



## МЕХАНИЗМЫ ДЕФОРМАЦИИ В АДДИТИВНО ИЗГОТОВЛЕННОМ ОЛИГОКРИСТАЛЛЕ АЛЮМИНИЕВОЙ БРОНЗЫ

М. Писарев<sup>1</sup>, В. А. Романова<sup>1</sup>, Д.В. Лычагин<sup>2</sup>, Р.Р. Балохонов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Email: pisarev@ispms.ru

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0002

В данной работе численно и экспериментально исследованы деформационные механизмы в олигокристалле алюминиевой бронзы. Экспериментальный образец, содержащий несколько столбчатых зерен был изготовлен проволочным электронно-лучевым способом. На основе полученной экспериментально EBSD карты была построена конечно элементная модель в рамках физической теории пластичности кристаллов с явным учетом формы и ориентации зерен.

### 1. Изготовление образца

Для получения образцов использовалась проволока алюминиевой бронзы, содержащая 7,5 вес.% алюминия. Образец изготавливался на лабораторной установке, разработанной и изготовленной в ИФПМ СО РАН методом электронно-лучевого производства (ЭЛАП). Схематически процесс печати представлен на Рисунке 1.

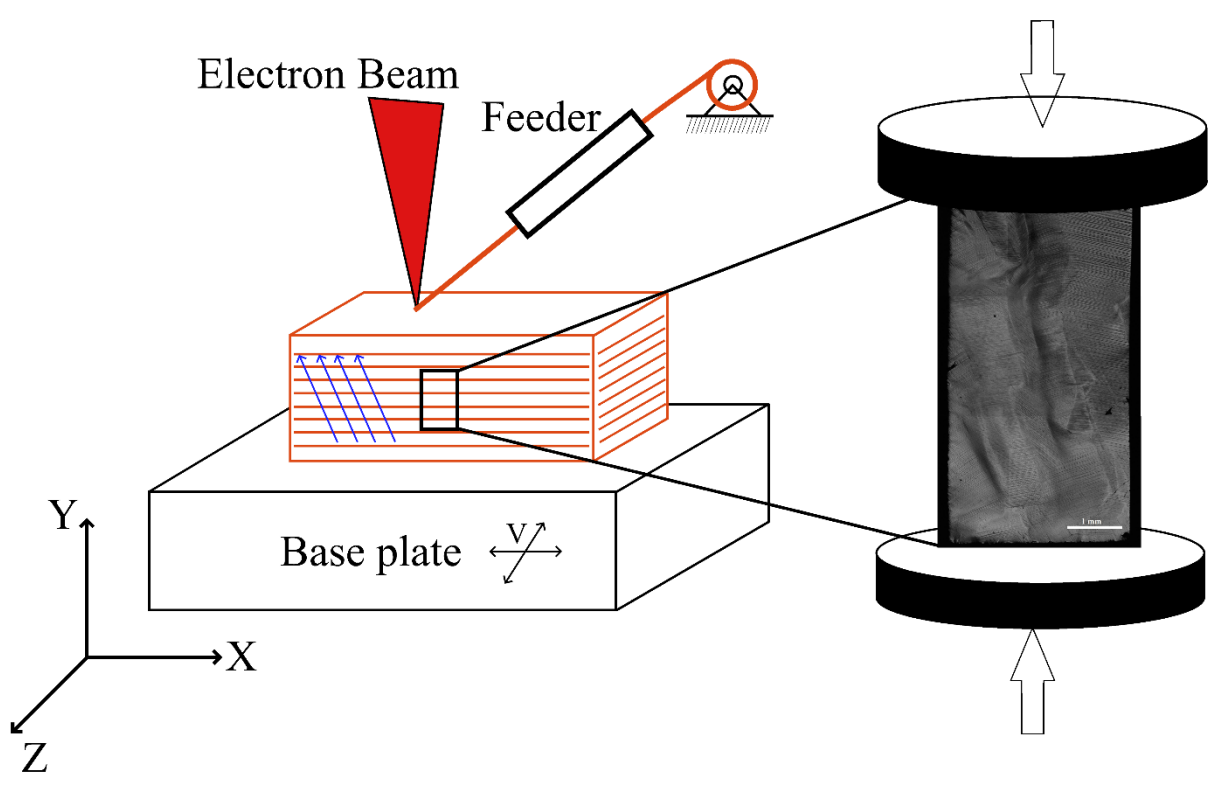


Рисунок 1 Схема ЭЛАП и теста на сжатие образца.

### 2. Тесты на сжатие образца

Образец для испытания на сжатие был вырезан из средней части в виде прямоугольного бруска размером 3,2x7x3,5 мм по осям X, Y и Z, соответственно. Сжатие осуществлялось на универсальной испытательной машине Instron ElektroPuls E100000. После 5 % деформации сжатия образец извлекался из испытательной машины, и его поверхность анализировалась с помощью лазерного сканирующего микроскопа Olympus LEXT OLS4100.

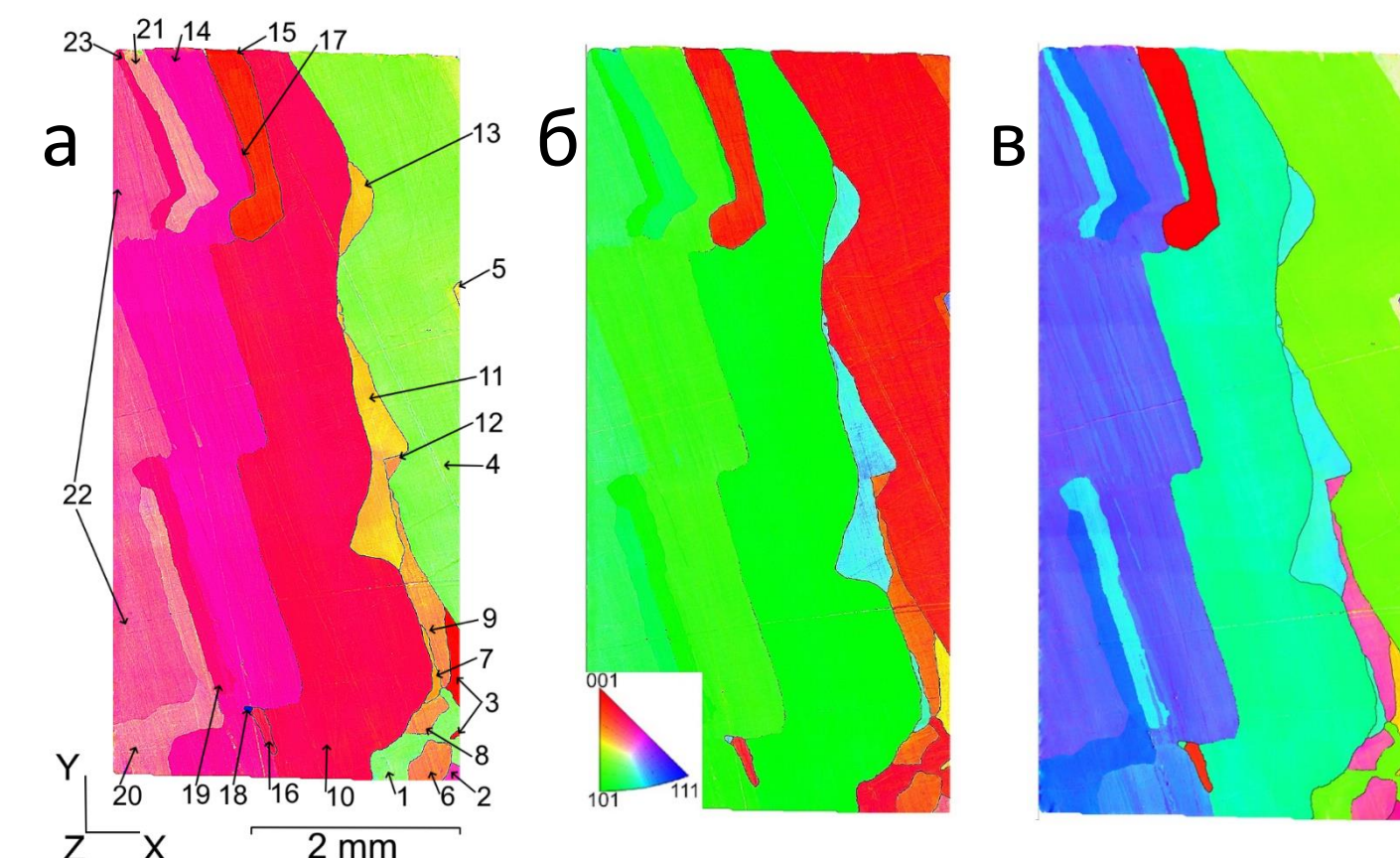


Рисунок 2. Карты ориентации для алюминиевой бронзы в цветах ОПФ для направлений //Y (a), //Z (b) и //X (c).

### 3. Численная модель

На основе EBSD карт была построена трехмерная конечно-элементная (КЭ) модель размерами 3,2x7,0x0,5 мм на сетке 407x880x64. КЭ модель была импортирована в ABAQUS/Explicit для решения краевой задачи в динамической постановке. Повороты зерен относительно глобальной системы координат (образца) XYZ задавались набором углов Эйлера, полученных из данных EBSD, чтобы полностью воспроизвести экспериментальные данные.

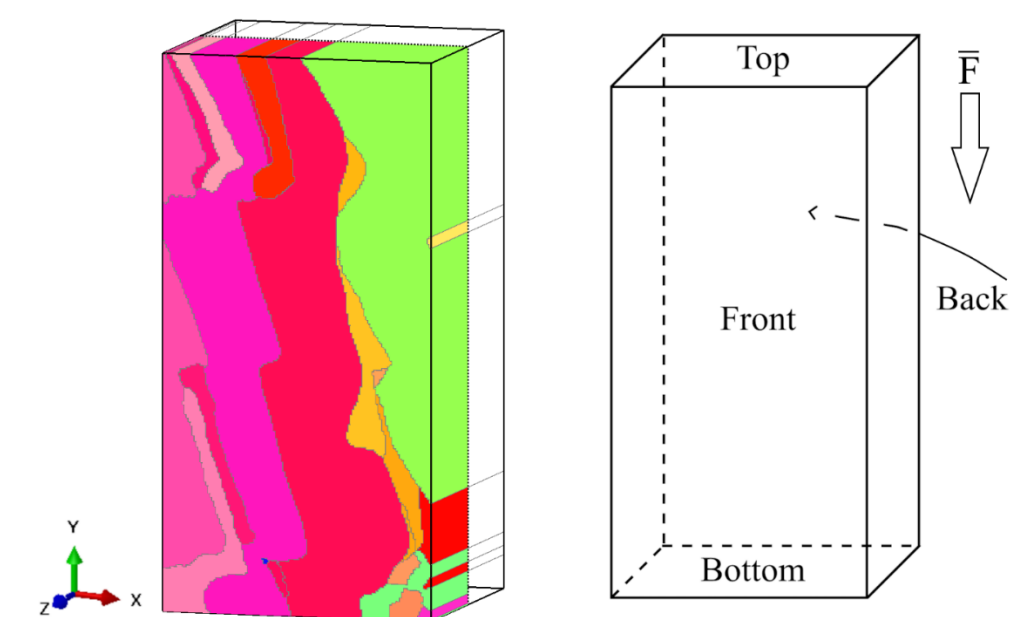


Рисунок 3 Зеренная модель, построенная на основе экспериментальных данных и схема ее нагружения.

Параметры модели:

$$C_{11}=169 \text{ ГПа}, C_{12}=122 \text{ ГПа}, C_{44}=75 \text{ ГПа}, \tau_0^{(\alpha)} = 27 \text{ МПа}, k = 270 \text{ МПа}$$

Поведение зерен описывалось при помощи физической теории пластичности кристаллов (ФТПК), которая связывает компоненты тензора напряжений и деформаций со скольжением по системам скольжения в ГЦК решетке. Важным моментом явной реализации ФТПК является то, что определяющие уравнения формулируются относительно локальных систем координат, характерных для каждого конечного элемента. Преимуществом этого подхода является рассмотрение структурной неоднородности в явном виде, что позволяет оценивать локальные характеристики на микроуровне.

#### Динамическая постановка

$$\sigma_{ij,j} = \rho \ddot{U}_i \quad \text{Уравнения движения}$$

$$\dot{U}_i - \dot{U}_{i,j} = 0 \quad \text{Закон сохранения массы}$$

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2}(\dot{U}_{i,j} + \dot{U}_{j,i}) \quad \text{Скорости полных деформаций}$$

$$\sigma_{ij} = f(\epsilon_{ij}, \dot{\epsilon}_{ij}, T, \dots) \quad \text{Определяющие соотношения}$$

$$\sigma_{ij} n_j |_{S_0} = T_i \quad \text{Граничные условия}$$

$$\dot{U}_i |_{S_0} = \dot{U}_i^* \quad \text{Граничные условия}$$

#### Определяющие соотношения

- Закон Гука  $\dot{\sigma}_{ij} = C_{ijkl} \dot{\epsilon}_{kl} = C_{ijkl} (\dot{\epsilon}_{kl} - \dot{\epsilon}_{kl}^p)$
- Компоненты тензора пластических деформаций  $\dot{\epsilon}_{ij}^p = \frac{1}{2} \sum_{\alpha} \dot{\gamma}^{(\alpha)} (s_i^{(\alpha)} m_j^{(\alpha)} + s_j^{(\alpha)} m_i^{(\alpha)})$   
 $s_i^{(\alpha)}$  Компоненты вектора направления скольжения в  $\alpha$  (система скольжения)  
 $m_i^{(\alpha)}$  Компоненты вектора нормали к  $\alpha$
- Скорость пластического сдвига  $\dot{\gamma}^{(\alpha)} = \begin{cases} 0, & \text{if } \tau^{(\alpha)} < \tau_{\text{crit}} \\ \frac{\tau^{(\alpha)} - \tau_{\text{crit}}}{k}, & \text{if } \tau^{(\alpha)} = \tau_{\text{crit}} \end{cases}$
- Приведенное сдвиговое напряжение, действующее на  $\alpha$ :  $\tau^{(\alpha)} = s_i^{(\alpha)} \sigma_{ij} m_j^{(\alpha)}$
- Критическое значение сдвигового напряжения  $\tau_{\text{crit}}^{(\alpha)} = \tau_0^{(\alpha)} + k \epsilon_{eq}^p$

### 4. Результаты

На рисунке 4а изображена экспериментальная поверхность образца, полученная на конфокальном микроскопе после сжатия до 5%. Экспериментальный анализ показывает, что уже при 5%-ном сжатии в деталях образца развивается крайне неоднородная пластическая деформация. Этот вывод о неоднородности пластической деформации подтверждается численными результатами. На рис. 4б, в представлены эквивалентное поле пластической деформации и соответствующий рисунок поверхности при 5%-ном сжатии, полученные в результате моделирования.

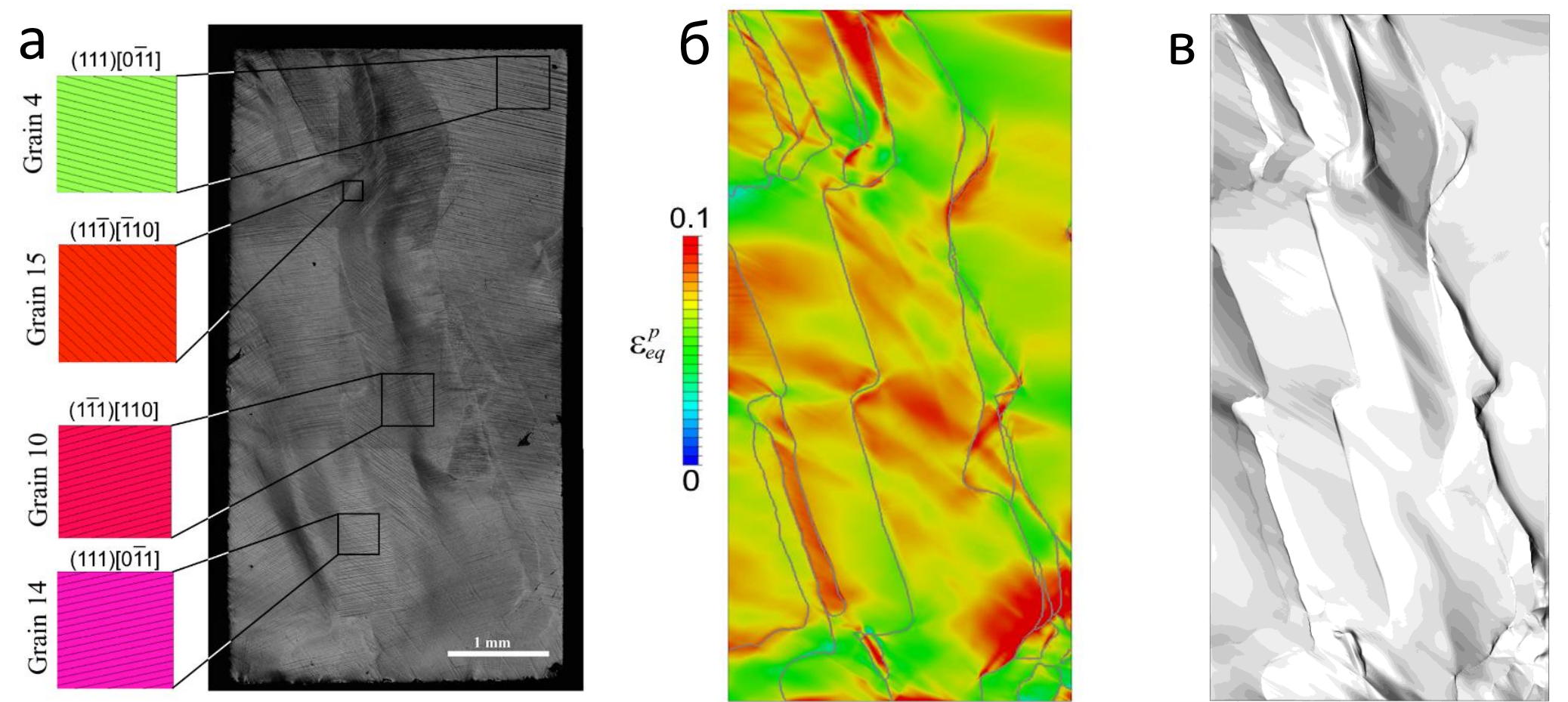


Рисунок 4 Экспериментальная поверхность образца после сжатия до 5%, с аналитически спрогнозированными системами скольжения в 4 выбранных зернах (а), Эквивалентное поле пластической деформации (б) и картина поверхности (в) в механической модели олигокристалла при 5% сжатия.

### 5. Анализ систем скольжения

Для аналитического анализа систем скольжения, использовался фактор Шмида, который вычислялся во всех зернах для всех потенциально активных систем скольжения по формуле  $F_Y^{(\alpha)} = \cos\phi \cos\theta$ , где  $\phi$  и  $\theta$  - углы между осью Y и векторами нормали скольжения и направления скольжения, соответственно. В процессе нагружения, скольжение вероятнее всего пойдет по системе скольжения с наибольшим фактором Шмида. В соответствии с этим, в модели активировались системы с наибольшими коэффициентами Шмида вдоль оси сжатия. Однако в большинстве зерен было активировано до четырех дополнительных систем скольжения для учета их сильно неоднородной пластической деформации.

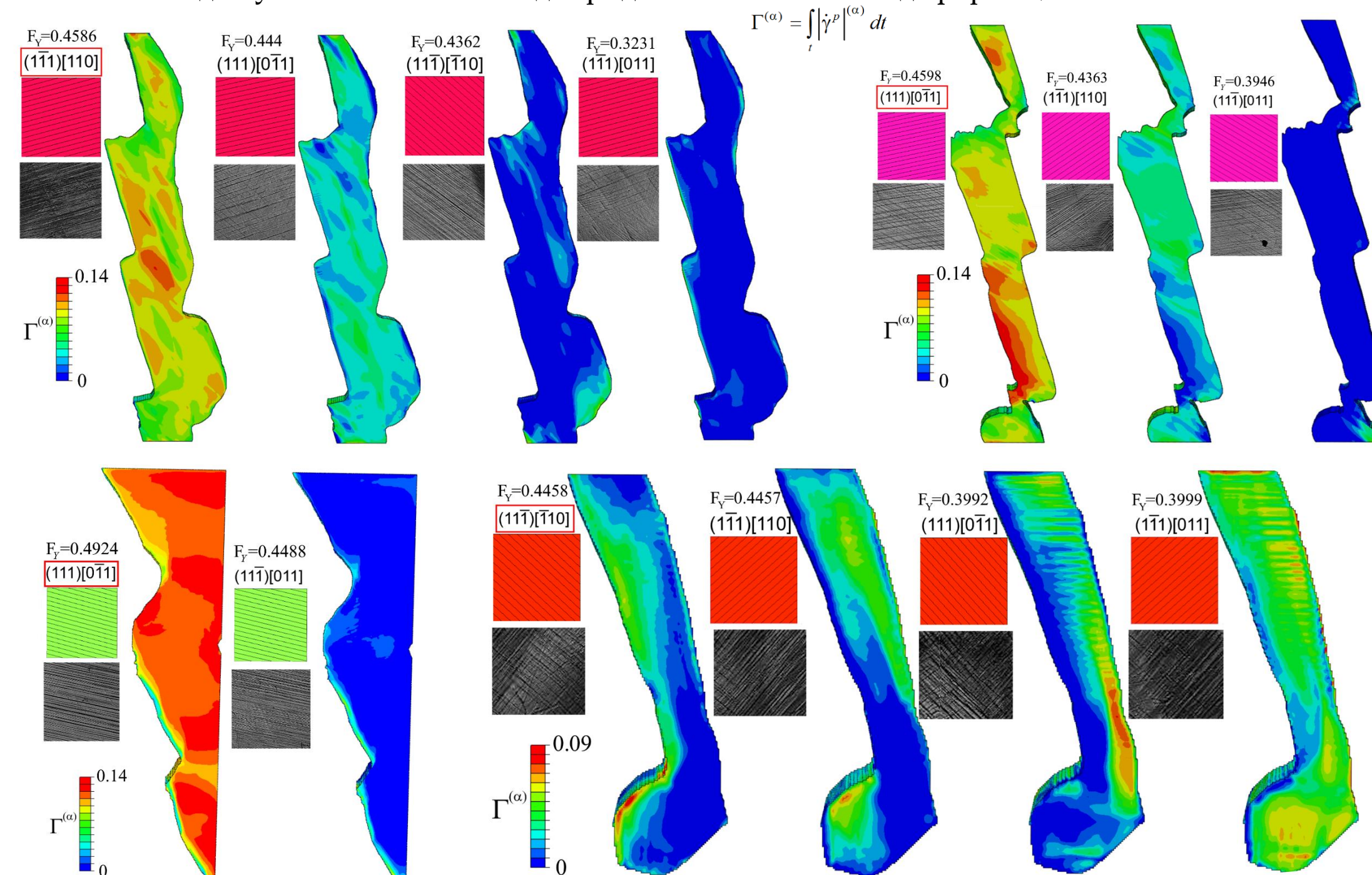


Рисунок 5 Количество накопленного сдвига в различных системах скольжения для разных зерен

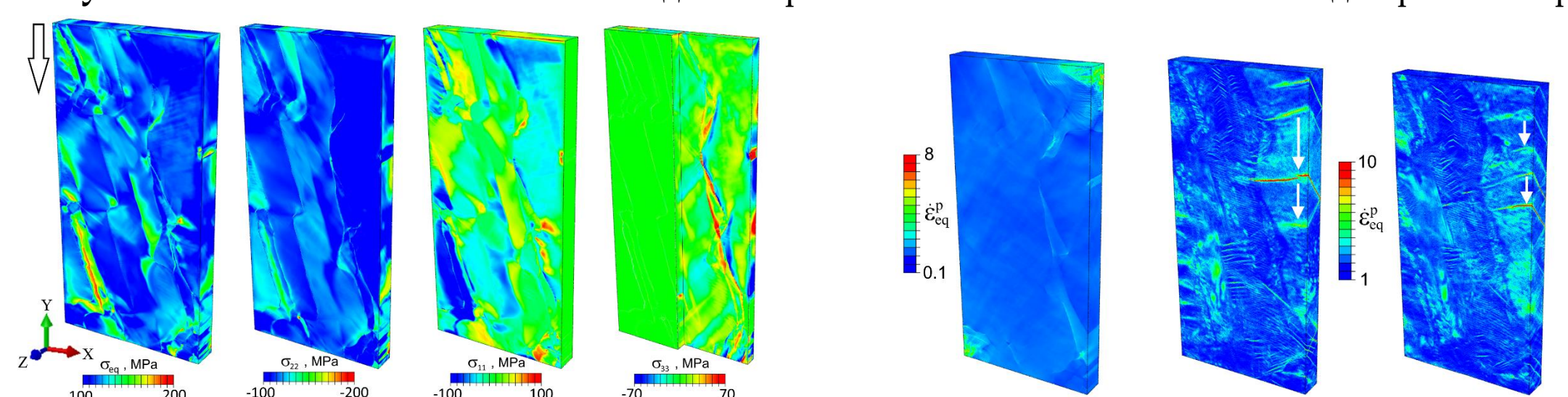


Рисунок 5 Компоненты тензора напряжения и скорости пластических деформаций в модели

Для более подробной информации смотрите статью:

ROMANOVA, Varvara et al. GRAIN-SCALE DEFORMATION MECHANISMS IN AN ADDITIVELY MANUFACTURED ALUMINIUM BRONZE OLIGOCRYSTAL. Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering, [S.1.], jan. 2024

