

## Природа локализации пластической деформации твердых тел

© В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин, А.В. Панин, Д.Д. Моисеенко

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634021 Томск, Россия  
e-mail: pav@ms.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 7 августа 2006 г. В окончательной редакции 15 декабря 2006 г.)

Приведены результаты теоретического и экспериментального исследования связи локализации пластической деформации твердых тел на различных масштабных уровнях с концентраторами напряжений соответствующих масштабов, которые возникают в поверхностных слоях и на всех внутренних границах раздела. Сделано заключение, что локализованное пластическое течение всех видов может зарождаться и распространяться только в зонах растягивающих нормальных напряжений, где возникают сильно неравновесные состояния. В пространстве междоузлий в условиях избыточного атомного объема появляются виртуальные узлы более высокоэнергетической структуры и происходит локальное структурное превращение путем коллективных атом-вакансионных конфигурационных возбуждений. Описать природу локализации пластического течения можно только на основе представления деформируемого твердого тела как многоуровневой системы.

PACS: 62.20.Fc

### Введение

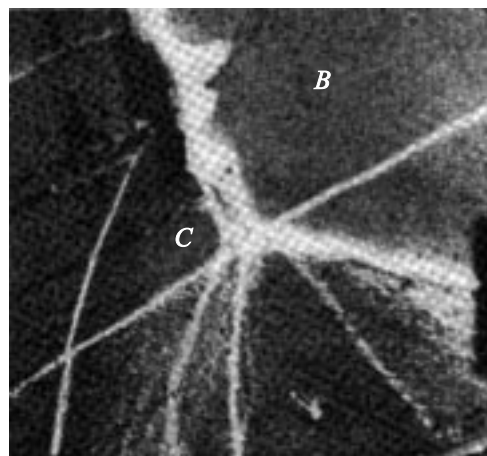
Хорошо известно, что пластическое течение в нагруженном твердом теле развивается локализованно на всех масштабных уровнях [1–3]. На микромасштабном уровне возникает локальная генерация плоских скоплений дислокаций на плоскостях кристаллографического скольжения. На мезомасштабном уровне формируются мезополосы локализованного пластического течения. Последние могут распространяться в виде полос сдвига [4–6], некристаллографических мезополос скольжения в поверхностных слоях сильно неравновесных сплавов, генерированных мезоконцентраторами напряжений на границах зерен (рис. 1) [2], двойных спиралей локализованного пластического течения наноструктурированных поверхностных слоев (рис. 2) [7] и др.

Наконец, на макромасштабном уровне развиваются макрополосы локализованного пластического течения. Они могут периодически распределяться на рабочей части образца при его растяжении [8–11], распространяться в виде зигзага вдоль оси нагружения [12] или локализоваться в шейке в виде двух макрополос, ориентированных по направлениям максимальных касательных напряжений  $\tau_{\max}$  по схеме диполя или креста (рис. 3) [13,14].

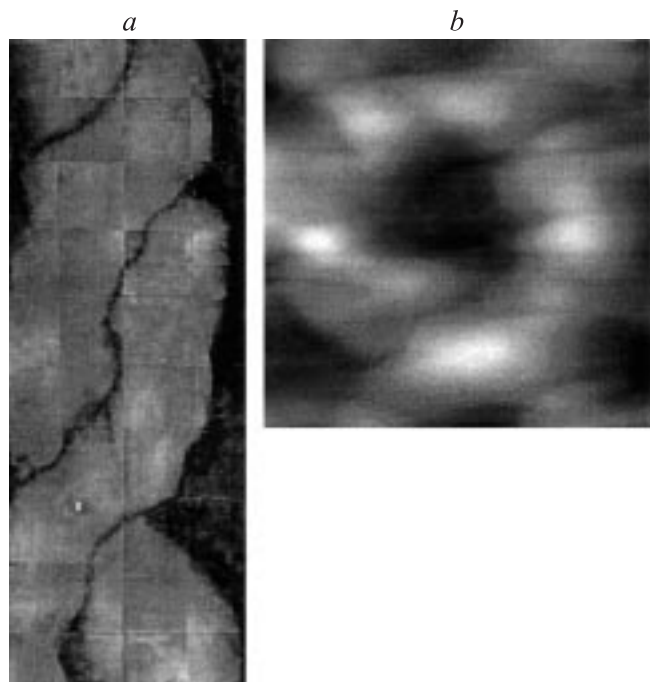
Все виды локализации пластической деформации на различных масштабных уровнях связаны с концентраторами напряжений соответствующего масштаба. Это вытекает из того очевидного факта, что любой пластический сдвиг развивается как локальное структурное превращение в нагруженном кристалле, но под действием средних деформирующих напряжений структура кристалла в целом не изменяется. Она может измениться только локально: в ядре дислокации (микромасштабный уровень), в мезополосе локализованного пластического течения; наглядным примером этому является формирование полос мартенсита деформации при растяжении

сдвигонеустойчивого интерметаллида NiTi, который в исходном состоянии имеет аустенитную структуру [15].

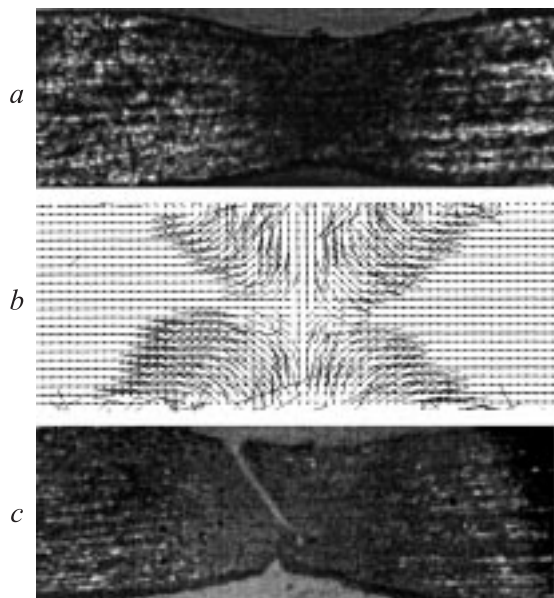
В зоне шейки изменения исходной структуры кристалла происходят на всех масштабных уровнях. Это проявляется в увеличении плотности дислокаций на микромасштабном уровне, фрагментации материала на мезомасштабном уровне [16], развитии макрополос деформации на макромасштабном уровне [13,14]. Условия, необходимые для возникновения локального структурного превращения в деформируемом твердом теле, были рассмотрены в [17–20]. Было сделано концептуально важное заключение, что для зарождения и развития пластического сдвига необходимо формирование в локальных зонах концентраторов напряжений сильно неравновесных состояний, которым соответствует другая кристаллическая структура. Другими словами, ядро дислокации формируется в локальной зоне сильно неравновес-



**Рис. 1.** Мезополосы локализованного пластического течения в поверхностных слоях сплава Pb + 1.9%Sn при растяжении со скоростью 1.1%/min;  $T = 543$  K;  $\epsilon = 30\%$ ,  $\times 1000$ .



**Рис. 2.** Двойные спирали мезополос локализованного пластического течения в наноструктурированных поверхностных слоях малоуглеродистой стали Ст-3 и тонкой пленки Ti, напыленной на полипропиленовую подложку; растяжение при  $T = 293\text{ K}$ ;  $\varepsilon = 28$  (a) и 5% (b); сканирующая туннельная микроскопия,  $\times 250$  (a) и  $\times 2000$  (b).



**Рис. 3.** Образование шейки и характер разрушения при растяжении холоднокатаного образца титана с субмикроструктурной структурой на лицевой поверхности: оптическое изображение лицевой поверхности образца (a) и соответствующее поле векторов смещений (b); характер разрушения (c);  $\varepsilon = 17\%$ ,  $\times 15$ .

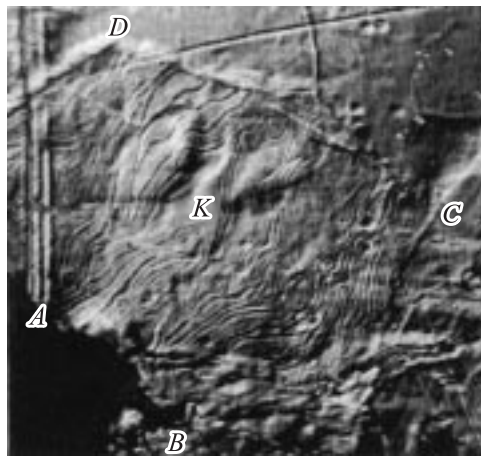
ных состояний не как дефект, а как разрешенная структура, соответствующая данному локальному неравновесному состоянию. Дефектом дислокация становится при выходе в зону равновесного кристалла под действием градиента концентратора касательных напряжений. Из условий [17–20] следует, что пластическая деформация твердого тела может развиваться только локализованно.

Описать физическую природу всей иерархии масштабных уровней локализации пластической деформации на основе одноуровневого подхода теории дислокаций, которая не учитывает локальных структурных превращений в деформируемом твердом теле, не представляется возможным. Это можно сделать только в рамках описания деформируемого твердого тела как многоуровневой системы. Данному концептуальному подходу посвящена настоящая работа.

### Поверхностные слои и внутренние границы раздела в деформируемом твердом теле как самостоятельные подсистемы

Пластическое течение твердого тела связано с локальной потерей его сдвиговой устойчивости на различных масштабно-структурных уровнях [2,18]. Поэтому в основе методологии описания деформируемого твердого тела должен быть системный анализ сдвиговой устойчивости всех его возможных подсистем: кристаллической решетки в объеме материала, составляющих его фаз, поверхностных слоев и внутренних границ раздела, электронной подсистемы. Все виды концентраторов напряжений различных масштабов (здесь не имеются в виду геометрические концентраторы напряжений типа надрезов, отверстий и др.) связаны с границами раздела подсистем, имеющих различную сдвиговую устойчивость. Именно эти концентраторы напряжений обуславливают все виды локализации пластического течения при однородном внешнем нагружении любого твердого тела.

Наименьшую сдвиговую устойчивость в нагруженном твердом теле имеет его поверхностный слой, который рассматривается как особое состояние вещества [21–23]. Отсутствие у атомов поверхности половины межатомных связей обуславливает специфическую кластерную структуру тонкого поверхностного слоя: атомно-силовая микроскопия выявляет в нем широкий спектр различных атомных конфигураций, в том числе не свойственных большому числу структурных вакансий обуславливает большой избыточный атомный объем и возможность локальных структурных превращений как коллективных конфигурационных возбуждений в полях градиентов напряжений. Как следствие, поверхностный слой при нагружении твердого тела более интенсивно теряет свою сдвиговую устойчивость по сравнению с объемом кристалла и проявляет специфические механизмы пластического течения недислокационной природы.



**Рис. 4.** Мезополосы локализованного пластического течения в наноструктурированном конгломерате зерен «К», наводороженного в течение 1 h поверхностного слоя технического титана ВТ1-0 при знакопеременном изгибе;  $T = 293 \text{ K}$ , ABCD — граница реструктурированного конгломерата зерен «К», вдоль фрагмента АВ которой произошло разрушение;  $N = 12.4 \cdot 10^6$  циклов; световая микроскопия в режиме DIC,  $\times 600$ .

На рис. 4 приведен пример развития мезополос некристаллографического пластического течения в тонком ( $\sim 0.5 \mu\text{m}$ ) насыщенном водородом поверхностном слое поликристалла титана при знакопеременном изгибе. Специальное наводороживание поверхностного слоя привело к его реструктуризации, которая характеризуется некристаллографическим распространением мезополос локализованного пластического течения, направление которых может произвольно изменяться в трех измерениях в соответствии со сложным характером напряженного состояния при знакопеременном изгибе<sup>1</sup>. При этом мезополосы в тонком наводороженном слое не связаны с кристаллографией разориентированных зерен подложки и развиваются автономно.

Подобная специфика автономного поведения тонкого поверхностного слоя выявляется при исследовании полей векторов смещений на поверхности деформируемого образца оптико-телевизионным измерительным комплексом TOMSC [8–10], методами сканирующей туннельной микроскопии [7,12], лазерной интерферометрии [25,26], спекл-интерферометрии [11]. Специально воздействуя на поверхностный слой (насыщая титан водородом, цирконий-ниобием, наноструктурируя поверхностный слой различных металлических материалов и др.), можно управлять развитием в нем механизмов недислокационного пластического течения. В свою очередь, поведение поверхностного слоя играет принципиально важную роль в деформации и разрушении

<sup>1</sup> Подобное anomальное поведение наводороженного поверхностного слоя может быть связано с его нанокластерной структурой. Отметим в связи с этим работу [24], где показано, что в присутствии водорода может происходить легкое структурное перестроение атомных нанокластеров титана  $\alpha$ - и  $\beta$ -модификаций.

материала в целом. Природа такого влияния связана с условиями сопряжения поверхностного слоя и подложки [3]. Подобную функциональную роль играют также все внутренние границы раздела подсистем с различной сдвиговой устойчивостью: границы зерен в поликристаллах, фаз в гетерогенных материалах, границы раздела в композиционных материалах и сварных соединениях, интерфейсы между локализованным пластическим сдвигом и смежным с ним материалом [2,26–30]. Пример зарождения мезополосы локализованного пластического течения на границе двух зерен приведен на рис. 1. Более подробно функциональная роль внутренних границ раздела в зарождении всех видов деформационных дефектов рассмотрена в [30].

### Поверхностный слой как синергетический активатор локализации пластического течения в деформируемом твердом теле

Необходимость сопряжения поверхностного слоя с подложкой, которая проявляет более высокую сдвиговую устойчивость, приводит к гофрированию поверхностного слоя. Характер этого гофрирования стадийно меняется по мере увеличения степени деформации.

На рис. 5 представлена картина гофрирования поверхностного слоя различной толщины при его сопряжении с подложкой. Расчет проведен в [29] методом возбудимых клеточных автоматов.

На начальной стадии деформации в тонком поверхностном слое образца вдоль всей его длины возникает стохастически распределенное высокочастотное гофрирование (рис. 5, а). Подобный поверхностный слой представляет собой активную возбудимую среду, которая характеризуется стохастической шероховатостью на микромасштабном уровне. Испускаемые базовым концентратором напряжений у захвата испытательной машины одиночные импульсы перераспределения атомных конфигураций распространяются в нанокластерной структуре тонкого поверхностного слоя в поле максимальных касательных напряжений как активный релаксационный процесс<sup>2</sup>. Его торможение в образце происходит на двух масштабных уровнях: мезо- и макроуровне.

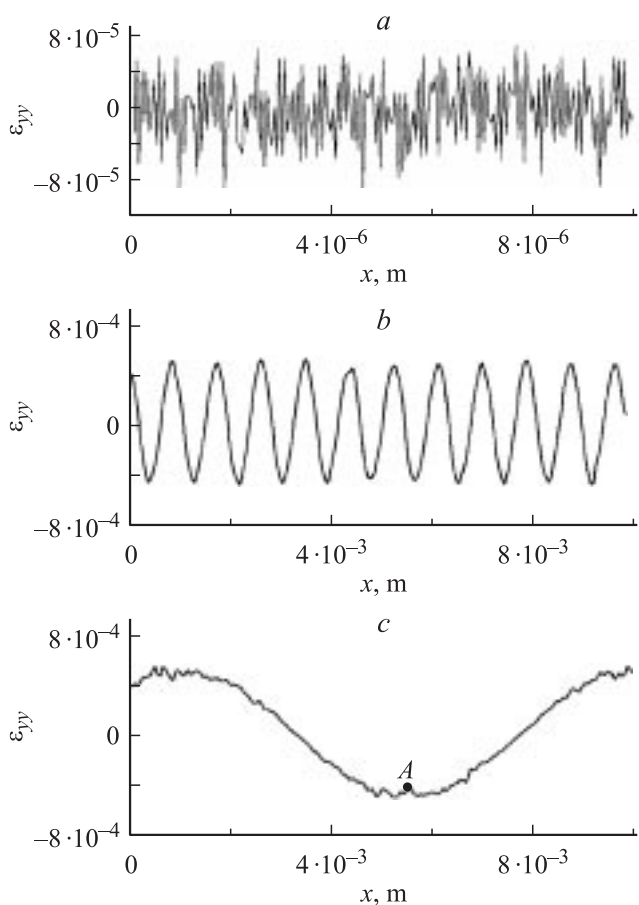
На мезуровне торможение подложкой приводит к образованию на поверхности складчатой структуры с сильно выраженной кривизной кристалла в складках. Согласно расчету [32], зоны локальной кривизны кристалла являются концентраторами напряжений. Они генерируют в складках дислокации, которые распространяются в объем материала, обуславливая локализацию деформации субмикронного уровня. Пример такой локализации представлен на рис. 6 [33].

Наряду с этим спекл-интерферометрия [11] и оптико-телевизионный измерительный комплекс TOMSC [8–10]

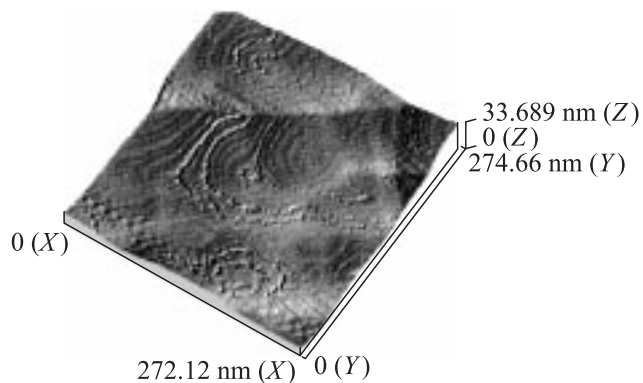
<sup>2</sup> Механизм подобных сдвигов рассмотрен в [31] на примере распространения локализованной полосы мартенситного превращения.

выявляют в поверхностном слое локализацию деформации макромасштабного уровня. Стохастическая микрошероховатость поверхностного слоя позволяет распространяться фронту атомных перераспределений на расстояния в миллиметровом диапазоне. Поскольку векторы смещений в тонком поверхностном слое ориентированы вдоль направления максимальных касательных напряжений, их поперечная составляющая приводит к локальному изгибу образца в целом. Возникающий в зоне локального изгиба макроконцентратор напряжений релаксирует путем испускания макрополос сброса. Фронт подобной макролокализации деформации движется вдоль оси образца с периодической генерацией макрополос сброса. Периодичность такой макролокализации зависит от длины образца, изменяясь в миллиметровом диапазоне.

В ходе пластической деформации накопление дислокаций в поверхностном слое оказывается более интенсивным, чем в объеме материала [34]. Эффективная толщина поверхностного слоя возрастает, и его стохастическое микрогофрирование становится невозможным. В поверхностном слое возникает стационарное квазипериодическое гофрирование, представленное в одномерном приближении на рис. 5, *b*. Подобное стационарное мезогофрирование поверхностного слоя



**Рис. 5.** Влияние толщины поверхностного слоя на профиль его сопряжения с подложкой в нагруженном твердом теле; толщина поверхностного слоя  $10^{-8}$  (*a*),  $10^{-7}$  (*b*) и  $10^{-6}$  м (*c*) [29].



**Рис. 6.** Образование цепочек дислокационных ямок на террасно-ступенчатой поверхности плоского образца дуралюмина; растяжение при 293 К;  $\epsilon = 9.8\%$ ; атомно-силовая микроскопия [33].

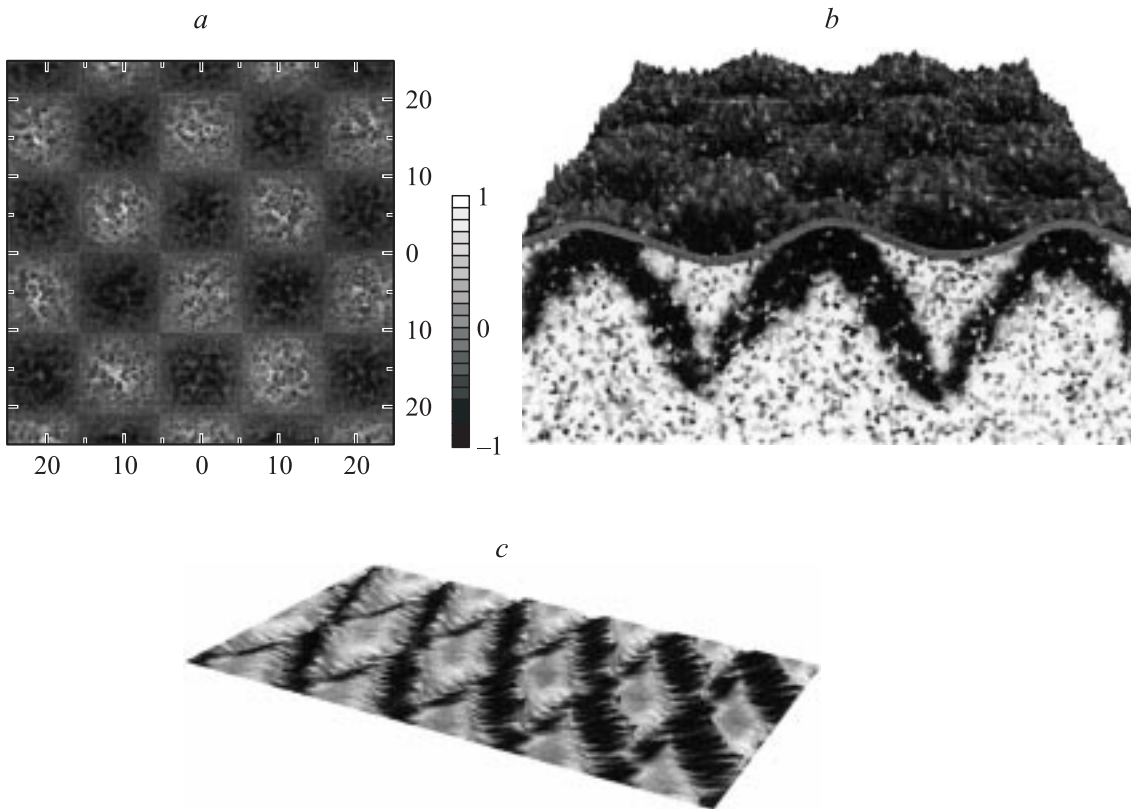
действительно выявляется экспериментально методом спекл-интерферометрии [11,35]. Оно развивается только на параболической стадии кривой „напряжение–деформация“, когда в упрочненном поверхностном слое прекращается продольное перемещение фронта очагов локализованной деформации.

На завершающей стадии пластической деформации толщина и жесткость поверхностного слоя становятся столь большими, что он теряет устойчивость, подобно сжатому длинномерному стержню (рис. 5, *c*). В зоне А (рис. 5, *c*) возникает макроконцентратор напряжений, который формирует две макрополосы локализованного пластического течения, представленные на рис. 3. Самосогласованное развитие двух макрополос формирует шейку [13,14]. Нарушение этого самосогласования приводит к разрушению как глобальной потере сдвиговой устойчивости деформируемого твердого тела на макромасштабном уровне.

### Эффект „шахматной доски“ в распределении напряжений и деформаций на интерфейсе „поверхностный слой–подложка“

Возникновение квазипериодических концентраторов напряжений на интерфейсах в нагруженном твердом теле и их связь с локализацией пластического течения наглядно проявляются при деформации образцов с наноструктурированным поверхностным слоем. В этом случае эффективная толщина поверхностного слоя может составлять несколько сотен микрометров, что увеличивает мезомасштаб гофрирования. Сильное различие модулей упругости наноструктурированного поверхностного слоя и кристаллической подложки обуславливает возникновение на их интерфейсе „шахматного“ распределения напряжений и деформаций при нагружении материала. При этом особого внимания заслу-





**Рис. 7.** *a* — контурная карта „шахматного“ распределения нормальных напряжений на интерфейсе „поверхностный слой—подложка“; *b* — деформационный профиль наноструктурированного поверхностного слоя нагруженного твердого тела и генерация поверхностным слоем в объем материала мезополос неупругой деформации, трехмерное моделирование, сжатие,  $\varepsilon = 0.5\%$  [36]; *c* — развитие мезополос неупругой деформации в наноструктурированном поверхностном слое в виде двойной спирали.

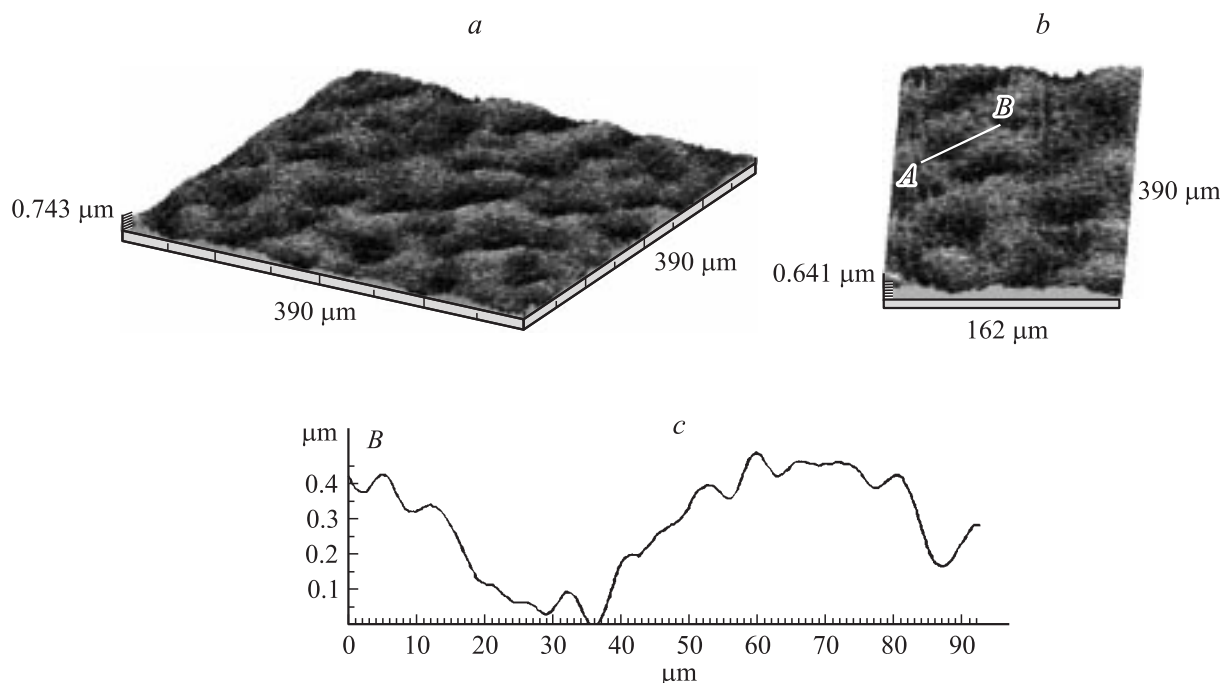
живает „шахматный“ характер распределения сжимающих и растягивающих нормальных напряжений. Результаты теоретического расчета распределения нормальных напряжений на границе раздела „поверхностный слой—подложка“ и развития мезополос локализованного пластического течения приведены на рис. 7. Модуль упругости поверхностного слоя  $E_s$  задавался равным половине модуля упругости  $E_b$  объема материала. Для расчета распределения напряжений и деформаций в трехмерном приближении использован стохастический подход в методе возбудимых клеточных автоматов [29].

В рамках данной модели процесс деформации твердого тела рассматривается как результат перераспределения поступающей энергии по элементарным мезообъемам нагруженного образца. Моделируемый трехмерный образец разбивается на сеть возбудимых клеточных автоматов, каждый из которых представляет мезоскопический элемент среды (мезообъем), находящийся в одном из четырех состояний, характеризующих упругую и пластическую деформации, а также деформационное упрочнение и разрушение материала. Клеточный автомат характеризуется величиной внутренней энергии элемента среды. Ввиду стохастического распределения концентраторов напряжений в реальной среде на мезоуровне, на нулевом шаге алгоритма величина

внутренней тепловой энергии для каждого автомата задается случайным образом. Каждому из состояний автомата соответствует определенный интервал энергий с нечеткими границами, которые являются пороговыми значениями для перехода мезообъема моделируемой системы в последующее состояние.

При получении клеточным автоматом энергии извне случайным образом определяется, какая часть полученной энергии пойдет на увеличение тепловой энергии, а какая на изменение объема данного элемента среды. Стохастичность в данном случае обуславливается тем, что распределение концентраторов напряжений определяется мезомасштабным уровнем моделируемых объектов, т.е. подчиняется вероятностным принципам. В результате на каждом временном шаге алгоритма известны значения как тепловой энергии, так и работы по изменению объема и формы каждого элемента среды, что позволяет рассчитать значения компонент тензора напряжений и деформаций для каждого мезообъема, а затем получить компоненты тензора деформаций для всего образца.

Для выявления на интерфейсе „поверхностный слой—подложка“ картины распределения напряжений в виде „шахматной доски“ целесообразно рассмотреть начальную стадию нагружения, когда исходное распределение



**Рис. 8.** *a* и *b* — деформационный рельеф боковых наноструктурированных граней образцов сплава Zr-2.5%Nb; сжатие;  $\varepsilon = 5\%$ ; лазерная профилометрия; *c* — профилограмма поперечного сечения поверхностного слоя.

напряжений слабо искажено пластическим течением материала. Поэтому в тензоре напряжений все недиагональные компоненты были занулены, что позволяет рассчитать по формулам Мурнагана [37] распределение на интерфейсе только нормальных напряжений и связанных с ними деформаций. Результаты проведенных расчетов для распределения на интерфейсе нормальных напряжений и деформационного профиля поверхностного слоя представлены соответственно на рис. 7, *a, b*. Темные клеточки на рис. 7, *a, b* соответствуют зонам сжимающих нормальных напряжений, светлые — зонам растягивающих нормальных напряжений. Как видно из рис. 7, *a, b*, для удовлетворения условию совместности двух сред с разными модулями упругости на их интерфейсе распределение сжимающих и растягивающих нормальных напряжений и связанных с ними деформаций имеет вид „шахматной доски“.

Особого внимания заслуживают результаты расчетов зарождения в поверхностном слое мезополос локализованной неупругой деформации и их распространения в объеме материала. Как видно из рис. 7, *b*, мезополосы зарождаются в поверхностном слое в локальных зонах растягивающих нормальных напряжений и распространяются в объеме материала по сопряженным направлениям максимальных касательных напряжений  $\tau_{\max}$ . Этот результат концептуально важен. Во-первых, он позволяет объяснить термодинамическую природу зарождения дефектов на поверхности. Во-вторых, из рис. 7, *b* вытекает, что в зависимости от масштаба „шахматного“ распределения напряжений и деформаций в поверхностном слое он может генерировать самые различные дефор-

мационные дефекты: точечные, краудины, дислокации, дисклинации, мезо- и макрополосы деформации. Наконец, рис. 7, *b* позволяет понять сам факт локализации пластического течения на различных масштабных уровнях: пластический сдвиг может зарождаться только в локальных зонах растягивающих нормальных напряжений, где возможно формирование критического мезообъема неравновесных состояний, необходимого для протекания локального структурно-фазового перехода.

На рис. 7, *c* приведены результаты моделирования локализованного пластического течения в наноструктурированном поверхностном слое образца при его растяжении. В соответствии с экспериментом моделирование подтвердило, что развитие в поверхностном слое мезополос локализованной деформации происходит в виде двойной спирали. Наряду с этим моделирование показало, что пластическое течение возникает только в локальных зонах, испытывающих растягивающие нормальные напряжения. Приведенные на рис. 7 результаты хорошо согласуются с концепцией [17–20], согласно которой пластический сдвиг в кристалле может развиваться только как его локальное структурное превращение в зонах сильно неравновесных состояний. Такие сильно возбужденные атом-вакансионные состояния возникают только в зонах растягивающих нормальных напряжений. Наличие в них избыточного атомного объема и виртуальных узлов более высокоэнергетической структуры позволяет осуществить локальное структурное превращение, соответствующее неравновесному состоянию в данной зоне. В зонах сжимающих нормальных напряжений такой возможности нет. Именно это обстоятельство

обуславливает определяющую роль локальных растягивающих нормальных напряжений в возникновении всех видов локализации пластического течения твердых тел.

Для экспериментального подтверждения „шахматного“ характера распределения деформации на границе раздела „поверхностный слой–подложка“ проведены структурные исследования деформационного рельефа образца сплава Э-125 состава  $Zr + 2.5\%Nb$ , подвергнутого одноосному сжатию. Наличие в  $Zr$  полиморфного превращения  $\alpha-\beta$  обуславливает низкую сдвиговую устойчивость его поверхностных слоев. Это способствует их наноструктурированию на достаточно большую глубину. Образцы сплава имели форму параллелепипеда  $4 \times 2 \times 0.7$  мм, боковые грани которого были наноструктурированы ультразвуковой обработкой. Толщина наноструктурированного поверхностного слоя составляла  $\sim 300 \mu m$ , их поверхность перед сжатием была отполирована.

На рис. 8, *a, b* показан типичный деформационный рельеф боковых граней образцов после их сжатия на  $\varepsilon = 5\%$ . Лазерная профилометрия четко выявляет клеточную структуру поверхностного слоя. Линейные размеры клеток составляют  $\sim 80 \mu m$  на размере зерен подложки  $\sim 5 \mu m$ . Глубина интродуцированного в темных клетках материала достигает  $0.5 \mu m$  (рис. 8, *c*). Следует также отметить наличие на поверхности боковых граней мелкой ячеистой структуры (с линейным размером ячейки  $\sim 6 \mu m$ ) и отсутствие ступенек кристаллографического скольжения. Это свидетельствует о квазивязком пластическом течении наноструктурированного поверхностного слоя, что позволяет эффективно декорировать „шахматный“ характер распределения сжимающих и растягивающих нормальных напряжений на интерфейсе „поверхностный слой–подложка“. Развитие локализованного пластического течения в виде двойных спиралей в условиях „шахматного“ распределения нормальных напряжений на интерфейсе „поверхностный слой–подложка“ показано в [7, 12] на различных материалах и напыленных тонких пленках (рис. 2).

Представленные на рис. 7 и 8 теоретические и экспериментальные доказательства „шахматного“ распределения напряженно-деформированного состояния на интерфейсе „поверхностный слой–подложка“ и его связи с развитием локализованного пластического течения позволяют объяснить физическую природу локализации пластической деформации в различных материалах, на различных масштабно-структурных уровнях и в различных условиях нагружения.

## Заключение

Пластическая деформация твердых тел может развиваться только локализованно как локальное структурное превращение в зонах концентраторов напряжений различного масштаба. Характер распределения локализованных сдвигов в твердом теле обусловлен распределением в нем зон растягивающих нормальных

напряжений, где в условиях сильно неравновесных состояний возникает новая структура, соответствующая данному неравновесному состоянию. Наличие в таких зонах избыточного атомного объема и возникновение в пространстве междоузлий виртуальных узлов новой структуры обеспечивает развитие локального структурного превращения по механизму коллективных атом-вакансионных конфигурационных возбуждений. Подобный механизм лежит в основе всех возможных механизмов пластического течения на различных масштабных уровнях. В условиях дислокационной пластичности он определяет механизм зарождения ядер дислокаций и их кристаллографического движения.

Описать локализацию пластического течения на различных масштабных уровнях можно только в рамках представления деформируемого твердого тела как многоуровневой системы. Поверхностные слои и внутренние границы раздела являются важными функциональными подсистемами, определяющими зарождение и развитие всех видов локализованного пластического течения.

Работа выполнена при финансовой поддержке интеграционного проекта СО РАН № 90, грантов РФФИ № 05-01-00767, 05-01-08007-офи-э и гранта президента РФ для поддержки ведущих научных школ № НШ-394.2006.1.

## Список литературы

- [1] Лихачев В.А., Панин В.Е., Засимчук Е.Э. и др. Кооперативные деформационные процессы и локализация деформации. Киев: Наук. думка, 1989. 320 с.
- [2] Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов / Под ред. В.Е. Панина. Новосибирск: Наука, 1995. Т. 1. 297 с. Т. 2. 320 с.
- [3] Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В. // Физ. мезомех. 2006. Т. 9. № 3. С. 9–22.
- [4] Hatherley M., Malin A.S. // Scripta Met. 1984. Vol. 18. P. 449–454.
- [5] Harren S.V., Deve H.E., Asaru R.J. // Acta Met. 1988. Vol. 36. N. 9. P. 2435–2480.
- [6] Засимчук Е.Э., Маркашова Л.И. Микрополосы в монокристаллах никеля, деформированных прокаткой. Киев, 1998. 36 с.
- [7] Панин А.В. // Физ. мезомех. 2005. Т. 8. № 3. С. 5–17.
- [8] Deryugin Ye.Ye., Panin V.E., Storozhenko I.V., Schmauder S. // Proc. Int. Conf. „New challenges in mesomechanics“. Aalborg Univ. Press. 2002. Vol. 1. P. 57–65.
- [9] Дерюгин Е.Е., Панин В.Е., Шмаудер З., Стороженко И.В. // Физ. мезомех. 2001. Т. 4. № 3. С. 35–47.
- [10] Панин В.Е., Панин С.В. // Изв. вузов. Физика. 1997. Т. 40. № 1. С. 31–39.
- [11] Зуев Л.Б., Данилов В.И. // Физ. мезомех. 2003. Т. 6. № 1. С. 75–94.
- [12] Панин А.В. Масштабные уровни деформации в поверхностных слоях нагруженных твердых тел и тонких пленках. Автореф. дис. докт. физ.-мат. наук. Томск: ИФПМ СО РАН, 2006. 37 с.

- [13] *Panin V.E., Grinyaev Yu.V., Panin A.V., Panin S.V.* // Proc. of 6<sup>th</sup> Int. Conf. for Mesomechanics. Patras Univ. Press. 2004. P. 335–342.
- [14] *Панин В.Е., Деревягина Л.С., Дерюгин Е.Е., Панин А.В., Панин С.В.* // Физ. мезомех. 2003. Т. 6. № 6. С. 97–106.
- [15] *Дударев Е.Ф., Бакач Г.П., Колобов Ю.Р., Лотков А.И., Гришков В.Н.* // Физ. мезомех. 2006. Т. 9. № 3. С. 71–80.
- [16] *Рыбин В.В.* Большие пластические деформации и разрушение металлов. М.: Металлургия, 1986. 224 с.
- [17] *Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Хон Ю.А., Елсукова Т.Ф.* // Изв. вузов. Физика. 1982. № 12. С. 5–29.
- [18] *Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В.* Структурные уровни деформации твердых тел. Новосибирск: Наука, 1985. 229 с.
- [19] *Панин В.Е.* // Изв. вузов. Физика. 1987. Т. 30. № 1. С. 3–8.
- [20] *Егорушкин В.Е., Панин В.Е., Савушкин Е.В., Хон Ю.А.* // Изв. вузов. Физика. 1987. Т. 30. № 1. С. 9–33.
- [21] *Zangwill A.* Physics of surfaces. Cambridge: Cambridge Interscience Publishing, 1988. 339 p.
- [22] *Панин В.Е.* // Физ. мезомех. 1999. Т. 2. № 6. С. 5–23.
- [23] *Панин В.Е.* // МНТОМ. 2005. № 7. С. 62–68.
- [24] *Демиденко В.С., Зайцев Н.Л., Меньщикова Т.В., Скоренцев Л.Ф.* // Физ. мезомех. 2006. Т. 9. № 3. С. 55–60.
- [25] *Наймарк О.Б., Баяндин Ю.В., Леонтьев В.А., Пермяков С.Л.* // Физ. мезомех. 2005. Т. 8. № 5. С. 23–29.
- [26] *Панин В.Е., Панин А.В., Моисеенко Д.Д., Елсукова Т.Ф., Кузина О.Ю., Максимов П.В.* // Докл. РАН. 2006. Т. 409. № 5. С. 1–5.
- [27] *Гриняев Ю.В., Панин В.Е.* // Изв. вузов. Физика. 1978. Т. 21. № 12. С. 95–101.
- [28] *Панин В.Е., Плешанов В.С., Гриняев Ю.В., Кобзева С.А.* // ПМТФ. 1998. Т. 39. № 4. С. 141–147.
- [29] *Моисеенко Д.Д., Максимов П.В., Соловьев И.А.* // Физ. мезомех. 2004. Т. 7. № 2. С. 19–24.
- [30] *Панин В.Е., Фомин В.М., Титов В.М.* // Физ. мезомех. 2003. Т. 6. № 2. С. 5–14.
- [31] *Скорикова Н.А.* Влияние деформации, нарушающей симметрию исходной решетки, на условия генерации волн смещений атомов неравновесными электронами. Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. Екатеринбург: УРО РАН, 2006. 23 с.
- [32] *Киселев В.В., Долгих Д.В.* // Физ. мезомех. 2004. Т. 7. Спец. вып. Ч. I. С. 173–176.
- [33] *Кузнецов П.В., Панин В.Е.* // Физ. мезомех. 2000. Т. 3. № 2. С. 91–98.
- [34] *Алехин В.П.* Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. М.: Наука, 1983. 280 с.
- [35] *Полетика Т.М., Нариманова Г.Н., Колосов С.В., Зуев Л.Б.* // ПМТФ. 2003. Т. 44. № 2. С. 132–142.
- [36] *Моисеенко Д.Д., Жевлаков А.Л., Панин В.Е.* // Физ. мезомех. 2006. Т. 9. Спец. вып. (в печати).
- [37] *Murnaghan F.D.* Finite Deformation of Elastic Solid. NY: Wiley, 1951. 140 p.