УДК 539.3+536.2

УСТОЙЧИВАЯ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ И ТЕПЛООБМЕН

Ключников Г.М., Ключников И.Г.

ФГБОУ ВПО «Ижевский Государственный Технический Университет имени М.Т. Калашникова», Ижевск, e-mail: klioutch313@mail.ru

Предлагается ввести понятие устойчивой сверхпластической деформации (УСПД), гарантирующей предельно возможную деформацию без разрушения. В работе показана тенденция развития стадий естественной самоорганизации деформации по мере приближения к стадии УСПД. На смену каналу диссипации с грубыми неустойчивыми кооперативными магистральными проскальзываниями приходит более тонкий канал диссипации, обусловленный движением друг относительно друга отдельных зёрен, очищенных от решёточных дислокаций. Опираясь на ранее предложенные авторами механизм сверхпластической деформации и численные эксперименты, определены условия формирования УСПД для поликристаллических металлов и сплавов, проявляющих эффект сверхпластичности при фазовых переходах. Показана определяющая роль нестационарных тепловых процессов, особенность кратковременных аномальных импульсных зернограничных проскальзываний (с ротацией), сопровождаемых столь же кратковременным аномальным импульсным тепломассопереносом вдоль поверхности проскальзывания и между взаимодействующими зёрнами. Дана физическая интерпретация уникальных особенностей УСПД наноструктурных металлов и сплавов – механизмов подавления неустойчивости деформации, повышенной скорости деформации, пониженной гомологической температуры и др.

Ключевые слова: самоорганизация, сверхпластичность, наноструктура, теплообмен

STABLE SUPERPLASTIC DEFORMATION AND HEAT TRANSFER

Klioutchnikov G.M., Klioutchnikov I.G.

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, e-mail: klioutch313@mail.ru

It is proposed to introduce a concept of stable superplastic deformation (SSPD), which guarantees a maximum possible deformation without breaking. The paper shows the trend of development stages for natural self-organization of deformation as they approach the stage of the SSPD. Instead of the channel dissipation with gross unstable cooperative trunk sliding, a thin dissipation channel develops, due to the motion relative to other individual grains, which are peeled of lattice dislocations. Based on the authors previously proposed mechanism of superplastic deformation and numerical experiments, the conditions of formation of the SSPD for polycrystalline metals and alloys exhibiting superplasticity effect of phase transitions are determined. The determining role of the unsteady thermal processes, especially short-time abnormal pulse grain boundary sliding (with rotation), followed by an equally short-time abnormal pulse heat- and mass-transfer along the slip surface and between the interacting grains, is shown. A physical interpretation of the unique features of the SSPD nanostructured metals and alloys namely mechanisms of restraining deformation instability, increased strain rate, low homologous temperature and others is given.

Keywords: self-organization, superplasticity, nanostructure, heat transfer

Интерес к сверхпластической деформации возрастает в связи с расширением применения в практике наноструктурных материалов. Сверхпластическая деформация используется как при изготовлении изделий, так и в технологиях получения самих мелкозернистых материалов с помощью интенсивной пластической деформации. Возможные положительные и отрицательные проявления эффекта сверхпластичности должны учитываться при проектировании и эксплуатации изделий, особенно для тех, детали которых работают в условиях импульсных тепловых и сдвиговых силовых воздействий. Вместе с тем, разработка и исследование процессов с использованием эффекта сверхпластичности редко сопровождается численными экспериментами. Одна из причин заключается в том, что традиционная сверхпластическая деформация включает разные стадии деформации с отличающимися сочетаниями механизмов и факторов. Совершенно неисследованной остаётся область «околосверхпластического» поведения материалов [1]. В работе предлагается ввести особую стадию устойчивой сверхпластической деформации (УСПД) с предельными возможностями формоизменения. Именно стадия УСПД включает такие отличительные признаки, при которых сама цель её формирования становится решающим системообразующим фактором, влияющим на получение нужных диссипативных структур в очаге деформации, и уже этим обеспечивает актуальность исследования. Введение стадии УСПД позволяет определиться с объектом изучения на этапе постановки задачи, а также сузить количество варьируемых параметров. Её идентификация осуществляется с помощью анализа иерархии самоорганизующихся стадий деформации на базе известных экспериментальных наблюдений, а также численных экспериментов из опубликованных ранее работ авторов настоящей статьи [3–6].

Развитию и углублению понимания деформационных процессов служит предло-

женный оригинальный механизм УСПД для кристаллических металлов и сплавов с использованием эффекта сверхпластичности при фазовых переходах. Отличительной его чертой является аномальное кратковременное импульсное зернограничное проскальзывание (с ротацией и аккомодационным массопереносом), с быстропротекающими нестационарными процессами тепломассообмена на микроуровне, имеющими порядок времени релаксации (~ 10^{-12} с), которые редко принимаются во внимание.

Обсуждаемые ниже численные эксперименты выполнялись с привлечением известных численных методов расчёта нестационарных нелинейных задач теплопроводности параболического и гиперболического типа.

Цель настоящей работы – определить место идеализированной УСПД в иерархии стадий деформации, показать практическую целесообразность её введения, отличительные особенности, важность тепловых процессов в формировании сценария её развития.

Место УСПД в иерархии стадий деформации

Самоорганизующиеся процессы в очаге деформации кристаллических металлов и сплавов по мере развития деформации претерпевают переходы от одной стадии к другой после исчерпания возможностей предыдущего канала диссипации компенсировать внешние воздействия [7]. При этом система выбирает тот путь, который обеспечивает максимальную степень диссипации упругой энергии. На диаграмме (рис.1) представлена иерархия стадий деформации на базе экспериментальных наблюдений при одноосном растяжении или сжатии и при нормальном атмосферном давлении. Стадия течения квазижидкости, в отличие от прочих, возникает в особых условиях сверхвысоких давлений и сдвиговых деформаций, связана с эффектом квантового туннелирования.

Здесь 1, 2, 3, 4, 5 – зоны перехода к очередной стадии деформации. Границы стадийных переходов чаще всего размыты. В практике, в разных местах очага деформации могут одновременно протекать процессы разных стадий, имеющих, соответственно, отличающиеся физические механизмы.

Диаграмма позволяет установить тенденции развития естественной самоорганизации по мере движения к стадии УСПД. Самоорганизация деформации обеспечивается самоподдерживающимися взаимнообусловленными сочетаниями факторов и механизмов, их взаимосодействием.

Грубая неустойчивость, прерывистость пластической деформации в предшествующих УСПД стадиях связана с возникающими кооперативными магистральными проскальзываниями, характерными для крупнозернистой структуры. При обеспечении их однородного распределения в деформируемом объёме могут быть достигнуты значительные общие деформации, которые можно отнести также к сверхпластической деформации, но неустойчивой, нестабильной, где ещё участвуют дислокационные механизмы деформации, в частности, внутризёренное дислокационное скольжение, сток решёточных дислокаций на границы зёрен, процессы динамической рекристаллизации. Такие режимы используют, например, для измельчения зёрен, получения наноструктурных материалов. При переходе к стадии УСПД происходит смена кооперативных магистральных проскальзываний индивидуальными зернограничными проскальзываниями. Механизм деформации коренным образом меняется.

При движении к УСПД особенно важно проследить эволюцию дислокационного канала диссипации, начиная от его определяющей роли при малых пластических деформациях к сменяющимся дислокационным субструктурам (со стремлением к относительному минимуму энергии), к стоку дислокаций в область возникающих проскальзываний. В итоге, наблюдается полное угасание активности дислокаций (очищение зёрен от решёточных дислокаций), что позволяет исключить дислокационные процессы из рассмотрения. На смену дислокационному каналу приходит новый канал диссипации, связанный с перемещением зёрен друг относительно друга как целых тел. При этом обеспечение деформации без разрушения возможно лишь с помощью зернограничного проскальзывания и ротации зёрен при аномальном массопереносе с частичным или полным закрытием образующихся пор (аккомодации). Активные процессы действуют только в пределах приграничных зон зёрен, развиваясь по мере протекания зернограничного проскальзывания.

С измельчением зёрен объёмная доля межзёренных границ в очаге деформации увеличивается, а время зернограничного проскальзывания уменьшается, что приводит к особенностям в происходящих процессах. Отметим на будущее известный из синергетики факт, что наиболее эффективный канал диссипации – вихревое движение, которое будет проявляться всё заметнее по мере увеличения деформации, измельчения и округления зёрен.

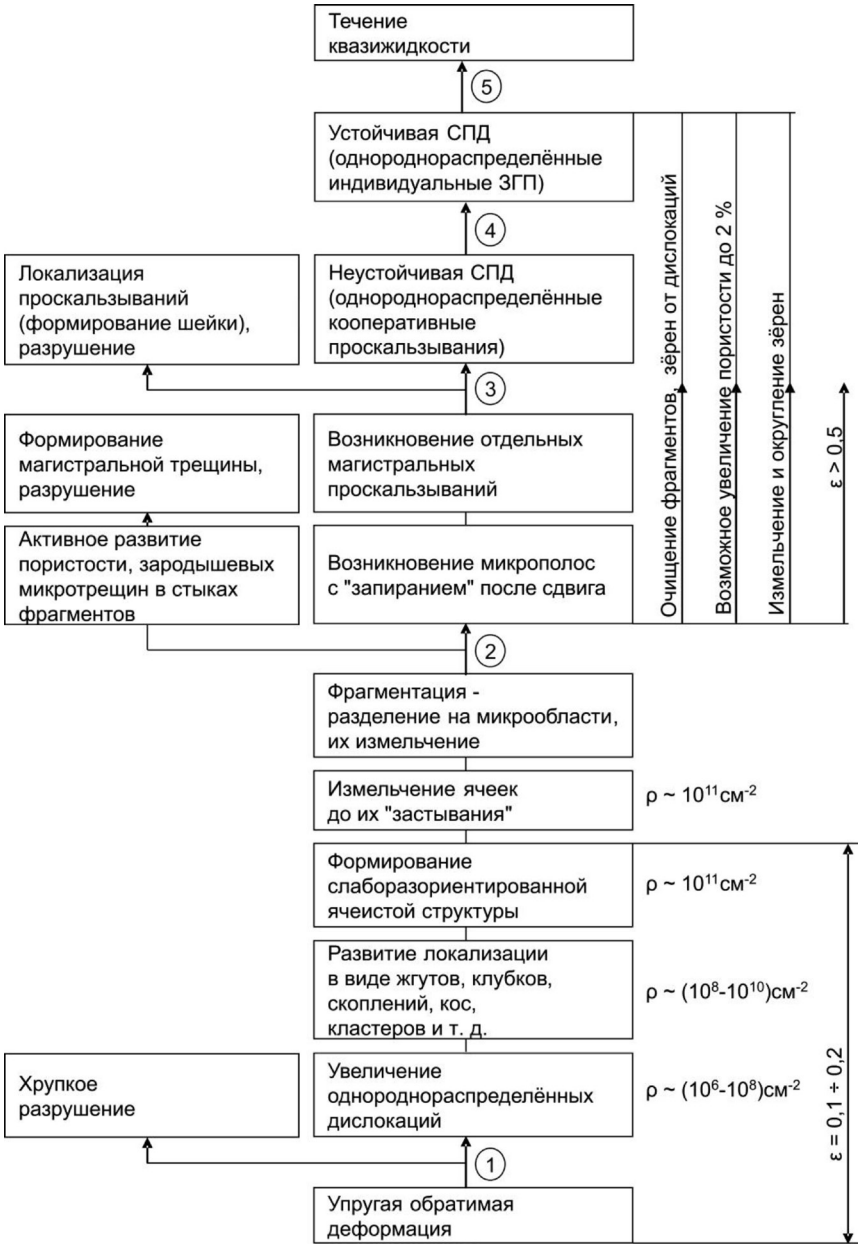

Рис. 1. Стадии деформации кристаллических металлов и сплавов (ρ – средняя плотность дислокаций, СПД – сверхпластическая деформация, ЗГП – зернограничное проскальзывание)

В результате, из анализа иерархии стадий деформации выделим некоторые отличительные признаки стадии УСПД:

1) завершён переход от кооперативного к индивидуальному проскальзыванию зёрен;

2) завершена динамическая рекристаллизация;

3) исключается дислокационный канал диссипации (прекращается внутризёренное дислокационное скольжение, зёрна очищены от решёточных дислокаций);

4) действующими остаются два канала диссипации: зернограничное проскальзывание и ротация зёрен (возможно вихревое движение);

5) образуются измельчённые, округлённые (равноосные) зёрна.

Таким образом, вышеприведённая упрощённая систематизация даёт возможность направить дальнейшее рассмотрение в русло естественной самоорганизации синтезируемой диссипативной системы – к организации УСПД.

Схема организации УСПД

Первым и основным шагом в формировании УСПД является выбор или получе-

ние нового материала с нужными составом, строением, сверхпластическими свойствами. Требования к материалу связаны с конечными целями его применения: какие его сверхпластические свойства предполагается использовать, какие характеристики он должен иметь в исходном состоянии, по ходу и в конце технологического процесса, а также в реальных условиях эксплуатации изделия. Выбранный материал должен быть подвергнут всесторонним исследованиям, результаты которых должны отражать не только традиционно определяемую скоростную чувствительность материалов в состоянии сверхпластичности, но и характерную для процессов диссипации температурную чувствительность, а также чувствительность сверхпластических свойств материала к изменению его состава, строения, с определением возможного изменения параметров без потери сверхпластичности. Должен быть предложен механизм возникновения состояния сверхпластичности.

Второй шаг – приведение деформируемого объёма в состояние активной кинетической среды с последующей возможностью конструирования внутри неё нужной диссипативной структуры в режиме самоорганизации. Понятие активной кинетической среды, используемое в теории самоорганизации, имеет следующие характерные признаки [2]: а) существует распределённый источник энергии или веществ, богатых энергией; б) каждый элементарный объём среды находится в состоянии, далёком от равновесия, то есть является открытой термодинамической системой, в которой диссипирует часть энергии, поступающей из распределённого источника; в) связь между соседними элементарными объёмами осуществляется за счёт процессов переноса.

Способ организации активной кинетической среды должен быть подчинён реализации конкретного физического механизма сверхпластической деформации, эксплуатирующего намеченное и изученное прежде сверхпластическое свойство выбранного материала. Размер очага, где сверхпластическая деформация будет следовать в русле естественной самоорганизации, определяется, соответственно, размером активной кинетической среды, подготовленной и поддерживаемой в процессе деформации. Поведение материала вне этой зоны должно рассматриваться особо.

Третий шаг должен дать ответ на вопрос: какое самоподдерживающееся взаимнообусловленное сочетание механизмов и факторов обеспечит реализацию УСПД в подготовленной активной кинетической среде очага деформации? Должна быть разработана программа мониторинга и управления процессом реализации этого сочетания. По ходу реального технологического процесса УСПД возможно включение процедур по управлению параметрами обработки, её маршрутами и режимами, например, контролируемым размером зёрен с помощью термомеханических воздействий.

Четвёртым шагом следует проверка детали (конструкции), изготовленной с использованием сверхпластической деформации, на работоспособность (на возможность отрицательного проявления эффекта сверхпластичности) при всех режимах эксплуатации изделия, подобной проверкам на резонанс.

Условия организации УСПД с использованием фазовых переходов

Сузим задачу до конкретного вида УСПД, использующей сверхпластические свойства кристаллических металлов и сплавов при переходах, где более очевидна роль тепловых процессов. (Сам факт проявления сверхпластичности материалов при фазовых переходах широко используется в практике).

Под переходами здесь понимается любая экстенсивная перестройка атомной или магнитной структуры. Практически каждый металл и сплав испытывает те или иные переходы. Двадцать шесть металлов таблицы Д.И. Менделеева при нормальном давлении испытывают фазовый переход от низкотемпературной плотноупакованной к высокотемпературной ОЦК модификации. К рассматриваемым переходам следует отнести эвтектические и эвтектоидные превращения в бинарных системах, изменения морфологии карбидов, а также плавление.

Металлы и сплавы обладают сильными межатомными связями с коллективизированными электронами. Характерная для металлов особенность – коллективность различных актов, то есть протекание их не по-атомно, а «квантами», что порождает скачкообразное, спорадическое развитие процессов на микроуровне [8]. Ниже использован этот факт при рассмотрении численного моделирования взаимодействия фронта перехода с границей зерна.

Изложим концепцию физического сценария развития УСПД на микро- и макроуровне, опираясь на выделенные выше её отличительные признаки, а также на ранее выполненные работы [3–6].

Предложен следующий механизм УСПД поликристаллических металлов и сплавов с использыванием переходов (его основу составляет ранее предложенный авторами механизм сверхпластичности, принципиально отличающийся от существующих [3]).

УСПД возникает в очаге деформации как результат эволюции элементарного акта пластичности – аномального кратковременного импульсного зернограничного проскальзывания (с ротацией зёрен) с аномальным кратковременным импульсным тепломассопереносом вдоль поверхностей проскальзывания. В отличие от обычной зернограничной диффузии здесь скорость аккомодационного переноса массы намного выше. Физическая природа этих явлений связана с кратковременным разупорядочением атомной структуры (потерей дальнего порядка) при появлении здесь межфазной границы того или иного перехода (фронта перехода), а также с механостимулированием сдвиговой деформацией. Начало перехода связано, в свою очередь, с определённой температурой T_n, выполняющей, в связи с этим, роль управляющего параметра. При достижении T_n на границе зёрен и при достаточном сдвиговом усилии стартует зернограничное проскальзывание, которое сопровождается спадом локальной величины напряжения и всплеском температуры. Фронт перехода (вместе с изотермой T_n = const) покидает зону проскальзывания. Зернограничное проскальзывание резко прекращается, вызывая поворот взаимодействующих зёрен. Фронт перехода перемещается на границы соседних зёрен, где может спровоцировать очередное зернограничное проскальзывание после пополнения запаса энергии упругой деформации. Движение каждого зерна (поступательное и вращательное) контролируется величиной и направлением действия внешних по отношению к нему сил и моментов, а также пределами ограничений со стороны соседних зёрен и свободных границ.

Итак, сценарий развития УСПД будет во многом определяться динамикой изменения действительного поля температур на микроуровне, в зоне зернограничного проскальзывания, об особенностях которого ниже будет идти речь.

Представленные результаты численных экспериментов получены с использованием справочных данных для технически чистого титана, а также общеизвестных численных методов расчёта нестационарных нелинейных задач теплопроводности параболического и гиперболического типа.

Показана значительная неравномерность температур по периметру шероховатой поверхности, возникающая при нагреве импульсным кратковременным тепловым потоком. Границы зёрен имеют ступенчатое, островковое или зубчатое строение. На рис. 2 приведено распределение относительной температуры по периметру поверхности с уступом. Как видим, температура выступающей острой кромки ступеньки существенно превышает температуру гладкой поверхности. Применительно к условиям нагрева границы зерна при зернограничном проскальзывании можно утверждать, что именно перегретые микронеровности служат первоначальным «строительным материалом» межзёренных микрообъёмов с неравновесной суперпозицией фаз. Этим можно объяснить также постепенное округление зёрен при сверхпластической деформации, приобретение ими равноосной формы. Очевидно, что эффект проявится сильней при большеугловых границах зёрен.

Оценивалась глубина проникновения тепла в тело зёрен δ при кратковременном импульсном нагреве. Из рис. 3, где показана относительная глубина прогрева зерна размером 10 мкм, видно её резкое падение с уменьшением времени действия источника тепла, стремление к изохорному процессу. Величина прогрева при реальном времени зернограничного проскальзывания соизмерима с толщиной «мантии» зёрен, фиксируемой в экспериментах с помощью оценки травящихся зон после сверхпластической деформации. Именно в этой зоне (при значительных градиентах температур и градиентных структурно-фазовых состояниях) сосредоточены поставщики продуктов для реализации кинетики импульсных диссипативных процессов в межзёренных микрообъёмах с динамическим неравновесным состоянием при зернограничном проскальзывании, а также «поставщики» отличительных особенностей наноструктур.

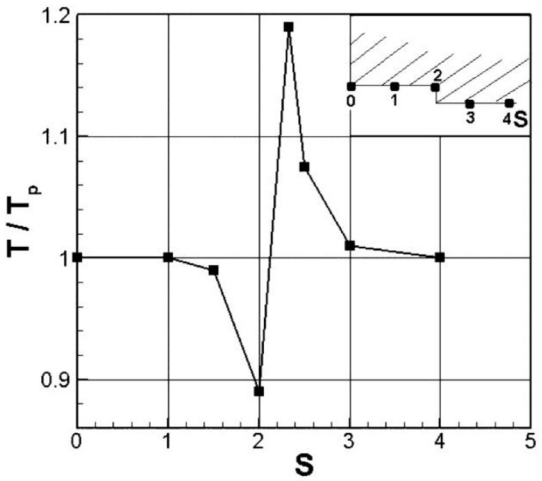

Рис. 2. Распределение относительной температуры по периметру поверхности с уступом при импульсном теплоподводе (T_p – температура гладкой поверхности)

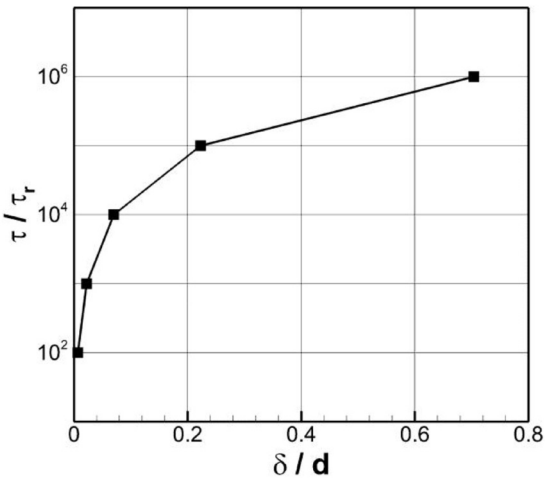

Рис. 3. Зависимость относительной глубины прогрева зерна от относительного времени действия источника тепла (d – размер зерна, τ_r – время релаксации теплового потока)

Оригинальные результаты получены при численном моделировании влияния на температуру границ зерен аномалий изменения теплофизических характеристик при возникающих переходах в случае импульсного теплового воздействия [3]. Так, для прямого (при нагреве) и обратного (при охлаждении) фазового $\alpha \leftrightarrow \beta$ перехода для технически чистого титана, когда коэффициент теплопроводности скачком изменяется почти в два раза (21 Вт/м.К для α – фазы и 12 Вт/м.К для β – фазы), влияние различное. Если на ветви нагрева эта аномалия вызывает увеличение температуры, то на ветви охлаждения – осцилляцию температуры границы зерна в связи со скачкообразными переходами «квантами», как было отмечено выше. В других материалах может быть противоположный скачок величины теплопроводности, например у циркония, тогда осцилляция возникнет на ветви нагрева. Осцилляция образуется в случае, если появляющаяся новая фаза изменяет температуру границы в сторону, противоположную её изменению от действия внешнего источника тепла. В пределах межзёренных объёмов могут возникать, соответственно, тонкие, неоднократные импульсные проскальзывания с шагом, меньшим чем размер зерна, со следами в виде полосчатых зон. Различие теплофизических характеристик фаз также существенно влияет на процессы межзёренного тепломассообмена при зернограничном проскальзывании и, соответственно, на изменение структуры материала по ходу сверхпластической деформации (на объёмное соотношение фаз, на размер зёрен, на миграцию границ зёрен и т.п.).

Следующий шаг в изучении сценария развития УСПД связан с процессами на макроуровне.

Как было сказано выше, для функционирования пространственной диссипативной структуры в режиме самоорганизации деформируемый объём (в данном случае рабочая часть образца) для обеих стадий СПД должен поддерживаться в состоянии активной кинетической среды, с удержанием этого состояния от старта до финиша процесса. Роль распределённого источника энергии играет энергия накопленной упругой деформации материала и нагружающего устройства, которой питается диссипативная структура. Неравновесное термодинамическое состояние взаимодействующих зёрен достигается приведением среды в предпереходное состояние, когда среднеинтегральная температура находится регламентированно ниже температуры начала полиморфного превращения титана ($T = T_n - \Delta T$). Связь между зёрнами осуществляется механическим взаимодействием и тепломассообменом.

Какое самоподдерживающееся взаимнообусловленное сочетание факторов и механизмов обеспечит реализацию УСПД в объёме очага деформации? Выяснить это можно из сравнения объёмных диссипативных структур стадии УСПД и предшествующей стадии СПД с грубой неустойчивостью деформации. Выше отмечено, что широко используемые механизмы и соотношения, базирующиеся на дислокационной и диффузионной теориях, для УСПД не пригодны.

В работах [5, 6] показаны результаты численного моделирования старта и развития самопроизвольного перемещения по пространству и времени грубых импульсных магистральных проскальзываний (эволюции диссипативных структур) при растяжении плоского образца из технически чистого титана. Магистральное проскальзывание, проходящее через всё тело образца, происходит по рельефной поверхности, образованной совокупностью граней зёрен, вовлечённых в проскальзывание.

Эволюция проскальзываний в очаге деформации связана с управляющим параметром – началом перехода T_n, при достижении которого стартует исходное магистральное проскальзывание (сопровождаемое стоком решёточных дислокаций, динамической рекристаллизацией) которое, в свою очередь, вызывает резкое падение напряжения и всплеск температуры, приводящие к резкому прекращению проскальзывания. Тепло распространяется в обе стороны от

места проскальзывания и, соответственно, два фронта перехода вместе с двумя изотермическими поверхностями (T_n = const) будут медленно расходиться в разные стороны. Два очередных проскальзывания возникнут в том месте, где их настигнет момент восстановления напряжения до величины, достаточной для двух наведённых проскальзываний, и, следовательно, эволюция проскальзываний, различная по форме зубчатость кривых σ – ε зависят от скорости деформации $\acute{\varepsilon}$. Расстояния между поверхностями проскальзывания будут кратны размеру зерна.

Стандартные условия реализации сверхпластической деформации обычно сводятся к раздельному выбору размера зёрен, скорости деформации (либо коэффициента скоростной чувствительности), температуры (часто реализуется изотермический процесс).

Размер зёрен часто считают базовым фактором различия стадий, который при монотонном развитии деформации требует особого сочетания с остальными факторами и механизмами для максимального проявления сверхпластических свойств. Именно для крупных зёрен характерно кооперативное проскальзывание, где работают дислокационные механизмы, динамическая рекристаллизация, помогающие выстраивать границы зёрен в общую поверхность проскальзывания. И, наоборот, при приближении к УСПД с нанокристаллической структурой происходит утонение частей материала (доменов) между поверхностями проскальзывания до потери их устойчивости при некоторой критическом размере округлённых зёрен, лишённых решёточных дислокаций. О влиянии на размер зерен процессов в их «мантиях» говорилось выше. Должны учитываться квантово – размерные эффекты.

Смещение реализации УСПД в область высоких скоростей. Из вышеизложенного следует , что подавление неустойчивости предыдущей стадии СПД возможно подготовкой материала с высокой однородностью структуры и изотропными механическими свойствами материала, исключением кооперативных проскальзываний, переходом от медленной релаксации, контролируемой медленным перемещением изотермических поверхностей (фронтов перехода) между исходным и наведённым магистральными проскальзываниями, к быстрой релаксации, определяемой распределёнными по объёму кратковременными зернограничыми проскальзываниями отдельных наноразмерных зёрен. Резкое ускорение диссипативных процессов смещает реализацию УСПД в область высоких скоростей, устраняя один из основных недостатков традиционной сверхпластической деформации.

Смещение реализации УСПД в область низких температур. Известно, что сдвиговая деформация стимулирует развитие фазового превращения, уменьшая температуру его начала T_n (T_n – управляющий параметр!) иногда вплоть до комнатной [9]. При стадии неустойчивой деформации крупнозернистого материала снизить $T_п$ не удаётся, так как имеет место перемещение фронта перехода в пространстве между исходными и наведёнными проскальзываниями. Этот переход не стимулирован сдвиговой деформацией в отличие от стадии УСПД. Кроме того, снижение температуры режима по ходу деформации требуется в обеих стадиях для компенсации интегрального тепловыделения при диссипации, из-за необходимости удержания активной кинетической среды в «тонусе» ($T = T_п – \Delta T$).

Чередующиеся импульсные проскальзывания, инициируемые фазовым переходом, неизбежно формируют двухфазную структуру в очаге деформации. Очевидно, что предварительная подготовка материала с бинарной микроструктурой облегчит реализацию УСПД, причём при высокой однородности наноструктурного материала наиболее благоприятная исходная структура будет при равенстве объёмного соотношения фаз (50 % α / 50 % β), что подтверждают многие экспериментаторы. Это подчёркивает известное положение, что для процесса самосогласования, самоорганизации предпочтение надо отдавать тем материалам, в которых физический механизм желаемой деформации заложен «генетически».

Как видим, сочетание механизмов и факторов (их величин) при переходе от неустойчивой стадии СПД к устойчивой кардинально меняется и для функционирования каждой из них требуется соблюдение своих особых условий организации.

При практической организации конкретного процесса пластической деформации необходимо выделить ту часть объёма очага деформации, где реализуются вышеназванные самоорганизующиеся процессы УСПД с её отличительными признаками, где активная кинетическая среда поддерживается в «тонусе». Влияние остальной части на общую деформацию рассматривается особо, с учётом своих деформационных механизмов. Программируемыми локальными условиями теплообмена и нагружения, опираясь на открывающиеся возможности численного моделирования, можно учесть изменения геометрии очага деформации, влияние креплений (зажимов) и другие осо-

бенности, которые имеют место в реальных технологиях. Особо тщательного мониторинга и программируемого управления требует температурный режим, играющий определяющую роль в формировании тонких диссипативных процессов УСПД.

Заключение

Введённая стадия УСПД, завершающая иерархию стадий естественных самоорганизующихся процессов пластической деформации, удачно объединяет востребованные в практике уникальные характеристики поведения наноструктурного материала – предельно высокую устойчивую деформацию без разрушения, повышенную прочность при сохранении пластичности, смещение сверхпластичности в зону повышенных скоростей и пониженных гомологических температур. На примере поликристаллических металлов и сплавов, проявляющих сверхпластичность при фазовых переходах, приведена физическая интерпретация этих характеристик, условия их получения.

Предложен своеобразный механизм УСПД, условия её развития. Показана особая роль в этом сценарии нестационарных тепловых воздействий. С помощью численных экспериментов физически обоснована отличительная особенность предложенного механизма сверхпластической деформации – кратковременность аномальных импульсных зернограничных проскальзываний (с ротацией отдельных зёрен или их групп), сопровождаемых столь же кратковременным аномальным импульсным тепломассопереносом вдоль поверхностей проскальзывания, а также между взаимодействующими зёрнами при сохранении их равноосности. Кратковременность мигрирующих рассредоточенных по очагу деформации ослабленных межзёренных связей оберегает от разрушения, декогезии (даже с маловязкой зернограничной фазой в случае высокотемпературной сверхпластической деформации).

Развитие и углубление физических представлений о деформационных механизмах, о принципах формулирования задач, дают возможность сузить количество вариируемых факторов, более целенаправленно формировать компьютерное численное моделирование, компьютерное управление кинематическими, силовыми и тепловыми параметрами процесса сверхпластической деформации.

Список литературы

1. Васин Р.А., Быля О.И. О формулировке условия сверхпластичности в задачах механики (проблема его экспериментального построения) // Письма о материалах. – 2013. – Т. 3, № 2. – С. 95–98.

2. Васильев В.А., Романовский Ю.М., Яхно В.Г. Автоволновые процессы в распределённых кинетических системах // Успехи физических наук. – 1979. – Т. 128. – Вып. 4. – С. 625–666.

3. Ключников Г.М. О механизме сверхпластичности // Сверхпластичность металлов: тезисы докл. Третьей всесоюзной конф.– Тула, 1986. – С. 35–36.

4. Ключников Г.М., Ключников И.Г. Тепловые эффекты в связи с аномалиями свойств материалов при превращениях // Высокотемпературные охлаждаемые газовые турбины двигателей летательных аппаратов. Межвуз. сб. Казань.– 1986. – С. 91–96.

5. Ключников Г.М., Ключников И.Г. Тепломассообмен при аномальной пластичности металлов // Инженерно-физический журнал. – 1994. – Т. 67. – № 1–2. – С. 127–131.

6. Ключников Г.М., Ключников И.Г. Эволюции диссипативных структур при аномальных пластических деформациях // Актуальные проблемы фундаментальных наук: труды Международной научно-технической конференции (Москва, 24–28 января 1994 г.). – Москва, 1994. – Т. 2. – ч. 1.– С. 25–27.

7. Конева Н.А., Козлов Э.В. Современная картина стадий пластической деформации // Вестник ТГУ. – 2003. – Т. 8. – № 4. – С. 514–518.

8. Медников С.И., Гуреев Д.М. Кинетика фазовых превращений в железе и стали при нагреве // ИФЖ. – 1991. – Т. 61. – № 4. – С. 669–672.

9. Слядников Е.Е. Структурный переход в сильновозбуждённое состояние в деформированном кристалле // Физ. мезомех. – 2003. – Т. 6. – № 5. – С. 29–36.