

УДК 621.891

МЕХАНИЗМЫ ДЕМПФИРОВАНИЯ УПРУГОЙ ЭНЕРГИИ В ПЕРЕХОДНОМ СЛОЕ МЕЖДУ ПОКРЫТИЕМ И ПОДЛОЖКОЙ В УСЛОВИЯХ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

В. Е. Панин^{*,**}, Д. Д. Моисеенко^{*}, С. В. Панин^{*,**},
П. В. Максимов^{*}, И. Г. Горячева^{***}, Ч.-Х. Ченг^{****}

^{*} Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634021 Томск

^{**} Томский политехнический университет, 634028 Томск

^{***} Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, 119526 Москва

^{****} Национальный университет Ченг Кунг, 70701 Тайнань, Китай

E-mails: paninve@ispms.tsc.ru, mdd@ispms.tsc.ru, svp@ispms.tsc.ru,

mpv@ispms.tsc.ru, goryache@ipmnet.ru, chcheng@mail.ncku.edu.tw

В рамках междисциплинарного исследования процессов деформации и разрушения композиций покрытие — подложка при их контактном взаимодействии выполнен теоретический и экспериментальный анализ влияния дисперсного переходного слоя между сопряженными слоями на процесс формирования деформационных структур вблизи границы раздела. С помощью метода возбудимых клеточных автоматов проведено моделирование переноса упругой энергии от индентора с учетом процессов самоорганизации сдвигов и поворотов структуры вблизи интерфейса. С использованием оптико-телевизионного измерительного комплекса TOMSC экспериментально исследовано влияние переходного слоя между покрытием и подложкой на формирование деформационных структур в условиях контактного взаимодействия с индентором при трехточечном изгибе.

Ключевые слова: контактное взаимодействие, интерфейс, дискретное моделирование, материалы с покрытиями, клеточные автоматы.

Введение. Анализ физических процессов, происходящих при трении, является актуальной задачей, исследованию которой посвящено большое количество работ (см. [1–4] и др.). Среди наиболее важных особенностей, характерных для взаимодействия материалов, находящихся в трибоконтакте, необходимо отметить следующие: 1) наличие нескольких характерных масштабов развития деформационных процессов, взаимодействие которых определяет характер сопротивления материала в зависимости от вида нагружения; 2) особая роль интерфейса, на который в основном воздействует нагрузка, прикладываемая к образцу, и который, подобно фильтру, избирательно передает механическую энергию в нижележащие слои.

Несмотря на большое количество моделей, используемых в механике контактного взаимодействия, эволюция внутренней структуры нагружаемого образца на различных масштабах не рассматривалась [5]. Особую актуальность эта проблема приобретает при разработке материалов, элементы внутренней структуры которых играют определяющую роль в эволюции пластической деформации и разрушении структуры. В данном случае применение аппарата механики сплошной среды не всегда является корректным. Кроме

того, в процессе трения в нагруженном образце (особенно в поверхностном слое) помимо деформационного упрочнения могут иметь место структурно-фазовые превращения, явления рекристаллизации, формирование нано- и микропор, а также трещин. Указанные явления необходимо исследовать с учетом внутренней структуры и ее отклика на внешнее воздействие. Таким образом, разработка новых подходов к моделированию процессов контактного взаимодействия с последующей их адаптацией для изучения процессов трения (и изнашивания) структурно-неоднородных сред в рамках многоуровневого подхода является актуальной физической задачей.

Для решения данной задачи в настоящей работе предложен гибридный метод моделирования. Этот метод может быть применен для описания процессов, развивающихся при деформационном и усталостном изнашивании.

Методологические основы построения многоуровневой модели развиты в рамках физической мезомеханики материалов [6]; при этом показана актуальность учета термодинамической устойчивости кристаллической решетки, обусловленной стремлением кристалла в полях внешних воздействий сохранить свою трансляционную симметрию. Наиболее подробное описание такого подхода приведено в работе [7], в основе которой лежит рассмотрение зависимости термодинамического потенциала Гиббса от молярного объема нагруженного материала, находящегося под действием поля внешних сил.

1. Моделирование микроиндентирования с использованием дискретно-континуального подхода возбудимых клеточных автоматов. Твердое тело как многоуровневая иерархическая система в процессе экстремальных внешних воздействий (механических, тепловых, радиационных и пр.) на каждом масштабном уровне претерпевает структурно-фазовые превращения, которые могут быть представлены в виде потоков, имеющих различный характер.

В число основных задач механики сплошных сред, используемой при решении прикладных задач теории упругости на макромасштабном уровне, не входит описание сред со структурой. Сложность применения методов механики сплошных сред при компьютерном моделировании динамики внутренней структуры материала обусловлена влиянием ряда факторов. В частности, в данных задачах должно учитываться не только наличие внутренней структуры, влияющей на перенос энергии, но и изменение как самой структуры, так и конфигурации внутренних границ раздела.

Существующие подходы механики сплошных сред учитывают наличие внутренней структуры путем задания так называемой нелинейности свойств, т. е. пространственного разброса параметров моделируемой среды [8]. Однако при построении моделей в рамках подходов физической мезомеханики требуется учитывать не только внутреннюю структуру материала путем задания различных свойств отдельных элементов (как в численных методах механики сплошных сред), но и иерархический характер взаимодействия различных структурных элементов.

В классической механике сплошных сред для имитации наличия структуры используются искусственные и зачастую крайне сложные математические приемы. Более того, закономерности изменения свойств элемента на мезоуровне, как правило, задаются на основе данных экспериментальных исследований поведения материала на макроуровне. Например, закон изменения напряжения в зависимости от деформации каждого мезообъема задается функцией отклика, полученной на основе $(\sigma-\varepsilon)$ -диаграммы на макроуровне, а такие параметры, как предел текучести (для модельного учета деформационного упрочнения), определяются на основе статистических закономерностей на макроуровне (например, закон Холла — Петча).

Таким образом, для моделирования поведения материалов со сложной структурой наряду с классическими методами сплошных сред необходимо использовать методы, позво-

ляющие в явном виде задавать как структуру моделируемой среды, так и законы взаимодействия структурных элементов. К их числу относятся так называемые дискретные подходы. Наиболее известными дискретными методами являются методы молекулярной динамики и клеточных автоматов.

В настоящей работе для моделирования поведения многослойных структур при микроидентификации используется дискретно-континуальный метод возбудимых клеточных автоматов (stochastic excitable cellular automata (SECA)). В рамках метода SECA моделируемый образец разбивается на элементарные объемы, каждый из которых моделируется с помощью активного элемента, содержащегося в клеточном автомате. Каждый такой элемент характеризуется определенным набором соседей на первой координационной сфере, а также числовыми параметрами, соответствующими материалу, находящемуся в моделируемом объеме пространства, такими как модуль упругости, плотность, модуль сдвига, плотность дислокаций, удельная теплопроводность, удельная теплоемкость, коэффициент температурного расширения и др. При взаимодействии с соседними элементами могут изменяться тепловая и механическая составляющие энергии, а значит, и зависящие от них физические параметры (температура, энтропия, напряжение, деформация, плотность и т. д.).

При моделировании процесса деформации предполагается, что некоторая часть энергии расходуется на изменение плотности каждого активного элемента, а другая ее часть — на увеличение его энтропии. Зная полную внутреннюю энергию каждого элементарного объема, можно получить распределение нормальных компонент тензора напряжений по всему образцу, в том числе по его поверхности, с помощью соотношений Мурнагана [9]. Более подробно основы метода SECA изложены в [10–12].

Следует отметить, что в рамках излагаемого подхода граничные активные элементы делятся на три типа: “жесткие”, “мягкие” и промежуточные. При взаимодействии граничных элементов “жесткого” типа с внутренними элементами образца их собственная энергия не изменяется. Взаимовлияние таких элементов не моделируется. “Мягкие” граничные элементы взаимодействуют со всеми соседями на первой координационной сфере, как с внутренними, так и с граничными, при этом их энергия меняется в соответствии с соотношениями для потока энергии. Наконец, элементы промежуточного типа не взаимодействуют с соседними граничными элементами, их энергия изменяется вследствие влияния внутренних соседних элементов на первой сфере.

Значения главного напряжения активного элемента и приложенный к нему суммарный момент сил вычисляются с использованием значений эффективного напряжения данного элемента и его соседей на первой координационной сфере. Алгоритм вычисления главных напряжений и моментов сил подробно описан в [13].

Метод SECA был существенно развит при использовании трехмерной модели построения зеренной структуры поликристаллических материалов путем разбиения единой сети клеточного автомата на отдельные конгломераты, характеризующиеся набором эйлеровых углов, определяющих ориентацию кристаллической решетки внутри каждого зерна. Сложная система разупорядочивания атомов на границах зерен влияет на потоки механической и тепловой энергий. Так как свойства поликристаллического материала существенно зависят от размеров и формы зерен, необходимо разработать модели построения зеренной структуры, позволяющие непосредственно управлять ее внутренней геометрией.

2. Описание численных экспериментов. Известно, что формирование дисперсного переходного слоя между покрытием и подложкой (например, путем ультразвуковой обработки) является важным фактором в повышении адгезионной прочности и в конечном счете износостойкости подобных композиций [14]. Для исследования влияния переходного слоя на формирование деформационных структур проведены две серии численных экспери-

ментов по нагружению индентором поликристаллических образцов с покрытием. Рассматривались образцы, содержащие промежуточный мелкодисперсный слой и не содержащие его.

При использовании для расчета метода SECA существует возможность оценить величину всесторонних гидростатических напряжений как функцию упругой энергии. Механическая энергия перераспределяется по сети активных элементов клеточного автомата за счет переноса от “энергетического пятна”, имитирующего индентор на верхней грани образца.

Каждый образец, имеющий размеры $50 \times 20 \times 50$ мкм, представлял собой клеточный автомат в виде сети активных элементов с размером 1 мкм, уложенных в соответствии с ГЦК-упаковкой. В первой серии экспериментов образцы представляли собой композицию керамический поверхностный слой — крупнозернистая подложка из алюминиевого сплава. Во второй серии численных экспериментов моделировалось поведение композиций керамический поверхностный слой — мелкозернистый алюминиевый промежуточный слой — крупнозернистая подложка из алюминиевого сплава. В первом случае толщины поверхностного слоя и подложки составляли 10 и 40 мкм соответственно; во втором случае поверхностный слой, промежуточный слой и подложка имели толщины, равные 10, 10 и 30 мкм соответственно. Размер зерна в мелкозернистом промежуточном слое составлял 3 мкм, в крупнозернистой подложке — 10 мкм. Начальные деформации и напряжения во всех ячейках были равны нулю, а шаг по времени во всех численных экспериментах — 1 нс.

Граничные условия, имитирующие воздействие индентора, для каждого образца были заданы следующим образом. В центре верхней грани (со стороны покрытия) располагалась область диаметром 12 мкм, в которой задавалась скорость роста всесторонних гидростатических напряжений, равная 3,8 ГПа/с. На каждом шаге по времени рассчитывались распределения напряжений, деформаций и локальных моментов сил в образце. Общее время каждого численного эксперимента составляло 1 мс. На рис. 1 представлены зеренные структуры образцов в сечении плоскостью, перпендикулярной плоскости контакта с индентором.

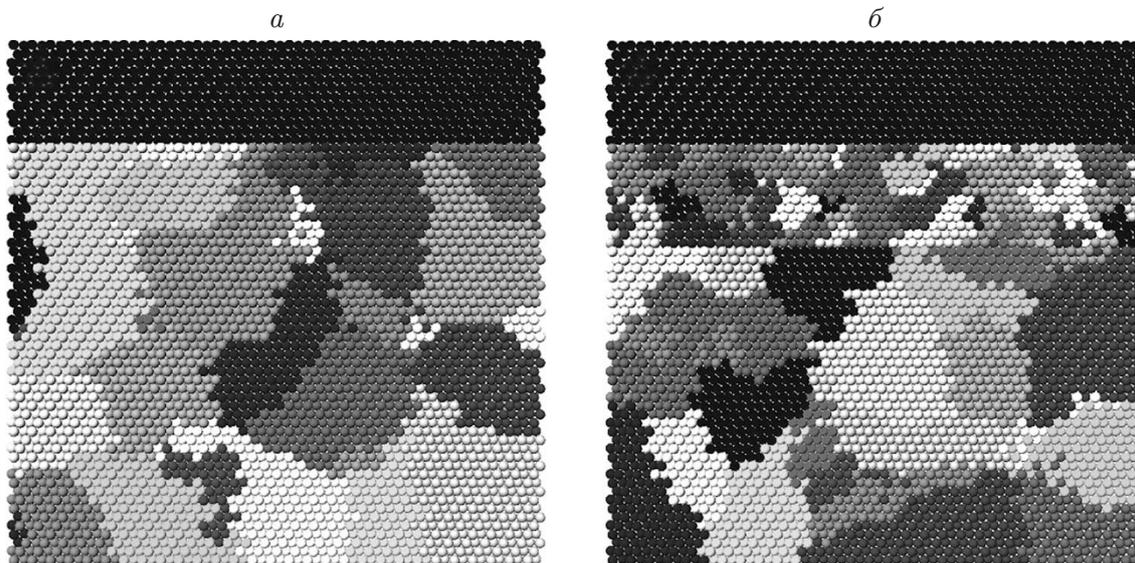


Рис. 1. Зеренные структуры образцов:

a — в отсутствие промежуточного мелкозернистого слоя, *б* — при наличии промежуточного мелкозернистого слоя

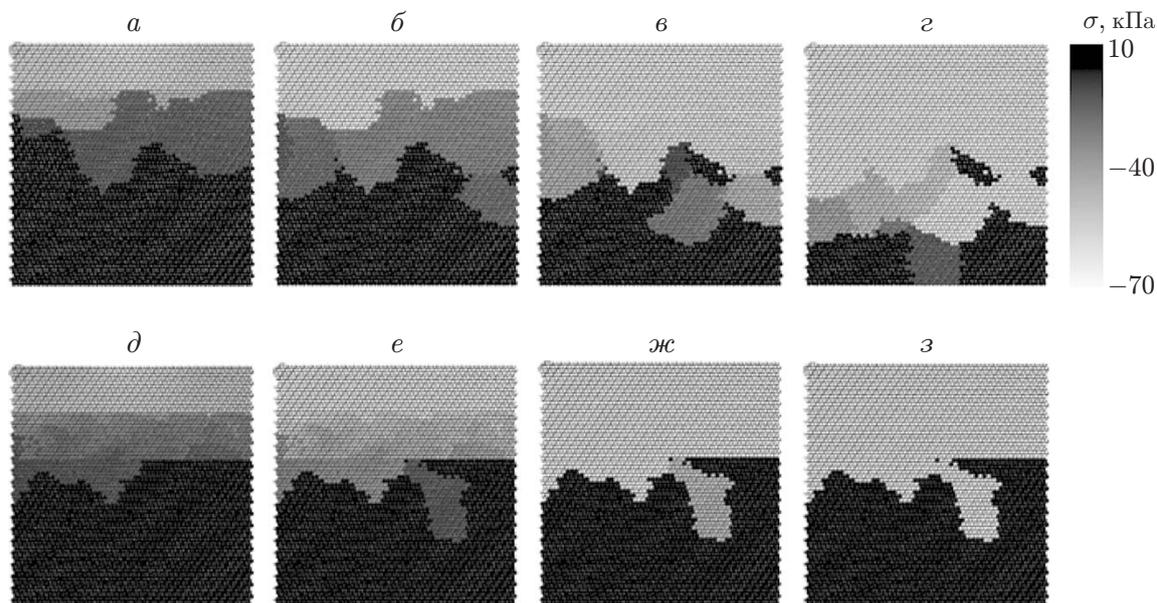


Рис. 2. Распределение напряжений в плоскости сечения в различные моменты времени на начальной стадии численного эксперимента:

a–z — образец без промежуточного мелкозернистого слоя, *д–з* — образец с промежуточным мелкозернистым слоем; *a, д* — $t = 0,2$ нс, *б, е* — $t = 0,6$ нс, *в, ж* — $t = 0,8$ нс, *з, з* — $t = 1,0$ нс

Следует отметить, что в данной работе исследуется влияние наличия межзеренных границ и их плотности на характер распространения фронта неупругой деформации и эволюцию полей локальных моментов сил. Для этих целей достаточно исследовать поведение модельного образца с небольшим числом зерен и с плотностями границ, различающимися в несколько раз.

На рис. 2 представлена эволюция полей всесторонних напряжений для двух композиций: покрытие — крупнокристаллическая подложка и покрытие — мелкозернистый подслоя — крупнокристаллическая подложка. Вследствие дискретности активных элементов клеточного автомата при учете наличия межзеренных границ в методе SECA можно не только оценить мощность концентраторов напряжений на интерфейсах, но и вычислить градиенты напряжений и деформаций вдоль этих границ.

Результаты сравнения динамики полей напряжений для двух структур позволяют сделать вывод, что скорость переноса упругой энергии в структуре с промежуточным мелкозернистым слоем (см. рис. 2, *д–з*) существенно меньше, чем в исходной структуре образца с покрытием (см. рис. 2, *a–z*). Это свидетельствует о том, что промежуточный слой, характеризующийся большей площадью поверхностей межзеренных границ и меньшим размером структурных элементов, играет демпфирующую роль.

Для исследования механизмов поглощения упругой энергии при прохождении фронта деформации через мелкозернистый подслоя проведен анализ распределений локальных моментов сил по каждому образцу (рис. 3). Результаты сравнения распределений локальных моментов сил на рис. 3 показывают, что область экстремальных значений моментов сил распространяется на всю толщину образца без промежуточного слоя (см. рис. 3, *a*), в то время как при наличии в образце такого слоя область экстремальных значений моментов распространяется лишь до середины крупнокристаллической подложки (см. рис. 3, *б*).

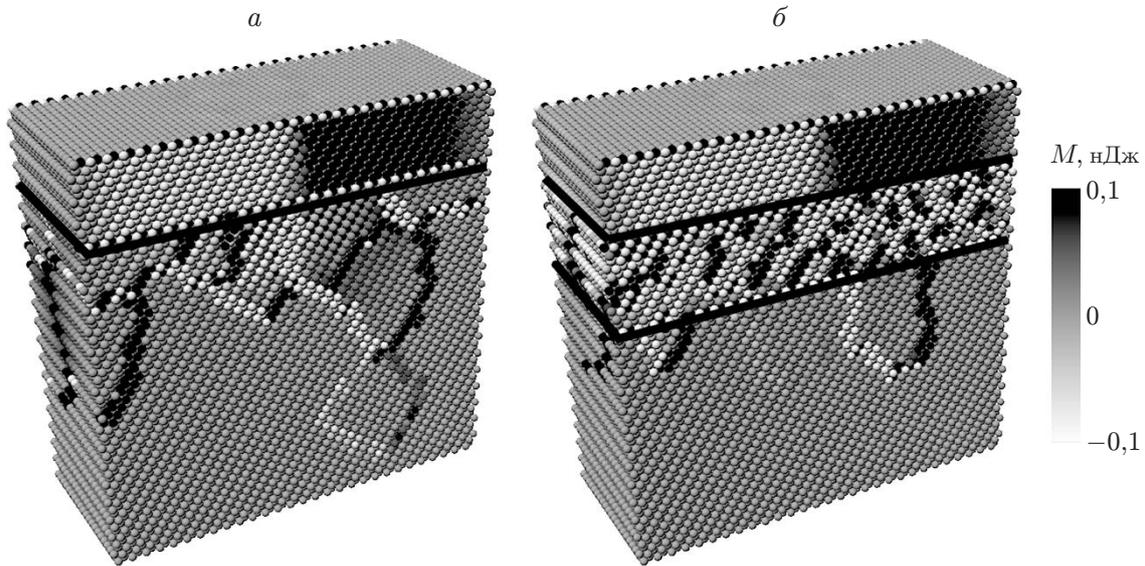


Рис. 3. Распределение моментов сил на боковых гранях образцов:
a — в отсутствие промежуточного мелкозернистого слоя, *б* — при наличии промежуточного мелкозернистого слоя

Кроме того, распределение, приведенное на рис. 3, *б*, свидетельствует о большей плотности флуктуаций значений моментов сил с разными знаками в промежуточном слое. Эти флуктуации компенсируются вследствие наличия локальных сдвигов и поворотов мелкозернистой структуры, что приводит к поглощению и диссипации значительной доли упругой энергии. Можно полагать, что данный процесс обуславливает демпфирующие свойства промежуточного мелкозернистого слоя.

Таким образом, наличие четко выраженной границы между покрытием и крупнокристаллической подложкой приводит к увеличению глубины локализации деформации. Поскольку промежуточный слой имеет мелкозернистую структуру, это позволяет перераспределить упругую энергию индентора путем рассредоточения концентраторов напряжений на большей площади поверхностей внутренних границ и осуществления сдвигов и поворотов элементов структуры.

3. Экспериментальные исследования влияния ультразвуковой обработки на деформирование образцов с покрытиями. Ниже излагаются результаты исследования контактного взаимодействия индентора и образца с покрытием, а также изучается влияние переходного слоя между покрытием и подложкой на мезо- и макроотклик такой композиции. Использовалась подложка из низкоуглеродистой стали, на поверхность которой методом газотермического напыления было нанесено покрытие состава Ni–Cr–B–Si. Существенным недостатком таких покрытий является наличие четко выраженной границы между сопрягаемыми материалами. Данную проблему можно решить путем оплавления покрытия газовой горелкой с одновременным подводом к заготовке ультразвуковых колебаний, под действием которых материал покрытия локально проникает в подложку (рис. 4) [15].

Дополнительным эффектом, возникающим при ультразвуковом оплавлении, является формирование дисперсного переходного слоя, наличие которого выявляется на основе анализа графика изменения микротвердости (рис. 5, *а*). В [15] показано, что при оплавлении покрытий уменьшается количество крупных зерен, при этом их микротвердость понижается на $400 \div 500$ МПа (см. рис. 5, *а*). Уменьшение размеров зерен свидетельствует о

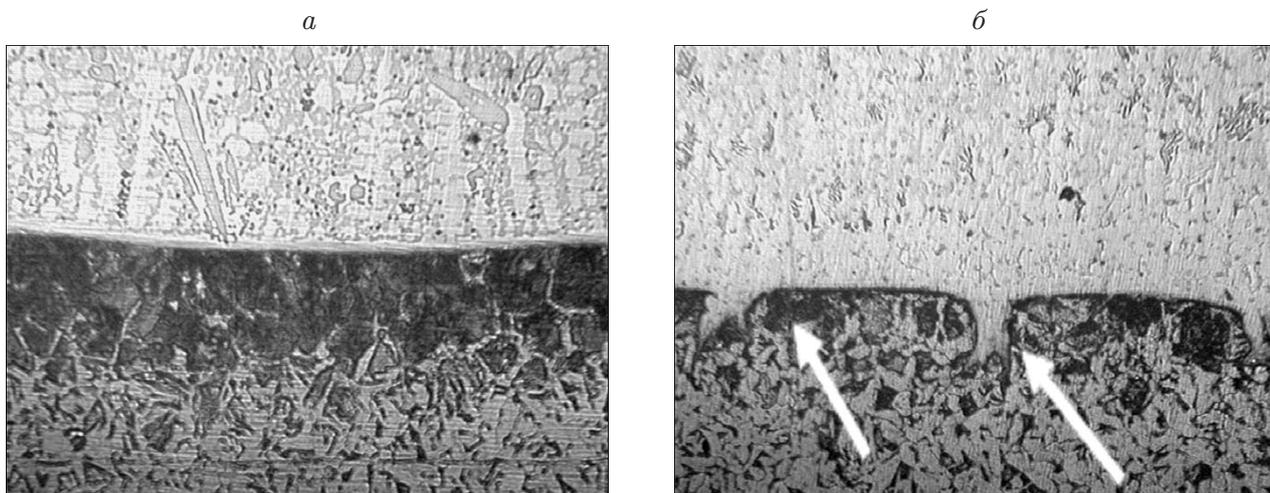


Рис. 4. Микроструктура оплавленных покрытий на основе композиции Ni–Cr–B–Si (размер изображений и векторных полей 550×410 мкм):
a — в отсутствие УЗО, *б* — при наличии УЗО; стрелки — направления диффузии материала покрытия в подложку

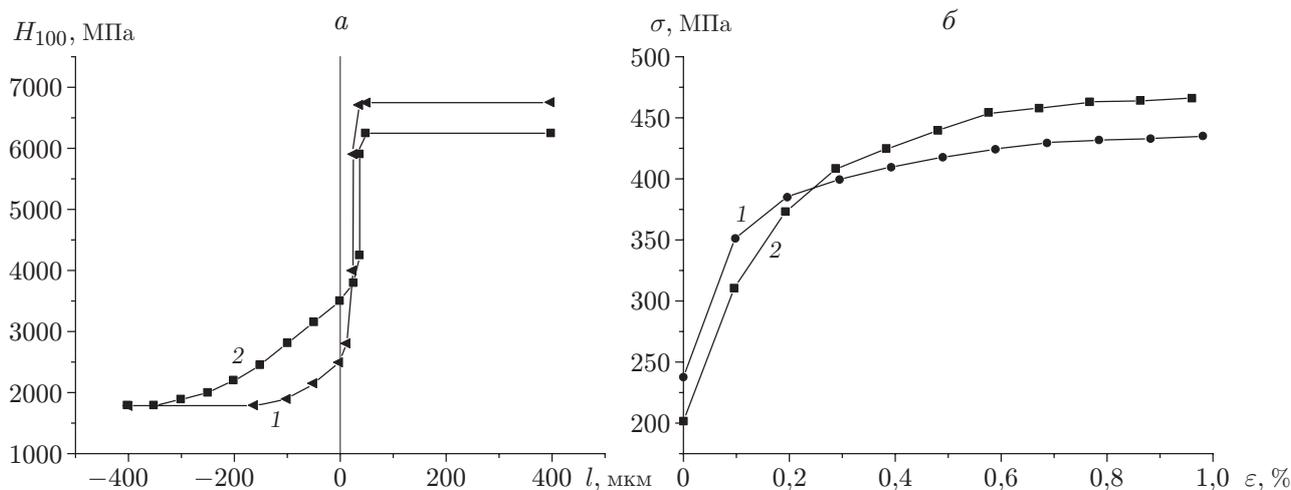


Рис. 5. Распределения микротвердости (*a*) и кривые течения (*б*) оплавленных покрытий на основе композиции Ni–Cr–B–Si:
1 — в отсутствие УЗО, *2* — при наличии УЗО

возрастании скорости кристаллизации расплава покрытия за счет увеличения числа центров кристаллизации и диспергирования их в процессе высокочастотного механического воздействия. В результате контакта жидкой и твердой фаз при оплавлении покрытия (см. рис. 4, *a*) в слое покрытия вблизи границы с подложкой в результате химического травления наблюдается сформировавшаяся при оплавлении прослойка белого цвета, представляющая собой твердый раствор железа в никеле. В случае оплавления покрытия в результате ультразвуковой обработки (УЗО) вместо прослойки формируется переходная зона, что обусловлено интенсификацией диффузии атомов Fe в покрытие (см. рис. 4, *б*). При увеличении времени воздействия ультразвука вдоль границ первичных аустенитных зерен происходит диффузия — “затекание” материала покрытия в подложку (см. рис. 4, *б*).

Данные измерений микротвердости в композиции с покрытием, оплавленным в результате УЗО, показывают, что в покрытии микротвердость уменьшается с 6700 до 6200 МПа (см. рис. 5, *a*). Это объясняется, с одной стороны, повышенной диффузией атомов углерода в подложку, а с другой — более активной диффузией атомов В и Si к поверхности с образованием защитных окисных пленок V_2O_3 и SiO_2 . В результате добавления легирующих элементов происходит некоторое обеднение материала покрытия. При этом увеличение степени диффузии углерода из покрытия в подложку приводит к увеличению микротвердости H_{100} слоя большей толщины ($l = 400$ мкм) по сравнению с образцами без оплавления в результате УЗО ($l \approx 150$ мкм) (см. рис. 5, *a*) [15].

На рис. 5, *б* приведены кривые напряжение — деформация для композиций оплавленное покрытие — подложка при трехточечном изгибе. Видно, что в образце, в котором покрытие было оплавлено в отсутствие ультразвуковых колебаний, пластическая деформация начинается при большем внешнем напряжении. Это может быть обусловлено большей микротвердостью данного образца. Однако по мере нагружения напряжение течения образца уменьшается. Причины возникновения этого явления устанавливаются при анализе оптических изображений поверхности боковой грани образцов и полей векторов смещений (рис. 6).

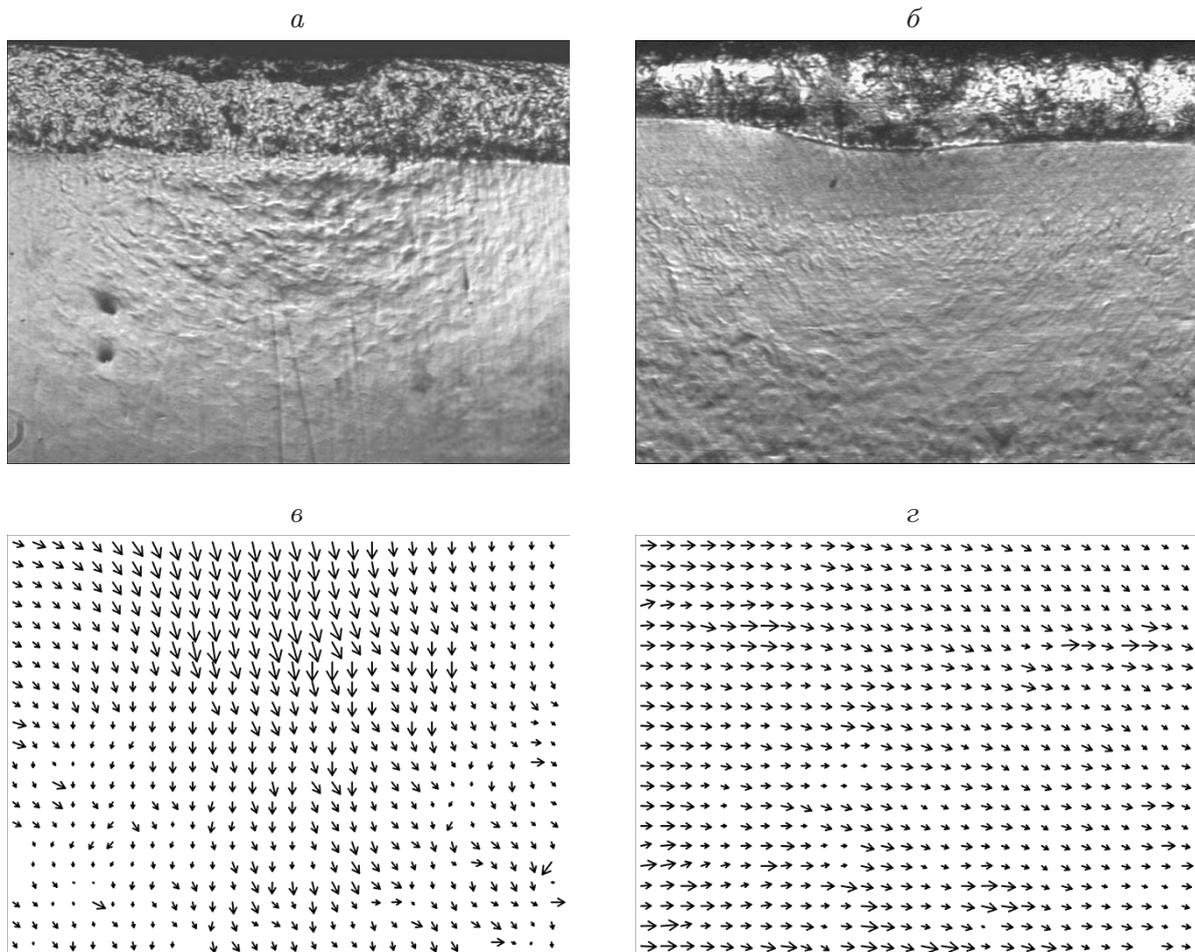


Рис. 6. Оптические изображения поверхности боковой грани образца с покрытием (размер изображений 1600×1200 мкм) (*a*, *б*) и поля векторов смещений на ней (*в*, *г*): *a*, *в* — в отсутствие УЗО ($\varepsilon \approx 0,04$ %), *б*, *г* — при наличии УЗО ($\varepsilon \approx 0,28$ %)

Локализованное нагружение при трехточечном изгибе образцов с покрытиями, оплавленными без УЗО, вносит некоторые особенности в развитие деформации. Максимальные сжимающие напряжения наблюдаются в области взаимодействия индентора и образца, где при этом возникают значительные градиенты напряжений. Наличие границы между подложкой и покрытием с существенно различающимися механическими характеристиками (прежде всего, модулями упругости) приводит к изменению характера распределения напряжений в композите. Процесс прохождения фронта деформации через покрытие с высокими прочностными свойствами сопровождается постепенным уменьшением напряжения течения. Это явление можно объяснить на основе совместного анализа оптического изображения боковой грани образца (см. рис. 6,а) и поля векторов смещений (см. рис. 6,в). Видно, что в примыкающем к покрытию слое подложки формируются протяженные складки в виде гофра, ориентированные параллельно границе раздела (см. рис. 6,а). Распределение векторов смещений свидетельствует о градиентном характере распределения деформации (см. рис. 6,в). Таким образом, несмотря на существенное изменение микротвердости на границе между покрытием и подложкой, векторное поле смещений на этой границе является непрерывным. Это означает, что прикладываемая к поверхности покрытия нагрузка полностью передается в нижележащие слои основы. При этом деформация локализуется в небольшой по площади области, имеющей форму розетки.

Иной характер развития деформации наблюдается при трехточечном изгибе образца с покрытием, оплавленным в результате УЗО. В таком композите пластическая деформация начинается при меньшем внешнем напряжении (согласно диаграмме нагружения), а формирование деформационного рельефа в подложке происходит менее интенсивно. (Иными словами, в покрытии, оплавленном без УЗО, наличие деформационных процессов фиксируется даже при небольших степенях деформации, в то время как в покрытии, оплавленном в результате УЗО, четко выраженных признаков развития деформации выявить не удастся.) При этом скорость пластического течения в прилегающем к покрытию слое подложки существенно уменьшается (см. рис. 6,б). Видно, что в промежуточном слое толщиной приблизительно 150 мкм деформационный рельеф практически отсутствует. Толщина этого слоя оказывается несколько меньшей по сравнению с толщиной, определенной по данным измерения микротвердости (кривая 2 на рис. 5,а). Заметим, что вследствие резкого уменьшения величины H_{100} граница между первым и нижележащими слоями подложки не является четко выраженной. Результаты анализа распределения векторов смещений в композите покрытие — основа, переходный слой которого в результате применения УЗО в процессе оплавления отличается градиентным характером изменения микротвердости (см. рис. 6,г), показывают, что распределение деформации имеет практически однородный характер. Это подтверждает наличие демпфирования упругой энергии, выявленное при проведении численного эксперимента. Наличие демпфирования подтверждается также отсутствием процессов локализации деформации.

Таким образом, несмотря на различие постановки задачи моделирования и условий эксперимента, в обоих случаях наличие переходного слоя приводит к существенному изменению характера деформации в граничащем с покрытием слое основы. Поэтому предложенный метод моделирования может быть использован при проведении параметрических исследований и подборе мезоструктуры композиции, обеспечивающей максимальное сопротивление внешней механической нагрузке.

Заключение. В работе показано, что дискретно-континуальный метод возбудимых клеточных автоматов может быть применен при моделировании деформационных процессов в системах с четко выраженными границами раздела. Явный учет наличия интерфейсов различного масштабного уровня (граница между покрытием и подложкой, межзеренные границы и пр.) позволил оценить мощность концентраторов напряжений на этих

границах, а также исследовать эволюцию полей напряжений в системах с покрытиями при динамическом вдавливании индентора.

В результате исследования динамики полей напряжений выявлена демпфирующая способность промежуточного мелкозернистого слоя, расположенного между покрытием и подложкой. Дополнительные алгоритмы вычисления локальных моментов сил обеспечили возможность проведения анализа их распределений в промежуточном мелкозернистом слое и установить причину уменьшения скорости переноса упругой энергии через этот слой. Показано, что снижение скорости переноса упругой энергии обусловлено рассеянием последней в результате сдвигов вдоль межзеренных границ и поворотов мелкозернистой структуры.

Результаты моделирования, проведенного с использованием метода SECA, показали, что большую роль в демпфировании упругой энергии в промежуточном мелкозернистом слое играют два фактора: большая площадь межзеренных границ и малый размер зерен, обеспечивающий возможность реализации поворотов структурных элементов.

В процессе индентирования покрытия при трехточечном изгибе наличие четко выраженной границы раздела между покрытием и подложкой приводит к локализации деформации в небольшой области подложки, имеющей форму розетки, и постепенному уменьшению напряжений. Напряжения, возникающие в поверхностном слое покрытия при воздействии индентора, передаются в подложку и релаксируют за счет пластических сдвигов в зоне локализации деформации. Более однородная структура покрытия, оплавленного в результате УЗО, а также наличие протяженного по толщине переходного слоя и локальных областей затекания материала покрытия в основу, имеющих форму зубцов, обеспечивают распределение прикладываемой нагрузки индентора на большей площади поверхности между покрытием и подложкой. В результате происходит увеличение напряжения течения и наблюдается более однородное распределение деформации в подложке по сравнению с образцом, не содержащим переходного слоя, сформированного путем ультразвуковой обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Крагельский И. В.** Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968.
2. **Крагельский И. В.** Трение как результат повторной деформации поверхностных слоев // Изв. вузов. Физика. 1958. № 5. С. 119–127.
3. **Гаркунов Д. Н.** Триботехника. М.: Машиностроение, 1989.
4. **Горячева И. Г.** Контактные задачи в трибологии / И. Г. Горячева, М. Н. Добычин. М.: Машиностроение, 1988.
5. **Горячева И. Г., Маховская Ю. Ю.** Моделирование трения на разных масштабных уровнях // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2010. № 3. С. 117–127.
6. **Панин В. Е., Егорушкин В. Е.** Деформируемое твердое тело как нелинейная иерархически организованная система // Физ. мезомеханика. 2011. Т. 14, № 3. С. 7–26.
7. **Панин В. Е., Егорушкин В. Е.** Физическая мезомеханика и неравновесная термодинамика как методологическая основа наноматериаловедения // Физ. мезомеханика. 2009. Т. 12, № 4. С. 7–26.
8. **Романова В. А., Балахонов Р. Р.** О роли внутренних границ раздела в процессах формирования мезоскопического деформационного рельефа на свободной поверхности нагруженных металлов // Физ. мезомеханика. 2010. Т. 13, № 4. С. 35–44.
9. **Murnaghan F. D.** Finite deformation of an elastic solid. N. Y.: Wiley, 1951.

10. **Моисеенко Д. Д., Максимов П. В.** Распределение напряжений и деформаций на интерфейсе “поверхностный слой — подложка”: моделирование на основе стохастического подхода // *Физ. мезомеханика*. 2005. Т. 8, № 6. С. 89–96.
11. **Panin V. E., Chernov V. M., Moiseenko D. D., et al.** Multilevel modeling of phenomena of irradiation-induced swelling and growth of materials with close-packed structure // *Electron microscopy and multiscale modeling: Proc. of the EMMM-2007 Intern. conf., Moscow (Russia), 3–7 Sept. 2007*. Melville: Amer. Inst. Phys., 2007. P. 102–117.
12. **Панин В. Е., Моисеенко Д. Д., Максимов П. В., Панин А. В.** Физическая мезомеханика деформируемого твердого тела как многоуровневой системы. 3. Неупругий предвестник зарождения пластического сдвига // *Физ. мезомеханика*. 2006. Т. 9, № 5. С. 5–15.
13. **Панин В. Е., Почивалов Ю. И., Моисеенко Д. Д. и др.** Трибоконтакт в парах трения как многоуровневая иерархически организованная система // *Физ. мезомеханика*. 2010. Т. 13, № 6. С. 27–34.
14. **Панин В. Е., Колубаев А. В., Слосман А. И. и др.** Износ в парах трения как задача физической мезомеханики // *Физ. мезомеханика*. 2000. Т. 3, № 1. С. 67–74.
15. **Панин С. В., Клименов В. А., Сейфуллина М. П. и др.** Влияние обработки ультразвуком в процессе оплавления газотермических покрытий на характер деформирования и разрушения композиций покрытие — основа при трехточечном изгибе // *Физ. мезомеханика*. 2004. Т. 7, № 2. С. 105–115.

*Поступила в редакцию 7/III 2013 г.,
в окончательном варианте — 3/XII 2013 г.*
