

ОБ ИДЕНТИФИКАЦИИ КЛАССА СИММЕТРИИ УПРУГИХ СВОЙСТВ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МНОГОУРОВНЕВОМ МОДЕЛИРОВАНИИ

К.В. ОСТАПОВИЧ, П.В. ТРУСОВ

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

E-mail: ostkirvad@gmail.com

Физико-механические свойства материалов определяются их микроструктурой, управление которой в ходе различных технологических процессов позволяет проектировать детали и конструкции с уникальными эксплуатационными особенностями. При интенсивном неупругом деформировании поликристаллических металлов и сплавов существенное влияние на эволюцию внутренней структуры оказывают механизмы, вызывающие ротацию зерен. Появление существенной неоднородности распределения ориентаций кристаллических решеток (возникновение кристаллографической текстуры) в таких материалах может приводить к значительной анизотропии их макроскопических характеристик. При этом установление тех или иных свойств инвариантности определяющих соотношений получаемых в результате материалов относительно ортогональных преобразований системы координат играет весьма важную роль в различных технических приложениях.

Пусть рассматривается анизотропный материал, упругое деформирование которого описывается обобщенным законом Гука:

$$\sigma = \Pi : \varepsilon,$$

где σ и ε – тензоры (2-го ранга) напряжений Коши и малых деформаций соответственно, Π – тензор (4-го ранга) упругих констант. В зависимости от того, какой конкретно группой симметрии обладает тензор Π , исследуемый материал может быть отнесен к тому или иному классу упругой симметрии [1]. Определенный интерес представляет задача симметричной идентификации [2, 3], состоящая в формировании иерархии указанных классов, каждому из которых тензор Π соответствует с известным уровнем погрешности. Существование аппроксимации тензора упругих констант из заданного класса симметрии, дающей приемлемо малое значение некоторой нормы невязки в законе Гука при всех возможных ε , целесообразно считать практическим критерием принадлежности материала по упругим свойствам этому классу. В таком случае задача симметричной идентификации может быть сведена к минимизации верхней оценки данной невязки на допустимых множествах тензоров рассматриваемых классов [3].

С применением двухуровневой конститутивной модели упруговязкопластичности [4] было проведено численное исследование изменения симметрии упругих свойств представительного объема поликристаллической меди при неупругом деформировании. Рассматривалась единичная реализация поликристаллического агрегата, содержащего 1000 кристаллитов со случайным равномерным начальным распределением ориентаций. Анализировались двухзвенные траектории кинематического нагружения типа «простой сдвиг – простой сдвиг» с постоянными градиентами скоростей деформации следующего вида (в базисе $\{I_i\}$ лабораторной системы координат):

$$\nabla \mathbf{v}_I = 5 \times 10^{-4} (I_1 I_1 - I_2 I_2 + I_1 I_2 - I_2 I_1)$$

$$\nabla \mathbf{v}_{II} = 5 \times 10^{-4} (I_1 I_1 - \cos^2 \theta I_2 I_2 - \sin^2 \theta I_3 I_3 \cos \theta (I_1 I_2 - I_2 I_1) + \sin \theta (I_1 I_3 - I_3 I_1) - \cos \theta \sin \theta (I_2 I_3 + I_3 I_2))$$

Значения параметра θ варьировались в диапазоне от 0° до 180° . Каждый из этапов деформирования завершался упругой разгрузкой до нулевых макроскопических напряжений. Длительности активных нагружений: $T_{I,II} = 2000$ с. Реализуемый по приведенной схеме процесс соответствует двум последовательным этапам равноканального углового прессования с прямым углом соединения каналов и предварительным продольным поворотом заготовки на угол θ перед вторым прохождением.

На рис. 1 приведены прямые полюсные фигуры (ППФ) для поликристаллического агрегата в различных конфигурациях. В рассматриваемых случаях деформирования наблюдается возникновение значительной неоднородности распределения ориентаций кристаллитов.

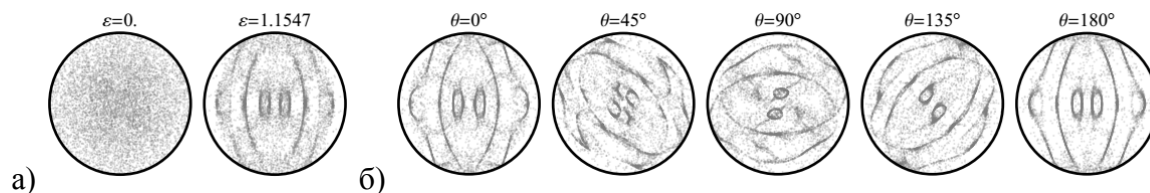


Рисунок 1 – ППФ для направлений $\langle 111 \rangle$ (проецирование вдоль I_3):

а) начальная и конечная ППФ этапа I; б) конечные ППФ этапа II

График, изображенный на рис. 2-а, описывает изменение *относительной оценки несоответствия (ООН)* [3] для макроскопических упругих свойств агрегата в классе изотропии при неупругом деформировании, реализуемом на этапе I. На рис. 2-б представлены кривые зависимости данной величины от параметра θ для различных состояний завершенности этапа II. В точке $\theta = 90^\circ$ полученные зависимости имеют выраженный минимум, причем в его окрестности, в отличие от предыдущего этапа, изменения ООН оказываются немонотонными.

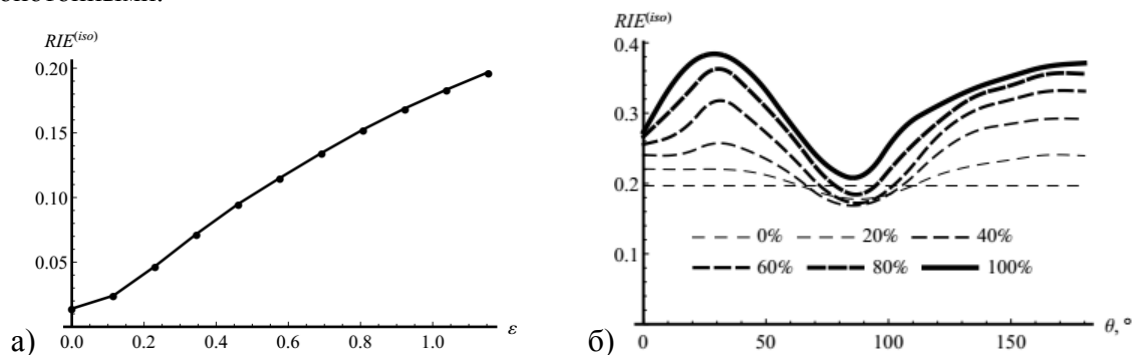


Рисунок 2 – Изменение ООН в классе изотропии:

а) в ходе этапа I; б) в зависимости от значений θ для различных состояний этапа II

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 17-41-590694-р_а, № 17-01-00379-а).

Список литературы

1. Bóna A., Bucataru I., Slawinski M.A. Material symmetries of elasticity tensors // Q. J. Mech. Appl. Math.. – 2004. – № 57. – P. 583-598
2. Остапович К.В., Трусов П.В. Об анизотропии упругих материалов: идентификация симметричных свойств // Механика композиционных материалов и конструкций – 2016. – Т. 22. – № 1. – С. 69-84
3. Остапович К.В., Трусов П.В. Об идентификации симметрии упругих свойств поликристаллических материалов // Неравновесные процессы в сплошных средах: мат. междунар. симп.. – 2017. – Т. 2. – С. 122-124
4. Швейкин А.И., Трусов П.В. Сопоставление сформулированных в терминах актуальной и разгруженной конфигураций геометрически нелинейных упруговязкопластических определяющих соотношений для кристаллитов // Физ. мезомех.. – 2016. – № 5. – С.48-57