

Отзыв

официального оппонента Волкова Александра Евгеньевича на диссертацию Д.С. Грибова «Физически-ориентированная трёхуровневая модель для исследования неупругого деформирования поликристаллов: описание сложного циклического нагружения материалов с различной энергией дефекта упаковки», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

В последние десятилетия активно развивается многоуровневое физически-ориентированное моделирование процессов пластического деформирования различных материалов. Особый интерес представляют модели, позволяющие описывать изменения структуры материалов на различных масштабных уровнях. Состояние мезо- и микроструктуры определяет целый ряд физико-механических свойств материалов, таких как предел пластичности, предел прочности, и другие. Многоуровневые модели позволяют анализировать эволюцию таких характеристик структуры, как доля фазы с определённым типом решётки, ориентация зёрен, плотности дислокаций и примесей в зёрнах. В связи с вышесказанным тема, выбранная соискателем для исследования, является **актуальной**.

О **научной новизне** диссертационной работы свидетельствует разработанная в рамках многоуровневого подхода модификация двухуровневой конститутивной модели (КМ), заключающаяся во введении дополнительного уровня для описания эволюции плотностей дефектов (дислокаций, барьеров дислокационной природы Ломера–Коттрелла и Хирта, источников генерации дислокаций на системах скольжения). Автор разработал математический аппарат реализации новой модели и выполнил расчеты для исследования пропорционального и непропорционального деформирования образцов из ряда ГЦК металлов, что позволило объяснить физическую природу дополнительного циклического упрочнения (ДЦУ) в материалах с низкой энергией дефекта упаковки (ЭДУ).

Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанной модели (включая алгоритмы и комплекс программ ее реализации) для описания отклика поликристаллических материалов с различной величиной ЭДУ в условиях сложного нагружения. **Фундаментально-научная значимость** диссертации состоит в возможности с ее помощью анализировать изменение состояния дефектной микроструктуры материала при исследовании процессов обработки металлов и сплавов.

Достоверность результатов работы подтверждается использованием апробированных методов микроструктурного моделирования и удовлетворительным соответствием расчетных данных с известными экспериментальными данными.

Основные результаты работы доложены и обсуждены на большом числе Всероссийских и пяти Международных конференциях, представлены в 30 публикациях автора (в том числе 5 – в изданиях, входящих в международные базы цитирования WebofScience и Scopus). **Автореферат соответствует** и достаточно полно отражает содержание **диссертации**.

Диссертационная работа состоит из списка сокращений и обозначений, введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы. Работа содержит 26 рисунков, библиографический список – 137 наименований, изложена на 111 страницах.

Во введении обосновывается актуальность и научная новизна диссертационного исследования, обсуждаются возможные сферы применения результатов работы, формулируются цель и задачи работы, приводится краткое содержание работы по главам.

В первой главе рассмотрены основные физические механизмы, обуславливающие изменения мезо- и микроструктуры при деформировании материалов с различной ЭДУ, имеющиеся в литературе экспериментальные данные (включая результаты исследования эффекта Баушингера, запаздывания векторных свойств, дополнительного циклического упрочения, выхода амплитудных значений напряжений на стационарные значения при циклических нагружениях с фиксированной амплитудой по деформациям).

Приведён обзор существующих макрофеноменологических и физически-ориентированных моделей для описания процессов пластического формоизменения поликристаллических металлов и сплавов (в том числе – при сложном нагружении).

Во второй главе приведены концептуальная и математическая постановка задачи разработки многоуровневой КМ, основное внимание уделено рассмотрению базовой 2-хуровневой (макро- и мезоуровень-1) упруговязкопластической модели.

В третьей главе, являющейся центральной для разработки новой модели, рассмотрена формулировка уравнений для мезоуровня-2, которые описывают эволюцию плотностей дислокаций, источников дислокаций и барьеров для их движения. Описаны связи внутренних переменных мезоуровня-2 и мезоуровня-1, проведена классификация внутренних переменных мезоуровней. Сформулирован закон упрочения, базирующийся на учете взаимодействия дислокаций друг с другом и с барьерами. Приведён алгоритм реализации предложенной модели.

В четвёртой главе приведены описание и анализ результатов моделирования сложного монотонного и циклического деформирования поликристаллических образцов, произведена оценка адекватности модели с использованием экспериментальных данных для различных материалов и нагружений. Показана способность модели описывать явления, наблюдаемые при циклическом нагружении (выход амплитуды напряжений на стационарные значения при циклических нагружениях с фиксированными амплитудами деформаций, явление ДЦУ, увеличение плотностей дефектов и появление барьеров на расщеплённых дислокациях).

В заключении сформулированы основные результаты диссертации, отмечено качественное соответствие результатов численного моделирования данным экспериментов.

Замечания по работе.

1. Из уравнения (2.13)₆ на с.55 следует, что когда напряжение в i -й системе скольжения превышает критическое, то сдвиг в ней происходит во времени, т.е. соответствует явлению ползучести. Также из этой формулы

видно, что ползучесть при напряжении, меньшем критического, невозможна. Таким образом, следовало бы пояснить, может ли данная модель описывать в чистом виде атермическую пластичность, а также ползучесть, и с какими ограничениями? Этот вопрос относится также к формулам (3.4) на с.63.

2. Дислокационные петли скольжения обязательно содержат винтовые сегменты. В работе они не рассматриваются. Насколько существенное влияние может вносить их неучёт в предложенной модели?

3. Неясно обоснование формулы (3.5), согласно которой изменение плотности источников пропорционально скоростям дислокаций (выражение в квадратных скобках в (3.5) согласно (3.4) равно скоростям дислокаций).

4. В модели больше 10 параметров. Сколько всего параметров подбирали методом Нелдера – Мида?

5. Исследовалась ли чувствительность модели по отношению к параметрам модели?

6. В работе имеется довольно много неясных комментариев и опечаток, например, следующие.

а) В списке обозначений и в комментарии к формуле (2.13) на с.55 имеется величина $m_{(s)}^{(i)}$ которая не встречается ни в одной формуле.

б) Растяжение с кручением – не то же самое, что двухосное деформирование, как можно понять из текста на с.21. При непропорциональном нагружении главные оси поворачиваются.

в) На с.52 в формулу (2.8) и в пояснение к ней входят разные градиенты.

г) На с.52 вводится понятие жесткой подвижной системы координат (ПСК). Поскольку это не общепринятое понятие, его следовало бы разъяснить подробнее, также, как и смысл введенной меры Z , ее симметричной и антисимметричной части.

д) На с.54 упоминаются формулы (2.9₁₁) и (2.9₁₂). Формулы с такой нумерацией в диссертации отсутствуют.

е) Возможно, имеется опечатка в формуле (2.14) на с.56.

- ж) Неясно, зачем в формулу (3.4) на с.63 введена константа α . Без ущерба для общности можно положить $\alpha=1$.
- з) На с.71 упоминается «вектор экстраплоскости». Что это такое? Если это нормаль к экстраплоскости, то ее направление совпадает с направлением вектора Бюргерса.
- и) С.72. Рис.3.3 не дает наглядного представления о собственной системе координат дислокации ВС.
- к) С.73. Обозначения α и β , входящие в (3.18), уже использованы в (3.4).
- л) С.81: «Средние плотности барьеров достигли порядка 10^5 м^{-2} ». Это $0.01 / (100\text{мкм})^2$. Следовательно, если размер зерна 100 мкм, то на плоскости сдвига с очень большой вероятностью не будет ни одного барьера.
- м) С.82: «Кинематические воздействия заданы компонентами вектора в двухмерном подпространстве пятимерного векторного пространства деформаций Ильюшина». Не указано, каким видам деформации соответствовали эти две компоненты в пространстве Ильюшина.
- н) С.97: «Плотности дислокаций при этом увеличиваются на 4-5 порядков». Ранее было указано, что брали начальное значение плотности дислокаций 10^9 см^{-2} . Если оно увеличится на 5 порядков до 10^{14} см^{-2} , то характерное расстояние между дислокациями будет 1нм, что соответствует аморфизации материала.

Заключение по диссертации.

Диссертационная работа Д.С. Грибова «Физически-ориентированная трёхуровневая модель для исследования неупругого деформирования поликристаллов: описание сложного циклического нагружения материалов с различной энергией дефекта упаковки» является завершённым научным исследованием, выполненным на высоком научно-методическом уровне, соответствует паспорту специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» и имеет важное научное значение и практические приложения.

Работа отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук Положением о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842 (ред. от 26.09.2022) "О порядке присуждения ученых степеней", а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент:

Профессор кафедры теории упругости, Санкт-Петербургский государственный университет, д.ф.-м.н., профессор



/ А.Е. Волков /

Волков Александр Евгеньевич, д.ф.-м.н. (специальность 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела), 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9, Санкт-Петербургский государственный университет, кафедра теории упругости.

Электронная почта: a.volkov@spbu.ru

30.11.2022

Я, Волков Александр Евгеньевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Грибова Дмитрия Сергеевича, и их дальнейшую обработку.



/А.Е. Волков/

Личную подл
заверяю
Заместитель
Управления к

