

УДК 539.3; 539.4

К ТЕОРИИ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

О. А. КАЙБЫШЕВ, А. И. ПШЕНИЧНИК

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН
Тел: (3472) 24 64 07 E-mail: aipsh@anrb.ru
450001, Уфа, ул. Халтурина, 39

Аннотация: Изложена концептуальная основа модели сверхпластической деформации, основанной на представлениях о полосах кооперированного зернограничного проскальзывания. Модель не только удовлетворяет стандартному набору требований, предъявляемых к физическим моделям сверхпластичности, но и позволяет перейти к анализу задач макроуровня.

Ключевые слова: пластичность; дислокация; границы зерен; зернограничное проскальзывание; тройные стыки; аккомодация; кооперативные явления, перколяция; ресурс пластичности

ВВЕДЕНИЕ

Исследования в области структурной сверхпластичности (СП) продолжают уже не один десяток лет. Содержание исследований диктуется тем, что СП — это не только загадочное физическое явление, но и основа ряда уникальных технологических процессов. Исследование СП как физического явления сводится к изучению процессов, происходящих на микро- и мезоуровне. СП как основа технологического процесса требует изучения характеристик макроуровня: ресурса пластичности, расчета напряженно-деформированного состояния. Брешь между этими исследованиями в настоящее время не только не преодолена, но даже нет ясности, чем ее можно закрыть.

В задачах классической пластичности крупнозернистых материалов аналогичная проблема связи характеристик микро- и макроуровней решается с использованием парадигмы Тейлора. В ее основе лежат два положения:

1) деформации всех зерен одинаковы и воспроизводят деформацию образца как целого;

2) для того чтобы обеспечить совместность деформации, достаточно, если в каждом зерне будет пять активных систем скольжения.

Структурные исследования показали, что при сверхпластической деформации (СПД) зерна не повторяют деформацию образца: при

удлинении образца в тысячи процентов зерна остаются практически равноосными, т. е. в СП представления Тейлора не применимы. В сочетании с одним из условий протекания СПД, а именно: требованием малого среднего размера зерен, — этот факт свидетельствует о том, что в сравнении с пластичностью крупнозернистых материалов в условиях сверхпластичности основные процессы перенесены из тела зерна на его периферию — границу. Система внутренних поверхностей раздела (границ зерен или межфазных границ) обеспечивает условия для реализации этих процессов. Увеличение удельной площади границ зерен (ГЗ) достигается подготовкой структуры с достаточно малым средним размером зерен. Иными словами, в условиях СП зерно не является представительным объемом, и, изучая процессы только в зерне, нельзя понять природу СПД.

Экспериментальные исследования последних лет привели к представлениям о новом механизме деформации СП материалов — полосах кооперативного зернограничного проскальзывания, которые по сути своей являются макрообъектом. Это создает предпосылки для постановки задач о связи микро- и макроуровней. При этом необходимым первым этапом является построение модели СП, основанной на представлениях о полосах кооперативного зернограничного проскальзывания (КЗГП).

В работе дается краткий обзор исследований, посвященных построению такой модели.

1. ЭТАПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

Сразу поменять сложившиеся представления о действующих механизмах деформации трудно, психологически естественнее подправить то, что уже известно. При этом возникает вопрос: сколько оставить от старых представлений и что исправить. Начались исследования по измерению вкладов в общую деформацию от внутризеренных и зернограничных процессов. После отработки методики разделения и оценки этих вкладов было установлено, что вклад зернограничных процессов значителен, а, может быть, даже и определяющий, при этом внутризеренные процессы могут оказаться лишь аккомодационными, т. е. вторичными и лишь сопровождающими зернограничными.

Начался процесс целенаправленного исследования зернограничного проскальзывания (ЗПП). Эти исследования проводятся на специально приготовленных модельных объектах — бикристаллах. Экспериментально наблюдаемый сдвиг вдоль плоскости границы в общем случае сопровождается объемной деформацией кристаллитов, что затрудняет интерпретацию результатов. В работе [1] был предложен метод, который позволяет как разделять эффекты ЗПП и внутризеренного скольжения (ВЗС), так и исследовать их взаимодействие. Это достигается выбором в качестве объекта исследований цинковых бикристаллов с 90° -ной симметричной границей наклона. Гексагональная решетка цинка имеет ярко выраженную систему легкого скольжения, заданную расположением наиболее плотно упакованной (базисной) атомной плоскости. Такой бикристалл всегда можно ориентировать относительно оси растяжения так, что сдвиговые напряжения на базисных плоскостях обоих кристаллитов будут нулевыми и внутризеренная деформация практически полностью подавлена. При этом плоскость границы совпадает с плоскостью максимальных сдвиговых напряжений. В этой ситуации реализуется вид ЗПП, который был назван собственным ЗПП. При любой другой ориентации бикристалла относительно оси растяжения сдвиговые напряжения на базисных плоскостях кристаллитов будут отличны от нуля и нагружение сопровождается внутризеренным скольжением. Оказалось, что это способствует ускорению

проскальзывания вдоль плоскости границы и этот вариант ЗПП был назван стимулированным ЗПП. Детальные эксперименты по этой схеме позднее были проведены на бикристаллах цинка [2,3] и кадмия (кристаллическая решетка той же симметрии) [4].

Однако в условиях поликристалла развитие ЗПП осложнено неотъемлемым элементом структуры — тройными стыками, в которых плоскости соседних ГЗ составляют двугранный угол, близкий к $2\pi/3$. Практически все известные модели СП отличаются способами, которыми осуществляется согласованный сдвиг по двум границам, встречающимся в тройном стыке. Достаточно полная коллекция этих способов приведена в обзоре [5]. Удивительно, что независимо от способа, заявленного в качестве контролирующего скорость деформации, все модели приводят к одному и тому же выражению для скорости деформации на стадии стабильного течения (когда исчезает зависимость от деформации):

$$\dot{\epsilon} = C \left(\frac{b}{d} \right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{\sigma - \sigma_{th}}{\mu} \right)^{\frac{1}{m}} \frac{\mu b D_0}{kT} \exp \left(- \frac{E}{kT} \right).$$

Здесь b — модуль вектора Бюргерса; d — средний размер зерен; σ — внешнее напряжение; σ_{th} — пороговое напряжение; μ — модуль сдвига; k — постоянная Больцмана; T — температура испытаний; D_0 — предэкспонента коэффициента диффузии; E — энергия активации СП — в общем случае средневзвешенное энергий активации зернограничной и решеточной диффузии; n и m — параметры, наследованные от феноменологической формы и определяющие зависимость от размера зерен и напряжения; C — константа, единственно значением которой и отличаются известные модели СП. Некоторое разнообразие проявляется лишь в оценке численного значения безразмерной константы C . Её величина в зависимости от модели меняется от 0.6 до 200. Недостатки всех этих моделей мы перечислили в работе [6], здесь лишь отметим, что отсутствие успеха было связано с тем, что модели, не подчеркивая это явно, представительным объемом объявили некоторый «типичный» тройной стык. Ошибочность этих представлений стала осознаваться после проведения экспериментов по изучению структурных изменений в процессе деформации. Было установлено, что:

- 1) зерна в процессе деформации меняют соседей и, более того,
- 2) большие группы зерен перемещаются в образце как целое с изменением ориентации.

Первый факт послужил основой для формулировки широко известной модели Эшби-Веррала [7], в которой был умозрительно сконструирован механизм перестановки зерен при сохранении сплошности материала. Однако, несмотря на привлекательную оригинальность механизма, последующий анализ показал, что он не может происходить в трехмерном поликристалле [8]. Второй факт выглядел просто обескураживающим: с одной стороны, есть требование малого размера зерен, а с другой — большие группы зерен перемещаются как единое образование. Сразу возникает масса вопросов. Во-первых, зачем нам малое зерно, если большие конгломераты движутся как целое? Почему нельзя взять размер зерна, равный размеру этого конгломерата? Во-вторых, о каком тройном стыке идет речь в известных моделях СПД? О стыке, принадлежащем этому конгломерату? Так в нем ничего не происходит. Чем же отличается один стык от другого и о каком стыке рассуждают авторы моделей? Ответ может быть лишь такой: тройной стык не является представительным элементом структуры. И лишь позже стало ясно, что это было первое свидетельство действия кооперативного деформационного механизма.

Параллельно с анализом физических механизмов в исследовании сверхпластичности протекал более успешный процесс расширения спектра материалов и условий, в которых реализуется режим СП. В керамиках и композитах сверхпластичность была обнаружена при скоростях (в обратных секундах) приблизительно на три-четыре порядка выше, чем скорости, характерные для классических эвтектоидов. Для сверхмелкокристаллических материалов удалось заметно уменьшить температуру — низкотемпературная СП. Начато изучение нанокристаллических материалов. Надежды на существование общего для всех материалов и условий микромеханизма, ответственного за реализацию режима СП, не оправдались. Появились работы, в которых было показано, что механизмы, контролируемые скоростью, могут быть разными при низких и высоких температурах даже для одного и того же материала [9].

Вопрос о природе СП перешел в другую плоскость: что объединяет столь разные материалы, испытываемые при столь разных условиях, таким образом, что они проявляют единое поведение — СП. Ответ, в общем-то, ясен: их объединяет отсутствие условий для разрушения. Отсутствие условий для разрушения сводится к отсутствию условий для локализа-

ции деформации (приводящей к вязкому разрушению) и концентрации напряжений (приводящей, при соответствующих скоростях нагружения, к развитию трещин и хрупкому разрушению) или, иначе, к требованию однородности течения в пределах всего образца (заметим, что речь не идет об однородности деформации на мезоуровне, масштаб которого задается средним размером зерен) и в течение достаточного промежутка времени, т.е. разрушение это всегда локализация чего либо, иначе — крупномасштабная неоднородность. Если при СП в течение длительного времени нет разрушения, то, следовательно, по каким-то причинам нет и неоднородности. А требуемая однородность может быть достигнута только специфической организацией крупномасштабной картины течения: она должна выглядеть не как суперпозиция независимых процессов, происходящих в различных частях деформируемого образца (иначе обязательно наступит конфликт этих частей), а представлять собой единый когерентный на макроуровне процесс. Именно изучение организации крупномасштабной картины течения и привело к формированию новых представлений о СП. Если очень кратко, то эти представления можно сформулировать так. На стадии выхода кривых нагружения на режим стабильного течения в материале формируются отдельные и независимые участки течения, представляющие собой либо неоднородные сдвиги вдоль благоприятно ориентированных границ зерен, либо проявления дислокационной активности в достаточно крупных зернах. При достижении стадии стабильного течения происходит объединение отдельных участков течения и деформация осуществляется посредством согласованного сдвига вдоль поверхностей, проходящих через все поперечное сечение образца и предельно близких к плоскостям с максимальными сдвиговыми напряжениями. Эти поверхности были названы полосами кооперативного зернограничного проскальзывания. Сформированная действием полос КЗГП картина течения позволяет обеспечить максимальную однородность деформации в пределах всего образца [10,11].

Оглядываясь назад, мы видим, что проблема сверхпластичности в своем историческом развитии предстает как проблема предстательного объема. Отчетливо прослеживается смена объекта исследования по цепи: зерно — граница зерен — тройной стык — полоса кооперативного ЗГП. Проведенные экспериментальные исследования сформирова-

ли необходимый базис для развития теоретических представлений о природе СПД. Ранее известные теоретические модели СП в лучшем случае можно назвать моделями аккомодации в изолированном тройном стыке.

Итак, построение теоретической модели сверхпластичности сводится к построению формального описания на структурном уровне, определяемом последовательно: границей зерен, тройным стыком, полосой кооперативного ЗГП.

2. ЗЕРНОГРАНИЧНОЕ ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЕ В БИКРИСТАЛЛЕ

В работах [3,4] была измерена зависимость величины проскальзывания вдоль границы бикристалла от времени при заданной температуре и величине нагружения. Было установлено, что скорость собственного ЗГП в течение длительного промежутка времени остается практически постоянной, а ее зависимость от температуры T и сдвигового напряжения в плоскости границы σ имеет вид

$$\dot{S} \propto \sigma \exp(-E_B/kT),$$

где E_B — энергия активации зернограничной диффузии. В случае стимулированного ЗГП скорость проскальзывания существенно зависит от времени. В начальный момент времени скорость значительно превышает скорость собственного ЗГП и имеет вид

$$\dot{S} \propto \sigma^2 \exp(-E_V/kT),$$

где E_V — энергия активации решеточной самодиффузии. С увеличением времени эффект стимуляции монотонно уменьшается и в определенный момент (~ 600 с в Cd и 1200с в Zn) скорость падает до скорости собственного ЗГП. Дислокационный механизм ЗГП был подтвержден следующими экспериментальными фактами:

- 1) пространственной неоднородностью сдвига вдоль направления скольжения;
- 2) линейной связью между скольжением и миграцией;
- 3) анизотропией скорости скольжения в плоскости границы.

Неясными оставались следующие моменты:

- 1) чем определяется длительность интервала действия стимулированного ЗГП;
- 2) почему начальная скорость в кадмии всего в три раза превышает соответствующую скорость в цинке, тогда как по диффузионным константам это превышение должно составлять три порядка;

3) почему скорость стимулированного ЗГП в цинке длительное время остается постоянной, тогда как в кадмии происходит монотонное уменьшение скорости, начиная с $t = 0$.

В соответствии с соотношением Орована скорость ЗГП определяется не только скоростью ЗГД, но и их количеством. Тот факт, что при низкой скорости ЗГД (Zn) реализуется высокая по сравнению с кадмием скорость ЗГП, позволяет считать, что в этом случае в границе формируется сравнительно высокая плотность дислокаций и наоборот (поведение, характерное для систем с отрицательной обратной связью), т.е. задача сводится к описанию динамики формирования и эволюции плотности ЗГД. Такое поведение удалось описать системой двух гиперболических уравнений первого порядка с квадратичной нелинейностью. Анализ решения [12] приводит к следующим представлениям о механизме стимулированного ЗГП в бикристаллах. Решеточные дислокации, образованные в сопряженных кристаллитах, достигают границы бикристалла и в течение времени спринга диссоциируют, формируя два подвижных семейства зернограничных дислокаций с противоположными векторами Бюргерса, т.е. движущихся навстречу друг другу и обеспечивающих тем самым локальное проскальзывание. При низких скоростях ЗГД (низкие температуры или высокие значения энергии активации зернограничной диффузии, т.е. цинк в данном случае) невысокая скорость аннигиляции позволяет решеточным источникам сформировать высокую плотность ЗГД. При достижении некоторой плотности в окрестности границы формируется дополнительное упругое поле, препятствующее распространению решеточных дислокаций. Формально это сводится к перепределению времени спринга. Устанавливается динамическое равновесие между аннигиляцией и притоком, что регистрируется как достаточно протяженный во времени участок с постоянной скоростью. Остающиеся в кристаллитах решеточные дислокации приводят к деформационному упрочнению, что непосредственно наблюдается при измерении микротвердости в окрестности границы цинковых бикристаллов.

При высокой скорости ЗГД (высокие температуры или низкие значения энергии активации зернограничной диффузии) скорость

аннигиляции высока и время жизни дислокаций в границе уменьшается. При этом эффективность решеточных источников недостаточна для формирования высокой плотности ЗГД и временная зависимость скорости ЗГП непосредственно отслеживает темп деформационного упрочнения внутризеренного скольжения. Количественное сравнение расчетов с экспериментальными результатами вполне удовлетворительное [12].

3. УСЛОВИЯ И ВЕРОЯТНОСТЬ МОДИФИКАЦИИ ТРОЙНОГО СТЫКА

Не существует какого-то типичного тройного стыка, который можно было бы выделить из общей совокупности и изучать как представительный объект. В результате экспериментального изучения распределения величины двугранных углов в тройных стыках, принадлежащих полосе и расположенных вне её [13], было установлено, что вне полосы двугранные углы равны приблизительно $2\pi/3$, т.е. близки к равновесной конфигурации. Тройные стыки, принадлежащие полосе, оказались «выпрямленными», т.е. их двугранные углы обнаружили отчетливую тенденцию стремления к развернутому (равным π).

Задача сводится к построению условий, при которых происходит модификация произвольно выбранного стыка, и расчету их полного количества. При исследовании ЗГП в три-кристаллах [14] обнаружили, что «выпрямление» тройного стыка происходит в результате локальной миграции (выпучивания) одной из границ (в плоскости которой действуют максимальные сдвиговые напряжения) до такой перестройки конфигурации тройного стыка, которая обеспечивает совместность сдвига по двум из трех границ, составляющих данный стык. Для построения механизма локальной миграции была использована аналогия с классической задачей Эйлера о потере устойчивости упругого стержня при соосном нагружении. Упругая энергия в нашем случае связана с энергией взаимодействия скопления ЗГД, сформированного на принадлежащей стыку границе с максимальным сдвиговым напряжением. В качестве условия миграции используется условие уменьшения энергии системы «скопление ЗГД + граница зерна». Для вычисления энергии такой системы необходимо задать конфигурацию границы и распределение дислокаций в скоплении. Уравнения для этих величин можно получить либо из ва-

риационного принципа, либо из условия баланса сил, действующих на произвольно выбранный участок границы. Соответствующая система — это система двух нелинейных интегро-дифференциальных уравнений с ядром Коши. Предельно упрощенный анализ позволяет установить, что при заданной температуре T и сдвиговом напряжении в плоскости границы τ мигрируют все границы, чьи длины в направлении проскальзывания попадают в некоторый интервал $[L_{LM}, L_D]$. Если длина границы L меньше величины L_{LM} , то сформированное скопление ЗГД не обладает достаточной мощностью, чтобы обеспечить локальную миграцию. Если же L превышает L_D , то локальная миграция подавлена более интенсивным процессом — дислокационной ползучестью. Число границ, попадающих в интервал $[L_{LM}, L_D]$, определяется функцией распределения длин ГЗ в данном материале. С использованием логнормального распределения была вычислена вероятность того, что одна случайно выбранная граница может принимать участие в формировании полосы. Расчеты [14–16] показали, что в материале с большим средним размером зерен условия для локальной миграции отсутствуют при всех напряжениях. Уменьшение среднего размера зерен приводит к формированию условий миграции в определенном интервале напряжений. При увеличении температуры локальная миграция происходит в более широких интервалах как размеров зерен, так и напряжений. Увеличение дисперсии приводит к уменьшению числа границ зерен, принимающих участие в формировании полос КЗГП, но расширяет соответствующий интервал напряжений.

4. ОЦЕНКА ЧИСЛА ПОЛОС КЗГП И УСЛОВИЯ РЕАЛИЗАЦИИ РЕЖИМА СПД

Определим полосу как некоторую негладкую поверхность, составленную из n границ зерен. Если половина из этих границ испытала локальную миграцию, то каждая из них вовлекла в деформацию по одной соседней границе и вся поверхность начинает работать как когерентная сдвиговая полоса. Однако это справедливо только в том случае, если подстроившиеся границы распределены предельно однородно вдоль полосы, т.е. если две границы зерен, испытавшие миграцию, разделены одной границей, вовлекаемой в кооперацию. В противном случае половины подстроившихся границ может оказаться недостаточно для формирования активной поло-

сы. С другой стороны, есть экспериментальные свидетельства о том, что дислокационное скопление, сформированное на некоторой границе, может включить в кооперацию более чем одну соседнюю границу. В этом случае для формирования активной полосы может оказаться достаточным, если миграции будет подвержено менее половины из n границ, составляющих полосу. Исходя из приведенных соображений, будем считать, что если полоса состоит из n границ зерен и часть из них, равная $p_c n$, испытала локальную миграцию, то сформирована активная полоса КЗГП. Перколяционный порог p_c ($0 < p_c < 1$) будем считать свободным параметром, вычисление которого представляет самостоятельную задачу. Расчет числа активных полос сводится к классической вероятностной задаче: случайное распределение известного числа шаров m (полное число промигрировавших границ) по M_0 (максимально возможное число полос) урнам и оценка среднего числа урн $\langle M \rangle$, в которых число шаров превышает величину порога протекания. Полученное таким образом отношение $\langle M \rangle / M_0$ проанализировано в [16] и определяет интервал СПД в пространстве параметров материала и условий нагружения.

5. СКОРОСТЬ СДВИГА В ПОЛОСЕ И СИГМОИДАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ

Для расчета зависимости скорости деформации от напряжения осталось посчитать скорость сдвига в полосе КЗГП. Предполагая аккомодационный характер скольжения в зернах, мы воспользовались тем, что назвали бикристалльным приближением, но плотность ЗГД рассчитали с учетом дислокационной активности зерен. Последующий анализ [17] показал, что характеристики процесса СПД определяются не только средним размером зерен, но и дисперсией их распределения. Существенно сказывается на результатах вид температурной зависимости коэффициента поверхностного натяжения ГЗ и его величина. Было выяснено, что процесс формирования поверхностей КЗГП имеет порог по напряжениям, исследована его зависимость от параметров материала и температуры испытаний. Сравнение с экспериментальными зависимостями $\sigma - \dot{\epsilon}$ показало, что результаты вполне удовлетворительно воспроизводят семейство зависимостей для всех температур в широком интервале скоростей деформации [18]. Таким образом, модель в состоянии объяснить и количественно описать результаты эксперимента, выполненного на ста-

дии стационарного течения для случая одноосного нагружения.

6. ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ СТАДИИ СТАБИЛЬНОГО ТЕЧЕНИЯ

Известно, что стадия стабильного течения завершается формированием необратимо развивающейся шейки и разрушением образца, т.е. расчет ресурса СП сводится к анализу условий и механизма формирования необратимо развивающейся шейки. При этом шейка — это уже макроскопическая характеристика деформационного поведения. Из общих соображений ясно, что если скорость изменения длины определяется полным числом полос КЗГП в данный момент времени, то скорость изменения линейных размеров любого сечения определяется числом полос в окрестности данного сечения. При однородном распределении полос по длине образца скорость изменения поперечных размеров не зависит от выбранного сечения и формирования шейки не происходит. С увеличением длины образца возможностей для неоднородного распределения полос становится больше (как в силу увеличения базы, так и в силу возможного уменьшения абсолютного числа полос) и вероятность появления шейки возрастает. Однако априори не ясно, будет ли она развиваться необратимо или в дальнейшем её «догонят» другие сечения.

Будем рассматривать образец как двумерную область, заданную в координатах (x, z) условием

$$\{|z| \leq l(t), \quad |x| \leq h(z, t)\}.$$

Здесь $l(t)$ — половина длины образца в момент времени t ; $h(z, t)$ — половина ширины в сечении z в момент времени t . Тогда нетрудно получить кинематическое уравнение для $h(z, t)$:

$$\frac{\dot{h}(z, t)}{l(t)} = - \int_{z-h(z, t)}^{z+h(z, t)} p(z', t) dz', \quad h(z, 0) = h_0, \quad (1)$$

где h_0 — половина ширины образца в момент времени $t = 0$; $p(z, t)$ — плотность распределения полос по длине образца, нормированная условием

$$\int_{-l(t)}^{l(t)} p(z, t) dz = 1.$$

Для однородного распределения полос $p(z, t) = \frac{1}{2l(t)}$ уравнение (1) сводится к условию несжимаемости

$$\frac{d}{dt} [l(t)h(z, t)] = 0$$

и описывает однородное изменение поперечного сечения. Если масштаб неоднородности распределения полос много меньше текущей ширины, то, поскольку длина интервала интегрирования в (1) равна $2h(z, t)$, такая неоднородность будет сглажена интегрированием и слабо скажется на величине $\dot{h}(z(t))$. И только лишь когда характерный масштаб неоднородности по порядку величины сравним с текущей шириной, формируется значимая локализация течения. Содержательность анализа зависит от физического наполнения распределения $p(z, t)$. Оказалось, что это проще сделать, если сопоставить уравнению (1) соответствующее стохастическое уравнение. При этом удобнее в качестве независимой переменной рассматривать не время t , а текущую длину l . Для случайной функции $\tilde{h}(l) = h(l) - \langle h(l) \rangle$ можно рассчитать коррелятор $\langle \tilde{h}(l_1)\tilde{h}(l_2) \rangle$. За недостатком места мы не будем приводить полного анализа. Результат же можно сформулировать следующим образом. В зависимости «одновременного» коррелятора $R = \langle \tilde{h}(l)\tilde{h}(l) \rangle$ выделяются три стадии.

1. $R \sim 0, l_0 < l < l_1$.
2. $R \sim l, l_1 < l < l_2$.
3. $R \sim l^n, l_2 < l$.

Первая стадия соответствует однородной деформации. Вторая стадия с линейной зависимостью является аналогом диффузионного поведения и описывает так называемый режим бегающей шейки. Нелинейный рост дисперсии соответствует локализации и необратимому развитию шейки (аналог критического зародыша). Границы между стадиями (l_1, l_2) определяются законом изменения числа полос КЗГП на единицу длины образца при увеличении l : $M(l)$. Конкретный вид зависимости $M(l)$ определяется степенью удаленности условий деформации от оптимальных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Периодизация истории исследования СП, проведенная в разделе 2, показывает, что проблема сверхпластичности в исторической ретроспективе формировалась как проблема представительного объема. В результате возникли новые представления о деформационном механизме СПД, основанном на действии

полос кооперативного ЗГП. Эта концепция позволяет сформулировать физическую модель СП, которая не только удовлетворяет стандартному набору требований, предъявляемых к физическим моделям, но и позволяет перекинуть естественный мостик к анализу макрохарактеристик. Нетрудно заметить аналогию между системой полос КЗГП и системой скольжения монокристалла. Как при деформации монокристалла под действием нескольких систем скольжения происходит перетасовка различных его участков, так и при действии полос КЗГП происходит перестановка участков материала, расположенных между полосами, т.е. отдельных зерен, что и приводит к удлинению образца без заметного изменения формы зерен. Но существует одно принципиальное и очень важное отличие между системами скольжения и полосами КЗГП. Число и ориентация систем скольжения монокристалла однозначно определяются его кристаллической решеткой. Упрочнение в процессе деформации активных систем скольжения и низкое значение фактора Шмидта других систем может достаточно быстро разрушить второе условие парадигмы Тейлора, а тем самым и условие совместности деформации поликристалла в целом. Совершенно иная ситуация с полосами КЗГП. Бесструктурный материал с малым средним размером зерен на макроуровне является практически изотропным, в силу чего ориентация полос КЗГП определяется только характеристиками напряженного состояния, а именно: полосы КЗГП расположены в плоскости действия максимальных сдвиговых напряжений. Упрочнение полосы (например, в результате действия кавитационных эффектов или в результате разворота при деформации и последующего выхода из плоскости максимальных сдвиговых напряжений) приведет к ее заперению. Однако изменившееся напряженное состояние сформирует иначе ориентированную систему полос КЗГП, поскольку есть возможность выбирать из континуума ориентаций, а не из конечного числа систем скольжения. Таким образом, можно сказать, что СП материал — это материал с бесконечным числом систем скольжения, роль которых выполняют системы полос КЗГП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кайбышев О. А., Астанин В. В., Валиев Р. З. Зернограничное проскальзывание при деформации цинковых бикристаллов // ДАН. 1979. Т. 245, № 6. С. 1356–1358.

2. **Kaibyshev O. A.** Superplasticity of Alloys, Intermetallides and Ceramics. Springer-Verlag. 1992. 317 p.
3. **Валиев Р. З., Хайруллин В. Г., Шейх-Али А. Д.** Феноменология и механизмы зернограничного проскальзывания // Изв. вузов. Физика. 1991. № 3. С. 93–103.
4. **Fukutomi H., Takatory H., Horiuchi R.** Grain boundary sliding with and without matrix slip deformation in cadmium bycrystals // Trans. Japan Inst. Metals. 1982. V. 23, No. 10. P. 579–584.
5. **Edington J. W., Melton K. N., Cutler C. P.** Superplasticity // Progress in Mater. Sci. 1976. V. 21. P. 61–170.
6. **Пшеничнюк А. И., Кайбышев О. А., Астанин В. В.** О возможности использования физических моделей при построении определяющих соотношений сверхпластичности // Математическое моделирование систем и процессов. № 6. Пермь: ПГТУ, 1998. С. 92–98.
7. **Ashby M. F., Verrall R. A.** Diffusion-accommodated flow and superplasticity // Acta metall. 1973. V. 21. P. 149–163.
8. **Пуарье Ж.-П.** Ползучесть кристаллов. Механизмы деформации металлов, керамик и минералов при высоких температурах. М.: Мир, 1988. 287 с.
9. **Hayden H. W., Floreen S., Goodell P. D.** The deformation mechanisms of superplasticity // Metall. Trans. 1972. V. 3. P. 833–842.
10. **Astanin V. V., Kaibyshev O. A., Faizova S. N.** Cooperative grain boundary sliding under superplastic flow // Scripta Met. et Mater. 1991. V. 25, No. 12. P. 2663–2668.
11. **Astanin V. V., Kaibyshev O. A., Faizova S. N.** The role of deformation localization at superplastic flow // Acta metall. 1994. V. 42, No. 8. P. 2617–2622.
12. **Pshenichnyuk A. I., Astanin V. V., Kaibyshev O. A.** The model of grain-boundary sliding stimulated by intragranular slip // Phil. Mag. A. 1998. V. 77, No. 4. P. 1093–1106.
13. **Astanin V. V., Kaibyshev O. A.** Cooperative grain boundary sliding and superplastic flow nature // Materials Science Forum. Ed. T. Langdon. Trans Tech Publication, Switzerland. 1994. Vols. 170–172. P. 23–28.
14. **Astanin V. V., Sisanbaev A. V., Pshenichnyuk A. I., Kaibyshev O. A.** Self-organization of cooperative grain boundary sliding in aluminium tricrystals // Scripta Met. et Mater. 1997. V. 36, No. 1. P. 117–122.
15. **Astanin V. V., Kaibyshev O. A., Pshenichnyuk A. I.** Cooperative processes during superplastic deformation // Mater. Sci. Forum. 1997. Vols. 243–245. P. 41–46.
16. **Пшеничнюк А. И., Кайбышев О. А., Астанин В. В.** Природа крупномасштабного течения как отличительный признак сверхпластичности // ФТТ. 1997. Т. 39, № 12. С. 2179–2185.
17. **Астанин В. В., Кайбышев О. А., Пшеничнюк А. И.** К теории сверхпластической деформации // ФММ. 1997. Т. 84, вып. 6. С. 5–16.
18. **Kaibyshev O. A., Pshenichnyuk A. I., Astanin V. V.** Superplasticity resulting from cooperative grain boundary sliding // Acta mater. 1998. V. 46, No. 14. P. 4911–4916.

ОБ АВТОРАХ

Кайбышев Оскар Акрамович, директор ИПСМ, академик АН РБ, профессор. Дип. инженер по физике металлов (Московский институт стали и сплавов, 1962), д-р техн. наук в области материаловедения (МИСиС, 1973). Исследования по сверхпластичности металлов.



Пшеничнюк Анатолий Иванович, ст. науч. сотр. ИПСМ. Дипл. физик (БГУ, 1971), канд. физ.-мат. наук в области математической физики (ИПМ им. М. В. Келдыша, 1985). Исследования по сверхпластичности металлов.

