

ОПИСАНИЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ В МНОГОУРОВНЕВЫХ МОДЕЛЯХ МЕТАЛЛОВ

Т.В. Останина, П.В. Трусов, А.И. Швейкин tv-ostanina@yandex.ru

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, кафедра «Математическое моделирование систем и процессов» (Пермь, Россия)

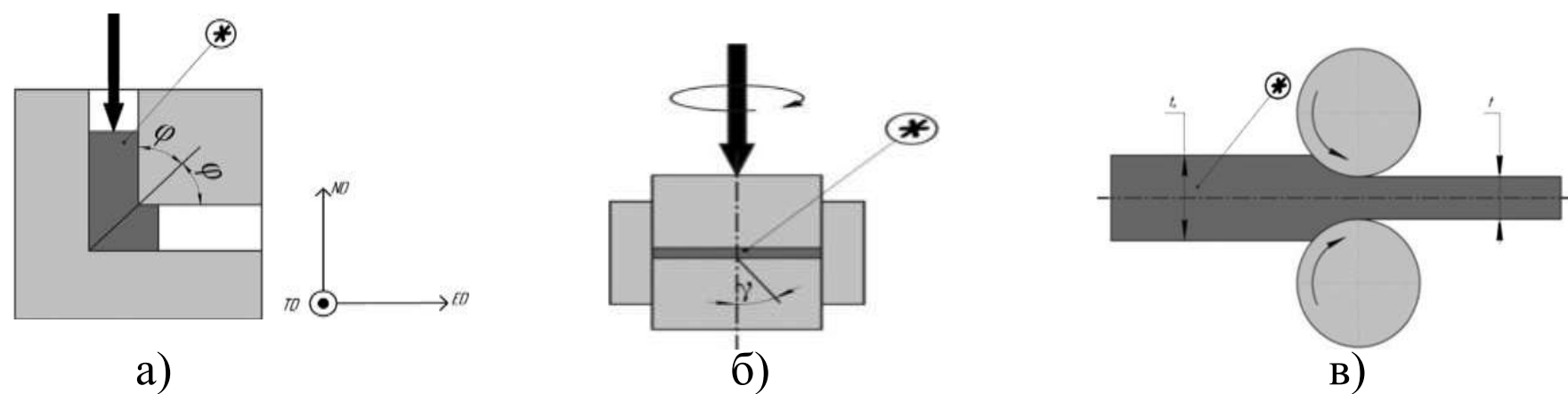
АКТУАЛЬНОСТЬ

Процессы получения поликристаллических металлов и сплавов с ультрамелкозернистой структурой в последние 15–20 лет все шире используются в различных отраслях машиностроения. Данное обстоятельство связано с существенно улучшенными рабочими характеристиками изделий, приобретаемыми последними при обработке интенсивным пластическим деформированием (ИПД), ведущим к измельчению зеренной структуры материалов¹. Уменьшение зерен ниже некоторого порогового размера может приводить к кардинальному изменению свойств: микротвердость таких материалов может в несколько раз превышать микротвердость крупнозернистых аналогов, высокая прочность может сочетаться со значительной пластичностью². Возможность оптимального сочетания механических свойств в металлах и сплавах с мелкозернистой структурой открывает перспективы их применения в качестве новых конструкционных и функциональных материалов.

¹Сегал В.М., Резников В.И., Копылов В.И. и др. Процессы пластического структурообразования металлов – Минск: Наука и техника, 1994. – 232 с.

²Утяшев Ф.З. Деформационные методы получения наноструктурированных материалов и возможности их использования в авиационно-космической технике // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 10(67). – С. 7–11.

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

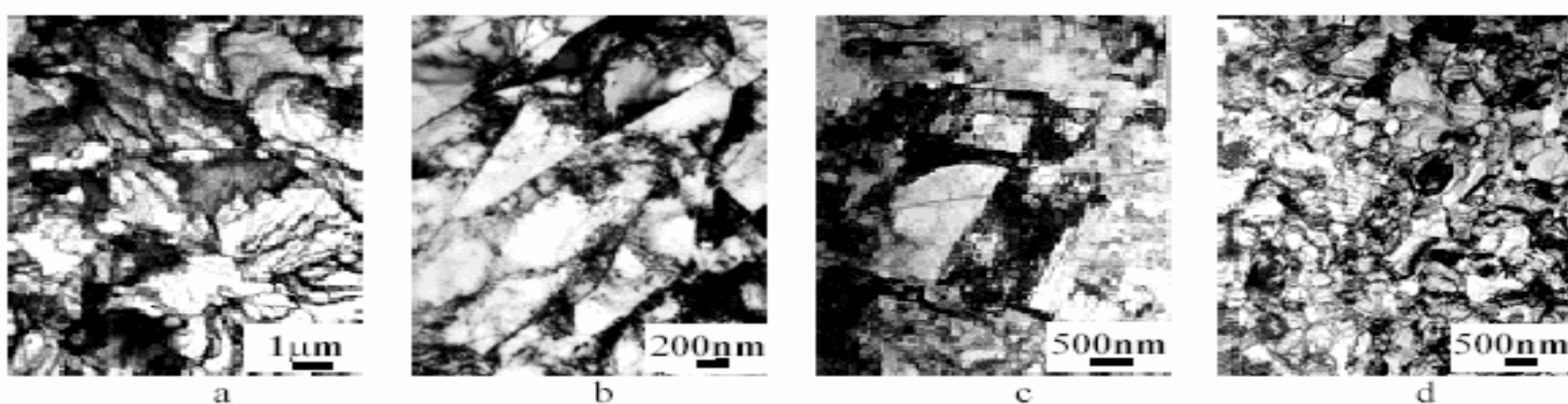


Основные методы ИПД^{3,4}:

а) равноканальное угловое прессование, б) кручение под давлением, в) прокатка

³Estrin Y., Vinogradov A. Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science // Acta Materialia. – 2013. – Vol.61. – Pp.782–817.

⁴Сегал В.М., Резников В.И., Дробышевский Ф.Е., Копылов В.И. Пластическая обработка металлов простым сдвигом // Известия АН СССР. Металлы. – 1981. – № 1. – С. 115–123



Развитие мелкозернистой структуры при интенсивной пластической деформации осадкой чистого титана:

а - первая осадка (e ~ 15%); б — 3 шага осадки (e ~ 40%); с — 5 шагов осадки; д — 12 шагов осадки⁵

⁵Сарафанов Г.Ф., Перевезенцев В.Н. Закономерности деформационного измельчения структуры металлов и сплавов. Учебно-методический материал.–Н. Новгород, 2007.– 96 с.

ТРЕБОВАНИЯ К МЕТОДАМ ПОЛУЧЕНИЯ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ^{6,7}

•В настоящее явление фрагментации экспериментально наблюдается при обработке многих металлах и сплавах (железо, алюминий, титановые сплавы, стали ферритного, мартенситного и аустенитного классов).

•Важно получить ультрамелкозернистые структуры с преобладанием большеугловых границ зерен, так как только в этом случае можно качественно изменить свойства материалов.

•Формирование мелкозернистой структуры, однородной во всем объеме образца, что необходимо для обеспечения стабильных свойств обрабатываемых материалов.

⁶Рыбин В.В. Фундаментальные проблемы интенсивной пластической деформации кристаллических твердых тел // Научно-техническое ведомости СПбГТУ. Физико-математические науки. – 2013. – Т. 182, № 4-1. – С. 166-169.

⁷Valiev R.Z., Islamgaliev R.K., Alexandrov I.V. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation // Progress in Materials Science. – 2000. – Vol. 45, No. 7. – Pp. 103–189.

⁸Pippan R., Scheriau S., Taylor A., Hafok M., Hohenwarter A., Bachmaier A. Saturation of Fragmentation During Severe Plastic Deformation // Annu. Rev. Mater. Res. – 2010. – Vol.40. – Pp.319–343.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Наиболее перспективными для описания процессов измельчения зеренной структуры при неупругих деформациях представляются многоуровневые модели на базе физических теорий пластичности⁹, поскольку позволяют явно описывать изменяющуюся структуру и зависящие от нее свойства материала. Целью работы является разработка многоуровневой модели для описания поведения металлов и сплавов, основными особенностями которой (в контексте описания измельчения зеренной структуры) будут являться учет факторов, определяющих развороты ячеек, за счет описания взаимодействия дислокаций и дисклинаций, а также определение пространственного расположения границ ячеек.

⁹Трусов П.В., Швейкин А.И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. – Новосибирск: Изд-во СО РАН. – 2019. – 605 с.

СТРУКТУРА ТРЕХУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ

$$\begin{aligned} &\text{Макроуровень} \\ &\Sigma, \hat{\nabla}V, Z = \hat{\nabla}V^T - \Omega; \quad \Pi, Z^{in}, \Omega, f(o), h(g) \\ &\Sigma^{R_macro} = \hat{\Sigma} - \Omega \cdot \Sigma + \Sigma \cdot \Omega = \Pi : (Z - Z^{in}) \end{aligned}$$

$$\hat{\nabla}V(t) = \hat{\nabla}V(t) \quad \begin{aligned} &\Pi = \Pi(\pi_k, \dots), \\ &Z^{in} = Z^{in}(z_k^{in}, \dots), \\ &\Omega = \Omega(\omega_k, \dots), \\ &f(o), h(g) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{Мезоуровень (зерно, субзерно, фрагмент)} \\ &\sigma, z = \hat{\nabla}V^T - \omega, \pi, z^{in}, \omega, o, g \\ &\sigma^{r_mezo} = \hat{\sigma} - \omega \cdot \sigma + \sigma \cdot \omega = \pi : (z - z^{in}), \\ &+ соотношения для определения z^{in}, \omega \end{aligned}$$

напряжения, разориентации, спин, уточненные скорости сдвигов, ...
Мезоуровень 2 (часть кристаллита - фрагмент)

МЕЗОУРОВЕНЬ 2: НЕУПРУГОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ФРАГМЕНТА С УЧЕТОМ МОМЕНТНЫХ ФАКТОРОВ И РАЗВОРОТОВ РЕШЕТКИ ФРАГМЕНТОВ

Спин решетки кристаллита ω представляется как сумма:

- **материального поворота** (материальный поворот связывается с тензором R^e , скоростью поворота – с тензором спина $\dot{R}^e \cdot R^{eT}$),

- **дополнительного поворота** решетки зерна за счет несовместности скольжения дислокаций в соседних зернах *

Поверхностный и объемный моменты:

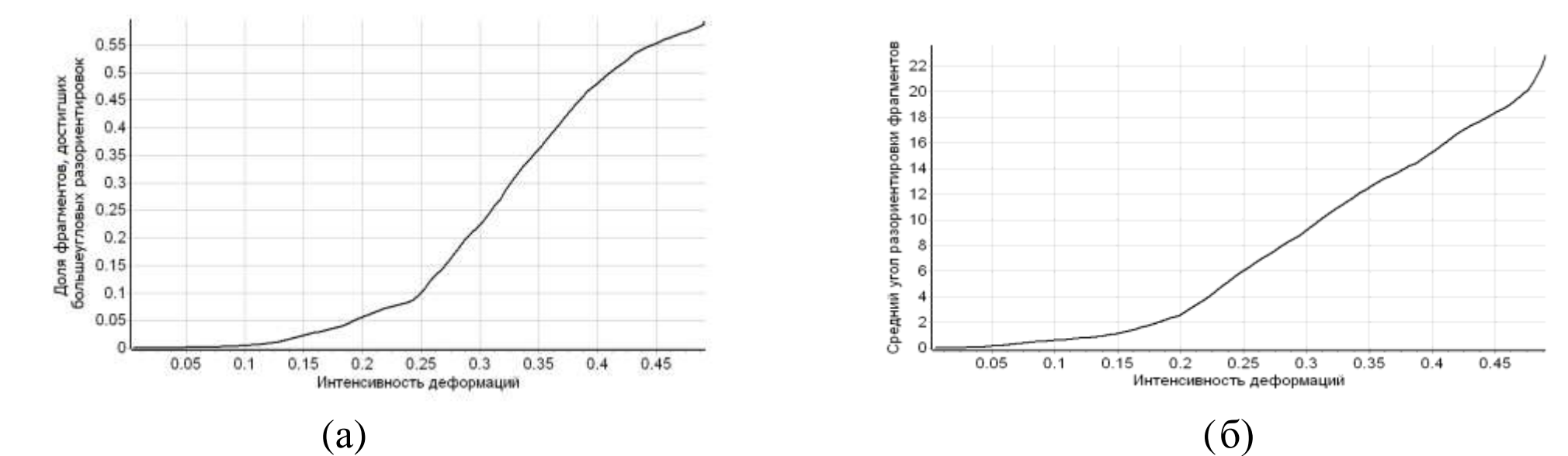
$$\begin{aligned} (m^m)^r &= m_0 \cdot N \times (\sum_j \dot{\gamma}^j n^j b^j - \sum_j \dot{\gamma}^{j(m)} n^j b^{j(m)}) \cdot N \\ M &= \frac{1}{V} \sum_{m=1}^M m^m S_m \end{aligned}$$

«Упругие» и «неупругие» развороты решетки:

$$e = \frac{M}{|M|}, \quad \phi = \begin{cases} \frac{1}{A} |M| + \frac{1}{H} |M|, & |M| = M_c \text{ и } M \cdot \dot{M} \geq 0, \\ \frac{1}{A} |M|, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

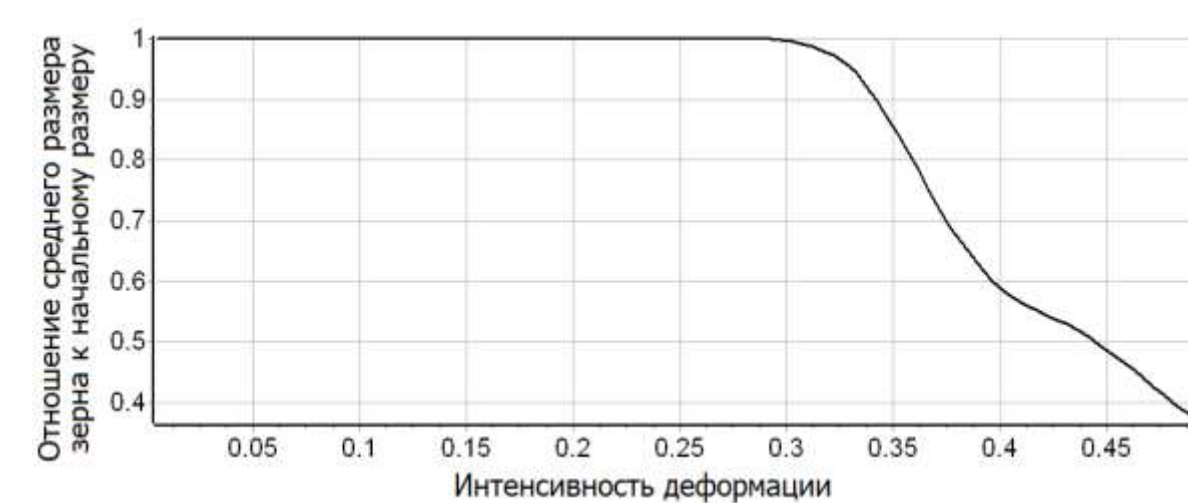
вектор скорости поворота ω^e , составляющая спина

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ



Зависимости доли фрагментов, достигших высокоугловых разориентировок (а) и среднего угла разориентировки (б) от интенсивности накопленных деформаций¹⁰

¹⁰Ostanina T.V., Telkanov M.A., Makarevich E.S., Trusov P.V., Shveykin A.I. Grain structure refinement modeling in inelastic deformation of metals and alloys// AIP Conference Proceedings. – 2017.-V.1909. – 020160.



Зависимость отношения среднего размера зерна к его начальному значению от интенсивности накопленных деформаций

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Выполнен обзор существующих моделей процесса измельчения зеренной структуры.
- На основе физического анализа механизмов деформирования разработана структура трехуровневой модели для описания интенсивного деформирования поликристаллических металлов и сплавов, учитывающей процесс измельчения зеренной структуры.
- Предложенный подход может быть использован для моделирования эволюции структуры поликристаллического материала при больших пластических деформациях, в том числе для описания перевода материала в состояние, позволяющее реализовать режим сверхпластичности.
- Разработан пакет программ, позволяющий реализовывать прямые модели для описания деформирования¹¹ металлов и сплавов, данный пакет будет использоваться и при реализации разрабатываемой модели.

¹¹Трусов П.В., Янц А.Ю., Теплякова Л.А. Прямая упруговязкопластическая модель: приложение к исследованию деформирования монокристаллов// Физическая мезомеханика. – 2018.- Т.21, №2. – С. 33-44.