

ФОРМИРОВАНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ МЕЗОПОЛОСОВЫХ СТРУКТУР ПРИ РАСТЯЖЕНИИ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ С ПРОТЯЖЕННЫМИ ГРАНИЦАМИ РАЗДЕЛА

В. Е. Панин, В. С. Плешанов, Ю. В. Гриняев, С. А. Кобзева

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634021 Томск

Изучено влияние крупномасштабных границ раздела в виде протяженных поперечных локализованных областей переплава на механизм пластической деформации поликристаллов низкоуглеродистой стали. Теоретически и экспериментально показано, что в зоне таких границ раздела возникают осциллирующие мезоконцентраторы напряжений, релаксация которых обуславливает формирование в деформируемых поликристаллах периодических полосовых структур мезомасштабного уровня.

Введение. Периодический характер пространственного распределения элементов диссипативных структур представляет собой одно из фундаментальных явлений структурообразования при неупругом деформировании твердых тел. Согласно положениям физической мезомеханики материалов, пластическая деформация — сугубо релаксационный процесс, при котором потоки деформационных дефектов зарождаются и распространяются в условиях неоднородного напряженного состояния только в локальных зонах концентраторов напряжений [1]. Из этого следует, что именно пространственная упорядоченность концентраторов напряжений является причиной возникновения периодических дефектных структур при пластическом течении кристаллических тел.

В работе [2] теоретически показано, что на границах зерен упруго нагруженного поликристалла имеет место осциллирующий характер контактных напряжений, обусловленных жесткой связью по общей границе кристаллитов с различными упругими модулями. Это дало возможность [3] связать дискретность любого скольжения с осциллирующим характером напряжений на границах раздела и определить концентраторы напряжений как источники зарождения пластического сдвига. Применительно к отдельным структурным элементам поликристалла данное положение означает, что дискретный характер линий скольжения обусловлен осцилляцией упругих напряжений на границах деформируемых зерен. В локальных областях концентраторов напряжений происходит потеря сдвиговой устойчивости кристаллической решетки, зарождение и движение потоков дислокаций по определенным кристаллографическим направлениям.

В соответствии с принципом масштабной инвариантности в деформируемом твердом теле [1] периодичность дефектных структур должна иметь место и на более высоких (мезоскопических) структурных уровнях деформации. Для этого необходимо определить условия возникновения в образце осциллирующих мезоконцентраторов напряжений, в зоне которых происходит зарождение и распространение релаксационных потоков деформационных дефектов мезомасштабного уровня.

Исследовать данный вопрос в рамках стандартных механических испытаний весьма трудно, поскольку в деформируемом образце пластическое течение развивается одновременно на всех масштабных уровнях. Мезоконцентраторы напряжений необходимо вводить в образец изначально, чтобы они были определяющими в развитии пластической дефор-

мации. Это может быть сделано формированием в деформируемом образце искусственных протяженных границ раздела.

В настоящей работе крупномасштабные границы раздела в поликристаллических образцах моделировались протяженной поперечной узлокализованной областью переплава путем воздействия на образец высокоэнергетическим дуговым разрядом. Такое состояние материала характеризуется сильно выраженным градиентом структур в областях «основной металл — зона термического влияния (ЗТВ) — область переплава», что обуславливает значительное различие характеристик прочности и пластичности в данных зонах. При нагружении таких образцов внешним механическим полем это должно приводить к появлению на границах разнодеформированных материалов осциллирующих контактных напряжений высокого масштабного уровня. Релаксация последних должна обеспечить формирование периодических полосовых мезоскопических структур в областях металла, прилегающих к границам раздела.

Материал и методика исследований. Изучение процессов формирования и эволюции полосовых мезоскопических структур на поверхности металлических образцов с размерами $75 \times 5 \times 1$ мм проводили при статическом растяжении поликристаллов со скоростью 2–4 мм/ч при температуре 293 К. Протяженные области переплава шириной около 2,5 мм формировались перпендикулярно оси образца в поликристаллах низкоуглеродистой стали 10 со средним размером зерна 15 мкм. Анализируемая поверхность образцов заранее механически полировалась. Запись и обработку изображений поверхности, изучение эволюции мезосубструктуры поликристаллов в процессе деформации проводили с помощью оптико-телевизионной измерительной системы [4]. В результате обработки по специальным программам двух последовательно снятых изображений строились поля векторов смещений мезообъемов и вычислялись распределения локальных компонент тензора пластической дисторсии: продольной ε_{xx} , сдвиговой ε_{xy} и поворотной ω_z .

Результаты и их обсуждение. При исследовании поведения нагруженного твердого тела на мезомасштабном уровне (сложные ансамбли дефектов) необходимо учитывать энергию ядер дефектов, которые при континуальном описании представляют систему взаимодействующих элементарных возбуждений. Эту систему можно заменить физически адекватным полем дефектов, которое характеризуется двумя величинами: тензором плотности дефектов α и тензором плотности потока дефектов j . Теория калибровочных полей позволяет получить динамические полевые уравнения относительно этих величин [5–7]. Рассмотрим уравнение, которое позволит качественно проанализировать распределение плотности дефектов α в статике:

$$S_1 \nabla \times \alpha = -\sigma_1 - \sigma_2 + \gamma k T \delta, \quad (1)$$

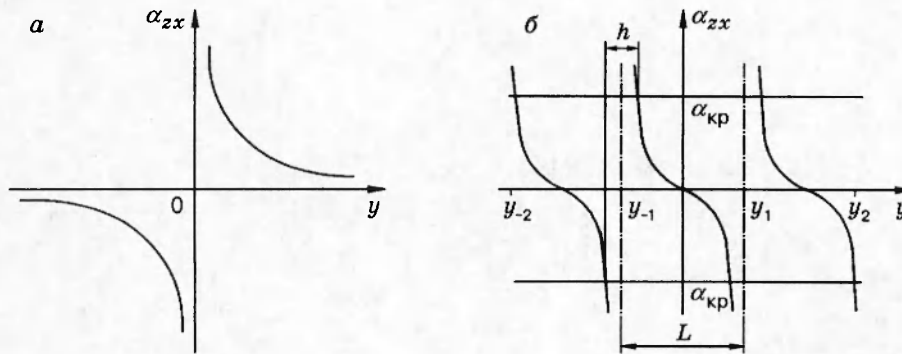
где S_1 — константа теории, имеющая смысл погонной энергии дефекта; σ_1 — материальные напряжения, обусловленные дефектами; σ_2 — напряжения от внешних воздействий, которые положим равными нулю; k и γ — соответственно модуль всестороннего сжатия и коэффициент теплового расширения; T — абсолютная температура. Напряжения σ_1 можно выразить через тензор плотности потока импульса с обратным знаком:

$$\sigma_1 = S_1(\alpha \cdot \alpha - \alpha^2 \delta / 2). \quad (2)$$

В выражении (2), как и в (1), δ — единичный тензор; $\alpha \cdot \alpha$ означает, что по вторым индексам берется скалярная свертка. Подставляя (2) в (1), получим

$$\nabla \times \alpha = (\alpha^2 \delta / 2 - \alpha \cdot \alpha) + \gamma k T \delta. \quad (3)$$

Предположим, что в материале имеет место одна система дефектов (например, α_{zx}), зависящая только от координаты y . В этом случае линия дефекта направлена по z , а

Рис. 1. Распределение плотности дефектов α_{zx} вдоль оси y при $T = 0$ (а) и $T \neq 0$ (б)

скачок смещений — по x . Из уравнения (3) получим

$$-\frac{\partial \alpha_{zx}}{\partial y} = \frac{\alpha_{zx}^2}{2} + \frac{\gamma k T}{S_1}. \quad (4)$$

Уравнение (4) имеет решение при $T = 0$ $1/\alpha_{zx} = y/2$. Распределение плотности дефектов α_{zx} вдоль оси y в этом случае представлено на рис. 1, а. Видно, что в материале появляется граница при $y = 0$, по разные стороны от которой дефекты имеют противоположные скачки смещений и наблюдается локализация дефектов у границы.

При $T \neq 0$ решение уравнения существенно меняется и имеет вид

$$-\alpha_{zx} = (2\gamma k T/S_1)^{1/2} \operatorname{tg} [(\gamma k T/2S_1)^{1/2} y]. \quad (5)$$

Распределение α_{zx} вдоль оси y представлено на рис. 1, б. В данном случае материал вдоль оси y разбивается на области, размер L которых определяется как

$$\bar{L} = \pi(2S_1/\gamma k T)^{1/2}. \quad (6)$$

Из выражения (6) видно, что при повышении температуры размер областей уменьшается, но увеличивается по абсолютной величине α_{zx} внутри области из-за присутствия множителя $(2\gamma k T/S_1)^{1/2}$ в выражении (5). Границы областей

$$y(\gamma k T/2S_1)^{1/2} = \pi/2 \pm n\pi \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

напоминают полосы сброса [8], поскольку дефекты имеют противоположные скачки смещений по разные стороны от границы. Если положить, что плотность дефектов α_{zx} не может превышать некоторого критического значения $\alpha_{кр}$, то появляется возможность качественно проанализировать ширину границы (мезополосы) h :

$$h = 2(2S_1/\gamma k T)^{1/2} \operatorname{arctg} [(2S_1/\gamma k T)^{1/2} \alpha_{кр}]$$

или

$$h = (2L/\pi) \operatorname{arctg} (L\alpha_{кр}/\pi). \quad (7)$$

Таким образом, ширина полос сброса h связана с размером областей L между ними. При $L\alpha_{кр}/\pi > 1$ выражение (7) приближенно можно представить в виде

$$h = (2L/\pi)[\pi/2 - \pi/(L\alpha_{кр}) + \pi^3/(3L^3\alpha_{кр}^3) - \dots],$$

а при $(L\alpha_{кр}/\pi)^2 < 1$ получим $h = 2L/\pi[L\alpha_{кр}/\pi - L^3\alpha_{кр}^3/3 + \dots]$.

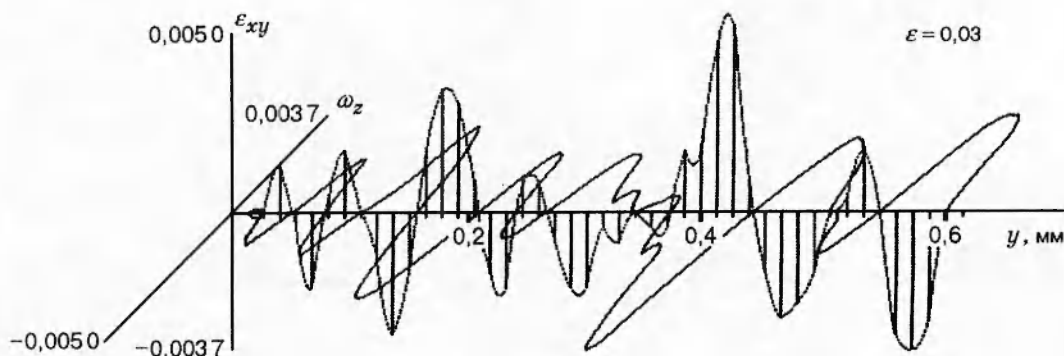


Рис. 2. Распределение компонент сдвига ε_{xy} и поворота ω_z в зоне термического влияния вдоль оси y (перпендикулярно оси образца)

Представленные выше результаты свидетельствуют о том, что в нагруженном твердом теле при пластическом течении возможно периодическое пространственное распределение элементов дефектных структур мезоскопического масштаба.

Результаты экспериментальных исследований на примере поликристаллов с крупномасштабными границами раздела хорошо согласуются с выводами теоретической модели. При нагружении поликристалла протяженная поперечная область переplava является сильным полосовым концентратором напряжений, который формирует в образце неоднородное напряженное состояние и определяет развитие на мезоуровне сильно неоднородной пластической деформации. Уже в начале макропластической деформации (относительное удлинение образца $\varepsilon = 0,01 \div 0,02$) в ЗТВ развивается локализованное пластическое течение в виде волны локализованной пластической деформации, в то время как в основном металле пластическое течение еще практически не проявляется. Волна локализованной пластической деформации характеризуется осцилляцией сдвигов ε_{xy} и синхронно связанных с ними материальных поворотов ω_z перпендикулярно оси образца (рис. 2), что качественно подобно теоретическим результатам (см. рис. 1, б). Природа такой волны объясняется тем, что каждый локализованный сдвиг и связанный с ним материальный поворот, инициированные мезоконцентратором напряжений на одной стороне ЗТВ, вызывают на противоположной границе ЗТВ появление встречного мезоконцентратора напряжений (в механике они называются силами изображения). Последний релаксирует сдвигом ε_{xy} и поворотом ω_z противоположного знака. Этого требует закон сохранения момента количества движения, согласно которому в условиях сохранения сплошности материала сумма роторов всех потоков деформационных дефектов в образце должна быть равна нулю [1].

Таким образом, распространение волны в ЗТВ связано с возникновением на границах ЗТВ серии осциллирующих мезоконцентраторов напряжений. Их релаксация происходит путем распространения мезополос по обе стороны от границы раздела. В зоне термического влияния шириной Δt_1 отражение мезополос от встречной границы раздела (рис. 3) обуславливает распространение волны локализованной пластической деформации с длиной λ_1 , а релаксация мезоконцентраторов напряжений в основной металл образца происходит путем распространения мезополос, представленных на рис. 4 (40-кратное увеличение, $\varepsilon = 0,03$). Они вызывают силы изображения на боковых поверхностях образца, которые формируют сопряженные мезополосы, представленные на рис. 5 (110-кратное увеличение, $\varepsilon = 0,04$). В результате вдоль образца тоже распространяются осциллирующие мезополосы, образуя периодическую мезополосовую структуру. Ее период λ_2 определяется шириной образца Δt_2 . Поскольку $\Delta t_2 > \Delta t_1$, то $\lambda_2 > \lambda_1$.

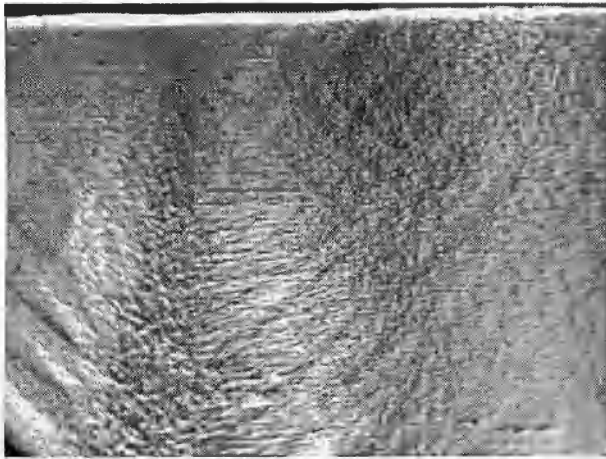


Рис. 3

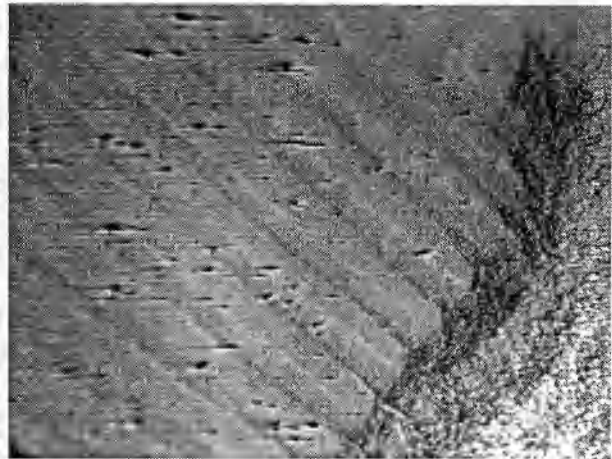


Рис. 4

Рис. 3. Отражение и развитие мезополос от границ раздела в зоне термического влияния

Рис. 4. Зарождение регулярных мезополос на протяженной границе раздела «зона термического влияния — основной металл» и их развитие в зоне основного металла

По существу, распространяющиеся по образцу осциллирующие мезополосы являются аналогом полос Людерса. Однако, в отличие от традиционных полос Людерса, полосовая мезосубструктура возникает и развивается не на площадке текучести, а на стадии деформационного упрочнения, связанного с интенсивным развитием локализованной деформации в ЗТВ. Общим у мезополос с традиционными полосами Людерса является их связь с мезоконцентраторами напряжений. Именно они являются первичными источниками упругой энергии, которая должна непрерывно подводиться к полосам Людерса, распространение которых — сугубо релаксационный процесс.

Мезополосы локализованной деформации имеют вполне определенные ориентационные параметры: направление их распространения не зависит от кристаллографической ориентации отдельных зерен поликристалла и совпадает с направлением максимальных касательных напряжений τ_{\max} (угол 45° к оси приложенной нагрузки). Напомним, что наблюдаемые в просвечивающем электронном микроскопе микрополосы, возникающие при прокатке кубических объемноцентрированных [9] и гранецентрированных [10] кристаллов, также ориентированы в сопряженных направлениях максимальных касательных напряжений. Это хорошо согласуется с результатами теоретических исследований многоуровневой модели пластичности структурно-неоднородных сред по формированию полос сдвига от границ раздела фрагментов [11] и дает основание говорить об их общей природе.

С целью выявления кинетических аспектов механизма релаксации упругих осциллирующих напряжений на границах раздела были построены и проанализированы поля векторов смещений мезообъемов на разных стадиях формирования периодической полосовой мезосубструктуры (см. рис. 4). Полученные данные свидетельствуют о последовательном вовлечении в процесс релаксации мезоконцентраторов напряжений из осциллирующего ряда. Экспериментально это проявляется в последовательном дискретном характере формирования и эволюции полос локализованной пластической деформации от границ раздела в область основного металла образца с ростом степени деформации.

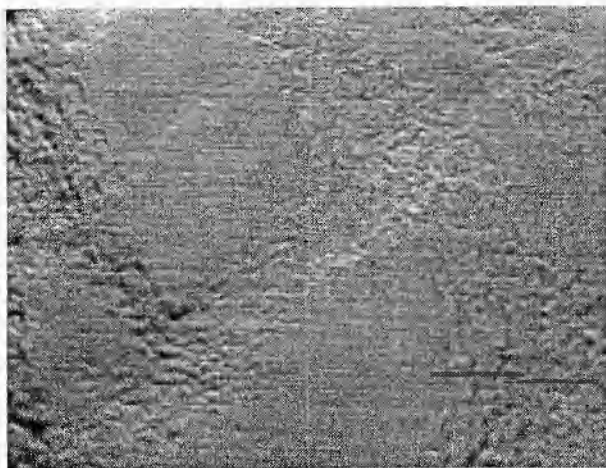


Рис. 5

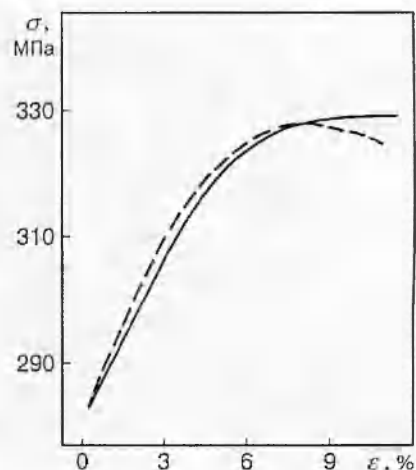


Рис. 6

Рис. 5. Формирование сопряженных мезополос в области основного металла

Рис. 6. Зависимость напряжения течения σ от остаточной деформации ϵ для поликристаллов с протяженными границами раздела (штриховая линия) и без них (сплошная линия)

Формирование полосовых мезоскопических структур в образцах с крупномасштабными границами раздела является дополнительным каналом диссипации упругой энергии в нагруженных поликристаллах. Анализ поля векторов смещений на стадии сформированной мезополосовой структуры показывает движение блоков мезосубструктуры как целого по схеме «сдвиг + поворот». Это вызывает появление стадии падающего коэффициента деформационного упрочнения $\theta = d\sigma/d\epsilon$ на заключительном этапе пластического течения таких образцов при $\epsilon > 0,03$ (штриховая линия на рис. 6), когда шейка на образце еще не образуется (разрушение происходит не в области ЗТВ, а в зоне основного металла образца как следствие разориентации блоков мезосубструктуры).

Заключение. Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что на всех масштабных уровнях границы раздела в нагруженном твердом теле являются источниками осциллирующих контактных напряжений. Релаксация последних приводит к формированию в образце периодических полосовых структур соответствующего масштаба: кристаллографических линий скольжения, микрополос переориентации областей кристаллической решетки, микрополос сдвига, полос локализованной пластической деформации на мезоуровне. Образование полосовых мезоскопических структур является дополнительным каналом диссипации упругой энергии в нагруженном твердом теле. Элементы полосовых мезосубструктур (полосы локализованной пластической деформации) зарождаются на границах раздела в зонах мезокоцентраторов напряжений и по своей природе являются полосами Людерса. Их ориентация имеет некристаллографический характер и задается направлениями максимальных касательных напряжений. Отмеченные факторы свидетельствуют об определяющей роли границ раздела в механизмах деформации твердых тел.

ЛИТЕРАТУРА

1. Панин В. Е. Методология физической мезомеханики как основа построения моделей в компьютерном конструировании материалов // Изв. вузов. Физика. 1995. № 11. С. 6–25.

2. Гриняев Ю. В., Панин В. Е. Расчет напряженного состояния в упруго нагруженном поликристалле // Изв. вузов. Физика. 1978. № 12. С. 95–101.
3. Панин В. Е. Волновая природа пластической деформации твердых тел // Изв. вузов. Физика. 1990. № 2. С. 4–18.
4. Сырямкин В. И., Панин В. Е., Дерюгин Е. Е. и др. Оптико-телевизионные методы исследования и диагностики материалов на мезоуровне // Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов. Новосибирск: Наука, 1995. Т. 1. С. 176–194.
5. Кадич А., Эделен Д. Калибровочная теория дислокаций и дисклинаций. М.: Мир, 1987.
6. Гриняев Ю. В., Чертова Н. В. Калибровочные теории пластической деформации в механике сплошных сред // Изв. вузов. Физика. 1990. № 2. С. 34–50.
7. Гриняев Ю. В. Калибровочно-инвариантное описание деформации структурно-неоднородных сред // Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов. Новосибирск: Наука, 1995. Т. 1. С. 102–112.
8. Владимиров В. И., Романов А. Е. Дисклинации в кристаллах. Л.: Наука, 1986.
9. Анцифоров П. Н., Засимчук Е. Э., Каверина С. Н. Взаимосвязь структурных и ориентационных изменений при прокатке ОЦК-кристаллов // Металлофизика. 1985. Т. 7, № 6. С. 68–75.
10. Панин В. Е., Строкатов Р. Д. Динамика мезоскопической структуры и сверхпластичность аустенитных сталей и сплавов // Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов. Новосибирск: Наука, 1995. Т. 1. С. 208–240.
11. Макаров П. В. Микродинамическая теория пластичности и разрушения структурно-неоднородных сред // Изв. вузов. Физика. 1992. № 4. С. 42–58.

Поступила в редакцию 19/XII 1996 г.
