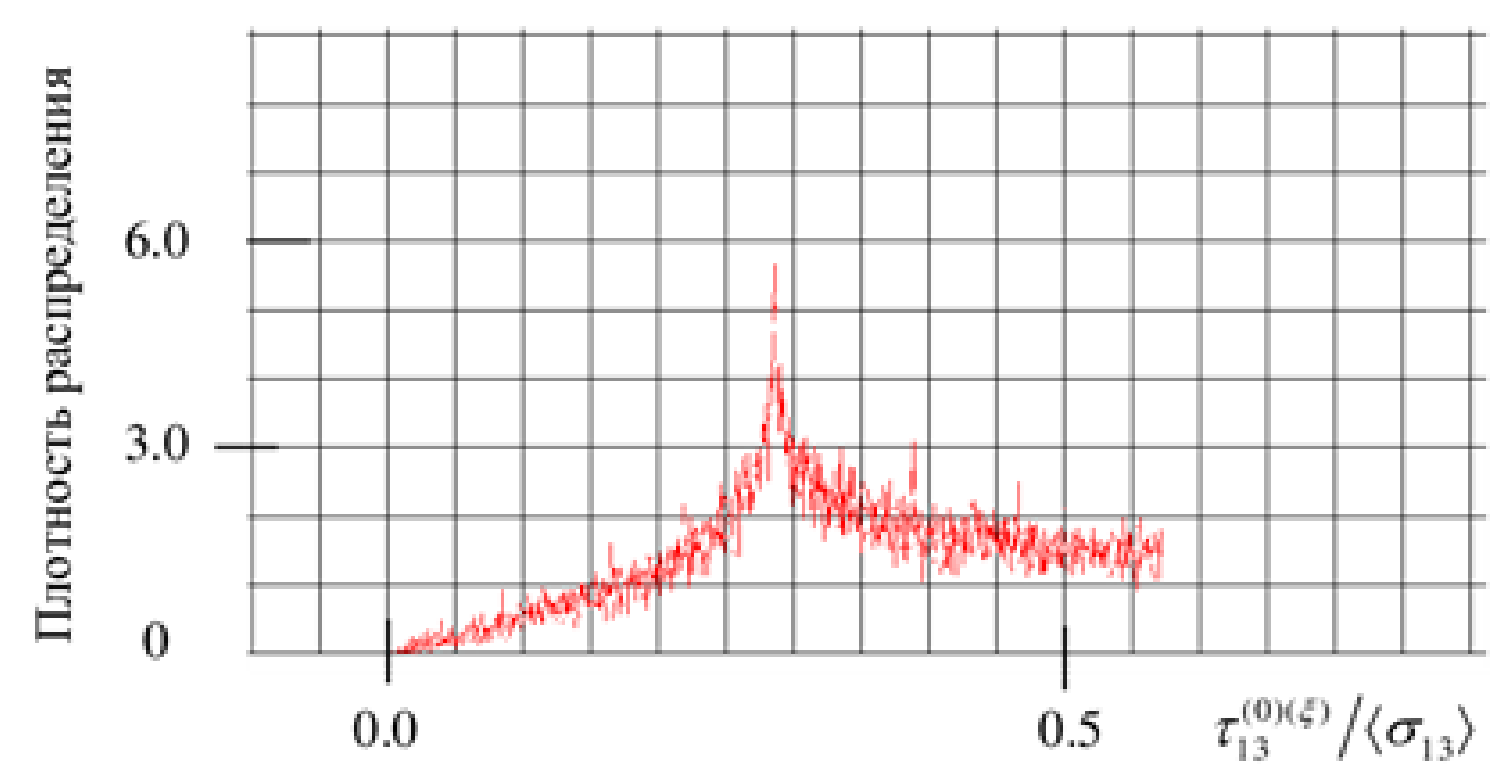


Рис.4. Плотность распределения для  $\tau_{13} = \sqrt{\sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2}$  по модели Эшелби (без учета взаимодействия зерен).

## 2.2. Вероятности повреждения материала в конструкции.



Рис.4. Эндопротез ТБС из УУКМ

Осевая нагрузка на конструкцию	<1700 Н	1750 Н	1800 Н
Вероятность повреждения	0	1,8 %	3,5 %

Результаты получены при выполнении государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (проект № FSNM-2026-0006).

### Литература

[1] Шавшуков В.Е. Взаимодействие зерен и распределение упругих деформаций в поликристаллических материалах // Физическая мезомеханика. - 2024. - т. 27, № 2. - С. 112-123..