

Эффект «шахматной доски» в распределении напряжений и деформаций на интерфейсах в нагруженном твердом теле: экспериментальная верификация и механизмы мезоскопического каналирования

В.Е. Панин, А.В. Панин, Т.Ф. Елсукова, О.Ю. Кузина

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

Проведена экспериментальная верификация предсказанного А.В. Паниным эффекта «шахматной доски» в распределении напряжений и деформаций на интерфейсе «поверхностный слой – основной кристалл» в деформируемом твердом теле. При знакопеременном изгибе плоских образцов титана VT1-0 с наводороженным поверхностным слоем получено прямое экспериментальное подтверждение эффекта «шахматного» распределения пластического течения на мезомасштабном уровне в сдвигоустойчивом наводороженном поверхностном слое. Все обнаруженные авторами мезоскопические механизмы деформации в наводороженных поверхностных слоях поли- или субмикроструктурного титана при растяжении или знакопеременном изгибе удовлетворительно объясняются эффектом каналирования сдвигов в условиях клеточной структуры интерфейса «наводороженный поверхностный слой – кристаллическая подложка титана».

Effect of “chessboard” stress and strain distribution on interfaces in a loaded solid: experimental verification and mesoscopic channeling mechanisms

V.E. Panin, A.V. Panin, T.F. Elskova, and O.Yu. Kuzina

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

We have experimentally verified the effect of chessboard-like stress and strain distribution on the surface layer – crystal bulk interface in a deformed solid, which was predicted by A.V. Panin. Under alternating bending of flat titanium VT1-0 specimens with a hydrogenated surface layer, we have obtained a direct experimental verification of the effect of chessboard-like plastic flow distribution at the mesoscale level in the shear-unstable hydrogenated surface layer. All the revealed mesoscopic deformation mechanisms in hydrogenated surface layers of poly- and submicrocrystalline titanium under tension or alternating bending are satisfactorily explained by the shear channeling effect for the chessboard-like structure of the interface “hydrogenated surface layer – titanium crystal substrate”.

1. Введение

В работах [1–6] на основе системного подхода обобщается концепция физической мезомеханики, согласно которой поверхностный слой в деформируемом твердом теле является самостоятельной подсистемой. Ослабленные силы связи, наличие большого числа структурных вакансий, широкий спектр атомных конфигураций в поверхностном слое вызывают развитие в нем более интенсивной пластической деформации по сравнению с объемом кристалла. Необходимость совместности пластического течения поверхностного слоя и кристаллической подложки обуславливает возникнове-

ние на границе их раздела квазипериодического распределения напряжений и деформаций.

Теоретические расчеты распределения нормальных σ и касательных τ напряжений на интерфейсе «поверхностный слой – основной кристалл», проведенные в [7, 8] в одномерном приближении, показали периодический характер распределения σ и τ вдоль интерфейса двух сред, имеющих различные значения модуля упругости или коэффициента термического расширения. Проведенный в [4] анализ теоретических расчетов [7, 8] и экспериментальных данных [9–12] о развитии в наноструктурированных слоях деформируемого твер-

дого тела локализованного пластического течения в виде двойных спиралей привел к заключению о том, что на интерфейсе разнородных сред в двумерном измерении распределение напряжений и деформаций должно иметь вид «шахматной доски». Моделирование интерфейса «поверхностный слой – подложка» в нагруженном твердом теле, проведенное в [8] на основе стохастического подхода в рамках трехмерной модели, подтвердило заключение [4] о «шахматном» распределении локальных напряжений и деформаций при сопряжении двух разнородных сред. Получило теоретическое подтверждение и объяснение эффекта каналирования локального пластического течения в наноструктурированных поверхностных слоях вдоль клеток «шахматной» структуры интерфейса с растягивающими нормальными напряжениями. Вместе с тем, прямого экспериментального подтверждения «шахматного» характера распределения напряжений и деформаций на границе раздела «поверхностный слой – основной кристалл» до сих пор не было получено.

В настоящей работе поставлена задача получить прямое экспериментальное доказательство эффекта «шахматной доски» в распределении деформаций на границе раздела «поверхностный слой – основной кристалл». Проведение экспериментов [9–12] в условиях одноосного растяжения образца с наноструктурированным поверхностным слоем вызывало слияние деформируемого материала в клетках с растягивающими нормальными напряжениями в мезополосах локализованного пластического течения. Для предотвращения такого слияния и сохранения дискретных островков экструдированного материала в клетках с растягивающими нормальными напряжениями необходимо основной объем деформируемой многоуровневой системы сохранять в стационарном состоянии. Тогда в координатах (x, y, z) избыточная деформация поверхностного слоя будет развиваться в основном вдоль оси z . Это позволит эффективно декорировать дискретный «шахматный» профиль распределения клеток с растягивающими нормальными напряжениями на интерфейсе «поверхностный слой – основной кристалл». Подобную деформацию целесообразно осуществлять знакопеременным изгибом образца при его нагружении в упругой области. Если специальной обработкой дополнительно снизить сдвиговую устойчивость поверхностного слоя образца и вызвать его пластическое течение на мезомасштабном уровне, то на интерфейсе «поверхностный слой – упруго напряженная подложка» должно возникнуть стационарное распределение дискретной «шахматной» структуры распределения напряжений и деформаций. Экспериментальному подтверждению эффекта «шахматной доски» в распределении напряжений и деформаций на интерфейсе «поверхностный слой – основной объем материала» посвящена настоящая работа.

2. Материал и методика исследования

В качестве материала исследования был выбран технический титан марки ВТ1-0. Он характеризуется полиморфизмом, что позволяет ожидать существования в его поверхностных слоях спектра различных атомных конфигураций [2, 13], которые облегчают зарождение и развитие деформационных дефектов. В этом же направлении действует и другая характерная особенность титана — низкая сдвиговая устойчивость кристаллической решетки (его энергия дефекта упаковки составляет всего 10 мДж/м²). И, наконец, для титана характерно большое сродство к водороду. Это обуславливает развитие при знакопеременном изгибе плоских образцов титана с наводороженным поверхностным слоем аномально больших поперечных смещений мезообъемов поверхностного слоя в направлении оси z [14]. Естественно ожидать, что в подобных условиях должен эффективно декорироваться «шахматный» характер распределения напряжений и деформаций на интерфейсе «наводороженный поверхностный слой – основной объем поликристаллического титана».

Исследовали плоские образцы в форме двойной лопатки с размерами рабочей части 40×8×1 мм³. Поверхность образцов для структурных исследований готовили методом электролитической полировки. На полированную поверхность наносили координатную сетку с квадратными ячейками. Это позволяет анализировать развитие сдвиговых и поворотных составляющих деформации, а также распределение деформации на поверхности образца.

Насыщение водородом образцов титана осуществляли при комнатной температуре в 1 М растворе электролита (LiOH + H₂O) при плотности тока 1 А/см² в течение 0,5, 1, 2 и 3 часов. Толщину наводороженного слоя определяли на масс-спектрометре вторичных ионов MS-7201M с послынным разрешением 3÷5 нм и элементной чувствительностью на уровне 10⁻³÷10⁻⁴ ат. %. Сечение зондирующего пучка ионов аргона составляло 1,7 мм, энергия — 4,5÷6 кэВ, плотность — 0,1 мА/см², уровень вакуума — 2,0·10⁻⁴ Па. Измеряли зависимости сигналов вторичного тока ионов исследуемых элементов от времени распыления.

Нагружение осуществляли знакопеременным симметричным изгибом, обеспечивающим преимущественную деформацию только поверхностных слоев образца. Испытания проводили при комнатной температуре в режиме многоциклового усталости.

Структурные исследования выполняли методом световой микроскопии на различных этапах знакопеременного изгиба. Трехмерную картину формирующейся на поверхности образца мезоскопической субструктуры получали с использованием лазерного профилометра MICRO MEASURE 3D и оптического микроскопа Axiovert-25CA, снабженного устройством DIC для полу-

чения дифференциально-интерференционного контраста. Для изучения кинетики самосогласованного взаимодействия деформирующихся зерен на большом участке образца применяли метод фотомонтажей.

3. Результаты исследования

Послойный анализ рекристаллизованного титана ВТ1-0, подвергнутого электролитическому наводороживанию в течение 30, 60 и 120 минут, показал, что концентрация водорода в приповерхностном слое исследованных образцов возрастает с увеличением времени водородной обработки (рис. 1).

На рис. 2 приведены оптические изображения поверхности поликристаллических образцов титана до и после наводороживания их поверхностного слоя. Видно, что в наводороженном слое еще до нагружения образца целые конгломераты зерен поликристалла самоорганизуются с формированием более крупномасштабной мезоскопической структуры (рис. 2, б). Это не связано с рекристаллизацией материала, поскольку на рис. 2, б в каждом конгломерате просматривается исходная зеренная структура. Мезоскопическая самоорганизация зерен в конгломераты обусловлена внутренними напряжениями, которые возникают в наводороженном поверхностном слое при его сопряжении с мелкокристаллической подложкой.

В ходе последующего циклического нагружения образцов в тонком наводороженном поверхностном слое развиваются механизмы деформации мезоскопического масштаба, не связанные с кристаллографией исходных

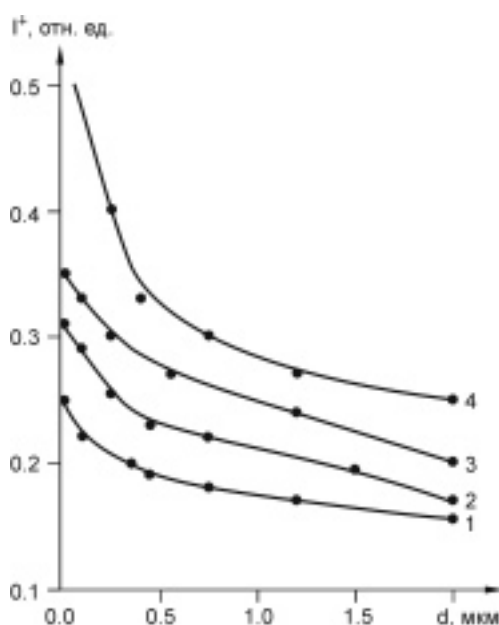


Рис. 1. Профили распределения концентраций положительных ионов H^+ в образцах титана ВТ1-0; 1 — исходный образец, 2, 3, 4 — наводороженные в течение 30, 60 и 120 минут соответственно

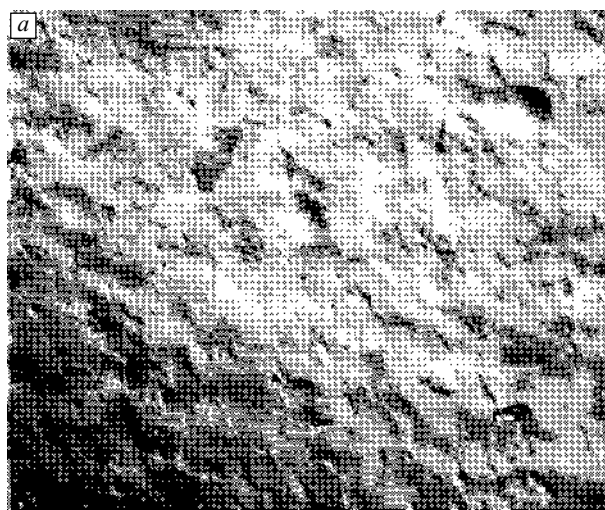


Рис. 2. Структура рекристаллизованного титана до (а) и после (б) наводороживания. $\times 370$

зерен. На рис. 3 представлено оптическое изображение фрагмента образца с наводороженным в течение одного часа поверхностным слоем вблизи зоны разрушения. Особого внимания заслуживают три механизма деформации мезоскопического масштаба:

1. Зарождение на границе ABC конгломерата зерен K в зоне последующего разрушения (рис. 3) системы мезополос пластического течения, которые распространяются через конгломерат K по направлению максимальных касательных напряжений. Сильное гофрирование наводороженного поверхностного слоя в условиях знакопеременного изгиба искривляет траектории мезополос. На встречной границе CD конгломерата K система мезополос испытывает сильно выраженный поворот траектории своего движения, продолжая распространяться вдоль границы CD .

2. Гофрирование наводороженного поверхностного слоя при знакопеременном изгибе развивается в иерархии мезомасштабных уровней. В зонах локальной ин-

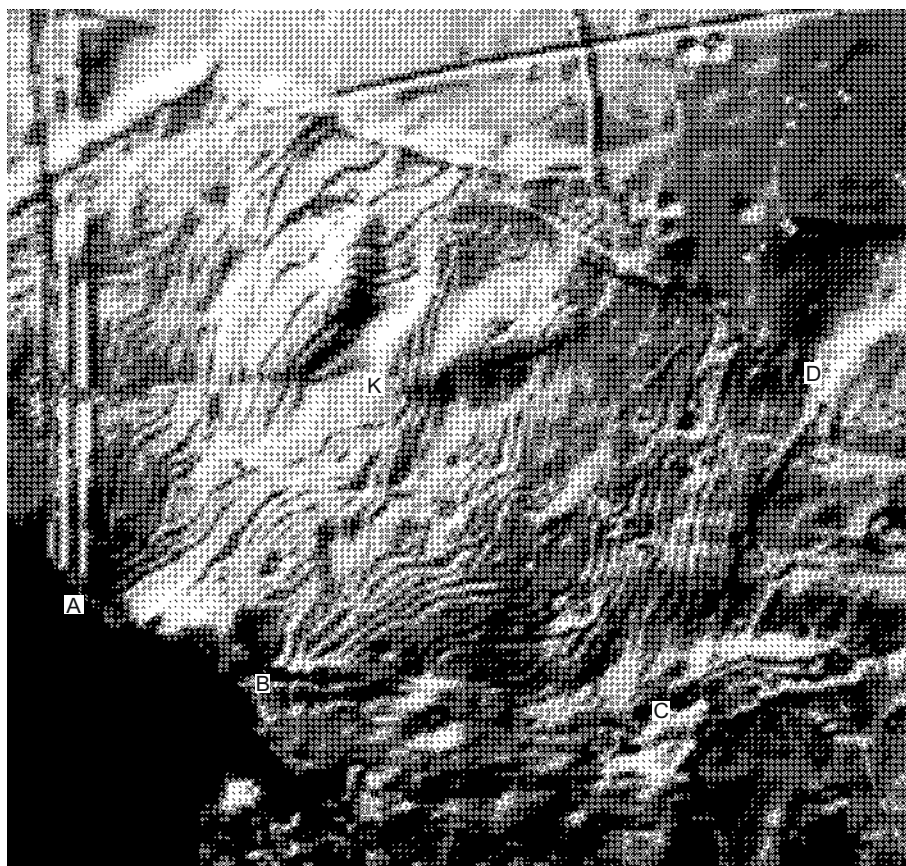


Рис. 3. Мезополосы пластического течения в конгломерате зерен *K* наводороженного в течение 1 часа поверхностного слоя титана. *ABCD* — граница конгломерата; $N = 12.4 \cdot 10^6$ циклов; DIC; $\times 600$

трузии декорируется тонкая мезоструктура типа «шахматной доски» (рис. 4, б, в).

3. По границам конгломератов развивается проскальзывание с формированием в приграничной зоне клеточной структуры мезоскопического масштаба (рис. 5, 6).

После наводороживания поверхностного слоя образцов титана в течение трех часов масштабы гофрирования поверхностного слоя при знакопеременном изгибе существенно возрастают:

- увеличиваются размеры элементов мезосубструктуры-II, первичные конгломераты зерен самоорганизуются в более крупные конгломераты (суперпетли, рис. 7), возрастает и разность высот экструдированных и интродуцированных зон;

- на дне интродуцированных зон (рис. 8, а) четко декорируется клеточная структура, размеры клеток которой значительно больше соответствующей клеточной структуры поверхностного слоя, наводороженного в течение одного часа (рис. 4);

Приведенные на рис. 4, 5 экспериментальные результаты являются прямым экспериментальным подтверждением концепции [4] о «шахматном» характере распределения напряжений и деформаций на интерфейсе в нагруженной структурно-неоднородной среде. Они

хорошо согласуются и со стохастическим моделированием возмущений на границах раздела в нагруженном твердом теле в [8, 15]. Остановимся на этом подробнее.

4. Обсуждение результатов

Сопоставление механизмов локализованного пластического течения мезомасштабного уровня в наноструктурированных поверхностных слоях в условиях одноосного растяжения [9–12] и в наводороженных поверхностных слоях титана в условиях растяжения [11] или знакопеременного изгиба (рис. 3) свидетельствует об их общности. Во всех рассматриваемых условиях поверхностные слои характеризуются низкой сдвиговой устойчивостью, что проявляется в более низких значениях их модулей упругости, по сравнению с кристаллической подложкой [16]. При нагружении таких поверхностных слоев в них развиваются мезополосы локализованного пластического течения по направлениям максимальных касательных напряжений τ_{\max} .

В наводороженных поверхностных слоях титана при знакопеременном изгибе мезополосы распространяются в одной системе направлений τ_{\max} (рис. 3). При этом траектория их распространения может искривляться в соответствии с неоднородным полем внутренних напря-

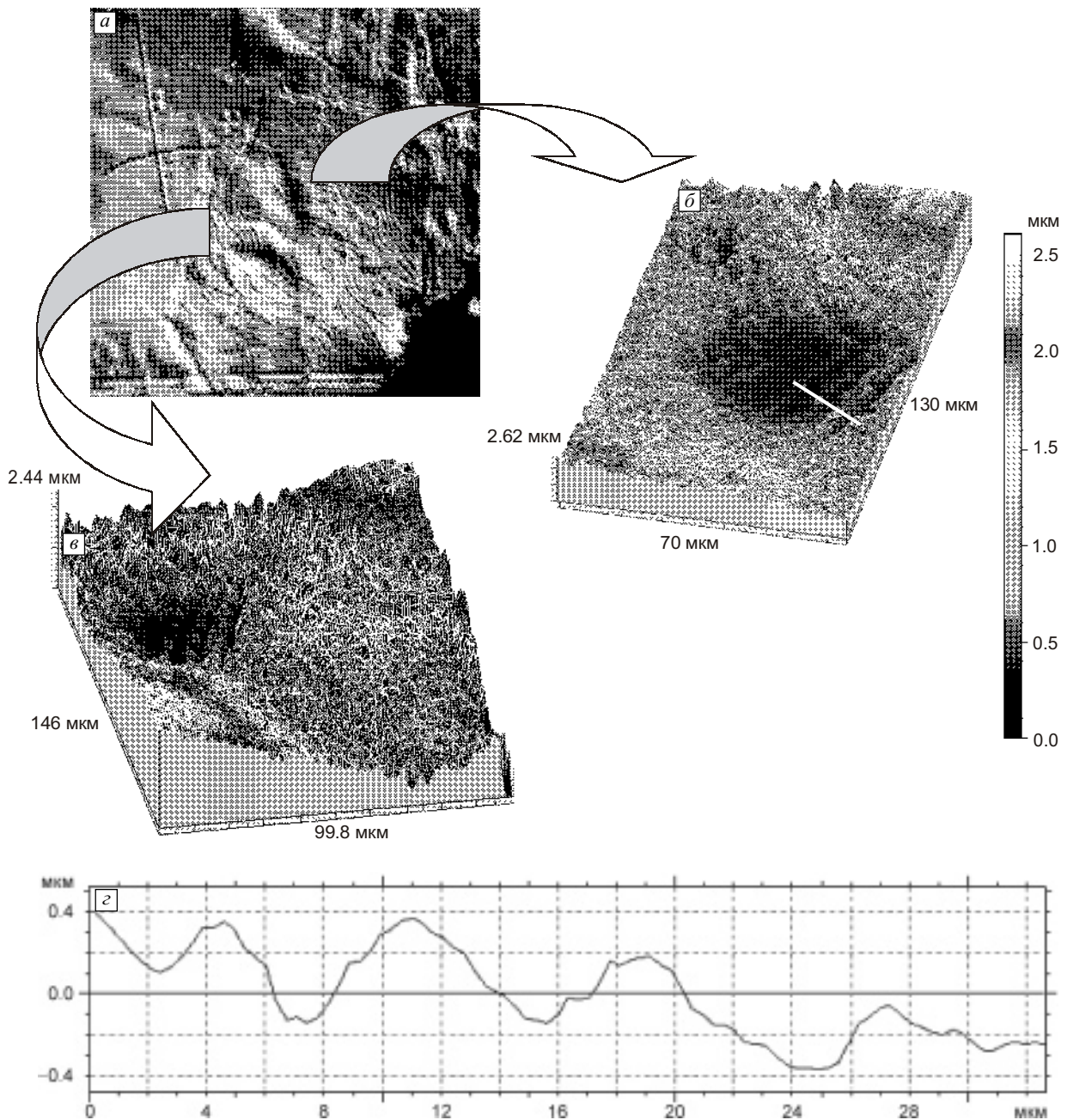


Рис. 4. Фрагмент рис. 3: *a* — оптическая микроскопия, $\times 350$; *б, в* — объемная профилометрическая картина «шахматной» структуры зоны локальной интрузии рис. 4, *a*, $\times 600$; *г* — профилограмма поверхностного слоя; $N = 12.4 \cdot 10^6$ циклов

жений в поверхностном слое и эффектами его гофрирования.

При одноосном растяжении образцов титана с наводороженным поверхностным слоем мезополосы локализованного пластического течения распространяются по сопряженным направлениям τ_{\max} в виде двойных спиралей [11].

Наконец, в наноструктурированных поверхностных слоях конструкционных сталей, титана и его сплавов

мезополосы локализованной деформации на первой стадии активного растяжения распространяются по двум сопряженным системам максимальных касательных напряжений, а затем формируют серию двойных спиралей [6].

Применение методов высокого разрешения (атомно-силовая или сканирующая туннельная микроскопия, лазерная профилометрия) показывает, что в мезополосах локализованной деформации происходит экструзия ма-

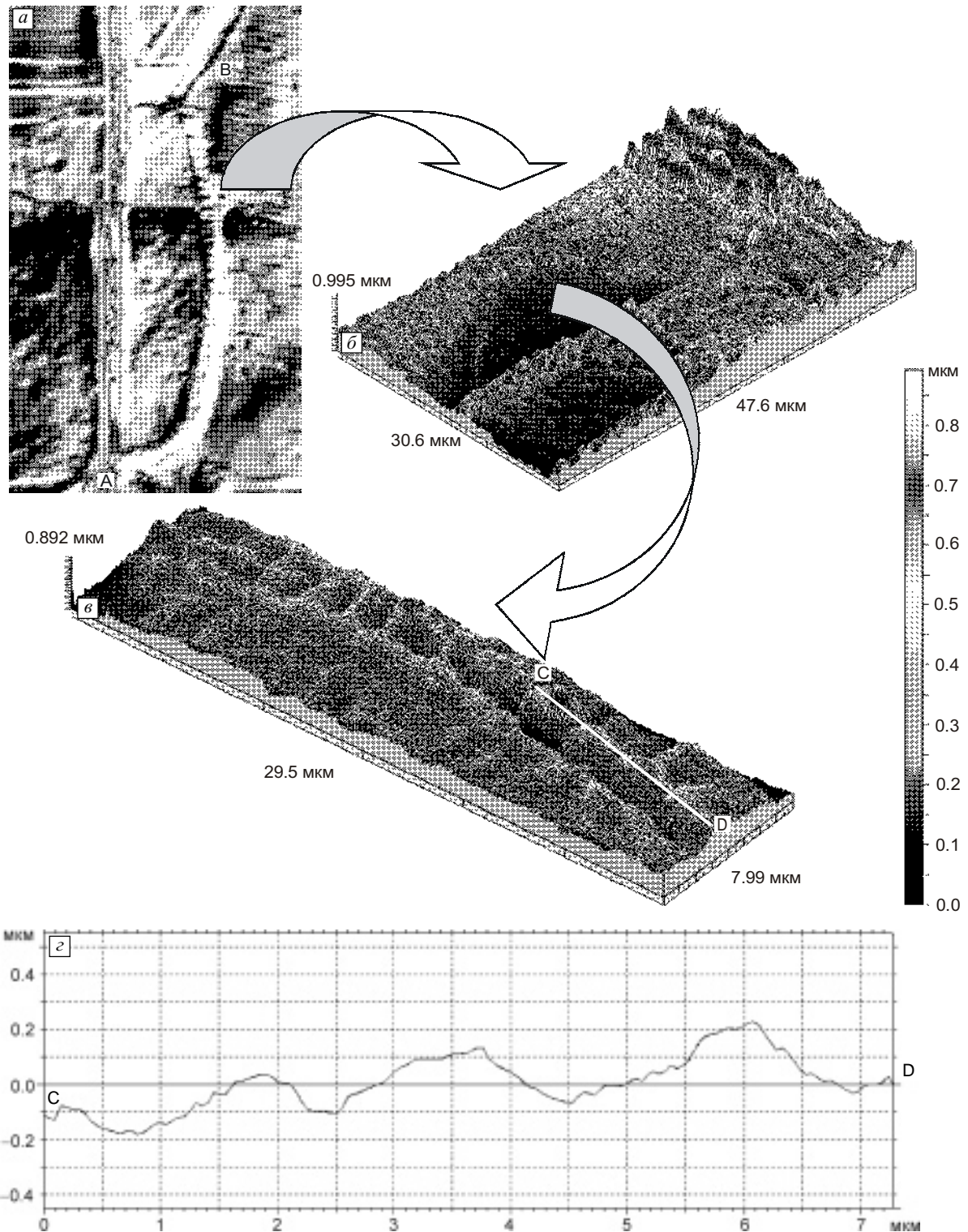


Рис. 5. Участок AB границы конгломератов зерен в наводороженном поверхностном слое титана: a — оптическая микроскопия, $\times 2000$; b — профилометрическая картина проскальзывания по границе AB и «шахматной» мезосубструктуры в приграничных зонах; $в$ — клеточный профиль проскальзывания по границе AB ; $г$ — профилограмма сечения CD

териала поверхностного слоя. Другими словами, избыточная (по сравнению с объемом образца) пластическая деформация поверхностного слоя развивается строго

канализованно по сопряженным направлениям максимальных касательных напряжений. При «шахматном» распределении на интерфейсе нормальных и касатель-



Рис. 6. Проскальзывание по границам конгломератов зерен в наводороженном в течение 1 часа поверхностном слое титана. $\times 550$



Рис. 7. Суперпетли из конгломератов зерен в наводороженном в течение 3 часов поверхностном слое титана после $35 \cdot 10^6$ циклов нагружения. DIC. $\times 500$

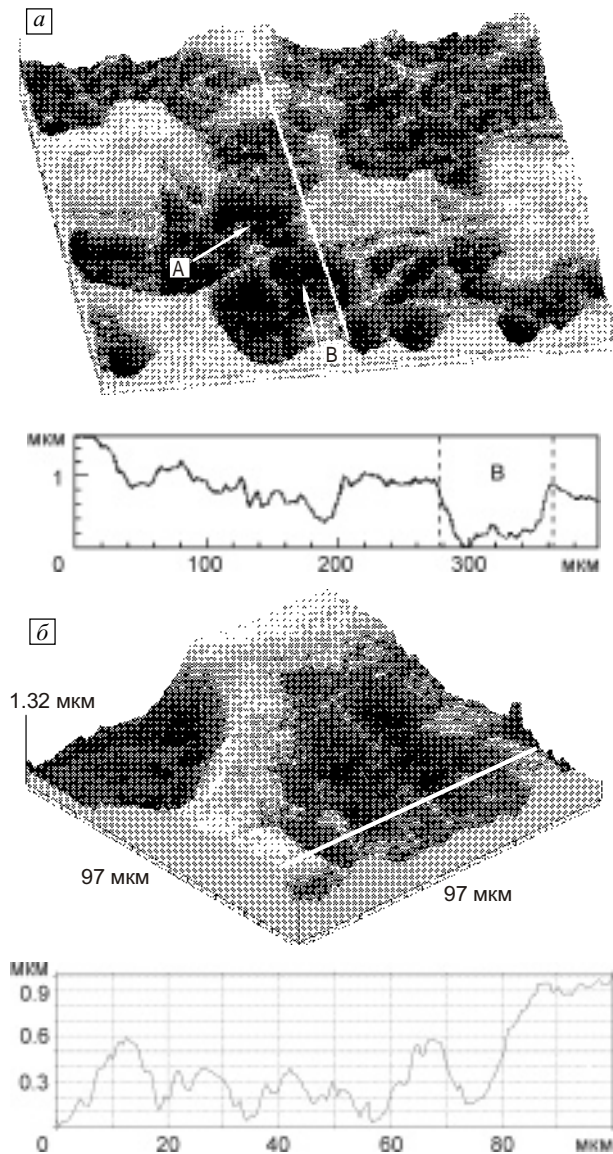


Рис. 8. Наводороженный в течение 3 часов поверхностный слой титана. Объемные картины экструзии-интрузии конгломератов зерен, клеточная структура на дне зоны интрузии и соответствующие им профилограммы. На (а) стрелками указаны клетки А и В на дне интродуцированных конгломератов зерен; на профилограмме клетка В имеет четкие контуры. $N = 1.6 \cdot 10^6$ циклов

ных напряжений каналированная экструзия поверхностного слоя может происходить только вдоль клеток с растягивающими нормальными напряжениями (рис. 9), как это показано в [4].

Дополнительным подтверждением данной концепции являются результаты, представленные на рис. 3–7. В ходе знакопеременного изгиба в наводороженном поверхностном слое интенсивно развивается проскальзывание вдоль границ конгломератов зерен. Световая микроскопия с устройством DIC для получения дифференциально-интерференционного контраста выявляет зоны проскальзывания в виде треков с дискретной внутренней структурой (треки MN, OP на рис. 6). Развитие проскальзывания обуславливает повороты конгломератов зерен как целого. Они аккомодируются поворотными модами на более низких масштабных уровнях: материальными поворотами в множественном тонком скольжении в конгломерате 1, фрагментацией конгломерата 2, что проявляется в поворотах как целого фрагментов А, В, С, D конгломерата 2 и изгибе реперной линии KL, формированием дискретной внутренней структуры в треках проскальзывания. Использование лазерного профилометра показывает, что треки проскальзывания имеют клеточную внутреннюю структуру (рис. 5, в). В приграничных зонах смежных конгломератов зерен экструдированы дискретные островки, соединенные поперек границы конгломератов дискретными стенками экструдированного материала. Такая клеточная структура треков проскальзывания хорошо согласуется с предсказанием теорий [7, 8, 15] о периодическом распределении вдоль интерфейса нагруженных разнородных сред нормальных и касательных напряжений. Растягивающие нормальные напряжения экструдировывают в приграничных зонах интерфейса дискретные островки материала, а касательные напряжения формируют поперечные стенки, реализующие проскальзывание на интерфейсе.

Поскольку треки проскальзывания на рис. 5, 6 декорируют выход на поверхность внутренних интерфейсов в наводороженном поверхностном слое, представленные на этих рисунках результаты могут рассматри-

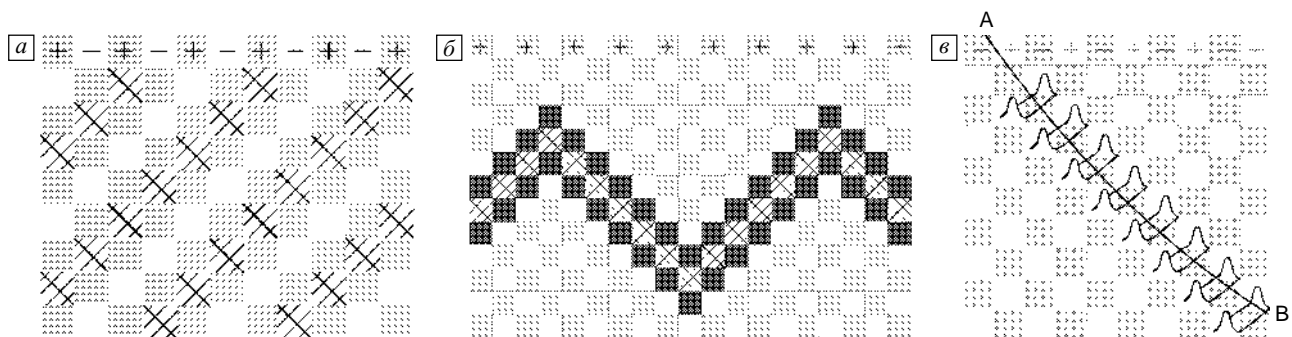


Рис. 9. Схемы распространения мезополос в поверхностном слое на базе «шахматной» структуры интерфейса: а — протяженные сдвиги вдоль одной системы направлений τ_{\max} ; б — сдвиги с изменением направления по двум сопряженным системам τ_{\max} ; в — проскальзывание по границе АВ конгломерата зерен при знакопеременном изгибе с формированием вдоль границы АВ клеточной мезосубструктуры

ваться как экспериментальное подтверждение эффекта «шахматного» распределения напряжений и деформаций на внутренних границах раздела в структурно-неоднородной среде.

Важным результатом настоящего экспериментального исследования является обнаружение многоуровневости клеточной островковой структуры на дне интродуцированных зон материала (рис. 8). Теория [15] предсказывает, что для выполнения условия совместности на границе раздела двух разнородных сред интерфейс должен иметь многоуровневую иерархически самосогласованную структуру. Это действительно наблюдается в многоуровневой структуре зон интродуцированного материала наводороженного поверхностного слоя. В основе данного эффекта лежит стремление кристалла трансформировать любую зону локальной кривизны в многоуровневую террасно-ступенчатую структуру, что понижает его внутреннюю энергию.

5. Заключение

При знакопеременном изгибе плоских образцов поликристаллического титана ВТ1-0 с наводороженным поверхностным слоем получено прямое экспериментальное подтверждение эффекта «шахматного» распределения пластической деформации в зоне интерфейса «поверхностный слой – подложка».

Развитие скольжения по границам сопряжения конгломератов зерен в наводороженном поверхностном слое приводит к формированию в зоне интерфейса клеточной мезосубструктуры, которая связывается с «шахматным» распределением напряжений и деформаций на внутренних границах раздела поверхностного слоя.

В крупных клетках «шахматного» распределения деформации в наводороженном поверхностном слое толщиной ~1 мкм (при наводороживании в течение 3 часов) обнаруживается более тонкое гофрирование. Это согласуется с теоретическим предсказанием [15] о необходимости формирования многоуровневого самосогласованного деформационного профиля на интерфейсе двух разнородных сред для обеспечения условия совместности их сопряжения.

В наводороженном поверхностном слое поли- или субмикроструктурного образца титана ВТ1-0 при растяжении или знакопеременном изгибе развивается широкий спектр мезоскопических механизмов деформации: распространение одиночной системы мезополос локализованного пластического течения вдоль одного направления τ_{\max} , распространение мультиплетной системы мезополос по двум сопряженным направлениям τ_{\max} , распространение вдоль оси растяжения двойных спиралей мезополос, горизонтальное проскальзывание по границам конгломератов зерен с формированием в приграничной зоне клеточной структуры, взаимные вертикальные смещения конгломератов зерен с формированием на дне интродуцированного материала

многоуровневой клеточной структуры. Все перечисленные механизмы деформации мезомасштабного уровня удовлетворительно описываются на основе представления о «шахматном» характере распределения напряжений на интерфейсе «наводороженный поверхностный слой – кристаллическая подложка титана».

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 05-01-00767, 05-01-08007 и гранта Президента РФ для поддержки ведущих научных школ № НШ-2324.2003.1.

Литература

1. Панин В.Е. Физическая мезомеханика поверхностных слоев твердых тел // Физ. мезомех. – 1999. – Т. 2. – № 6. – С. 5–23.
2. Панин В.Е. Поверхностные слои нагруженных твердых тел как мезоскопический структурный уровень деформации // Физ. мезомех. – 2001. – Т. 4. – № 3. – С. 5–22.
3. Панин В.Е., Панин Л.Е. Масштабные уровни гомеостаза в деформируемом твердом теле // Физ. мезомех. – 2004. – Т. 7. – № 4. – С. 5–23.
4. 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.
5. 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.
6. Панин В.Е., Панин А.В. Эффект поверхностного слоя в деформируемом твердом теле // Физ. мезомех. – 2005. – Т. 8. – № 5. – С. 7–15.
7. Cherepanov G.P. On the theory of thermal stresses in a thin bonding layer // J. Appl. Phys. – 1995. – V. 78. – No. 11. – P. 6826–6832.
8. Моисеев 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.
9. Panin A.V., Klimenov V.A., Abramovskaya N.L., Son A.A. Plastic flow at mesoscale for surface layers // Mesomechanics'2000 / Ed. G.C. Sih. – Beijing: Tsinghua University Press, 2000. – V. 2. – P. 579–584.
10. Панин А.В., Клименов В.А., Почивалов Ю.И., Сон А.А. Влияние состояния поверхностного слоя Ст3 на механизм пластического течения и сопротивление деформации // Физ. мезомех. – 2001. – Т. 4. – № 4. – С. 85–92.
11. Панин А.В., Панин В.Е., Чернов И.П., Почивалов Ю.И., Казаченко М.С., Сон А.А., Валиев Р.З., Копылов В.И. Влияние состояния поверхности субмикроструктурного титана и α -железа на их деформацию и механические свойства // Физ. мезомех. – 2001. – Т. 4. – № 6. – С. 87–94.
12. Панин А.В. Особенности пластической деформации и разрушения технического титана и малоуглеродистой стали, подвергнутых ультразвуковой обработке // Физика металлов и металловедение. – 2004. – Т. 98. – Вып. 1. – С. 109–118.
13. Zangwill A. Physics of Surfaces. – Cambridge: Cambridge University Press, 1988. – 536 p.
14. Кузина О.Ю., Елсукова Т.Ф., Панин В.Е. Мезоскопические структурные уровни деформации в поверхностных слоях и характер усталостного разрушения поликристаллов при знакопеременном изгибе. Часть II. Многоуровневый подход // Физ. мезомех. – 2005. – Т. 8. – № 4. – С. 13–26.
15. Моисеев Д.Д., Максимов П.В. Формирование спиральных структур и эффект «шахматной доски» при расчете деформационного профиля на поверхности нагруженного твердого тела // Физ. мезомех. – 2005. – Т. 8. – № 6. – С. 89–96.
16. Мальков А.В., Низкин И.Д., Мишанов М.Г. Водородная технология объемной штамповки титановых сплавов // Металлы. – 2003. – № 6. – С. 49–53.