

УДК 669.017:539.213

© 1999 г. В.Е. ПАНИН

ФИЗИЧЕСКАЯ МЕЗОМЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ

Представлены основы нового научного направления – физической мезомеханики материалов. Мезомеханика материалов рассматривает нагруженное твердое тело как многоуровневую самоорганизующуюся систему, в которой пластическая деформация самосогласованно развивается как последовательная эволюция потери сдвиговой устойчивости на микро-, мезо- и макромасштабных уровнях. Носителями пластического течения на мезоуровне являются трехмерные структурные элементы (мезообъемы), которые перемещаются по схеме "сдвиг + поворот". Это приводит к фрагментации материала. Разрушение есть завершающая стадия фрагментации, когда она переходит с мезоуровня на макромасштабный уровень (глобальная потеря сдвиговой устойчивости всего нагруженного материала). Механизмы деформации, их носители и соответствующие стадии кривой "напряжение-деформация" на различных масштабных уровнях являются масштабно инвариантными. Указаны актуальные проблемы и области исследования физической мезомеханики материалов.

1. Введение. Традиционное описание пластической деформации и разрушения твердых тел проводится на основе двух подходов: механики сплошной среды, теории дислокаций. Механика сплошной среды объясняет поведение материала под нагрузкой с помощью интегральных характеристик среды. В рамках такого подхода внутренняя структура материала не учитывается, тензоры напряжений и деформаций являются симметричными, пластическая деформация осуществляется только трансляционным движением дефектов под действием внешних приложенных напряжений. Кривая пластического течения получается путем расчета деформационного упрочнения выше предела текучести материала.

Использование феноменологического подхода в механике сплошной среды физически и математически вполне корректно, однако он пригоден только для определения интегральных свойств макрооднородной среды. Теория дислокаций описывает микроскопическое поведение деформируемого твердого тела. На основе изучения элементарных актов пластической деформации ставится задача вскрыть механизмы зарождения пластических сдвигов и трещин, объяснить поведение дислокационных ансамблей и дать физическую интерпретацию феноменологических закономерностей механики сплошной среды. В области микроскопического описания некоррелированного поведения различного рода дефектов в деформируемом твердом теле теория дислокаций достигла больших успехов.

Многочисленные попытки органически связать теорию дислокаций и механику сплошной среды до сих пор были безуспешными. Долгое время казалось, что это обусловлено чисто математическими трудностями макроскопического представления статистических ансамблей деформационных дефектов. Однако в последнее время стало очевидным, что наше понимание элементарного акта пластической деформации было не совсем верным и определялось ошибочной схемой. Это приводило к неверной интерпретации поведения ансамблей деформационных дефектов, а также феноменологических закономерностей механики сплошной среды.

Неправильность наших представлений была связана с тем, что за элементарный акт пластической деформации принималось сугубо трансляционное движение любого деформационного дефекта (например, кристаллографический сдвиг), а условие сохранения сплошности представлялось как определенная самоорганизация только трансляционных мод деформации. Так, все известные в литературе схемы пластической деформации структурно-неоднородной среды (Закса, Кохендорфера, Бишопа – Хилла, Эшби, Тейлора и др.), несмотря на отличия друг от друга, строятся как различные комбинации кристаллографических сдвигов и рассматривают, таким образом, только трансляционный характер деформации. Это неадекватно действительности и в принципе не позволяет вскрыть природу источников дислокаций, понять закономерности самоорганизации дислокационных ансамблей.

Последние два десятилетия в Томске эффективно развивается новое научное направление – физическая мезомеханика материалов [1–12]. Оно возникло на стыке механики сплошной среды, физики пластичности и прочности (теории дислокаций) и физического материаловедения.

Принципы физической мезомеханики качественно отличаются от традиционных подходов в механике сплошной среды и теории дислокаций. Это – новая парадигма, которая широко дискутируется на ежегодных международных конференциях, организуемых в Томске Институтом физики прочности и материаловедения СО РАН. На конференции "Mesofracture'96" принято решение проводить международные конференции по физической мезомеханике в различных странах. Конференция "Мезомеханика'98" проведена в Тель-Авиве (Израиль). Следующие конференции пройдут в Берлине (Германия, 1999 г.) и Сиане (КНР, 2000 г.). В Томске начал издаваться на русском и английском языках международный журнал "Физическая мезомеханика", совместно со Штутгартским университетом создан международный центр по физической мезомеханике материалов.

2. Основные положения физической мезомеханики материалов. Проведенные исследования позволяют сформулировать следующие основные положения физической мезомеханики материалов [8, 9]:

1. Нагруженное твердое тело есть сильно неравновесная самоорганизующаяся многоуровневая система. Его пластическое течение развивается как синергетический процесс эволюции потери сдвиговой устойчивости на различных масштабных уровнях: микро, мезо и макро.

2. На микромасштабном уровне происходит потеря сдвиговой устойчивости кристаллической решетки в локальных зонах микроконцентраторов напряжений. Основной дефект кристаллической решетки – дислокация является результатом локального структурного превращения в кристаллической решетке в поле градиента микроконцентратора напряжений. Ядро дислокации – это фрагмент другой структуры, более высокоэнергетической по сравнению с исходной кристаллической решеткой.

3. На мезомасштабном уровне происходит потеря сдвиговой устойчивости в локальных зонах нагруженного образца как целого. Основным мезодефектом является мезополоса, рождающаяся в локальных зонах мезоконцентраторов напряжений и распространяющаяся в направлениях максимальных касательных напряжений τ_{\max} независимо от кристаллографической ориентации решетки.

4. Основным носителем пластического течения на мезоуровне является трехмерный мезообъем: ячейки дислокационной субструктуры, деформационные домены, субзерна, зерна, их конгломераты и др. Их движение характеризуется схемой: "сдвиг + поворот".

5. Кристаллический материал, способный лишь к трансляционным сдвигам, на мезоуровне формирует иерархию диссипативных субструктур, которые осуществляют деформацию по схеме "сдвиг + поворот". Данный процесс приводит к фрагментации материала на мезоуровне.

6. Разрушение есть проявление глобальной потери сдвиговой устойчивости нагруженного образца, когда возникает макроконцентратор напряжений, обуславливаю-

щий переход фрагментации образца с мезоуровня на макроуровень. Две макрополосы локализованной деформации (параллельные или в сопряженных направлениях τ_{\max}) распространяются через все сечение образца, реализуя предельный случай фрагментации образца на макроуровне – разделение его на 2 части.

7. Механизмы пластического течения, их носители и соответствующие стадии кривой "напряжение – деформация" являются масштабно инвариантными (принцип скейлинга).

8. Методы физической мезомеханики позволяют ввести всю информацию о нагруженном материале в компьютер и решать обратные задачи компьютерного конструирования материалов с заданными механическими свойствами.

3. Актуальные области исследования в физической мезомеханике материалов. Физическая мезомеханика материалов переживает начальную стадию своего становления и научного обоснования. На этой стадии основополагающими являются следующие области исследования.

3.1. Методология описания деформируемого твердого тела на мезомасштабном уровне. В основе традиционных подходов к описанию деформируемого твердого тела как в механике сплошной среды (макроуровень), так и в теории дислокаций (микроуровень) лежат силовые модели. Принято считать, что по достижении предела текучести макрочастицы в некоторой локальной области среднее приложенное напряжение вызывает пластическое течение в этой области, что сопровождается деформационным упрочнением этой части макрообъема.

В физической мезомеханике развивается качественно иная методология, основанная на концепции масштабных уровней потери сдвиговой устойчивости в локальных зонах концентраторов напряжений. Среднее приложенное напряжение в принципе не способно осуществить пластическое течение макрообъема нагруженного твердого тела, который макроскопически является сдвигоустойчивым. Пластические сдвиги возникают сугубо очагово в локальных зонах концентраторов напряжений, где исходный кристалл теряет свою сдвиговую устойчивость и перестраивается в другую структуру. Эволюция потери сдвиговой устойчивости нагруженного твердого тела на различных масштабных уровнях завершается его разрушением.

Синергетическая методология физической мезомеханики требует выяснения следующих вопросов:

природа концентраторов напряжений и характер соответствующих градиентов напряжений в нагруженном твердом теле с различной внутренней структурой и в различных условиях нагружения;

механизм неравновесного структурного превращения кристалла в локальных зонах концентраторов напряжений и их градиентов;

микроскопическая природа мезодефектов, распространяющихся в направлениях τ_{\max} независимо от кристаллографической ориентации материала;

типы трехмерных мезообъемов как основных носителей пластического течения на мезомасштабном уровне и закономерности их движения;

формирование иерархии диссипативных субструктур как процесс самоорганизации в деформируемом твердом теле;

физическое содержание, математическая формулировка и практическое применение в задачах физической мезомеханики принципа скейлинга в иерархии масштабных уровней потери сдвиговой устойчивости;

механизм разрушения как завершающая стадия потери сдвиговой устойчивости в нагруженных материалах на макроуровне, когда аккомодационная способность материала на более низких масштабных уровнях исчерпана.

Перечисленные вопросы по своей сущности концептуальны и являются первостепенными в обосновании физической мезомеханики материалов.

3.2. Элементная база масштабных уровней в деформируемом твердом теле. Принцип масштабной инвариантности приводит к принципиально важному заключению: существует элементная база масштабных уровней, которая позволяет любой вид

деформации представить в виде определенного сочетания унифицированных элементов (пластических сдвигов) различных масштабных уровней [7]. Это дает основу для построения четкого алгоритма математического представления пластического течения материала с любой внутренней структурой и для любых условий нагружения. В каждом конкретном случае ведущим является определенный масштабный уровень (и определенные его элементы). Элементы других масштабных уровней являются либо аккомодационными, либо отсутствуют.

Классические работы теории дислокаций с использованием просвечивающей электронной микроскопии были выполнены в условиях, когда ведущим являлся микромасштабный уровень. Интерпретация соответствующих механизмов деформации представлена полностью в терминах зарождения, движения и взаимодействия дислокаций. Попытки распространить подобную интерпретацию на все возможные случаи пластической деформации натолкнулись на непреодолимые трудности. В настоящее время стало понятным, что ведущими могут быть и мезо- и макромасштабный уровни. В этих случаях интерпретация должна проводиться на основе деформационных дефектов мезо- и макромасштабного уровней (мезо- и макрополосы деформации, дисклинации и др.), а движение дислокаций следует рассматривать как аккомодационный процесс. Типичными примерами ведущей роли мезоуровня являются: деформация высокопрочных сплавов [12], материалов с нано- и субмикроструктурной структурой [13], поверхностно-упрочненных материалов [14–16], растяжение образцов, предварительно деформированных прокаткой или волочением [3, 17], все виды усталостного разрушения [7, 18]. Макромасштабный уровень является ведущим при деформации сварных конструкций, образцов с отверстиями, выточками и др. [3, 4].

В рамках физической мезомеханики материалов проводится систематическая работа по составлению таблиц элементной базы масштабных уровней деформации для широкого класса материалов и различных условий нагружения. Такие данные будут неценимым справочным материалом для конструкторов и материаловедов, занимающихся компьютерным конструированием материалов новых поколений.

3.3. Роль внутренней структуры среды в физической мезомеханике материалов. Данный вопрос является ключевым для построения моделей физической мезомеханики. В структурно-неоднородной среде любой сдвиг в определенном структурном элементе сопровождается его стесненным поворотом на более высоком структурном уровне. В деформируемом материале возникает поле поворотных моментов, которое приводит в самосогласованное движение всю иерархию структурных уровней среды. Классификация структурных уровней деформации лежит в основе мезомеханики структурно-неоднородной среды.

Физическая мезомеханика материалов вскрыла принципиально новый аспект в проблеме внутренних границ раздела. Традиционно любая граница раздела в структурно-неоднородной среде рассматривается лишь как дополнительное сопротивление деформации [19]. Исследования на мезоуровне показали, что граница раздела двух сред с различными модулями упругости в нагруженном состоянии теряет свою сдвиговую устойчивость, и в ней возникает осцилляция локальных концентраторов напряжений [20, 21]. Такие локальные концентраторы напряжений являются источниками деформационных дефектов: дислокаций (на микроуровне), мезополос деформации (на мезоуровне), макрополос деформации и трещин (на макроуровне). Указанный аспект имеет не только фундаментальное значение для понимания природы пластичности и прочности твердых тел. Он является определяющим в технологиях создания новых конструкционных материалов, многослойных материалов для электроники, нанесения упрочняющих и защитных покрытий, сварки и наплавки и др.

Физическая мезомеханика структурно-неоднородных сред является одним из основных стратегических направлений развития механики деформируемого твердого тела.

3.4. Методы и средства исследования в физической мезомеханике материалов.

Новая область науки потребовала разработки принципиально новых методов и средств исследования. Эффекты мезомасштабного уровня необходимо измерять с высокой разрешающей способностью и в протяженных областях нагруженного твердого тела. Наибольшее распространение получили методы обработки оптических изображений поверхности нагруженных материалов и конструкций на мезо- или макроуровне.

Первым был разработан модифицированный метод лазерной спекл-интерферометрии [22, 23]. Он дает возможность измерять поля векторов смещений на всей поверхности нагруженных образцов с разрешением 1 вектор/мм². Это позволяет исследовать пограничные области деформации между мезо- и макромасштабными уровнями. В последующем данный подход был развит в работах [24, 25].

В начале 90-х гг. в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН впервые для изучения механизмов деформации на мезоуровне стали применяться методы технического зрения, позволяющие резко увеличить разрешающую способность обработки оптических изображений и расширить диапазон исследуемых мезомасштабных уровней [26]. Разработаны автоматизированные оптико-телевизионные измерительные комплексы серии TOMSC, способные оперативно выполнять обработку больших объемов видеоинформации при исследовании образцов *in situ*. Это позволяет измерять поля векторов смещений на мезоуровне с разрешением 5×10^5 точек на 1 мм², рассчитывать локальные механические характеристики, диагностировать состояние нагруженных конструкций на стадии предразрушения задолго до появления видимых микротрещин. В настоящее время стоят задачи разработки специализированных комплексов серии TOMSC для тестирования материалов и конструкций в различных условиях нагружения: высокие или низкие температуры, знакопеременное нагружение, дистанционная диагностика и др.

Принцип скейлинга позволил вскрыть диагностические возможности такой характеристики, как фрактальная размерность [27, 28]. В настоящее время проводится большой комплекс теоретических и экспериментальных работ по использованию фрактальной размерности для аттестации состояния деформируемых материалов на мезоуровне.

3.5. Компьютерное конструирование материалов на основе физической мезомеханики. Уравнения физической мезомеханики структурно-неоднородных сред позволяют адекватно ввести в компьютер всю информацию о материале, осуществить моделирование его нагружения в различных условиях и сконструировать материал с заданными механическими свойствами. Методология компьютерного конструирования предусматривает следующие этапы исследований:

1. Физическая постановка обратной задачи.
2. Построение модели алгоритма физической мезомеханики.
3. Реализация модели в терминах иерархии структурных уровней деформации.
4. Выбор физико-математических методов и компьютерных технологий.
5. Адаптация физико-математических методов и компьютерных технологий к модели задачи.
6. Решение прямых задач в рамках выбранных моделей, сопоставление с экспериментом.
7. Формулировка и построение алгоритма обратной задачи.
8. Оптимизация параметров конструируемого материала в рамках обратной задачи.

В отличие от широко распространенных задач компьютерного моделирования, где решаются прямые задачи, алгоритм решения обратных задач оказывается значительно более сложным и требует привлечения мощных быстродействующих компьютерных станций для обработки больших объемов информации. Имеющийся арсенал физической мезомеханики структурно неоднородных сред пока позволяет решать только простейшие обратные задачи компьютерного конструирования материалов. В

этом направлении в ближайшем будущем предстоит огромная совместная работа физиков, механиков, химиков, материаловедов, специалистов в области информатизации и компьютерных технологий. XXI век будет веком вычислительных технологий, и компьютерное конструирование материалов займет в нем достойное место как основная стратегия разработки материалов новых поколений.

4. Концентраторы напряжений и механизмы деформации на мезомасштабном уровне. В 1998 г. вышел ряд обзоров по физической мезомеханике с анализом известных механизмов и закономерностей деформации на мезоуровне [8–12]. Поэтому в настоящем обзоре приведем только самые последние результаты, имеющие принципиально важное значение для экспериментального обоснования методологии физической мезомеханики материалов.

4.1. Базовый концентратор напряжений в месте приложения к деформируемому твердому телу внешней нагрузки и волны переключений на мезоуровне. Традиционные механические характеристики материалов определяются в условиях, когда ведущим является микромасштабный уровень пластической деформации. Поэтому принято считать, что деформируемый образец нагружается однородно по всему объему рабочей части, и влияние захвата испытательной машины как фактора неоднородности нагружения образца исключается. Однако на самом деле это не так. Сопряжение в захвате неподвижного материала головки образца и пластически деформируемой рабочей части создает на их границе мощные концентраторы напряжений [20]. Они являются местом зарождения потоков дефектов по поверхности образца, мезо- и макрополос деформации внутри образца, известных в литературе как полосы Людерса.

Следует подчеркнуть, что полосы Людерса в традиционном понимании проявляются в условиях, когда дислокационная деформация на микромасштабном уровне заблокирована. В противном случае высокая подвижность дислокаций на микроуровне эффективно диссипирует зарождающиеся на захвате мезополосы деформации, и последние методами световой микроскопии не выявляются.

Однако применение методов спекл-интерферометрии обнаруживает распространение от захвата фронтов Людерса в поле векторов смещений во всех случаях, когда на кривой течения имеется площадка текучести или стадия легкого скольжения [2–4, 29–31]. В сдвигонеустойчивых монокристаллах, у которых деформация осуществляется механизмом термоупругого мартенситного превращения, около обоих захватов зарождаются два фронта деформации, движущиеся навстречу друг другу. Их можно многократно перемещать в прямом и обратном направлениях, циклически нагружая и разгружая образец.

Анализ имеющихся в литературе экспериментальных и теоретических результатов позволяет полагать, что в месте приложения внешней нагрузки к деформируемому материалу всегда возникает базовый концентратор напряжений, который оказывает влияние на развитие пластической деформации на всех ее масштабных уровнях. Покажем это на примере мезомасштабного уровня при одноосном растяжении [14–16, 18, 32].

Известно [33], что в нагружаемом образце дислокации зарождаются на поверхности¹. Если специальной обработкой упрочнить поверхность и заблокировать источники дислокаций, то микромасштабный уровень деформации можно подавить. Тогда при нагружении образца около захватов следует ожидать зарождение мезополос деформации, которые будут без диссипации распространяться вдоль образца по направлениям максимальных касательных напряжений. Это действительно было обнаружено в [14–16] при растяжении плоских образцов стали 65Х13 и 12ХМФ1, подвергнутых для поверхностного упрочнения ионному азотированию в плазме тлеющего разряда. Экспериментальное исследование механизмов деформации поверхност-

¹ Связь природы поверхностных источников с влиянием захватов как базовых концентраторов напряжений будет рассмотрена в отдельной работе.

но-упрочненных образцов осуществлялось в [14–16] с помощью оптикотелевизионного комплекса TOMSC-1 [26]. Наблюдение процессов, развивающихся на границе раздела "упрочненный поверхностный слой – подложка" проводилось на боковой грани плоских образцов, которая была не упрочнена.

На фиг. 1 приведена картина распространения мезополосы вдоль образца стали 65X13 (на боковой неазотированной поверхности) по мере увеличения степени деформации ($a - 0,7\%$; $b - 0,9\%$; $c - 1,8\%$). Видно, что от захвата вдоль образца распространяется волна переключений, в которой смежные трехгранные призмы между мезополосами испытывают повороты противоположного знака. Поскольку основания трехгранных призм жестко связаны с упрочненной поверхностью образца, повороты испытывают вершины призм, которые геометрически совпадают с поперечными микротрещинами в поверхностно-упрочненном слое и могут свободно перемещаться. В случае растяжения поверхностно-упрочненной стали 12ХМФ1, которая является более мягкой, чем сталь 65X13, распространение вдоль образца мезополосы в виде волны переключений приводит к волнообразному искривлению формы первоначально плоского образца. Это является наглядной иллюстрацией возможности распространения от захвата локализованных полос деформации в виде волн переключения.

Теория распространения в деформируемом образце волн переключения как осциллирующее движение трехмерных мезообъемов по схеме "сдвиг + поворот" приведена в [3, 4]. Волновое уравнение для скорости V распространения локализованного сдвига и связанного с ним материального поворота ω_z мезообъема имеют соответственно вид:

$$\Delta V - \frac{1}{c_t^2} \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{l^{2D_f}} g^{ij} \eta_i^\alpha (D_\mu \eta_j^\alpha) \right) - \text{grad } g^{ij} \eta_i^\alpha \dot{\eta}_j^\alpha \quad (1)$$

$$\Delta \omega_z - \frac{1}{c_t^2} \frac{\partial^2 \omega_z}{\partial t^2} = \text{rot } \frac{1}{l^{2D_f}} g^{ij} \eta_i^\alpha (D_\mu \eta_j^\alpha) \quad (2)$$

где c_t – предельная скорость распространения поля дефектов в структурно неоднородной среде; η – репер мезообъема; l – его линейный размер; D_f – фрактальная размерность; $D_\mu = \partial_\mu - \lambda^a B_\mu^a$ – ковариантная производная; $\eta^{j\alpha} = \eta_i^\alpha g^{ij}$.

Наличие зависящей от координат и времени правой части в волновых уравнениях (1), (2) свидетельствует о том, что осцилляции "сдвигов – поворотов" мезообъемов в структурно-неоднородной среде являются нерегулярными и затухающими. Это вполне естественно, так как в диссипативной среде волновой процесс в общем случае должен быстро затухать. Однако если правые части (1), (2) близки к нулю, то волна переключений может распространяться с малым затуханием. Это условие имеет вид

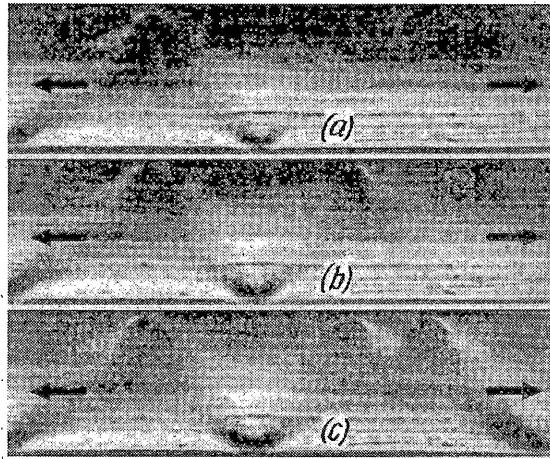
$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{l^{2D_f}} g^{ij} \eta_i^\alpha (D_\mu \eta_{j\alpha}) \right) \cong \text{grad } g^{ij} \eta_i^\alpha \dot{\eta}_{j\alpha} \quad (3)$$

$$\text{rot } \frac{1}{l^{2D_f}} g^{ij} \eta_i^\alpha (D_\mu \eta_j^\alpha) \cong 0 \quad (4)$$

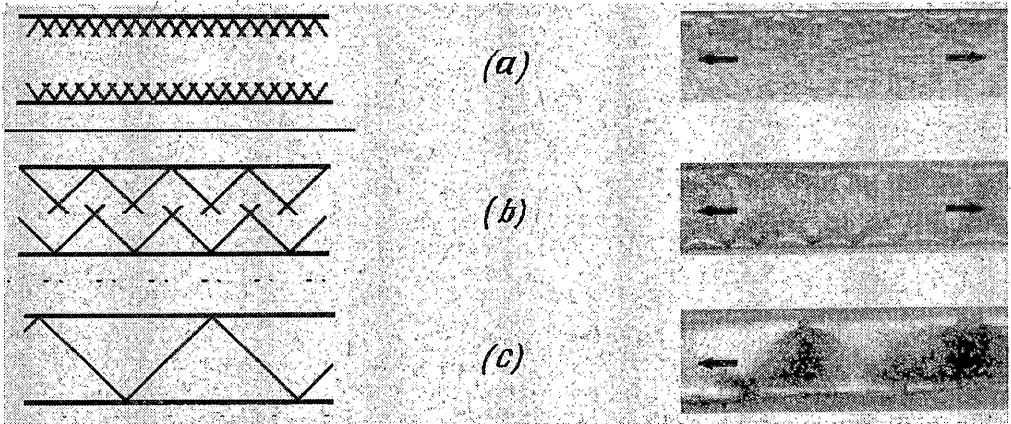
Из уравнений (3), (4) следуют условия распространения волн переключения в структурно-неоднородной среде.

(а) Левая часть уравнения (3) характеризует скорость потока дефектов в распространяющейся мезополосе Людерса. Правая часть (3) отражает градиент источника дефектов (как локального концентратора напряжений) в голове мезополосы Людерса, который определяет ее распространение².

² Напомним, что в голове полосы Людерса всегда возникает концентратор напряжений, который определяет ее распространение по образцу [33].



Фиг. 1



Фиг. 2

Условием непрерывного распространения волны переключения вдоль образца является постоянство скорости дефектов в распространяющейся мезополосе. Соответственно равенство (3) требует стабильного поддержания критического значения концентратора напряжения и связанного с ним источника дефектов в голове мезополосы. *b)* Условием "ламинарного" потока дефектов в мезополосе, исключающего его диссипацию в структурно-неоднородной среде, является равенство (4), то есть равенство нулю ротора потока дефектов в мезополосе. В условиях распространения сильно локализованной мезополосы вдоль направления τ_{\max} независимо от кристаллографической ориентации среды и подавления квазиоднородного движения дислокаций на микромасштабном уровне генерируемая захватом волна переключения может распространяться вдоль образца без заметной диссипации. Распространение вдоль деформируемого образца волн переключений определяется попеременным возникновением на противоположных поверхностях деформируемого образца концентраторов изгибающих напряжений, которые переключают распространение фронта волны по

сопряженным направлениям максимальных касательных напряжений. Ламинарные потоки дислокаций или мартенситных ламелей на стадии легкого скольжения, вызывая на боковых поверхностях изгибающие моменты как встречные концентраторы напряжений, также способны обеспечить распространение вдоль образца волн переключений. Это объясняет результаты [28–31] распространения от захвата фронтов деформации в условиях развития на кривой $\sigma - \epsilon$ площадки текучести или стадии легкого скольжения.

В свете сказанного особый интерес представляет эксперимент [34] по деформации сжатием образцов моно- и поликристаллов сплава Al–3 вес.% Cu в виде параллелепипеда в щелевом канале пресс-формы. Ширина щелевого канала была равна ширине образца, а длина канала превышала его длину. При приложении к образцу бокового сжимающего напряжения он удлинялся вдоль щелевого канала. При этом все четыре боковые поверхности образца равномерно нагружались сжимающими напряжениями.

В данном эксперименте осуществлялось максимально однородное нагружение образца. Вместе с тем, исключались зарождение на боковых поверхностях дислокаций и связанная с ними деформация на микромасштабном уровне. Как следствие, вся деформация образца развивалась на мезомасштабном уровне. На боковых поверхностях зарождались мезополосы, которые распространялись в образце по сопряженным направлениям максимальных касательных напряжений. Это является убедительным подтверждением развиваемого в настоящей работе тезиса, что любой способ нагружения деформируемого образца создает базовый концентратор напряжений, способный генерировать на мезоуровне полосы локализованной деформации, распространяющиеся вдоль образца в виде волн переключений.

Наконец, отметим, что при знакопеременном изгибе плоских образцов любых материалов от неподвижного захвата всегда распространяются вдоль поверхностного слоя волны переключений [2–4, 18]. Поскольку при знакопеременном нагружении деформация всегда сильно локализована и развивается на мезомасштабном уровне, волны переключений распространяются с малой диссипацией. Аналогичные результаты наблюдаются при локальном приложении деформирующей нагрузки в условиях листовой прокатки: в прокатываемом материале развиваются мезополосы, распространяющиеся в виде волны переключений³.

Рассмотренные результаты позволяют сделать заключение, что в деформируемом материале в месте приложения внешней нагрузки всегда возникает базовый концентратор напряжений, который играет принципиально важную роль в развитии деформации на мезомасштабном уровне. Это обстоятельство нужно учитывать при построении моделей в физической мезомеханике:

4.2. Осциллирующие концентраторы напряжений на границах раздела в поверхностно-упрочненных материалах и связанные с ними механизмы деформации на мезоуровне. Теоретическими расчетами [20] показано, что на границе раздела двух сред с различными механическими характеристиками при нагружении возникает осцилляция локальных напряжений, которые могут существенно превышать средние приложенные напряжения. На микромасштабном уровне такие осциллирующие концентраторы напряжений могут быть источниками дислокаций [3, 4], на мезомасштабном уровне – источниками мезополос деформации [14–16, 32]. Подобные осциллирующие термические напряжения возникают на границе раздела "тонкая пленка – подложка" при различии коэффициентов термического расширения компонентов [35]. Период осцилляции возрастает при увеличении толщины пленки на подложке. Рассмотрим основные закономерности влияния тонких пленок на поверхности и поверхностно-упрочненных слоев на развитие в приповерхностных слоях механизмов деформации мезомасштабного уровня.

³ См. Губернаторов В.В., Соколов Б.К., Владимиров Л.Р. и др. Течение металла в очаге деформации и образование деформационных полосовых структур // Тез. докл. науч. сессии ИФМ УрО РАН. Екатеринбург. 1998. С. 42–43.

В [32] выявлена существенная роль окисной пленки в деформации алюминия. В поверхностном слое алюминия под окисной пленкой на фоне однородного пластического течения (микромасштабный уровень) в локальных зонах возникает дополнительная деформация в виде сопряженных мезополос, ориентированных под углом 45° к оси нагружения. Они распределены квазипериодически вдоль образца, образуя стационарную поверхностную волну деформации с длиной $\lambda \sim 120$ мкм. Это является проявлением возникновения на границе раздела "окисная пленка – алюминий" осциллирующих концентраторов напряжений мезомасштабного уровня.

Сопряжение поверхностного слоя, испытывающего дополнительную деформацию, с нижележащим слоем проявляется в виде появления на боковой поверхности образца продольных мезополос экструдированного материала протяженностью 200–400 мкм. Образец разбивается на продольные мезообъемы, каждый из которых характеризуется определенной степенью деформации. Их сопряжение формирует еще одну стационарную волну деформации с длиной $\lambda \sim 4,8$ мм. Данная стационарная волна была впервые обнаружена в [36, 37] методом лазерной спекл-интерферометрии.

Таким образом, наличие на поверхности образца алюминия окисной пленки, которая вызывает продольное расслоение деформируемого образца, приводит к эффекту гофрирования поверхности образца как результат сопряжения продольных полос с разной степенью деформации. Этот эффект может быть описан только на основе физической мезомеханики. Он лежит в основе возникновения в поверхностных слоях микротрещин, фрагментации поверхностных слоев на мезоуровне [38], износа в парах трения и др.

Еще более ярко обнаруженный эффект проявляется при деформации плоских образцов стали 65X13 и 12ХМФ1, на поверхности которых имеется упрочненный слой [14–16]. Релаксация ликовых значений осциллирующих напряжений на границе раздела "упрочненный слой – подложка" происходит путем образования квазипериодической системы поперечных микротрещин в упрочненном слое и сопряженных мезополос локализованной деформации в подложке. В соответствии с теорией [35] с увеличением толщины упрочненного слоя частота распределения микротрещин и сопряженных мезополос уменьшается.

Взаимное пересечение мезополос формирует в объеме мезоструктуру, характер которой зависит от глубины распространения мезополос от поверхности внутрь образца. Можно выделить три варианта такого процесса, фиг. 2 [15]:

(а) *Тонкие упрочненные слои (~ 20 мкм).* Мезополосы и мезоструктура формируются только в поверхностных слоях, а основной объем материала ведет себя как в неупрочненном образце, фиг. 2, а;

(в) *Средняя толщина упрочненных слоев (~ 50 мкм).* Мезополосы распространяются с обеих сторон образца до взаимной встречи. Мезоструктура охватывает весь объем образца, фиг. 2, в;

(с) *Большая толщина упрочненных слоев (~ 100 мкм).* Около захвата зарождается и распространяется в объеме образца одна мезополоса локализованной деформации, испытывая на упрочненных поверхностных слоях полное внутреннее отражение (рис. 1). Каждое такое отражение сопровождается образованием в упрочненном слое поперечной трещины, фиг. 2, с.

В областях сформировавшейся мезоструктуры наблюдается движение отдельных мезообъемов как целого по схеме "сдвиг + поворот", вдавливание в образец поверхностных мезообъемов в виде треугольных призм. Экструзия основного материала между вдавливанием призм образует стационарную поверхностную волну [14]. Локализация этого процесса в одном из сечений сопровождается сильным поворотом треугольной призмы и образованием трещины на ее границе. Эволюция развития трещины завершается разрушением образца.

Осцилляция локальных напряжений на границе раздела двух сред проявляется по-разному для разных сочетаний материалов. В хрупком покрытии осцилляция напряжений на границе раздела проявляется в виде системы параллельных микротрещин.

Если сопрягаются пластичные среды с различными механическими характеристиками, то вместо системы параллельных трещин в одной из сред возникает система параллельных мезополос локализованной деформации [3].

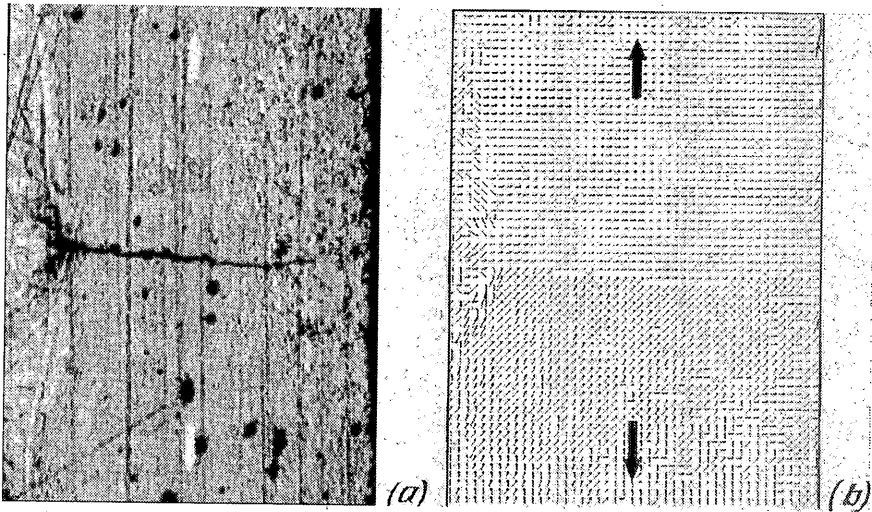
Наконец, приведем интересные данные [39] в подтверждение возникновения на границе раздела "покрытие – подложка" опасных концентраторов напряжений (фиг. 3 (a – оптическое изображение боковой грани образца Х120; b – поле векторов смещений)). В [39] исследованы механизмы деформации на мезоуровне низкоуглеродистой стали с направленным на поверхность слоем высоколегированной стали. Электроннолучевая наплавка позволяла получить высокие характеристики наплавленного слоя и границы его раздела с подложкой. В то же время определенная пластичность наплавленного слоя давала возможность проследить кинетику зарождения и распространения трещины в покрытии.

Как видно из фиг. 3, трещина при растяжении образца с наплавленным покрытием зарождается на границе их раздела в месте мезоконцентратора напряжений, который одновременно формирует в подложке две мезополосы локализованной деформации по сопряженным направлениям τ_{\max} . Оба процесса оказываются взаимосвязанными, что определяет ступенчатый характер их развития. Воздействием на границу раздела "покрытие – подложка" можно существенно релаксировать осциллирующие концентраторы напряжений и повышать механические характеристики поверхностно-упрочненных материалов. Что касается тонкой структуры мезополос и механизма их образования, то в настоящее время эти вопросы находятся в стадии интенсивного экспериментального исследования.

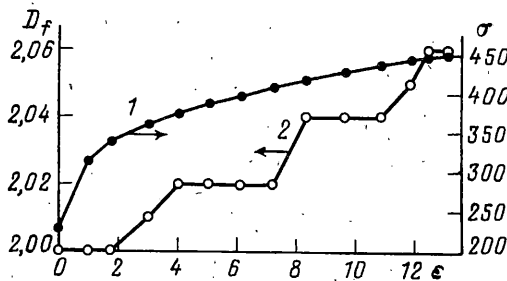
Картина развития мезополос локализованной пластической деформации при растяжении плоских образцов низкоуглеродистой стали, подвергнутых предварительной прокатке на 80% при 293 К, подробно изучена в [17]. Показано, что каждая мезополоса, разделяющая два соседних мезообъема, состоит из нескольких параллельных друг другу подполос. Ширина этих подполос составляет микрометры, длина – десятки микрометров. Это означает, что локализованная в мезополосе пластическая деформация осуществляется в пределах этой полосы дискретно, то есть в пределах исходной мезополосы возникает иерархия масштабных уровней деформации. Мезообъемы, разделяемые мезополосой локализованной деформации, смещаются практически во взаимно противоположных направлениях.

Процесс пластической деформации, как релаксационный, может осуществляться только локализованно в тех местах, где под действием концентраторов напряжений происходит потеря сдвиговой устойчивости материала. Поскольку с концентраторами напряжений связаны моментные напряжения, их релаксация, естественно, вызывает фрагментацию материала. Хотя механизм этой фрагментации пока неясен, можно предполагать несколько его вариантов. Например, в результате локальной деформации на мезоуровне образуется узкая подполоса, и в этом происходит релаксация внутренних напряжений. При этом возникает концентратор напряжений в соседнем участке, где, в свою очередь, реализуется пластическая деформация, и образуется очередная подполоса. Таким образом, формируется мезополоса локализованной деформации как совокупность последовательно возникающих дискретных на мезоуровне подполос.

Возможна и другая природа фрагментации крупной мезополосы. При достижении достаточно больших напряжений в ходе пластической деформации происходит, как аккомодационный, процесс, подобный динамической полигонизации, в результате которого крупная мезополоса разбивается на совокупность более мелких подполос. Качественно этот механизм аналогичен образованию субструктуры при полигонизации на микроуровне. Но механизм этой полигонизации связан не с образованием дислокационных стенок, а с эффектами поляризации дислокационной подсистемы типа [40]. В общем случае тонкая структура мезополос может быть самой разнообразной в зависимости от типа материала и условий его нагружения [3, 4].



Фиг. 3



Фиг. 4

5. Принцип масштабной инвариантности при пластической деформации и разрушении твердых тел. В общем случае пластическая деформация нагруженного материала начинается на микромасштабном уровне, который описывается трехстадийной кривой "напряжение – деформация".

В основе трехстадийности кривой $\sigma - \epsilon$ лежат три типа сдвигов [7]:

- сдвиг с несстенным материальным поворотом и связанная с ним стадия легкого скольжения;
- сдвиг со стесненным материальным поворотом, обуславливающим множественное скольжение и стадию линейного упрочнения;
- сдвиг с кристаллографическим поворотом структурного элемента деформации, обуславливающий формирование вихревой диссипативной структуры и ответственный за параболическую стадию кривой $\sigma - \epsilon$.

Наряду с этим на интегральной кривой $\sigma - \epsilon$ наблюдаются еще две самостоятельные стадии IV и V. Стадия IV слабого деформационного упрочнения классифицирована как самостоятельная и подробно изучена в [41] на основе анализа дислокационных субструктур. Стадия V падения кривой $\sigma - \epsilon$ связана с образованием шейки и также была классифицирована как самостоятельная в [9, 13]. Анализ механизмов деформации на стадиях IV и V в [7, 9] методами физической мезомеханики привел к заключению, что эти стадии связаны соответственно с мезо- и макромасштабными уровнями потери сдвиговой устойчивости нагруженного твердого тела и, в свою очередь, имеют собственную трехстадийную структуру. Если деформация мезомасштабного уровня развивается на фоне интенсивной деформации микромасштабного

уровня, то интегральные значения напряжения на IV-ой стадии кривой $\sigma - \epsilon$ не выявляют ее внутренней трехстадийной структуры. В этом случае она проявляется только как модуляция на мезоуровне дислокационного течения и может быть выявлена измерением дифференциальных характеристик. В [42] в качестве такой дифференциальной характеристики была использована фрактальная размерность D_f поверхности, характеризующая степень ее шероховатости. На фиг. 4 приведены кривые 1 - σ [МПа] - ϵ [%] и 2 $D_f - \epsilon$ для поликристаллических образцов листового сплава Д16 в состоянии поставки. Видно, что протяженная IV-ая стадия кривой $\sigma - \epsilon$ характеризуется дискретным набором площадок $D_f - \epsilon$, отражающих трехстадийность изменения мезосубструктуры материала на данной стадии деформации.

Если подавить квазигомогенную деформацию микромасштабного уровня и инициировать пластическое течение сразу на мезоуровне, то стадии мезомасштабного уровня отчетливо проявляются и на диаграммах "напряжение - деформация":

- одиночное движение мезополос (стадия легкого скольжения);
- множественное движение мезополос (стадия линейного упрочнения);
- вихревое движение мезообъемов в пределах мезоструктуры II (параболическое упрочнение).

Соответствующие три стадии кривой $\sigma - \epsilon$ четко проявляются при пластическом течении мелкокристаллического сплава NiTi, имеющем мартенситную структуру В19' [7, 43]. При деформации мартенситные пластины распространялись через многие зерна, образуя мезоструктуру II.

Образование шейки на макромасштабном уровне потери сдвиговой устойчивости также характеризуется тремя стадиями падения деформирующего напряжения и коэффициента $\Delta\sigma/\Delta\epsilon$ [9, 13]. Эволюция этого процесса связана со стадийностью процесса развития локализованных макрополос деформации, которая завершается возникновением в шейке вихревой макродиссипативной структуры. На начальной стадии образования шейки развиваются две непересекающиеся и далеко расположенные друг от друга макрополосы деформации. Эта стадия характеризуется высокой скоростью снижения коэффициента $\Delta\sigma/\Delta\epsilon$. Затем две сопряженные макрополосы соединяются своими концами, образуя между собой трехгранную призму. Развитие макрополос на этой стадии сопровождается внедрением трехгранной призмы как целого внутрь образца. При этом $\Delta\sigma/\Delta\epsilon$ изменяется слабо. Наконец, в области трехгранной призмы и прилегающего материала интенсивно развивается фрагментация образца на мезоуровне II. В области шейки формируется вихревая диссипативная структура. Наблюдается заключительная стадия наиболее быстрого падения приложенного напряжения и коэффициента $|\Delta\sigma/\Delta\epsilon|$. Трещина при разрушении зарождается на третьей стадии формирования диссипативной структуры и распространяется по ее границам на различных масштабных уровнях.

Таким образом, все масштабные уровни потери сдвиговой устойчивости в деформируемом твердом теле характеризуются трехстадийностью процесса, в основе которой лежат три типа сдвигов в нагруженном твердом теле. Последовательное развитие трех типов сдвигов определяет три стадии формирования вихревых диссипативных структур на всех масштабных уровнях. Это позволяет сформулировать принцип масштабной инвариантности (или принцип скейлинга) в деформируемом твердом теле: *механизмы деформации, их носители и соответствующие стадии кривой "напряжение - деформация" на различных масштабных уровнях являются масштабно-инвариантными.*

Естественно, что в различного типа материалах и при различных условиях нарушения могут проявляться не все стадии деформации. В качестве ведущего могут быть различные механизмы деформации. Однако принцип масштабной инвариантности дает простую методологическую основу для анализа сложной природы пластической деформации и нагружения твердых тел. В соответствии с методологией физической мезомеханики [7, 8] деформация любого материала и для любых условий нагружения может быть представлена в виде определенной комбинации трех типов

сдвигов на трех масштабных уровнях потери сдвиговой устойчивости нагруженного твердого тела.

6. Вихревое механическое поле в деформируемом твердом теле. Все модели физической мезомеханики в своей основе рассматривают движение различного рода трехмерных структурных элементов. Математическое описание каждой модели отражает физическое содержание поставленной задачи. Так, аналитическое описание движения мезообъемов может быть выполнено объединением уравнений механики сплошной среды и калибровочной теории дефектов [44–46]. Численные решения уравнения мезомеханики требуют рассмотрения поведения представительного мезообъема [10, 47]. Движение мезообъемов может быть описано на основе анализа поведения диссипативных субструктур [48–50] или движения двумерных дефектов [51, 52].

В последнее время интенсивно развивается метод подвижных клеточных автоматов [11, 53], который позволяет учесть различные физико-химические процессы при деформации структурно-неоднородной среды.

Рассмотрим очень эффективный подход [44], основанный на лагранжевом формализме и принципе локальной калибровочной инвариантности, который привел к представлению о вихревом механическом поле в деформируемом твердом теле. Нагруженное твердое тело моделируется в [44] как совокупность мезообъемов, которые могут двигаться по схеме "сдвиг + поворот". Движение дислокаций на микромасштабном уровне классифицируется как аккомодационный процесс, описываемый калибровочной теорией дефектов.

Механическое состояние такой гетерогенной среды описывается следующими уравнениями вихревого механического поля:

$$\operatorname{div} S^a - f^{abc} (A^b \cdot S^c) = I_0^a / l^{2D_f} \quad (5)$$

$$(\operatorname{rot} S^a)_\mu - f^{abc} (A^b \times S^c) = \partial R_\mu^a / \partial t \quad (6)$$

$$\operatorname{div} R^a - f^{abc} (A^b \cdot R^c) = 0 \quad (7)$$

$$(\operatorname{rot} R^a)_\mu - f^{abc} (A^b \times R^c)_\mu = \frac{1}{c^2} \frac{\partial S_\mu^a}{\partial t} + I_\mu^a / l^{2D_f} \quad (8)$$

$$I_\mu^a = -g^{ij} \lambda_i^{ak} \eta_k^\alpha D_\nu \eta_j^\beta C_{\alpha\beta}^{\nu\mu} (\alpha, \beta, \mu, \nu = 1, 2, 3), \quad I_0^a = -\rho g^{ij} \lambda_i^{ak} \eta_k^\alpha \frac{\partial \eta_{j\alpha}}{\partial t}$$

$$(a, b, c = 1, 2, \dots, 9)$$

где S^a – изменение во времени градиента компонента тензора дисторсии; A^b – градиент компонента тензора дисторсий, отражающий калибровочное поле; c – предельная скорость распространения калибровочного поля в структурно-неоднородной среде; R^a – градиент компонента тензора изгиба-кручения; f^{abc} – структурные константы, учитывающие, что калибровочные поля образуют алгебру Ли; λ^a – генераторы группы Ли; I_0^a – источники калибровочных полей, связанные с изменением репера η во времени; I_μ^a – потоки, обусловленные изменением репера η в пространстве; $D_\nu = \partial_\nu - \lambda^a A_\nu^a$ – ковариантная производная; R^c, S^c – компоненты тензора напряженности калибровочного поля; $C_{\alpha\beta}^{\nu\mu}$ – упругие константы; ρ – плотность материала; l – размерный параметр структурных уровней деформации среды; D_f – фрактальная размерность.

Как видно из уравнения (6), неоднородность первичного скольжения $(\operatorname{rot} S^a)_\mu$ приводит к возникновению локальной кривизны в твердом теле, скорость изменения которой характеризуется величиной $\partial R_\mu^a / \partial t$. Возрастание локальной кривизны может аккомодироваться двумя путями:

(1) аккомодационными потоками дефектов, представленными в уравнении (8) для $(\text{rot } R^a)_\mu$;

(2) развитием в зоне локальной кривизны трещины, что приведет к разрушению твердого тела.

В общем случае роторы потоков первичного скольжения (уравнение 6) и аккомодационных потоков деформационных дефектов (уравнение 8) не равны на структурном уровне i . Поэтому на отдельно взятом структурном уровне закон сохранения момента количества движения не выполняется. Его выполнение для заданных граничных условий может реализоваться для всей совокупности структурных уровней деформации среды. Поэтому закон сохранения момента количества движения для всех видов потоков дефектов в гетерогенной среде может быть записан в виде [3, 4]:

$$\sum_{i=1}^N \text{rot } I_i = 0 \quad (9)$$

Уравнение (9) описывает закон структурных уровней деформации твердых тел. В соответствии с этим законом сумма роторов всех потоков деформационных дефектов в деформируемом твердом теле для иерархии N самосогласованных структурных уровней деформации равна нулю. По существу, уравнение (9) есть условие сохранения сплошности в деформируемом твердом теле.

Естественно, разрушение твердого тела связано с невыполнением этого условия, когда $(\text{rot } S^a)_\mu$ не компенсируется $(\text{rot } R^a)_\mu$. Отсюда критерий разрушения может быть записан в виде [5, 54]:

$$(\partial R^a_{\mu} / \partial t)_{i=N} > 0, \quad (\text{rot } R^a_{\mu})_{i=N} = 0 \quad (10)$$

Критерий (10) предсказывает возможность как хрупкого, так и вязкого разрушения.

Если в соответствии с уравнением (8) все слагаемые $(\text{rot } R^a_{\mu})_{i=N}$ равны нулю, то разрушение будет хрупким. Оно может наблюдаться для интерметаллидов, керамики, химических соединений, для деформации в условиях низких температур или высоких скоростей нагружения. Однако даже для абсолютно хрупкого разрушения должны наблюдаться следы первичного скольжения в соответствии с уравнением (5). Действительно, в случае любого хрупкого разрушения на берегах трещины всегда наблюдаются дислокации [55].

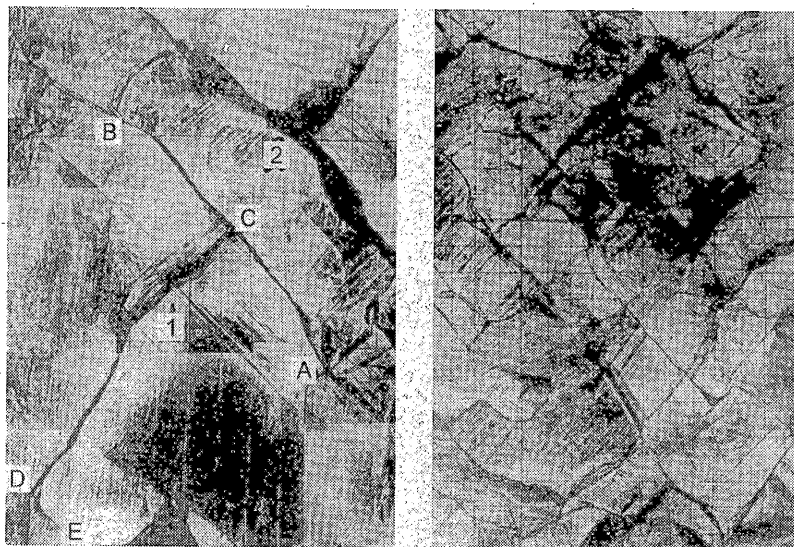
В случае, когда сумма роторов аккомодационных потоков дефектов равна нулю, но отдельные слагаемые этой суммы не равны нулю, разрушение будет вязким. В соответствии с уравнением (8) может быть два типа ротационных мод деформации:

– материальный поворот, осуществляемый множественным скольжением и представленный слагаемым $(1/c^2)(\partial S^a_{\mu} / dt)$

– кристаллографический поворот, представленный слагаемыми $f^{abc}(A^b \times R^c)_\mu$ и $(1/l^{2D_{ij}})I^a_{\mu}$.

Развитие множественного скольжения всегда способствует выполнимости условия (9) и выравниванию локальной кривизны в деформируемом твердом теле. Этот фактор задерживает разрушение.

Роль кристаллографических поворотов в пластической деформации и разрушении зависит от их масштабного уровня и условий нагружения. Слагаемое $f^{abc}(A^b \times R^c)$ описывает кристаллографические повороты, обусловленные взаимодействием аккомодационных потоков деформационных дефектов с лесом дислокаций (калибровочные поля в мезомеханике). Это низкий масштабный уровень, на котором возникает ячеистая дислокационная субструктура. Повороты отдельных ячеек способствуют эффективной релаксации микроконцентраторов напряжений и связанных с ни-



Фиг. 5



Фиг. 6

ми моментных напряжений. Подобная диссипативная субструктура обеспечивает высокую пластичность материала. Слагаемое $(1/l^{2D_{fi}})I_{\mu}^a$ описывает потоки дефектов по внутренним границам раздела, способствуя движению трехмерных элементов внутренней структуры по схеме "сдвиг + поворот". В специфических условиях высокотемпературной ползучести и сверхпластичности удается обеспечить самосогласованное движение элементов внутренней структуры всех масштабных уровней. В этих условиях подобные поворотные моды являются положительным фактором, предотвращая разрушение.

В условиях, когда повороты испытывают только элементы структуры высоких масштабных уровней, а аккомодационные возможности низких масштабных уровней исчерпаны, возникают опасные мезоконцентраторы напряжений. Они релаксируют генерацией дисклинаций и мезополос локализованной деформации, которые обус-

ловливают фрагментацию материала и возникновение мезосубструктуры II. Как следствие, возникают многочисленные несплошности материала, и наступает его разрушение.

Роль отдельных слагаемых в выражении для $\text{rot } R_{\mu}^a$ в усталостном разрушении при знакопеременном нагружении можно проследить на фиг. 5, где представлена картина формирования мезосубструктуры II в плоском образце крупнозернистого свинца. Процесс формирования мезофрагмента в пределах крупного зерна I поликристалла свинца, фиг. 5, а ($N = 5 \cdot 10^4, \times 100$) начинается с развития в этом зерне сильновыраженного одиночного скольжения (темное поле в зерне I). Сопровождающий это одиночное скольжение стесненный материальный поворот вызывает интенсивные потоки дефектов вдоль границы зерна ACB, что проявляется в разрыве на этой границе рисок реперной сетки. Неравноосность зерна I и затрудненность скольжения в точке B вызывают потерю сдвиговой устойчивости границы AB и возникновение в зоне C сильновыраженной локальной кривизны. В этой области возникает мезоконцентратор напряжений, который релаксирует зарождением и развитием дисклинации CD.

Распространение дисклинации CD вдоль направления максимальных касательных напряжений порождает встречные силы изображения, которые изменяют в точке D ее направление распространения на сопряженное DE. Как следствие, фрагмент ACDE крупного зерна I испытывает движение по схеме "сдвиг + поворот". В образце возникает фрактальная структура, представленная на фиг. 5, b ($N = 10^5, \times 50$). Когда формирование такой мезосубструктуры II охватывает все поперечное сечение образца, ее дальнейшая эволюция сопровождается возникновением трещины, распространяющейся по границам мезосубструктуры. Подобное усталостное разрушение характерно для материалов с низкой сдвиговой устойчивостью или при циклическом нагружении в условиях высоких температур. При высоких температурах развивается ползучесть с сильновыраженным движением зерен как целого. Наложение в этих условиях циклического нагружения ускоряет процесс ползучести поликристаллов [56].

В сдвигоустойчивых поликристаллах повороты зерен как целого затруднены. Поэтому основным аккомодационным механизмом деформации для первичного скольжения является множественное скольжение и возникновение деформационных доменов. В пределах очень крупного зерна развивается множественное скольжение. Однако величина сдвигов и их скорость в сопряженных системах множественного скольжения, а также внутри первичного скольжения сильно отличаются. Этот процесс описывается слагаемым $(1/c^2)(\partial S_{\mu}^a / \partial t)$ в уравнении (8). Как следствие, в образце возникает крупнодоменная структура, выявляемая в поле векторов смещений. Два больших деформационных домена перемещаются в различных направлениях, вызывая сильнолокализованный поворот на границе их сопряжения. Вдоль такой границы зарождается и распространяется трещина продольного сдвига (усталостная трещина) как поворотная деформации. Долговечность образца при его циклическом нагружении достаточно велика.

Если циклическое нагружение совместить с процессом трения, то скорость усталостного разрушения существенно возрастает и долговечность поликристаллов катастрофически снижается. Картина поля векторов смещения, полученная на поверхностях трения соединенных внахлест образцов дуралюмина Д16, приведена на фиг. 6. Высокая плотность дислокаций на поверхностях трения в условиях циклического нагружения приводит к эффектам поляризации в подсистеме дефектов. Этот процесс описывается слагаемым $f^{abc}(A^b \times R^c)_{\mu}$ в уравнении (8). Доменная структура в поле векторов смещений сильно измельчается и разориентируется. Граница раздела с наибольшей разориентацией определяет траекторию распространения усталостной трещины. Скорость распространения усталостной трещины вдоль границы деформационных доменов с сильной разориентировкой очень высока.

Полученные результаты показывают, что эффекты поляризации в подсистеме деформационных дефектов на микроуровне оказывают существенное влияние на развитие усталостной трещины. Это объясняет хорошо известные закономерности усталостного разрушения: прерывистый характер распространения усталостной трещины при циклическом нагружении [57], сильное влияние трения на усталостное разрушение [58] и др.

7. Заключение. Длительный период развития механики сплошной среды для описания усредненных механических свойств деформируемого твердого тела на макромасштабном уровне практически завершен. Разработанные методы успешно применяются для многих инженерных расчетов.

Физика пластичности и прочности за прошедший период развивалась на основе теории дислокаций для описания поведения деформируемого твердого тела на микромасштабном уровне. Первый этап этого развития в рамках понимания элементарных актов пластического течения и описания упругих полей дислокаций с выраженными ядрами также успешно завершен. Попытки описать упругие поля сложных дислокационных ансамблей и усреднить их поведение оказались безуспешными.

Последние два десятилетия в науке о пластичности и прочности твердых тел выдвинуто два принципиально новых концептуальных положения:

А. Пластическая деформация развивается на нескольких взаимосвязанных масштабных уровнях: микро, мезо и макро, и описать макродеформацию можно только усреднением самосогласованных микро- и мезоуровней.

В. Физика пластического течения и разрушения твердых тел связана с потерей их сдвиговых устойчивостей на различных масштабных уровнях. Эти явления должны описываться на основе представлений о сильноравновесных состояниях в нагруженном твердом теле. Физика их поведения имеет синергетическую природу.

В связи с этим в настоящее время особый интерес при описании деформации и разрушения твердых тел вызывают следующие принципиально новые области исследования:

1. Роль поверхности и внутренних границ раздела в деформируемом твердом теле в зарождении всех типов деформационных дефектов.

2. Синергетика самоорганизации деформационных дефектов и формирование диссипативных структур. Полевая теория дефектных субструктур как самостоятельного континуума ядер деформационных дефектов.

3. Иерархические модели самосогласованного пластического течения на всех масштабных и структурных уровнях деформации твердых тел при различных условиях нагружения.

4. Зарождение несплошностей (микротрещин) как ротационная мода деформации. Иерархические модели самоорганизации трещин. Пластическая деформация и разрушение как две органически взаимосвязанные стадии потери сдвиговой устойчивости в нагруженном твердом теле.

5. Мезомеханика деформации и разрушения в специфических условиях нагружения: циклическое нагружение и усталостное разрушение; разрушение поверхностных слоев и износ твердых тел в парах трения; деформация и разрушение при динамическом нагружении; мезомеханика градиентных материалов и сварных соединений.

6. Мезомеханика многослойных материалов для электроники и функциональных материалов.

7. Приложения методов физической механики структурно-неоднородных сред к проблемам материаловедения и развитие самостоятельного направления – физической мезомеханики материалов.

8. Компьютерное конструирование материалов на основе физической мезомеханики.

Автор выражает искреннюю признательность своим коллегам в Институте физики

прочности и материаловедения СО РАН и Томском политехническом университете, чьи результаты были использованы при написании данного обзора.

Работа выполнена при поддержке ФЦП "Интеграция" (проект 291) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект 96-01-00902).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В. Структурные уровни деформации твердых тел. Новосибирск: Наука, 1985. 229 с.
2. Панин В.Е., Гриняев Ю.В., Данилов В.И. и др. Структурные уровни пластической деформации и разрушения. Новосибирск: Наука, 1990. 255 с.
3. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов / Под ред. В.Е. Панина. Новосибирск: Наука, 1995. Т. 1. 298 с.; Т. 2. 320 с.
4. Physical Mesomechanics of Heterogeneous Media and Computer-Aided Design of Materials / Ed. by V.E. Panin. Cambridge: Cambridge Intersci. Pub. 1998. 339 p.
5. Panin V.E. Physical mesomechanic of plastic deformation and fracture of solids // Proc. 10th Intern. Conf. on the Strength of Materials. Sendai: Japan. Inst. Met., 1994. P. 415–418.
6. Panin V.E. Plastic deformation and fracture of solids at the mesoscale level // Mat. Sci. Eng. 1997. V. 234. Aug. P. 944–948.
7. Панин В.Е. Методология физической мезомеханики как основа построения моделей в компьютерном конструировании материалов // Изв. вузов. Физика. 1995. Т. 38. № 11. С. 6–25.
8. Панин В.Е. Современные проблемы пластичности и прочности твердых тел // Изв. вузов. Физика. 1998. Т. 41. № 1. С. 7–34.
9. Panin V.E. Foundations of physical mesomechanics // Phys. Mesomech. 1998. V. 1. № 1. P. 5–20.
10. Makarov P.V. Physical mesomechanics approach in simulation of deformation and fracture processes // Phys. Mesomech. 1998. V. 1. № 1. P. 57–76.
11. Psakhie S.G., Korostelev S.Yu., Smolin A.Yu., Dmitriev A.I., Shilko E.V., Moiseyenko D.D., Tatarintsev E.M., Alexeev S.V. Movable cellular automata method as a tool for physical mesomechanics of materials // Phys. Mesomech. 1998. V. 1. № 1. P. 89–102.
12. Korotaev A.D., Tyumentsev A.N., Pinzhin Yu.P. Activation of the mesolevel plastic flow in high-strength materials and characteristic types of defective substructures // Phys. Mesomech. 1998. V. 1. № 1. P. 21–32.
13. Panin V.E., Derevyagina L.S., Deryugin Ye.Ye., Valiev R.Z., Girsova N.V. Regularities of plastic deformation at the meso- and macrolevel in Cu with submicrocrystalline structure // Abstr. Intern. Conf. Computer-Aided Design of Advanced Materials and Technology'97, Tomsk: ISPMS, 1997. P. 158–159.
14. Панин В.Е., Слосман А.И., Колесова Н.А. Закономерности пластической деформации и разрушения на мезоуровне поверхностно-упрочненных образцов при статическом растяжении // Физика металлов и материаловедение. 1996. Т. 82. Вып. 2. С. 129–136.
15. Панин В.Е., Слосман А.И., Колесова Н.А., Молчунова И.Ю., Овечкин Б.Б. Влияние толщины упрочненного слоя на формирование мезоструктуры при растяжении поверхностно упрочненных образцов // Изв. вузов. Физика. 1998. Т. 41. № 6. С. 63–69.
16. Панин В.Е., Слосман А.И., Колесова Н.А. О механизмах фрагментации на мезоуровне при пластической деформации поверхностно-упрочненной хромистой стали // Физика металлов и материаловедение. 1997. Т. 84. Вып. 2. С. 130–135.
17. Панин В.Е., Плешанов В.С., Буркова С.П., Кобзева С.А. Мезоскопические механизмы локализации деформации поликристаллов низкоуглеродистой стали // Материаловедение. 1997. № 8–9. С. 22–27.
18. Елсукова Т.Ф., Панин В.Е. Механизм усталостного разрушения поликристаллов на мезоуровне // Изв. вузов. Физика. 1996. Т. 39. № 6. С. 40–57.
19. Шермергор Т.Д. Теория упругости микронеоднородных сред. М.: Наука, 1977. 399 с.
20. Гриняев Ю.В., Панин В.Е. Расчет напряженного состояния в упругонагруженном поликристалле // Изв. вузов. Физика. 1978. № 12. С. 95–101.
21. Панин В.Е., Коротаев А.Д., Макаров П.В., Кузнецов В.М. Физическая мезомеханика материалов // Изв. вузов. Физика. 1998. Т. 41. № 9. С. 8–36.

22. Зуев Л.Б., Данилов В.И., Мних Н.М. Спекл-интерферометрический метод регистрации и анализа полей смещений при пластической деформации // Заводск. лаборатория. 1990. Т. 56. № 2. С. 90–93.
23. Pat. N 93002731. Method and apparatus for non-destructive testing of the mechanical behaviour of solid objects under loading // V.E. Panin, L.B. Zuev, V.I. Danilov et al. Moscow: Ruspatent, 1993.
24. Yoshida S., Muhamad J., Pardede M., Widiastuti R., Muchiar, Siahaan B., Kusnowo A. Optimal interferometry applied to analyse deformation and fracture of aluminum alloys // Theor. and Appl. Fracture Mech. 1997. V. 27. № 2. P. 85–98.
25. Suprapedi, Toyooka S. Spatio-temporal observation of plastic deformation and fracture by speckle interferometry // Phys. Mesomech. 1998. V. 1. № 1. P. 50–56.
26. Сырямкин В.И., Панин В.Е., Дерюгин Е.Е., Парфенов А.В., Неруш Г.В., Панин С.В. Оптико-телевизионные методы исследования и диагностики материалов на мезоуровне // Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов. Новосибирск: Наука, 1995. Т. 1. С. 176–194.
27. Kuznetsov P.V., Panin V.E., Panin S.V. Deformation mechanisms of duralumin at the mesoscale level and stages of fractal dimension // Abstr. of Intern. Conf. Computer-Aided Design of Advanced Mater. and Technology'97. Tomsk: ISPMS, 1997. P. 63–64.
28. Панин В.Е., Кузнецов П.В., Дерюгин Е.Е., Панин С.В., Елсукова Т.Ф. Фрактальная размерность мезоструктуры поверхности пластически деформированных поликристаллов // Физика металлов и металловедение. 1997. Т. 84. Т. 2. С. 118–122.
29. Зуев Л.Б. О формировании автоволн пластичности при деформации // Металлофизика и новейшие технологии. 1994. Т. 16. Вып. 10. С. 31–36.
30. Зуев Л.Б., Данилов В.И. О природе крупномасштабных корреляций при пластическом течении // Физика твердого тела. 1997. Т. 39. Вып. 8. С. 1399–1403.
31. Zuev L.B., Danilov V.I., Kartashova N.V., Barannik S.A. The self-excited wave nature of the instability and localization of plastic deformation // Mater. Sci. Eng. 1997. A234. Aug. P. 699–702.
32. Панин В.Е., Панин С.В. Мезомасштабные уровни пластической деформации поликристаллов алюминия // Изв. вузов. Физика. 1997. Т. 40. № 1. С. 31–39.
33. Алехин В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. М.: Наука, 1983. 280 с.
34. Harren S.V., Deve H.E., Asaro R.J. Sgear band formation in plane strain compression // Acta Met. 1988. V. 36. № 9. P. 2435–2480.
35. Cherepanov G.P. On the theory stresses in a thin bonding layer // J. Appl. Phys. 1995. V. 78. N 11. P. 6826–6832.
36. Зуев Л.Б., Данилов В.И., Горбатенко В.В. Закономерности пространственно-временных картин пластического течения твердых тел // Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов. Новосибирск: Наука, 1995. Т. 1. С. 162–175.
37. Горбатенко В.В. О природе пространственной и временной периодичности при пластической деформации. Автореф. дисс. на соискание учен. степени канд. физ.-мат. наук. Томск: ИФПМ. СО РАН, 1993. 15 с.
38. Елсукова Т.Ф., Панин В.Е., Пинжин Ю.П., Ангелова Г.В. Эффекты поверхностных локальных зон изгиба – кручения при циклическом нагружении поликристаллов алюминия // Физ. мезомеханика. 1999. Т. 2. № 4. С. 38–47.
39. Панин С.В., Дураков В.Г., Прибытков Г.А. и др. Мезомеханика пластической деформации и разрушения низкоуглеродистой стали с высокопрочным деформируемым покрытием // Физ. мезомеханика. 1998. Т. 1. № 2. С. 51–58.
40. Коротаев А.Д., Тюменцев А.Н., Гончиков В.Ч., Олемской А.И. Закономерности формирования субструктуры в высокопрочных дисперсно-упрочненных сплавах // Изв. вузов. Физика. 1991. № 3. С. 81–92.
41. Конева Н.А., Козлов Э.В. Физическая природа стадийности пластической деформации // Структурные уровни пластической деформации и разрушения. Новосибирск: Наука, 1990. С. 123–186.
42. Kuznetson P.V., Panin V.E., Panin S.V. Deformation mechanisms of duralumin at the mesoscale level and stages of fractal dimension: Abstracts Int. Conf. CADAMT'97. Preprint. N. Tomsk: 1997. P. 63–64.
43. Панин В.Е., Дерюгин Е.Е., Деревягина Л.С. Принцип масштабной инвариантности при пластической деформации на микро- и мезомасштабном уровнях // ФММ. 1997. Т. 84. Вып. 1. С. 106–111.

44. Панин В.Е., Гриняев Ю.В., Егорушкин В.Е. Спектр возбужденных состояний и вихревое механическое поле в деформируемом кристалле // Изв. вузов. Физика. 1987. Вып. 30. № 1. С. 36–51.
45. Гриняев Ю.В., Чертова Н.В. Калибровочные теории пластической деформации в механике сплошных сред // Изв. вузов. Физика. 1990. Вып. 33. № 2. С. 36–50.
46. Егорушкин В.Е. Динамика пластической деформации. Волны локализованной пластической деформации в твердых телах // Изв. вузов. Физика. 1992. Вып. 35. № 4. С. 19–41.
47. Макаров П.В., Черепанов О.И., Демидов В.Н. Математическая модель упруго пластического деформирования мезообъема материала с ограниченным числом систем скольжения // Изв. вузов. Физика. 1995. Вып. 38. № 11. С. 26–57.
48. Аннин В.Д., Ревуженко А.Ф., Шемякин Е.И. Механика деформируемого твердого тела // ПМТФ. 1987. № 4. С. 66–85.
49. Ревуженко А.Ф. Функции со структурой – математические объекты для описания пластической деформации твердых тел // Изв. вузов. Физика. 1995. Вып. 38. № 11. С. 70–85.
50. Ревуженко А.Ф. Диссипативные структуры в сплошной среде // Изв. вузов. Физика. 1992. Вып. 35. № 4. С. 94–104.
51. Лихачев В.А. Кооперативная пластичность, вызванная мобильной разориентировкой и фазовыми границами // Изв. вузов. Физика. 1982. Вып. 25. № 6. С. 83–102.
52. Лихачев В.А., Малинин В.Г. Структурно-аналитическая теория прочности. С.-Петербург: Наука, 1993. 471 с.
53. Псахье С.Г., Хори Я., Коростелев С.Ю. Метод подвижных клеточных автоматов как инструмент для моделирования в рамках физической мезомеханики // Изв. вузов. Физика. 1995. Вып. 38. № 11. С. 58–69.
54. Panin V.E. Overview on mesomechanics and fracture of solids // Theor. Appl. Fract. Mech. 1998. V. 30. № 1. P. 1–11.
55. Трефилов В.И., Мильман Ю.В., Фирстов С.А. Физические основы прочности тугоплавких металлов. Киев: Наук. думка, 1975. 315 с.
56. Lukas P., Kunz L., Skleniska V. Interaction of high cycle fatigue with high temperature creep // Proc. 10th Int. Conf. on the Strength of Materials. Sendai: Jpn. Inst. of Metals, 1994. P. 17.
57. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. М.: Металлургия, 1975. 456 с.
58. Сосновский Л.А. Экспериментальные основания трибофатиги // Проблемы прочности. 1997. № 3. С. 74–82.

Томск

Поступила в редакцию
12.02.1999