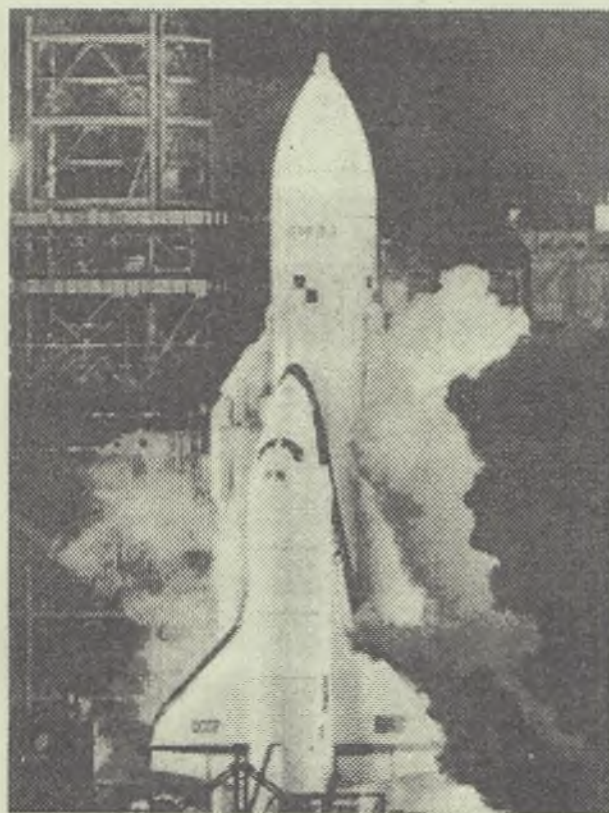




**МЕХАНИКА ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ
И
СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

**СБОРНИК ИЗБРАННЫХ ДОКЛАДОВ VI ВСЕРОССИЙСКОЙ
НАУЧНО - ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**



Министерство образования Российской Федерации
Томский государственный университет
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
Филиал Института структурной макрокинетики РАН

**Федеральная целевая программа
"Государственная поддержка интеграции
высшего образования и фундаментальной науки на 1997 - 2000 годы"**

МЕХАНИКА ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Сборник избранных докладов VI Всероссийской
научно-технической конференции

К 90-летию профессора
МИХАИЛА СЕМЕНОВИЧА ГОРОХОВА

Выпуск 2

Под редакцией к.ф.-м.н., академика Нью-Йоркской АН США
К.О. Сабденова



Издательство Томского университета
Томск - 1999

УДК 662: 662.7.62-78

Механика летательных аппаратов и современные материалы: Сборник избранных докладов VI Всероссийской научно-технической конференции /Под ред. К.О. Сабденова. - Томск: Изд-во Том. ун-та, 1999. Вып. 2. - 200с. - 100 экз.

Сборник содержит материалы докладов VI Всероссийской научно-технической конференции, посвященных научным и прикладным проблемам технологии двойного назначения. Конференция проводилась в рамках проекта «Система выявления и поддержки талантливой молодежи на основе интеграции фундаментальной науки и высшего образования на базе «Академического университета». Материалы в основном сгруппированы по работавшим на конференции 8 секциям: 1) до-, сверх-, гиперзвуковая аэродинамика; 2) ствольные системы и ракетные двигатели; 3) горение ракетных топлив и взрывчатых веществ; 4) магнитная гидродинамика и гидродинамика; 5) физика прочности и пластичности; 6) физика ударных и детонационных волн; 7) СВЧ-процессы; 8) космические летательные аппараты.

Для студентов, аспирантов и специалистов, работающих в перечисленных областях.

ОРГАНИЗАЦИОННО - ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Т.М. Платова (председатель оргкомитета), д.ф.-м.н., зав. кафедрой прочности и проектирования физико-технического факультета ТГУ;

К.О. Сабденов (зам. председателя оргкомитета), к.ф.-м.н., научный сотрудник лаборатории проблем опасных космических объектов ТГУ;

А.А. Круглов (ответственный секретарь), аспирант физико-технического факультета ТГУ.

В.В. Казаков, председатель профкома студентов ТГУ;

М.Н. Шабанов, аспирант физико-технического факультета ТГУ;

В.В. Ким, студент физико-технического факультета ТГУ.

ПРЕДСЕДАТЕЛИ СЕКЦИЙ И ИХ ЗАМЕСТИТЕЛИ

Секции 1,8: **В.И. Биматов** (председатель), к.ф.-м.н., зав. кафедрой, доцент;

В.К. Якушев, к.ф.-м.н., доцент.

Секции 2, 3, 7: **Л.Н. Ревягин** (председатель), к.ф.-м.н., зав. кафедрой, доцент;

Р.С. Буркина, к.ф.-м.н., докторант.

Секция 4: **Г.Р. Шрагер** (председатель), д.ф.-м.н., профессор; **В.А. Якутенок**, д.ф.-м.н., доцент.

Секции 5, 6: **Т.М. Платова** (председатель), д.ф.-м.н., профессор; **П.В. Макаров**, д.ф.-м.н., профессор; **В.А. Скрипняк**, д.ф.-м.н., профессор; **Н.Н. Белов**, д.ф.-м.н., профессор.

ISBN 5-7511-1165-6

© Томский государственный университет, 1999

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗВИТИЯ ПОВОРОТНЫХ МОД ДЕФОРМАЦИИ ПРИ НАГРУЖЕНИИ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ

П. В. Макаров¹, И. В. Савлевич², Д. В. Шмик¹

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
634021, г. Томск, пр. Академический, 2/1, E-mail: pvm@ispms.tsc.ru

²Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Традиционное описание деформации и разрушения твердых тел выполняется в контексте континуальной механики, использующей только усредненные макропараметры. Однако эксперименты показывают, что внутренняя структура поликристаллических материалов приводит к сложному характеру пластической деформации материалов. Это проявляется в локализации деформации в виде полос сдвига различных размеров и, наряду со сдвигом, приводит к поворотам фрагментов на мезоуровне. Чтобы описать эти процессы, материал должен рассматриваться как сложная и, как правило, иерархически организованная система структурных элементов различных масштабов [1 – 3]. Эта система эволюционирует при нагружении, и структурные элементы способны к самоорганизации.

Мы рассматриваем мезообъем материала как объем, который содержит структурную неоднородность материала. Конечно, при нагружении такой мезообъем может изучаться как классический деформируемый континуум. Но в сформулированном выше контексте должны быть развиты модели, которые позволяют описывать основные характерные явления мезоуровня: 1) очень часто в отдельном зерне активны не все системы скольжения, а только 1-2 (не 5, что является необходимым для произвольного изменения формы); 2) зарождение и развитие полос сдвига разных масштабов; 3) зарождение и развитие внутренних нескомпенсированных поворотов структурных элементов различных масштабов и появления, как результат, моментных напряжений.

Зернограничные потоки дефектов наряду с условиями стесненной деформации, имеющей место во время течения пластической деформации поликристаллических материалов, приводят к поворотам различных фрагментов материала. Причем могут поворачиваться как части зерен, так и индивидуальные зерна, а также конгломераты зерен. Величины этих поворотов меняются от доли до нескольких десятков градусов [1, 4]. Кроме того, формирование блоков, содержащих большое число зерен, происходит во время пластической деформации образцов и эти блоки способны перемещаться и поворачиваться, как целые [2 – 4].

Модель среды, учитывающая наличие в ней внутренних нескомпенсированных моментов, хорошо отражает процесс деформирования кристаллов с ограниченным числом активных систем скольжения, когда процесс accommodations в значительной мере обеспечивается поворотами различных фрагментов мезоскопического масштаба. Рассмотрение подобных моделей имеет большое значение, так как в реальности при нагружении поликристаллических

материалов очень часто активизируется всего несколько систем скольжения, а часто одна, наиболее благоприятная (схема Закса). Последовательное изучение особенностей развития локализованной деформации в рамках модели с внутренними независимыми поворотами может оказаться особенно полезным для моделирования стадии предразрушения, механизмов накопления повреждений и образования мезотрещин, когда ограниченная пластичность отдельных мезоэлементов оказывается неспособной обеспечить необходимую локальную accommodations и приспособление материала к приложенным нагрузкам идет по пути зарождения и развития несплошностей мезоскопических масштабов – мезотрещин. Стадия предразрушения всегда сопровождается процессами локализации деформации, которая существенно усиливается зарождением и развитием поворотов различных мезофрагментов. Именно повороты фрагментов способствуют раскрытию трещин, которые в этом случае обычно образуются по границам сформировавшихся блоков. Этот процесс убедительно иллюстрируют экспериментальные измерения полей перемещений, выполненные В.Е. Паниным с сотрудниками [1, 5 – 7], в которых трещины, как правило, развивались на границах блоков, а сами блоки на определенных этапах деформирования смещались в разных направлениях как целые. Подобные результаты были получены и нами при моделировании деформации поликристаллов с учетом внутренних нескомпенсированных моментов.

Здесь предлагается модель, учитывающая повороты мезофрагментов через асимметричные компоненты тензора силовых напряжений. Предполагается, что поле скоростей определяет не только перемещения, но и независимые повороты мезофрагментов. Асимметричные компоненты силовых напряжений учитываются явно только в уравнениях движения (закон сохранения количества движения) и задаются как функции накопленной пластической деформации.

Для скоростей силовых напряжений можем записать:

$$\dot{\sigma}_{ji} = 2\mu\dot{\gamma}_{(ji)} + 2\alpha\dot{\gamma}_{\langle ji \rangle}, \quad (1)$$

для $i \neq j$, где несимметричные деформации $\dot{\gamma}_{ji}$ вводятся в рассмотрение формально как некие обобщенные координаты [3], для которых $\dot{\gamma}_{(ji)}$ и $\dot{\gamma}_{\langle ji \rangle}$ – это симметричные и асимметричные компоненты соответственно и

$$\dot{\gamma}_{ji} = \dot{\epsilon}_{ji} - (\dot{\omega}_k - \dot{\Omega}_k) e_{kji}, \quad (2)$$

где $\dot{\epsilon}_{ji}$ – это обычная симметричная деформация, e_{kji} – это тензор Леви-Чевиты. Таким образом:

$$\dot{\gamma}_{(ji)} = -(\dot{\omega}_k - \dot{\Omega}_k) e_{kji}, \quad (3)$$

а приращения несимметричных составляющих тензора силовых напряжений окажутся равными

$$\dot{\sigma}_{ji}^A = -2\alpha(\dot{\omega}_k - \dot{\Omega}_k) e_{kji}. \quad (4)$$

Для случая плоской деформации получим

$$\dot{\sigma}_{12} = \dot{\sigma}_{xy} = 2\mu\dot{\epsilon}_{12} - 2\alpha(\dot{\omega}_3 - \dot{\Omega}_3), \quad (5)$$

$$\dot{\sigma}_{21} = \dot{\sigma}_{yx} = 2\mu\dot{\epsilon}_{12} + 2\alpha(\dot{\omega}_3 - \dot{\Omega}_3),$$

$$\dot{\Omega}_k = -\frac{1}{2} \frac{\partial \dot{u}_\alpha}{\partial x^\beta} e_{\alpha\beta k}, \quad \dot{\omega} = \frac{1}{2} \text{rot } \dot{u},$$

где \dot{u} – вектор скорости и $\bar{\omega}$ – вектор независимого поворота.

Предполагая, что независимые повороты пропорциональны градиенту накопленной пластической деформации ϵ_{eff}^P , мы можем записать:

$$\epsilon^P = \sqrt{3/2 \epsilon_{ij}^P \epsilon_{ij}^P}, \quad (6)$$

$$\omega_k = A_k \epsilon_{\text{eff}}^P. \quad (7)$$

Коэффициент α в (1) и (5) определяет величину отклонения силовых напряжений от симметричной упругости.

Приведем несколько примеров расчетов. На рис. 1 приведена исходная структура поликристаллических агрегатов, содержащих достаточно много зерен с близкими значениями «спинов» $\pm A_\alpha$, определяющих способность отдельных зерен к независимым поворотам («+» — «положительный» поворот по часовой стрелке; «-» — «отрицательный» поворот против часовой стрелки). Численные значения величин $\pm A_\alpha$ и параметра α варьировались для

индивидуальных зерен в пределах, близких к среднему значению для данного конгломерата, и выбирались такими, чтобы средние повороты фрагментов соответствовали экспериментальным значениям (от долей градусов до нескольких градусов для отдельных фрагментов [1, 4]). Нагружение этих образцов растяжением вдоль оси Y привело к развитию локализованной пластической деформации и поворотам конгломератов зерен (как целого) с близкими значениями спинов. Сравнение рис. 2 (изолинии инварианта пластической деформации ϵ^P) с картами исходной структуры (рис. 1) и поворотами фрагментов (рис. 3, 4) показывает, что полосы локализованного сдвига, развившиеся в направлениях, близких к направлению главных касательных напряжений, во-первых, разделяют области «положительных» и «отрицательных» поворотов. Во-вторых, полосы локализованного сдвига и границы раздела поворотов не следуют строго границам конгломератов. Так, в случае 2-го варианта (рис. 1, б – 4, б), конгломерат 2 оказался разделенным на две части, которые поворачиваются в противоположных направлениях, а наиболее мощная полоса локализованного сдвига фактически разделила образец на две части (рис. 2, б и 4, б). Точно так же в первом варианте конгломерат 3 оказался разбитым на две части полосой локализованного сдвига, однако части этого конгломерата поворачиваются на разные углы, но в одном и том же направлении (рис. 2, а и 3, а). Эти примеры качественно очень хорошо иллюстрируют эксперименты В.Е. Панина [1, 5 – 7], в которых наблюдалось образование деформационных доменов, содержащих большое количество зерен и смещающихся и поворачивающихся в разных направлениях. Повороты конгломератов зерен в разных направлениях обязательно должны в дальнейшем привести к образованию и раскрытию мезотрещин, что и показывают эксперименты [1, 6].

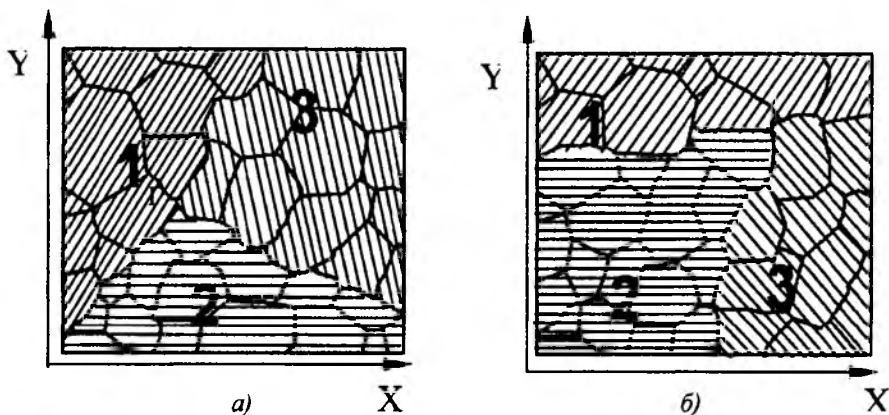





Рис. 1. Исходная структура поликристаллического материала (разный наклон штриховых линий соответствует конгломератам зерен с близкими значениями спинов:  - конгломерат 1 + A_α ;  - конгломерат 2 + A_α ;  - конгломерат 3 - A_α . В вариантах а) и б) конгломераты 1 - 3 объединяют различные группы зерен.

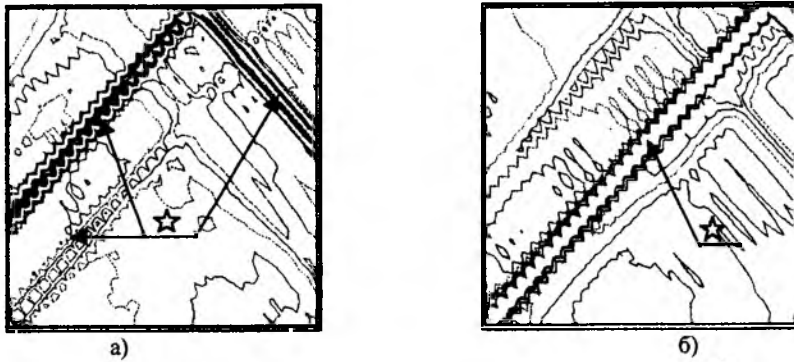


Рис. 2. Изолинии поля пластической деформации для образца (а) и образца (б); * — полоса сдвига.

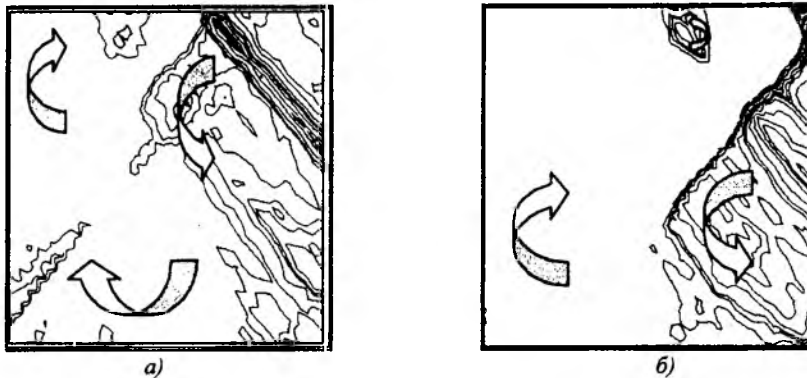


Рис. 3. Изолинии отрицательных поворотов в образцах (а) и (б) (шаг изолиний 0,0002 рад.).



Рис. 4. Изолинии положительных поворотов в образцах (а) и (б) (шаг изолиний 0,0002 рад.).

Таким образом, приведенные примеры моделируют стадию предразрушения. Пока разрушения нет, в поликристаллическом образце развивается своеобразный процесс самоорганизации полос локализованного сдвига и поворотов, который позволяет образцу сохранить сплошность при ограниченном формоизменении отдельных зерен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панин В.Е., Кортаев А.Д., Макаров П.В., Кузнецов В.М. Физическая мезомеханика материалов //Известия вузов. Физика. 1998. № 9. С. 8 – 36.
2. Физическая мезомеханика неоднородных сред и компьютерное конструирование материалов. /Под ред. Панина В.Е. Cambridge Interscience Publishing, Cambridge, 1998. P. 339.
3. Макаров П.В. //Физическая мезомеханика. 1998. №1. С. 57 - 75.
4. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. М.: Металлургия, 1986.
5. Панин В.Е. Физические основы мезомеханики пластической деформации и разрушения твердых тел //Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов. Новосибирск: Наука, 1995. Т. 1.
6. Панин В.Е. Основы физической мезомеханики //Физическая мезомеханика. 1998. Т. 1. № 1. С. 5 – 22.
7. Панин В.Е. Современные проблемы пластичности и прочности твердых тел //Изв. вузов. Физика. 1998. Вып. 41, № 1. С. 7 – 34.