

Эффект поверхностного слоя в деформируемом твердом теле

В.Е. Панин, А.В. Панин

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, 634021, Россия

На основе системного подхода обосновывается концепция физической мезомеханики, согласно которой поверхностный слой в деформируемом твердом теле является самостоятельной подсистемой. С ростом степени деформации в нем развиваются автономные процессы, оказывающие определяющее влияние на стадийность локализации пластического течения и разрушение образца в целом. Ключевую роль в мезомеханике поверхностного слоя играют его «эффективная» толщина и интерфейс с объемом кристалла, на котором распределение напряженно-деформированного состояния имеет вид «шахматной доски».

Effect of the surface layer in a solid under deformation

V.E. Panin and A.V. Panin

Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, 634021, Russia

Based on the systematic approach we validate the concept of physical mesomechanics which considers the surface layer in a deformed solid as an independent subsystem. With strain degree growth autonomous processes develop in the layer, which have a crucial effect on the stage-by-stage character of plastic flow localization and fracture of a specimen as a whole. In the mesomechanics of the surface layer the key role belongs to its “effective” thickness and interface with the crystal bulk. The interface is characterized by a chessboard-like distribution of the stress-strain state.

1. Введение

Влияние поверхности твердых тел на их прочность и пластичность было предметом большого числа исследований на протяжении многих десятилетий. Еще в классических работах ак. А.Ф. Иоффе в конце двадцатых годов прошлого столетия было показано, что растворение в воде поверхностного слоя каменной соли приводит к существенному увеличению его прочности и пластичности. Этот эффект связан с наличием механических дефектов в поверхностном слое естественного кристалла. Данная интерпретация оказала влияние на объяснение результатов многих последующих исследований. Однако эффект механических дефектов в поверхностном слое оказался не единственным и, главное, не самым существенным.

С развитием теории дислокаций стало формироваться мнение, что первичные дислокации в нагруженном

кристалле зарождаются на его поверхности. Эта идея была высказана в середине прошлого столетия Гилманом на основе изучения в деформированном кристалле LiF ямок травления [1]. Дальнейшие работы в данном направлении подтвердили идею Гилмана [2–11 и др.]. Подробный обзор работ, выполненных в данном направлении к началу восьмидесятых годов 20-го столетия, приведен в монографии Алехина В.П. [5]. В то же время, механизм зарождения дислокаций на поверхности деформируемого твердого тела пока окончательно не выяснен.

Наряду с вышесказанным, до сих пор остается неосознанным, что зарождение дислокаций на поверхности и более высокая их плотность в поверхностном слое превращают последний в самостоятельную подсистему. Как стало понятным в последние годы, эволюция этой подсистемы в ходе деформирования образца существен-

но влияет на стадийность кривой «напряжение – деформация» и разрушение материала. Обоснованию данной концепции физической мезомеханики посвящена настоящая работа.

2. Поверхностный слой в деформируемом твердом теле как самостоятельная подсистема

Принципиально важное значение для дальнейшего развития представлений о роли поверхностного слоя в прочности и пластичности твердых тел сыграли два обстоятельства:

1. Появление приборов новых поколений, сочетающих высокое разрешение со сканированием протяженных поверхностей деформируемого твердого тела (атомно-силовая и сканирующая туннельная микроскопия, оптико-телевизионный измерительный комплекс высокого разрешения TOMSC, спекл-интерферометрия, лазерные профилометры и др.). С помощью таких приборов удалось вскрыть в поверхностных слоях нагруженного образца не только зарождение дислокаций, но и совершенно новые процессы мезомасштабного уровня, которые могут протекать только в поверхностных слоях [12–22].

2. Развитие в физической мезомеханике системного подхода, описывающего деформируемое твердое тело как многоуровневую систему, в которой поверхностные слои являются самостоятельной подсистемой [15, 16, 20, 23–25]. Согласно современным представлениям поверхностный слой твердого тела принято классифицировать как особое состояние вещества [26, 27]. Электронная структура поверхности металлов и сплавов существенно отличается от таковой для объема кристалла [28, 29]. Характерными особенностями кристаллической структуры поверхностного слоя являются наличие террасно-ступенчатой субструктуры, существование широкого спектра атомных конфигураций, в том числе не свойственных структуре основного металла, аномально высокая концентрация структурных вакансий. Ослабление в поверхностном слое межатомного взаи-

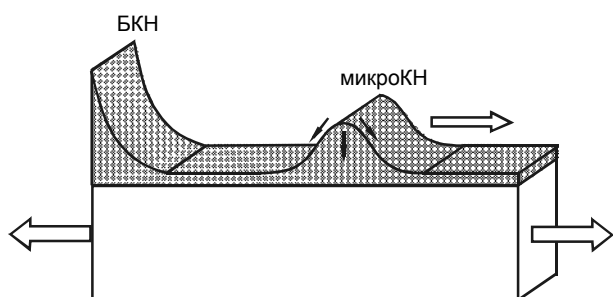


Рис. 1. Схема генерации дислокаций одиночным импульсом, движущимся в тонком поверхностном слое как активной возбудимой среде. БКН — базовый концентратор напряжений; микроКН — микроконцентратор напряжений. Будем называть представленную схему «насосом» ↓

модействия проявляется в смягчении его фононных мод. Как следствие, сдвиговая устойчивость поверхностного слоя оказывается более низкой по сравнению с объемом кристалла, и пластическое течение в деформируемом твердом теле с самого начала нагружения развивается более интенсивно в его поверхностных слоях.

Избыточная (в сравнении с объемом кристалла) деформация поверхностного слоя обуславливает его гофрирование и появление на поверхности нагруженного образца складчатой структуры. Сильно выраженная кривизна в складках является источником возникновения концентраторов напряжений [30], которые генерируют в поверхностном слое деформационные дефекты [10], уходящие в объем материала. Другими словами, поверхностный слой функционирует подобно «наосу», который генерирует и закачивает деформационные дефекты в деформируемый образец. Схема такого «наоса» представлена на рис. 1. Согласно экспериментальным данным [12–16], пластическое течение в поверхностном слое зарождается у захвата испытательной машины, где формируется базовый концентратор напряжений. Сдвиги развиваются в направлении максимальных касательных напряжений по схеме бегущего импульса в возбудимой среде¹. Как отмечалось выше, их торможение кристаллической подложкой вызывает появление микроконцентраторов напряжений, которые генерируют дислокации как локальное структурное превращение. Последние распространяются в объеме материала в поле градиента микроконцентратора напряжений. Фронт сдвигов в поверхностном слое распространяется дальше, формируя новые микроконцентраторы напряжений и генерируя новые дислокации.

В отличие от квазистатического одноосного растяжения, при динамическом (или ударном) нагружении несовместность деформации поверхностного слоя и кристаллической подложки формирует с самого начала нагружения систему распределенных микроконцентраторов напряжений на всей рабочей части образца [32]. Такой «насос» одновременно генерирует дислокации в зонах локализации деформации, квазипериодически распределенные по длине образца.

Теоретические и экспериментальные исследования последних лет показали, что роль поверхностного слоя как самостоятельной подсистемы оказывается принципиально важной в развитии пластической деформации твердых тел. Именно с этой функцией поверхностного слоя связаны микродеформация нагружаемого кристалла ниже его предела текучести, последовательность стадий на кривой «напряжение – деформация», наступле-

¹ Механизм сдвигов в поверхностном слое связывается в [15, 23] с эстафетным перестроением атомных конфигураций по типу механизма Бейна при мартенситном превращении. Кристаллография таких атомных перераспределений под действием внешнего нагружения кристалла рассмотрена в [31].

ние разрушения. Все указанные эффекты являются следствием несовместности деформации поверхностного слоя и объема материала. Корректно описать роль поверхностного слоя в прочности и пластичности твердых тел можно только в рамках системного подхода, который рассматривает деформируемое твердое тело как многоуровневую систему.

3. Напряженно-деформированное состояние на интерфейсе «поверхностный слой – основной кристалл»

Представленная на рис. 1 схема бегущего импульса вдоль плоской поверхности деформируемого кристалла характерна только для небольших степеней деформации, пока поверхностный слой тонкий и его интерфейс с подложкой выражен слабо. В этих условиях возникающий в складке микроконцентратор напряжений определяется высоким поверхностным натяжением в зоне сильно выраженной локальной кривизны поверхности кристалла. По мере увеличения степени деформации плотность дислокаций в подповерхностном слое возрастает значительно быстрее, чем в объеме кристалла [5]. Это обуславливает непрерывное увеличение толщины «эффективного» поверхностного слоя и более высокое его деформационное упрочнение по сравнению с подложкой. Сопряжение упрочненного поверхностного слоя с менее упрочненной кристаллической подложкой формирует интерфейс, профиль которого не является плоским и непрерывно меняется в ходе пластической деформации. Это существенно изменяет характер развития пластического течения в поверхностном слое и его влияние на деформацию образца в целом. В связи с этим стала очевидной необходимость теоретических расчетов профиля интерфейса «поверхностный слой – объем кристалла» и распределения на нем напряженно-деформированного состояния.

Первые расчеты распределения нормальных и касательных напряжений на интерфейсе «поверхностный слой – основной кристалл» были сделаны в [33] для случая термического воздействия на твердое тело. Учитывалось различие коэффициентов термического расширения поверхностного слоя и объема материала. Расчеты были проведены для одномерной границы раздела в рамках приближений механики сплошной среды. Ниже приведены соотношения для изменения вдоль направления X границы раздела нормальных σ и касательных τ напряжений:

$$\sigma = \frac{2\sigma_s}{\sqrt{3}} \sin \frac{x+l_x}{t\sqrt{2}}, \quad \tau = \frac{\sigma_s}{\sqrt{6}} \cos \frac{x+l_x}{t\sqrt{2}}, \quad (1)$$

где σ_s — предел текучести поверхностного слоя; t — его толщина; параметр $l_x = \sqrt{2}/2(\pi/2 + n\pi)t$.

Характер изменения напряженно-деформированного состояния в поверхностном слое согласно соотно-

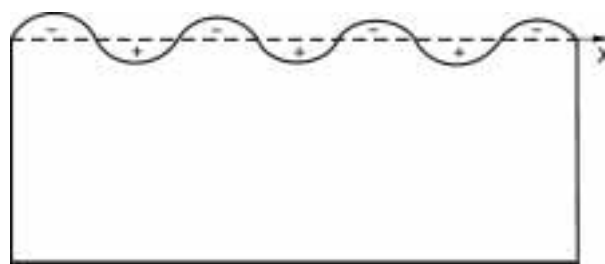


Рис. 2. Профиль сопряжения поверхностного слоя с подложкой по модели Черепанова Г.П. [33]: «+» — зоны сжимающих нормальных напряжений, «-» — зоны растягивающих нормальных напряжений

шениям (1) схематично показан на рис. 2. Видно, что в поверхностном слое возникает чередование зон сжатия и растяжения. Пространственный период их чередования линейно зависит от толщины поверхностного слоя.

В работе [34] одномерная задача для интерфейса «поверхностный слой – подложка» решена для условий механического воздействия на твердое тело. Учитывалось различие модулей упругости поверхностного слоя и подложки, а также влияние толщины поверхностного слоя. Соотношения для изменения нормальных и касательных напряжений вдоль интерфейса «поверхностный слой – подложка» качественно подобны уравнениям (1). Влияние толщины поверхностного слоя на характер его пространственного гофрирования показано на рис. 3.

Представленные на рис. 3 закономерности гофрирования поверхностного слоя в совокупности с экспериментальными данными [9, 15, 21, 35, 36] о стадиях локализации деформации, обнаруживаемых на поверхности нагруженного образца, позволяют предложить ряд концептуальных положений о роли поверхностного слоя в пластической деформации и разрушении твердых тел. Остановимся на этом подробнее.

4. Масштабные уровни локализации пластического течения поверхностного слоя

На начальной стадии деформации в тонком поверхностном слое образца вдоль всей его длины возникает стохастически распределенное высокочастотное гофрирование (рис. 3, а). В рамках представлений синергетики подобный поверхностный слой представляет собой активную возбудимую среду, которая характеризуется стохастической шероховатостью на микромасштабном уровне. Испускаемые базовым концентратором напряжений у захвата испытательной машины (рис. 1) одиночные импульсы перераспределения атомных конфигураций распространяются в поверхностном слое в поле максимальных касательных напряжений как активный релаксационный процесс. Его торможение происходит на двух масштабных уровнях: мезо и макро.

На мезоуровне торможение возникает за счет сопряжения поверхностного слоя с кристаллической подлож-

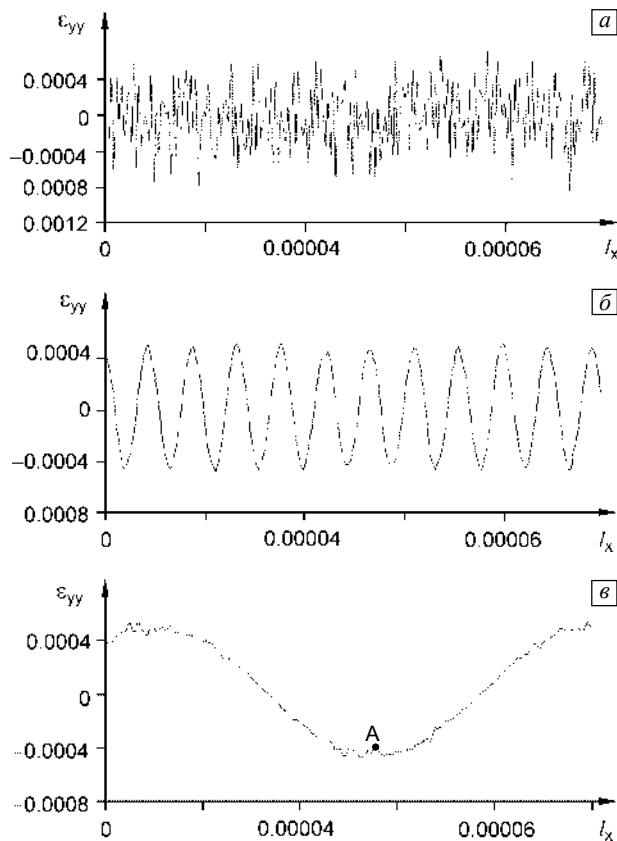


Рис. 3. Влияние толщины поверхностного слоя на профиль его сопряжения с кристаллической подложкой в нагруженном твердом теле [34]; толщина границы раздела 10^{-8} (а), 10^{-7} (б) и 10^{-6} м (в)

кой с образованием на поверхности складчатой структуры. Рождение в складках поверхностного слоя дислокаций обуславливает локализацию деформации мезомасштабного уровня. Пример такой локализации представлен на рис. 4, полученном при растяжении дуралюмина [9]. Наблюдать подобную локализацию при деформации металлов с низкой сдвиговой устойчивостью (Cu, Ag, Au и др.) затруднительно, так как дислокации легко зарождаются уже при небольшой высоте складок. Высокая сдвиговая устойчивость алюминия и его сплавов (их энергия дефекта упаковки составляет $0.2 \div 0.25$ Дж/м²) позволяет сформировать складки достаточной высоты

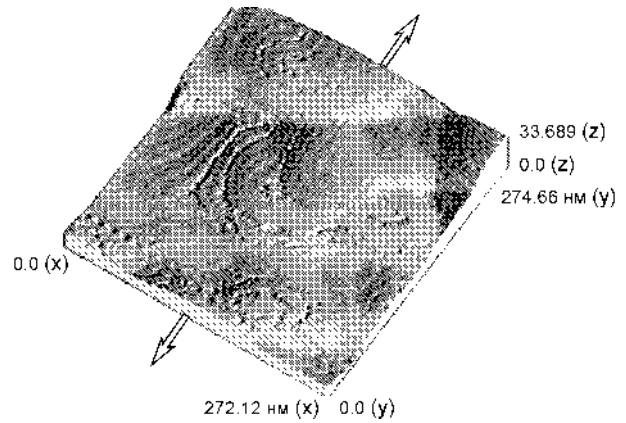


Рис. 4. Образование цепочек дислокационных ямок на террасно-ступенчатой поверхности плоского образца дуралюмина; растяжение при 293 К, $\epsilon = 9.8\%$, атомно-силовая микроскопия [9]

и протяженности, необходимой для их обнаружения атомно-силовой микроскопией. Мезомасштаб подобной локализации соответствует субмикронному диапазону.

Наряду с этим, спекл-интерферометрия и оптико-телевизионный измерительный комплекс TOMSC выявляют в поверхностном слое локализацию деформации макромасштабного уровня (рис. 5). 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 генерацией макрополос сброса. Фронт подобной макролокализации деформации движется вдоль оси образца с периодическим формированием макрополос сброса. Периодичность такой макролокализации зависит от длины образца. Для коротких образцов дисперсно-упрочненного алюминия ($l = 14$ мм) пространственная периодичность макролокализации составляет $1.5 \div 2$ мм (рис. 5). При длине рабочей части $l = 100$ мм в образцах многих чистых металлов периодичность макролокализации увеличивается до

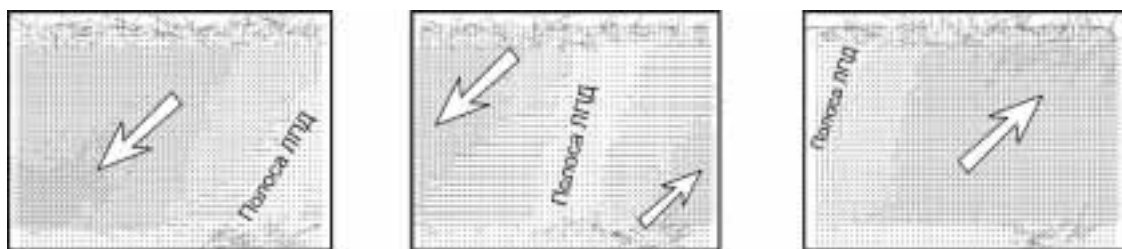


Рис. 5. Образование полос сброса в поле векторов смещений на поверхности плоского образца композиционного материала Al + 10% Al₂O₃; растяжение при $T = 293$ К [21] (ЛПД — локализованная пластическая деформация)

5÷8 мм. В образцах с длиной 150 мм расстояние между макрополосами сброса достигает 15 мм [35].

Подчеркнем, что описанный выше нелинейный волновой процесс распространения фронта одиночных очагов локализованной пластической деформации на мезо- и макромасштабных уровнях может наблюдаться только в условиях высокочастотного гофрирования достаточно тонкого поверхностного слоя деформируемого образца.

В ходе пластической деформации толщина «эффективного» поверхностного слоя возрастает, и его стохастическое гофрирование на микромасштабном уровне становится невозможным. Между поверхностным слоем и кристаллической подложкой формируется интерфейс, профиль которого, как отмечалось выше, не является плоским. Уже из решения одномерной задачи (рис. 3, б) видно, что в поверхностном слое возникают зоны, испытывающие сжимающие нормальные напряжения, в которых процесс атомных перераспределений затруднен. В этих условиях гофрирование поверхностного слоя может происходить только в зонах с растягивающими нормальными напряжениями. Как следствие, на этой стадии пластической деформации в поверхностном слое образца формируется стационарный гофр. Его мезоструктура определяется состоянием поверхностного слоя и его интерфейса с кристаллической подложкой.

5. Влияние толщины поверхностного слоя и состояния его интерфейса с основным кристаллом на пластическую деформацию и разрушение твердых тел

Анализ пространственной модуляции профиля одномерного интерфейса «поверхностный слой – подложка», рассчитанного в [33], позволил в работе [37] сформулировать и экспериментально обосновать принципиально новую концепцию, согласно которой в двух- или трехмерном представлении интерфейс должен иметь структуру «шахматной доски». Представленные в [37] экспериментальные данные хорошо коррелируют с этой концепцией.

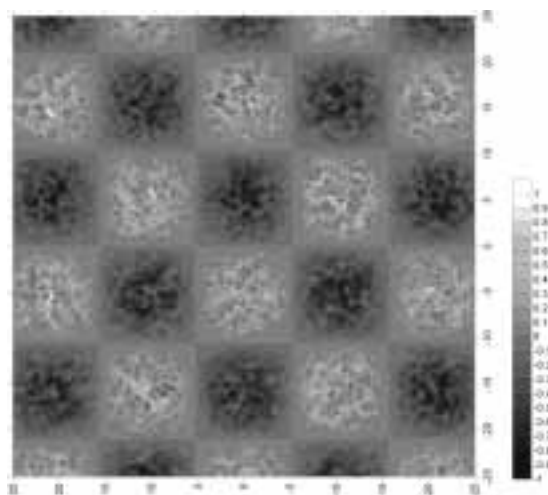


Рис. 6. Распределение неупругой деформации на интерфейсе «поверхностный слой – основной кристалл»; трехмерное моделирование [38]. Справа представлена высота профиля интерфейса

Расчет геометрии интерфейса «поверхностный слой – объем кристалла» в трехмерном приближении [38] подтвердил, что его профиль имеет вид «шахматной доски» (рис. 6). Темные клетки на рис. 6 соответствуют зонам сжимающих нормальных напряжений, светлые клетки — зонам растягивающих нормальных напряжений. Очевидно, что стационарный гофр поверхностного слоя может формироваться только в зонах растягивающих нормальных напряжений. Обеспечить непрерывную экструзию материала поверхностного слоя в ходе деформации можно только в направлениях максимальных касательных напряжений, в которых ряды светлых клеток находятся между рядами темных клеток. Последние находятся под действием сжимающих нормальных напряжений и экструдировать материал поверхностного слоя при его гофрировании не могут.

Принципиально возможны три вида стационарного гофрирования поверхностного слоя при структуре интерфейса в виде «шахматной доски». Они представлены на рис. 7 и все наблюдаются экспериментально (рис. 8).

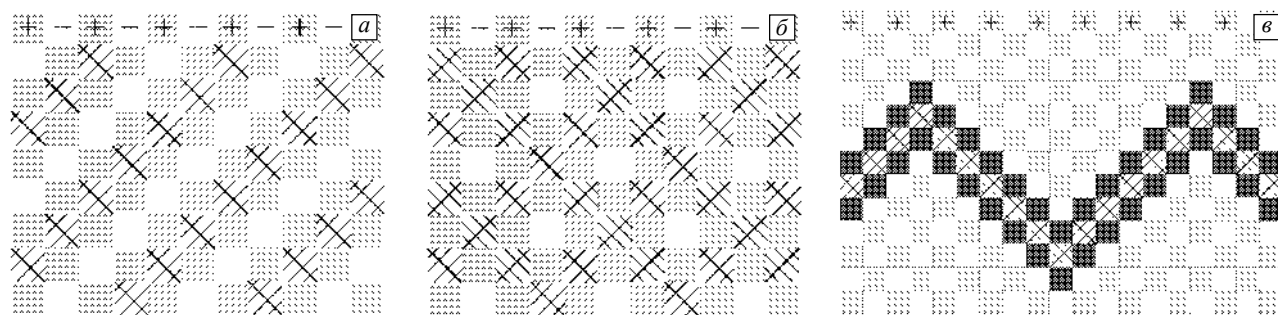


Рис. 7. Три принципиально возможные схемы стационарного гофрирования поверхностного слоя деформируемого твердого тела при структуре интерфейса в виде «шахматной доски»

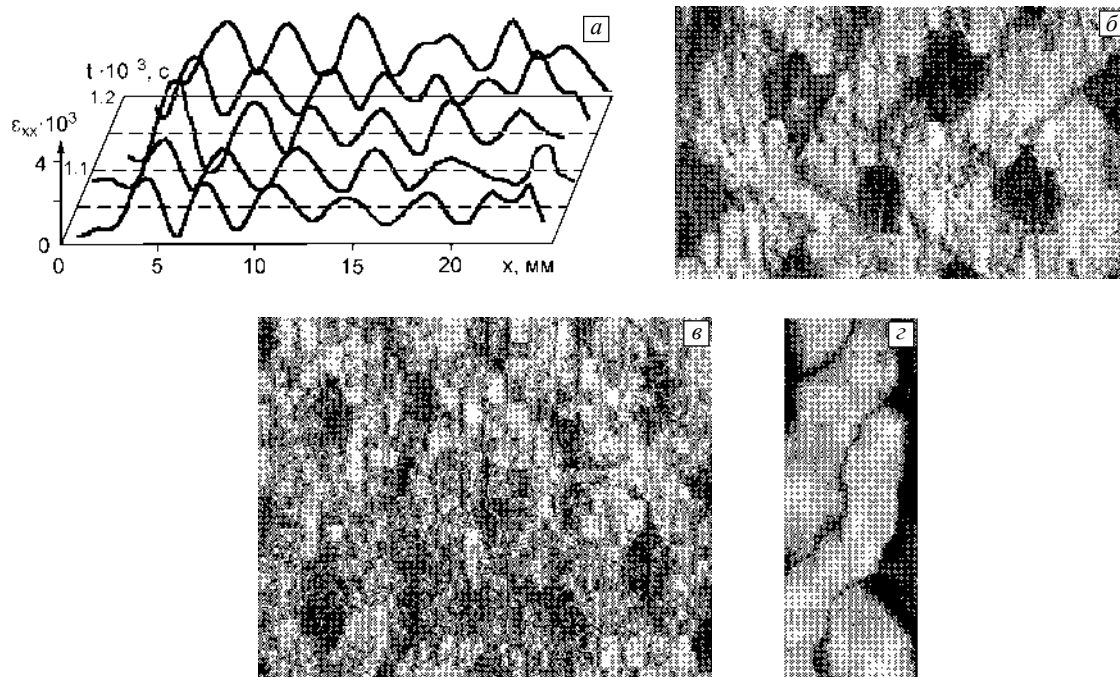


Рис. 8. Экспериментальные картины стационарного гофрирования поверхностного слоя в деформируемом твердом теле; растяжение при 293 К: *a* — поликристаллический сплав Zr–2.5%Nb [35]; *б, в, з* — малоуглеродистая сталь Ст3; растяжение при $T = 293$ К после ультразвуковой обработки и последующего отжига при $T = 1103$ К; $\varepsilon = 13$ (*б*), 28 (*в*), 32 % (*з*); сканирующая электронная микроскопия, $\times 250$ [12]

Характер гофрирования зависит от вида материала, состояния поверхностного слоя и его интерфейса с объемом кристалла, условий нагружения.

На рис. 8, *a* показано гофрирование поверхностного слоя, которое выявляется спекл-интерферометрией при растяжении плоских образцов отожженных металлов и сплавов [35, 36]. Оно возникает после прекращения движения фронтов макрополос сброса. Поскольку эффективный поверхностный слой при деформации отожженного материала формируется только за счет избыточной плотности дислокаций, он имеет размытый интерфейс при сравнительно небольшой толщине поверхностного слоя [5]. Развитие в нем гофрирования только вдоль одного направления максимальных касательных напряжений τ_{\max} (рис. 7, *a*, 8, *a*) не должно сопровождаться сильными эффектами изгиба образца. Частично такой изгиб может компенсироваться встречным аккомодационным движением дислокаций в подповерхностном слое, частично может приводить к развитию поворотных мод деформации в образце. В связи с этим напомним, что при растяжении нитевидных кристаллов всегда наблюдается эффект закручивания образца [39]. Однако до сих пор этот эффект не имел объяснения.

Как показано в [37], наноструктурирование поверхностного слоя плоского образца малоуглеродистой стали увеличивает толщину поверхностного слоя до $150 \div 180$ мкм, а его сопряжение с полосовым фрагментированным подслоем формирует хорошо выраженный

интерфейс. В таком образце сопротивление изгибу оказывается высоким, и при $\varepsilon \sim 10 \div 15$ % стационарное гофрирование поверхностного слоя развивается уже по схеме, представленной на рис. 7, *б*, в двух сопряженных направлениях τ_{\max} (рис. 8, *б*). Усиливается роль растягивающих нормальных напряжений на интерфейсе, о чем говорит значительное возрастание высоты экструдированных мезополос в зонах стационарного гофра. Если для случая на рис. 8, *a* стационарное гофрирование выявляется только из анализа интерференционных спеклов, то в случае рис. 8, *б* экструдированные мезополосы обнаруживаются уже туннельной сканирующей микроскопией.

При возрастании степени деформации до $\varepsilon \sim 28 \div 32$ % сопротивление изгибу образца с наноструктурированным поверхностным слоем настолько сильно возрастает, что стационарное гофрирование происходит только по схеме, представленной на рис. 7, *в*. Мезополосы в зонах стационарного гофрирования распространяются по сопряженным направлениям τ_{\max} на ограниченные расстояния, после чего зигзагообразно изменяют направление своего распространения. В итоге стационарный гофр поверхностного слоя приобретает вид двойных спиралей (рис. 8, *в, з*). При $\varepsilon = 32$ % высота экструдированного материала в мезополосах двойных спиралей достигает $5 \div 6$ мкм.

Все рассмотренные выше случаи стационарного гофрирования поверхностного слоя связаны с разви-



Рис. 9. Смещение ламелей друг относительно друга в мезополосах экструдированного материала; малоуглеродистая сталь Ст3, растяжение при $T = 293$ К после ультразвуковой обработки и последующего отжига при 1103 К; $\epsilon = 32\%$, сканирующая туннельная микроскопия, $\times 650$ [13]

тием мезополос экструдированного материала. Механизм экструзии в мезополосах двойных спиралей представлен на рис. 9. Видно, что экструзия материала происходит путем смещения наружу ламелей поверхностного слоя. Другими словами, если на начальных стадиях деформации движение фронта поверхностных дефектов сопровождалось закачкой дислокаций внутрь материала («насос \downarrow »), то на стадии стационарного гофрирования происходит смещение ламелей поверхностного слоя наружу (соответствующую схему назовем «насосом \uparrow », рис. 10).

Экструзия материала поверхностного слоя в зонах растягивающих нормальных напряжений естественно приводит к возрастанию сжимающих нормальных напряжений в смежных зонах с увеличением степени деформации. Жесткость интерфейса и «эффективная» толщина поверхностного слоя возрастают. В результате профиль поверхностного слоя приобретает вид, представленный на рис. 3, в. На поверхности деформируемого образца в зоне А возникает локализованный макроконцентратор напряжений, который формирует шейку и обуславливает разрушение образца.

Механизм развития макролокализованной деформации в шейке подробно описан в [40]. Здесь принципиально важно подчеркнуть, что место разрушения образца и время его наступления определяются его поверхностным слоем. В литературе ошибочно принято считать, что место разрушения в деформируемом образце возникает в результате случайных флуктуаций его поперечного сечения [41]. При этом исходят из положения, что пластическое течение контролируется средним приложенным напряжением. В физической мезомеханике пластическая деформация и разрушение связываются с возникновением в нагруженном материале концентраторов напряжений различного масштаба. Из приведенного выше анализа следует, что разрушение деформируемого образца является детерминированным процессом, который контролируется состоянием по-

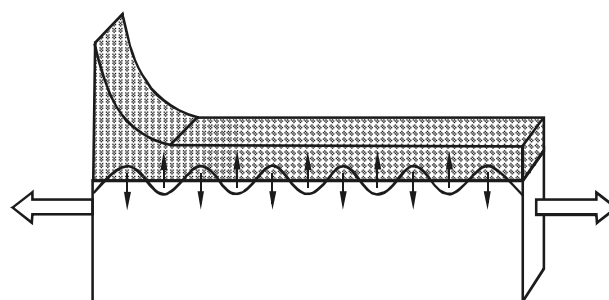


Рис. 10. Схема интерфейса «поверхностный слой – основной кристалл» в условиях стационарного гофрирования поверхностного слоя («насос \uparrow »)

верхностного слоя и его интерфейса с объемом кристалла. Как показано в [24, 25, 37], управляя действием «насоса \uparrow » в поверхностном слое, можно препятствовать формированию макрогофра, представленного на рис. 3, в. Как следствие, удастся задержать макролокализацию деформации и тем самым существенно увеличить как прочность, так и пластичность материала. Традиционно прочность повышают блокированием дислокаций. Но именно они обеспечивают пластичность материала. В [42] предлагается новый метод упрочнения конструкционных материалов за счет управления их поверхностными слоями. При этом определенную подвижность дислокаций в объеме материала следует сохранить. Такое упрочнение материала может сопровождаться увеличением его пластичности.

6. Заключение

Поверхностный слой в деформируемом твердом теле является самостоятельной функциональной подсистемой, которая радикально влияет на масштабные уровни локализации пластического течения и разрушение материала в целом. Ослабленные силы связи и специфическая структура поверхностного слоя обуславливают более интенсивное развитие в нем пластического течения по сравнению с объемом материала. Несовместность деформации поверхностного слоя и кристаллической подложки обуславливает возникновение при их сопряжении эффекта гофрирования поверхности кристалла. С ростом степени деформации эффект гофрирования проходит три стадии своего развития.

В начальной стадии в тонком поверхностном слое возникает стохастически распределенное гофрирование на микромасштабном уровне. Подобный поверхностный слой является активной возбудимой средой, в которой распространяются бегущие импульсы атомных перераспределений, испускаемые базовым концентратором напряжений у захвата испытательной машины. Торможение бегущих импульсов кристаллической подложкой вызывает квазипериодическое возникновение микроконцентраторов напряжений, которые релаксируют

генерацией дислокаций, уходящих в объем материала. В поверхностном слое возникает локализация деформации на мезомасштабном уровне.

Движение бегущих импульсов по направлению максимальных касательных напряжений τ_{\max} вызывает локальные изгибы образца и связанные с ними периодические макроконцентрации напряжений. Они релаксируют генерацией макрополос сброса, обуславливая периодическую макролокализацию деформации образца. На этой начальной стадии поверхностный слой функционирует подобно «наосу ↓», закачивающему дислокации в объем материала.

Вторая стадия гофрирования связана с формированием интерфейса между поверхностным слоем и объемом кристалла, на котором напряженно-деформированное состояние характеризуется распределением типа «шахматной доски». В этих условиях формируется стационарное гофрирование поверхностного слоя, которое наследует зоны растягивающих нормальных напряжений в «шахматной» структуре интерфейса.

На поверхности возникает мезосубструктура экструдируемого материала. В зависимости от вида материала, «эффективной» толщины поверхностного слоя и его механических характеристик могут возникать три типа мезосубструктур экструдируемого материала: одна система мезополос в направлении τ_{\max} , две системы мезополос в сопряженных направлениях τ_{\max} , система зигзагообразных двойных спиралей вдоль оси деформируемого образца. На этой стадии стационарного гофрирования поверхностный слой работает по схеме «насоса ↑», смещающего ламели мезополос гофра наружу.

На завершающей стадии гофрирования поверхностный слой, жестко прикрепленный к кристаллу в зонах сжимающих напряжений интерфейса, изгибается как целое подобно потере устойчивости длинномерного стержня при одноосном сжатии. В зоне максимального изгиба поверхностного слоя возникает макроконцентратор напряжений, который определяет место и время разрушения деформируемого образца.

Специальным конструированием поверхностного слоя и его интерфейса с объемом кристалла можно задерживать развитие всех трех стадий гофрирования, включая завершающую стадию разрушения. Это позволяет упрочнять материал с одновременным увеличением его пластичности.

Благодарности

Авторы выражают признательность Д.Д. Моисеенко и П.В. Максимова за возможность использования результатов выполненного ими трехмерного расчета «шахматной структуры» интерфейса.

Работа выполнена в рамках интеграционного проекта СО РАН № 93, гранта РФФИ № 05-01-08007-офи-э и гранта Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ НШ-2324.2003.1.

Литература

1. Гилман Дж., Джонстон В. Возникновение дислокаций в кристаллах LiF при низких напряжениях // Дислокации и механические свойства кристаллов. – М.: Иностран. лит., 1960. – С. 393–394.
2. Орлов Л.Г. О зарождении дислокаций на внешних и внутренних поверхностях кристаллов // ФТТ. – 1967. – Т. 9. – Вып. 8. – С. 2345–2349.
3. *Surface Effects in Crystal Plasticity* / Ed. by R.M. Latanision, J.T. Fourie. – Leyden: Noordhoff, 1977. – 944 p.
4. Eshelby J.D. Boundary problems. – Amsterdam: North-Holland Publ., 1979. – V. 1. – P. 167–220.
5. Алехин В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. – М.: Наука, 1983. – 280 с.
6. Дударев Е.Ф. Микропластическая деформация и предел текучести поликристаллов. – Томск: Изд-во ТГУ, 1988. – 256 с.
7. Антипов С.Ф., Батаронов И.Л., Дрожжин А.И. и др. Особенности пластической деформации кремния, связанные с зарождением дислокаций на поверхности и эволюцией их ансамбля в объеме // Изв. вузов. Физика. – 1993. – Т. 36. – С. 60–68.
8. Веттегрень В.И., Светлов В.Н., Рахимов С.Ш. Исследование эволюции субмикродофектов на поверхности нагруженных образцов золота при помощи туннельного профилометра // ФТТ. – 1996. – Т. 38. – № 2. – С. 590–594.
9. Кузнецов П.В., Панин В.Е. Прямое наблюдение потоков дефектов и субмикронной локализации деформации на поверхности дуралюмина при помощи сканирующего туннельного и атомного силового микроскопов // Физ. мезомех. – 2000. – Т. 3. – № 2. – С. 91–98.
10. Panin V.E. Strain-induced defects in solids at the different scale levels of plastic deformation and the nature of their sources // Mater. Sci. Eng. – 2001. – V. 310–321. – P. 197–200.
11. Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов. – М.: Наука, 2003. – 354 с.
12. Panin A.V., Klimenov V.A., Abramovskaya N.L., Son A.A. Plastic flow at mesoscale for surface layers // Mesomechanics'2000 / Ed. by G.C. Sih. – Beijing: Tsinghua University Press, 2000. – V. 2. – P. 579–584.
13. Панин А.В., Клименов В.А., Почивалов Ю.И., Сон А.А. Влияние состояния поверхностного слоя на механизм пластического течения и сопротивление деформации малоуглеродистой стали // Физ. мезомех. – 2001. – Т. 4. – № 4. – С. 85–92.
14. Панин А.В., Панин В.Е., Почивалов Ю.И., Клименов В.А., Чернов И.П., Валиев Р.З., Казаченок М.С., Сон А.А. Особенности локализации деформации и механического поведения титана ВТ1-0 в различных структурных состояниях // Физ. мезомех. – 2002. – Т. 5. – № 4. – С. 73–84.
15. Панин В.Е. Физическая мезомеханика поверхностных слоев твердых тел // Физ. мезомех. – 1999. – Т. 2. – № 6. – С. 5–23.
16. Панин В.Е. Поверхностные слои нагруженных твердых тел как мезоскопический структурный уровень деформации // Физ. мезомех. – 2001. – Т. 4. – № 3. – С. 5–22.
17. Тойоока С., Маджарова В., Жанг К., Супранеди. Исследование элементарных процессов пластической деформации с помощью динамической электронной спекл-интерферометрии // Физ. мезомех. – 2001. – Т. 4. – № 3. – С. 23–27.
18. Йошида С. Оптико-интерферометрические исследования деформации и разрушения на основе физической мезомеханики // Физ. мезомех. – 1999. – Т. 2. – № 4. – С. 5–12.
19. Toyooka S., Widiastuti R., Zhang Q., Kato H. Dynamic observation of localized strain pulsation generated in the plastic deformation process by electronic speckle pattern interferometry // Jpn. J. Appl. Phys. – 2001. – V. 40. – P. 873–876.
20. Колмаков А.Г. Анализ связи структурных изменений и механических свойств металлических материалов при модификации поверхности с использованием мультifractalных представлений // Дис. ... докт. техн. наук. – М.: ИМЕТ РАН, 2004. – 376 с.
21. Дерюгин Е.Е., Панин В.Е., Шмаудер З., Стороженко И.В. Эффекты локализации деформации в композитах на основе Al с включениями Al_2O_3 // Физ. мезомех. – 2001. – Т. 4. – № 3. – С. 35–47.

22. Панин В.Е., Панин С.В. Мезомасштабные уровни пластической деформации поликристаллов алюминия // Изв. вузов. Физика. – 1997. – Т. 40. – № 1. – С. 31–39.
23. Panin V.E. Synergetic principles of physical mesomechanics // Theor. Appl. Fracture Mech. – 2001. – V. 37. – No. 1–3. – P. 261–298.
24. Панин В.Е., Панин Л.Е. Масштабные уровни гомеостаза в деформируемом твердом теле // Физ. мезомех. – 2004. – Т. 7. – № 4. – С. 5–23.
25. Панин В.Е. Поверхностные слои твердых тел как синергетический активатор пластического течения нагруженного твердого тела // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2005. – № 7. – С. 62–68.
26. Васильев М.А. Структура и динамика поверхности переходных металлов. – Киев: Наукова думка, 1988. – 280 с.
27. Zangwill A. Physics of surfaces. – Cambridge: Cambridge University Press, 1988. – 536 p.
28. Бельский А.Я. Электронные поверхностные состояния в кристаллах // Усп. физ. наук. – 1981. – Т. 134. – Вып. 1. – С. 125–147.
29. Немошкленко В.В., Алешин В.Г. и др. Электронная структура и состав поверхности сплавов // Металлофизика. – 1982. – Т. 4. – № 4. – С. 58–63.
30. Киселев В.В., Долгих Д.В. Локальная неустойчивость, долгоживущие возбуждения в слоистой среде и на поверхности цилиндрической оболочки // Физ. мезомех. – 2004. – Т. 7. – Спец. выпуск. – Ч. 1. – С. 173–176.
31. Литовченко И.Ю., Шевченко Н.В., Тюменцев А.Н., Пинжсин Ю.П. Атомные модели образования дислокаций и механического двойникования в нанокристаллах с ГЦК-решеткой // Физ. мезомех. – 2005. – Т. 8. – № 4. – С. 5–12.
32. Цигенбайн А., Плессинг Й., Нойхойзер Х. Исследование мезоуровня деформации при формировании полос Людерса в монокристаллах концентрированных сплавов на основе меди // Физ. мезомех. – 1998. – Т. 1. – № 2. – С. 5–20.
33. Cherepanov G.P. On the theory of thermal stresses in a thin bonding layer // J. Appl. Phys. – 1995. – V. 78. – P. 6826–6832.
34. Моисеенко Д.Д., Максимов П.В., Соловьев И.А. Стохастический подход к многоуровневому моделированию возмущений на границах раздела в нагруженном твердом теле // Физ. мезомех. – 2004. – Т. 7. – № 2. – С. 19–24.
35. Зувев Л.Б., Данилов В.И. Медленные автоволновые процессы при деформации твердых тел // Физ. мезомех. – 2003. – Т. 6. – № 1. – С. 75–94.
36. Бараникова С.А. Динамика и эволюция макролокализации деформации в металлических монокристаллах при скольжении и двойниковании: Автореф. дис. докт. физ.-мат. наук. – Томск: ИФПМ СО РАН, 2005. – 40 с.
37. Панин А.В. Нелинейные волны локализованного пластического течения в наноструктурных поверхностных слоях твердых тел и тонких пленках // Физ. мезомех. – 2005. – Т. 8. – № 3. – С. 5–17.
38. Моисеенко Д.Д., Максимов П.В. Эффект «шахматной доски» и формирование спиральных мезоструктур на интерфейсе «поверхностный слой – подложка»: моделирование на основе стохастического подхода // Физ. мезомех. – 2005. – Т. 8. – № 6 (в печати).
39. Антипов С.А., Батаронов И.Л., Дрожжин А.М. и др. О ротационной неустойчивости пластически деформируемых растяжением нитевидных кристаллов кремния // Кристаллография. – 1986. – Т. 34. – № 3. – С. 702–705.
40. Panin V.E., Grinyaev Yu.V., Panin A.V., Panin S.V. Multilevel wave model of a deformed solid in physical mesomechanics // Proceedings of the Sixth International Conference for Mesomechanics «Multiscale in Applied Science and Emerging Technology. Fundamentals and Applications in Mesomechanics», 2004, Patras, Greece. – P. 335–342.
41. Владимиров В.И. Физика разрушения металлов. – М.: Металлургия, 1984. – 240 с.
42. Панин В.Е., Чернов В.М., Смирнова-Леонтьева М.В., Панин А.В., Почивалов Ю.И. Новый способ упрочнения конструкционных материалов. Заявка на патент.