

Формирование различных рельефов поверхности металлических стекол под воздействием механической нагрузки

© В.Е. Корсуков¹, В.И. Бетехтин¹, М.С. Варкентин², В.Л. Гиляров¹, А.Г. Кадомцев¹,
М.М. Корсукова¹, Б.А. Обидов¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: vjacheslav.korsukov@mail.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 1 октября 2012 г.)

Методы сканирующей туннельной и атомной силовой микроскопии применены для изучения микро- и нанорельефа боковых нагруженных поверхностей и поверхностей разрыва фольг аморфных сплавов $\text{Fe}_{77}\text{Ni}_1\text{Si}_9\text{B}_{13}$, $\text{Fe}_{58}\text{Ni}_{20}\text{Si}_9\text{B}_{13}$ и $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$. Изучены изотропные и анизотропные рельефы поверхностей. С помощью метода „покрытия“ оценены фрактальные размерности поверхностей нагруженных образцов и поверхностей разрыва вдоль и поперек направления распространения трещины. Методом вейвлет-преобразований рассчитаны фрактальные характеристики поверхностей, такие как параметр Гельдера и полуширина спектра сингулярностей. Установлено, что на топограммах с отчетливо выраженной анизотропией рельефа поверхность фрактальна только в одном направлении, а на топограммах с менее выраженной анизотропией рельефа поверхность фрактальна в двух направлениях. Фрактальные характеристики боковых поверхностей и поверхностей разрыва с учетом их анизотропии имеют близкие значения. Показано, что образование двух типов поверхностей разрыва хорошо описывается при помощи модели клеточного автомата.

1. Введение

Статистический подход к изучению механизмов деформации и разрушения материалов, в частности металлов, обеспечил значительный прогресс в этой области, достигнутый за последние годы. При этом заметная роль отводится изучению дефектообразования в приповерхностных слоях [1–9]. В работах [1–5] авторы предложили рассматривать деформируемое твердое тело как самоорганизующуюся критическую систему с фрактальными свойствами. Так, в результате экспериментального изучения эволюции поверхностного профиля образцов при пластической деформации металлов был сделан вывод, что деформация металла ведет к формированию самоподобия в ансамбле дислокаций [6–9]. Эволюция фрактальных структур в дислокационных ансамблях при пластической деформации описана в [3].

Упомянутые выше, а также многие другие работы были выполнены на кристаллических металлах, где деформирование почти полностью определяется дислокационной структурой материала. Поэтому интересно было проверить описанный выше подход на материалах, у которых резко ограничен резерв пластичности. Такими материалами, где нет классических дислокаций, являются, например, аморфные сплавы (АС) — так называемые металлические стекла [10–13].

АС на основе железа, имеющие вид лент, полученные сверхбыстрой закалкой, обладают высокой прочностью, и это позволяет изучать трансформацию рельефа поверхности в широком диапазоне нагрузок [10–12, 14, 15]. Существует много работ по изучению прочности таких

материалов и механизма их разрушения. В последнее время большое внимание уделяется изучению формирования рельефа поверхности под действием механической нагрузки, а также рельефа поверхностей разрыва. Этот интерес объясняется тем, что разрушение стекол, в том числе металлических, начинается с поверхности.

Известно, что при растяжении лент АС изменяются фрактальные характеристики их поверхности [16, 17]. Поверхности разрыва АС также фрактальны [17].

Мы предполагаем, что основные фрактальные характеристики поверхности разрыва, такие как средняя фрактальная размерность, анизотропия рельефа, тенденция к монофрактализации, сопровождающаяся скейлингом поверхностных дефектов, „закладываются“ на боковой поверхности в области, где в дальнейшем сформируется магистральная трещина.

Целью настоящей работы является изучение критических событий на поверхности АС на основе эволюции фрактальных структур, приводящих к появлению поверхностных трещин, а также апробация модели распространения магистральных трещин и формирования поверхностей разрыва.

В рамках этих целей выделены следующие задачи:

- 1) изучение формирования изотропных и анизотропных рельефов боковых поверхностей образцов под влиянием растяжения и их фрактальных характеристик;
- 2) изучение формирования изотропных и анизотропных рельефов поверхностей разрыва под влиянием растяжения и их фрактальных характеристик;
- 3) сопоставление фрактальных характеристик боковых поверхностей образцов и поверхностей разрыва;

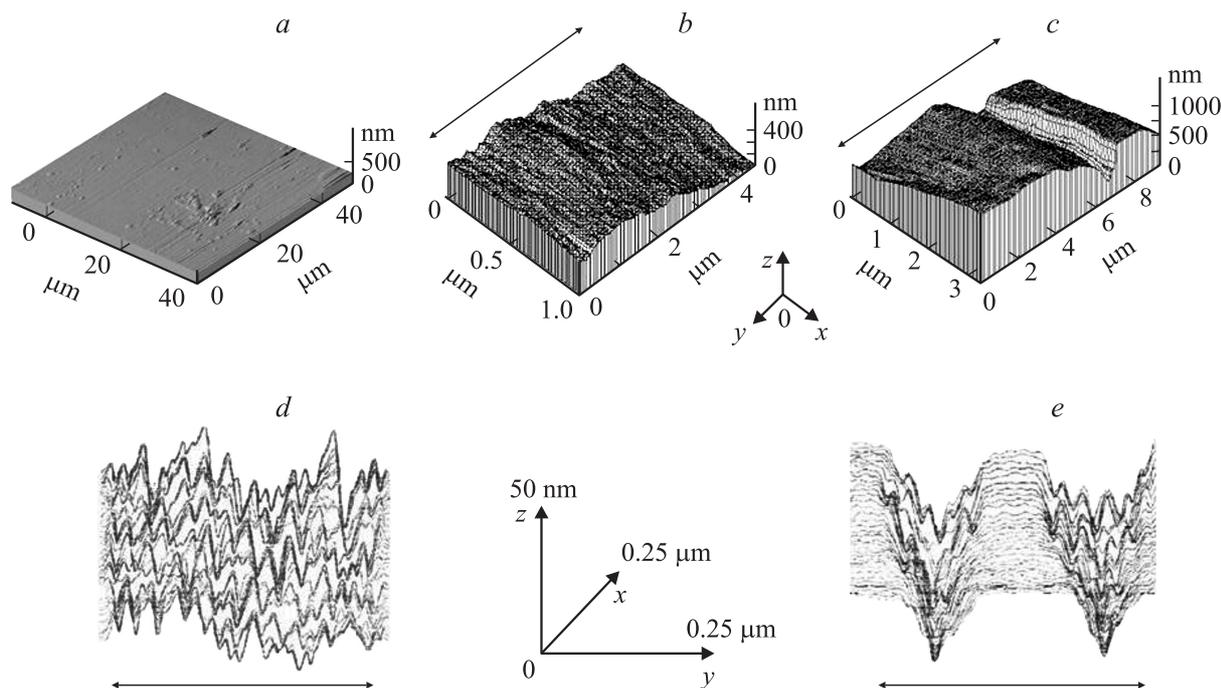


Рис. 1. Формирование анизотропного рельефа поверхности лент АС под влиянием внешней нагрузки. *a* — исходная неконтактная поверхность $\text{Fe}_{77}\text{Ni}_1\text{Si}_9\text{B}_{13}$ (метод АСМ); *b* — нагруженная поверхность, $\sigma = 1.7$ ГПа; *c* — нагруженная поверхность, $\sigma = 2.3$ ГПа (метод СТМ); *d, e* — контактная нагруженная поверхность $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$, $\sigma = 0.3$ ГПа через 5 и 300 мин соответственно (метод СТМ). Стрелками показано направление растяжения образцов.

4) исследование зарождения анизотропии боковой поверхности в области, где в дальнейшем сформируется поверхностная трещина;

5) разработка модели формирования поверхностей разрыва.

2. Методика эксперимента

Образцами служили ленты аморфных сплавов $\text{Fe}_{77}\text{Ni}_1\text{Si}_9\text{B}_{13}$, $\text{Fe}_{58}\text{Ni}_{20}\text{Si}_9\text{B}_{13}$ и $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$, которые были получены путем сверхбыстрой закалки из жидкой фазы методом одновалкового сплинигования [10–11]. Из лент АС толщиной 20–50 μm вырезали два типа образцов: полоски длиной 10–50 мм, шириной 1–5 мм, толщиной 20–50 μm и полоски с полукруговыми вырезами, которые располагались по краям центральной части образцов. В работе использовались оба типа образцов.

Поверхности образцов очищали путем промывания ацетоном и изопропиловым спиртом и высушивания в потоке сухого азота. Более подробно методика очистки, контроля химического состава и структуры приповерхностных слоев описана в [13].

С помощью сканирующей туннельной (СТМ) и атомной силовой микроскопии (АСМ) исследовались рельефы боковых поверхностей лент в процессе одноосного растяжения и поверхности разрыва лент. Механическое напряжение при растяжении σ менялось от 0 до 3 ГПа. При обработке изображений поверхностей использовались методы „покрытий“ (box counting) и

вейвлет-преобразований. При расчете фрактальных размерностей методом покрытий использовались программы Fraclab и Gwiddion.

3. Экспериментальные результаты

3.1. Трансформация рельефа под воздействием нагружения на боковых поверхностях лент. Изучались как широкие стороны поверхности лент, так и узкие боковые стороны, ширина которых равна толщине ленты. Основные результаты исследований воздействия растяжения на рельеф образцов были получены для неконтактных поверхностей лент, поскольку они считаются более слабыми в механическом смысле [12,14]. Однако часть результатов была получена для контактной стороны и даже для узкой боковой поверхности. Результаты эксперимента приведены на рис. 1–3.

3.1.1. Образование гофрированных рельефов. На рис. 1, *a* представлен рельеф ненагруженного образца ленты боковой неконтактной поверхности АС $\text{Fe}_{77}\text{Ni}_1\text{Si}_9\text{B}_{13}$. Видно, что поверхность достаточно гладкая, хотя и содержит участки с шероховатым рельефом. Эта исходная шероховатость происходит при изготовлении фольг методом сплинигования. Как показано в [12,14], исходная шероховатость может быть и фрактальной, но при начале растяжения образца она разглаживается, а затем формируется новая фрактальная поверхность.

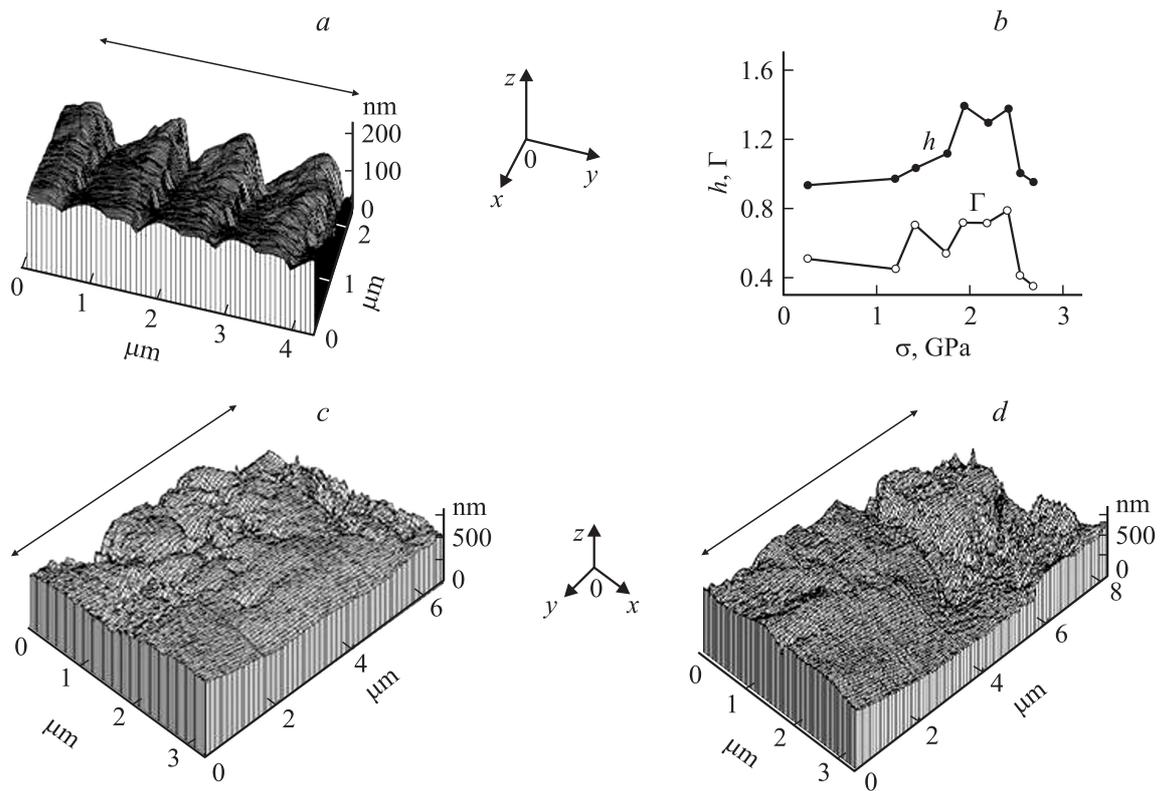


Рис. 2. Формирование различных рельефов поверхности $\text{Fe}_{77}\text{Ni}_1\text{Si}_9\text{B}_{13}$ под влиянием внешней нагрузки (метод СТМ). *a* — рельеф узкой боковой поверхности, $\sigma = 1.5$ GPa; *b* — зависимость показателя Гельдера h и полуширины спектра сингулярностей Γ неконтактной поверхности от внешнего напряжения; *c* — рельеф поверхности под нагрузкой $\sigma = 1.45$ GPa; *d* — рельеф поверхности под нагрузкой $\sigma = 1.45$ GPa.

На рис. 1, *b* показана та же поверхность под воздействием растягивающего напряжения *in situ*. Видно, что на поверхности образовался анизотропный рельеф. Подтверждением этого является измерение фрактальной размерности поверхности вдоль $D_{Oy} = 1.30 + 0.05$ и поперек $D_{Ox} = 1.1$ оси растяжения (программа Fraclab 2.0). Оценка общей фрактальной размерности (box counting, Gwiddion) дала величину $D_{GW} = 2.3$.

При дальнейшем увеличении нагрузки произошло образование поверхностной трещины (рис. 1, *c*). Поверхность вблизи трещины стала изотропной и немного разгладилась, что отразилось на фрактальной размерности разглаженных областей ($D_{GW} = 2.05$), т.е. они почти евклидовы. На рис. 1, *c* видны полосы на стенках поверхностной трещины. Можно предположить, что стенки поверхностной трещины образуют шероховатую структуру, однако нам не удалось в этом случае провести оценку анизотропии и фрактальной размерности.

Интересно было бы наблюдать изменение рельефа во времени при фиксированном напряжении. При больших нагрузках это сделать практически невозможно из-за быстроты физического процесса и сравнительно медленной скорости записи поверхностной топограммы. Однако при более низких растягивающих нагрузках это возможно. На рис. 1, *d* и *e* показано изменение рельефа поверхности образца ленты $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ под действием

напряжения 0.3 GPa через 5 min после нагружения и через 300 min после выдержки образца под фиксированной нагрузкой.

Из сравнения рисунков видно, что и в этом случае шероховатая поверхность перешла в поверхность с трещинами, а между трещинами поверхность разгладилась. Видно также, что шероховатость боковой поверхности перешла на стенки поверхностных трещин. Это может свидетельствовать об изменении рельефа поверхности под воздействием ступенчатого нагружения образцов. Процесс фрактализации поверхности немонотонен и ускоряется при увеличении напряжения [16,17] и, как показывают рис. 1, *d* и *e*, развивается во времени.

Необходимо отметить, что для образца ленты $\text{Fe}_{77}\text{Ni}_1\text{Si}_9\text{B}_{13}$ нам удалось зафиксировать образование гофрированного рельефа и, возможно, поверхностных трещин на узкой боковой поверхности под воздействием растяжения (рис. 2, *a*).

Отметим, что образовавшиеся трещины, представленные на рис. 1, *c-e* и 2, *a*, не магистральные, они не приведут к разрыву образца. При повышении нагрузки после образования поверхностной трещины или полосы деформации процесс повторяется: вновь возрастает шероховатость (поверхность становится мультифрактальной), затем происходит новая монофрактализация,

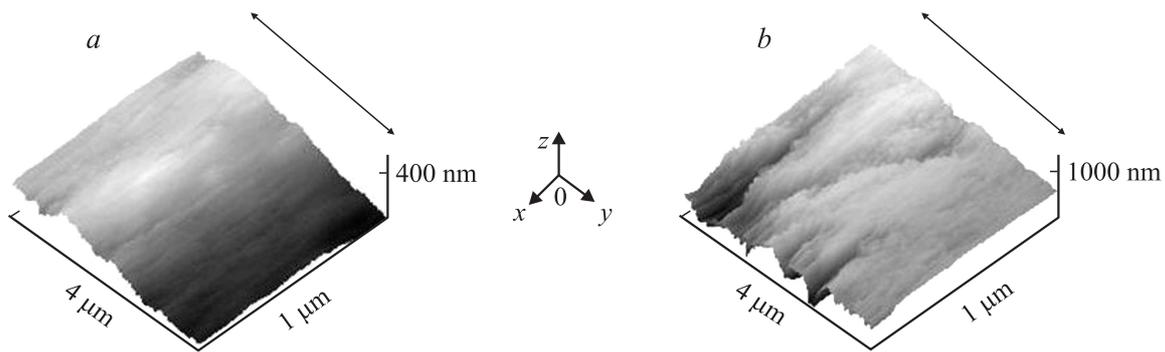


Рис. 3. Рельефы боковых поверхностей ленты $\text{Fe}_{77}\text{Ni}_1\text{Si}_9\text{B}_{13}$ под воздействием напряжений, близких к разрывным. Разрывное напряжение $2.5 \leq \sigma \leq 2.7$ ГПа. *a* — полностью анизотропная поверхность, *b* — частично анизотропная поверхность.

образуются другие поверхностные трещины, вплоть до магистральной, которая и разорвет образец.

Ранее нами было показано, что любому критическому событию на поверхности (образование поверхностной трещины, полосы деформирования и т. д.) предшествуют монофрактализация рельефа и формирование скейлинга поверхностных дефектов [16,17], что соответствует условиям образования самоорганизованной критичности (СОК) [18]. Для описания рельефа мультифрактальных нагруженных поверхностей удобен метод вейвлет-преобразований.

На рис. 2, *b* показаны зависимости максимума показателя Гельдера (h) и полуширины спектра сингулярностей (Γ) от величины приложенного напряжения σ . Способ вычисления параметров h и Γ подробно описан в [16]. Видно, что эти зависимости немонотонны. Это отражает переход от монофрактальных к мультифрактальным поверхностям и наоборот. Возрастание показателя h при неизменности параметра Γ означает уменьшение фрактальной размерности поверхности, а при увеличении Γ свидетельствует о переходе поверхности в мультифрактальное состояние. Такие изменения величин h и Γ происходят при образовании глубоких „долин“ (полос деформации или поверхностных трещин), рядом с которыми поверхность разглаживается. Рис. 1, *c* и *e* наглядно демонстрируют подобное явление. Немонотонность зависимостей максимума показателя Гельдера h и полуширины спектра сингулярностей Γ от величины приложенного напряжения σ отражает повторяемость процесса перехода поверхности из мультифрактального в монофрактальное состояние и обратно.

3.1.2. Образование изотропных рельефов. При нагружении образцов на боковых поверхностях образуется не только анизотропный гофрированный рельеф, но и изотропный. На рис. 2, *c* и *d* показано образование под воздействием одноосного растяжения изотропного рельефа на неконтактных поверхностях лент $\text{Fe}_{77}\text{Ni}_1\text{Si}_9\text{B}_{13}$. Исходная ненагруженная поверхность изображена на рис. 1, *a*. Общие фрактальные размерности для нагруженных поверхностей имеют значение $D_{\text{GW}} = 2.3$ (рис. 2, *c* и *d*). Разрушение образца с различной степенью вероятности может начаться с

одной из четырех боковых поверхностей. По нашему мнению, эта вероятность определяется по крайней мере тремя причинами. Первая причина — вероятностный термофлуктуационный механизм разрушения [19]. Вторая причина — гетерогенность структуры материала [10–12]. Третья — наличие видимых концентраторов напряжений [20].

При отсутствии концентраторов напряжений и гомогенной структуре вероятность разрыва межатомных связей в поверхностных и приповерхностных слоях пропорциональна площади или объему этих слоев. Поэтому нужно ожидать зарождения разрушения на широких боковых поверхностях образцов. Однако даже при отсутствии видимых макроконцентраторов напряжений нельзя не учитывать гетерогенность материала, например наличие пор. В работах [12,14] было показано, что неконтактная сторона ленты в механическом смысле более слабая, чем контактная, в частности из-за повышенного содержания микро- и нанопор в приповерхностном слое.

Наконец, при наличии полукруговых вырезов или надреза, которые мы иногда производили для сужения области наблюдений за трансформацией морфологии поверхности под действием внешнего напряжения, начало разрыва образцов происходит около этих концентраторов.

Рассмотрим более подробно рельефы на боковых поверхностях нагруженных образцов. На рис. 1, *b*, 3, *a* и *b* показаны анизотропные рельефы нагруженных поверхностей. Изотропные рельефы нагруженных поверхностей представлены на рис. 2, *c* и *d*. Проведена оценка фрактальных характеристик приведенных выше топограмм методом box counting с использованием программ Gwiddion и Fraclab. Использование программы Gwiddion позволяло оценивать общую фрактальную размерность поверхности D_{GW} . Для количественной оценки фрактальной размерности поверхности вдоль и поперек оси нагружения использовалась программа Fraclab 2.0, способная рассчитать среднюю фрактальную размерность по строкам и столбцам матрицы чисел, которая отражает рельеф поверхности образца в числовом формате.

Оценка фрактальных размерностей, проведенная вдоль и поперек оси нагружения, показала возможность реализации трех случаев.

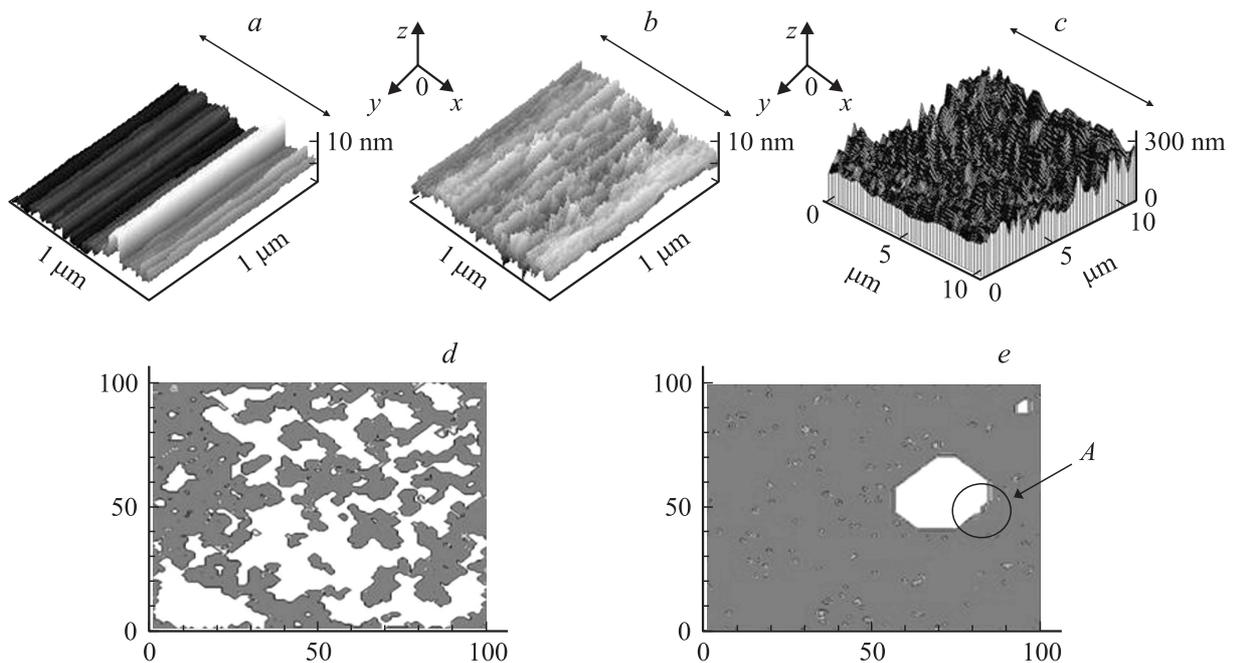


Рис. 4. Рельефы поверхностей разрыва и модель их формирования. *a* — полностью анизотропная поверхность $\text{Fe}_{77}\text{Ni}_1\text{Si}_9\text{B}_{13}$, *b* — частично анизотропная поверхность $\text{Fe}_{77}\text{Ni}_1\text{Si}_9\text{B}_{13}$, *c* — полностью изотропная поверхность $\text{Fe}_{58}\text{Ni}_{20}\text{Si}_9\text{B}_{13}$, *d, e* — развитие трещин с модели клеточного автомата 100×100 ячеек: перколяционный сценарий формирования трещин и коррелированный сценарий (рост одиночного очага) соответственно.

Первый случай показан на рис. 3, *a*: фрактальная размерность вдоль оси нагружения $D_{OY} = 1.2$, а поперек оси нагружения $D_{OX} = 1.0$. Общая фрактальная размерность дает величину $D_{GW} = 2.2$, т.е. поверхность полностью анизотропна.

Отметим, что суммарная фрактальная размерность D_S , определяемая равенством

$$D_S = D_{OX} + D_{OY}, \quad (1)$$

совпадает с общей фрактальной размерностью D_{GW}

$$D_S = D_{GW}. \quad (2)$$

Такие соотношения характеризуют поверхности переноса [21]. Для них в рамках фрактальных множеств доказана соответствующая теорема.

Второй случай изображен на рис. 1, *b* и 3, *b*. Для поверхности (рис. 1, *b*) $D_{OX} = 1.1$, $D_{OY} = 1.3$, $D_{GW} = 2.3$. Это свидетельствует о фрактальности поверхности в обоих направлениях, хотя фрактальные размерности не одинаковы. Соотношение (2) не выполняется. Аналогично для поверхности (рис. 3, *b*) $D_{OX} = 1.1$, $D_{OY} = 1.2$, $D_{GW} = 2.2$. Это свидетельствует о фрактальности поверхности в обоих направлениях. Отметим, что в этом случае также не выполняется соотношение (2). Такие поверхности будем называть частично анизотропными.

Третий случай демонстрирует рис. 2, *c, d*. Для топограммы (рис. 2, *c*) $D_{OX} = 1.2$ и $D_{OY} = 1.2$, а $D_{GW} = 2.3$. В этом случае $D_{OX} = D_{OY}$. Поверхности полностью изотропны, соотношение (2) не выполняется.

В настоящий момент неясно, по какой причине формируются изотропные либо анизотропные нагруженные боковые поверхности. Возможно, это связано с гетерогенностью структуры приповерхностных слоев.

3.2. Поверхности разрыва. Топограммы поверхности разрыва приведены на рис. 4. Видны три качественно различающихся типа рельефа поверхности. Направление распространения трещины происходило вдоль OY .

На рис. 4, *a* изображена топограмма поверхности разрыва, на которой рельеф поверхности анизотропен: видно, что поверхность состоит из хребтов и долин, расположенных поперек направления распространения трещины.

На рис. 4, *b* изображена топограмма поверхности разрыва, иллюстрирующая такой тип рельефа, при котором анизотропия выражена менее четко, чем в предыдущем случае: наряду с выделяющимися долинами и хребтами поверхность имеет шероховатость в направлении, перпендикулярном распространению трещины. Рис. 4, *c* отображает изотропный рельеф поверхности.

Качественное рассмотрение типов рельефа подтверждают измерения фрактальных размерностей поверхностей с помощью программ Gwiddion и FracLab, проведенные аналогично тому, как это было сделано для боковых поверхностей (рис. 4).

Для поверхности, изображенной на рис. 4, *a*, фрактальная размерность $D_{OY} = 1.3$, $D_{OX} = 1.0$, общая средняя фрактальность $D_{GW} = 2.3$. Такие поверхности мы счи-

таем полностью анизотропными, так как выполняется соотношение (2).

Для поверхности, представленной на рис. 4, *b*, фрактальная размерность $D_{OY} = 1.2$, $D_{OX} = 1.1$, фрактальная размерность $D_{GW} = 2.3$. Такие поверхности мы называем частично анизотропными. Оценка фрактальных размерностей для поверхности, изображенной на рис. 4, *c*, дает величины $D_{OX} = 1.2$, $D_{OY} = 1.2$, $D_{GW} = 2.3$. Такие поверхности мы считаем полностью изотропными. Соотношение (2) не выполняется.

4. Обсуждение результатов

Сравнение экспериментальных данных о рельефе нагруженных боковых поверхностей и поверхностей разрыва, а также их фрактальных характеристик показало, что имеются три типа фрактальных рельефов: полностью анизотропные, полностью изотропные и промежуточные.

Типы рельефов и их анизотропия как на боковых нагруженных поверхностях, так и на поверхностях разрыва несомненно связаны с механизмами зарождения, образования и роста магистральной трещины. Ранее было установлено, что зарождение магистральной трещины происходит на поверхности АС в области монофрактализации поверхностной морфологии и формирования скейлинга поверхностных дефектов [17,22]. Было высказано предположение, что поверхность разрыва на начальном участке формирования магистральной трещины „наследует“ среднюю фрактальную размерность боковой поверхности в области зарождения трещины [14]. Приведенные в настоящей работе результаты подтверждают ранее полученные данные. На наш взгляд, „наследуются“ не только общая фрактальная размерность, но и анизотропия рельефа.

Как уже указывалось выше, СОК предшествует критическому событию на поверхности. По нашему мнению, формированию СОК в приповерхностных слоях АС способствует повышенная по сравнению с объемом пористость этих слоев [12–14]. Как показано нами ранее [13], повышенная пористость в приповерхностных слоях АС ускоряет фазовый переход при низкотемпературном отжиге. Она же, по нашему мнению, играет большую роль при зарождении критического события при растяжении образца и, следовательно, в формировании магистральной трещины.

Для объяснения образования различных рельефов поверхностей разрыва была привлечена модель клеточного автомата (КА), которая хорошо описывает разрушение механически нагруженных гетерогенных материалов [23]. Эта модель позволяет наблюдать во времени за характером накопления повреждений и роста образующихся трещин.

Согласно этой модели, существует три сценария процесса разрушения: два предельных (перколяционный и коррелированный) и один промежуточный (когда процесс последовательно проходит оба предельных сценария — сначала перколяционный, а затем коррелированный).

При перколяционном механизме (рис. 4, *d*) результирующие формы поверхностей разрушения одинаково фрактальны в обоих направлениях, что соответствует топограмме поверхности, показанной на рис. 4, *c*.

При коррелированном механизме (рис. 4, *e*) наблюдается другая картина событий. Трещина в направлении распространения преодолевает потенциальные барьеры различной формы и высоты, что находит отражение во фрактальной структуре рельефа поверхности в этом направлении, а в перпендикулярном направлении распространяются „парные перегибы“ за счет того, что значительные локальные напряжения, возникающие при выбрасывании перегибов, превышают прочность элементов структуры. На рис. 4, *e* вблизи позиции А на фронте трещины можно видеть небольшой перегиб, распространяющийся вдоль диагонали рисунка. Разрушение элементов приводит к прорастанию фронта трещины и снятию механических перенапряжений. Фрактальная размерность в этом направлении оказывается значительно ниже, чем в направлении роста трещины, что совпадает с полученными экспериментальными данными (рис. 4, *a*). Следует отметить, что в модели КА в отличие от реального эксперимента нет выделенного направления роста трещины, поэтому гладкий фронт образуется по периметру трещины (рис. 4, *e*).

В остальных (промежуточных) случаях система эволюционирует к масштабно-инвариантному состоянию со степенным законом распределения дефектов по размерам. Процесс проходит две стадии: накопительную, некоррелированную, когда дефекты образуются практически однородно в рассматриваемой плоскости, и коррелированную — быстрый рост очага разрушения (режим с обострением). Соответствующий вид рельефа поверхности разрыва изображен на рис. 4, *b*.

Таким образом, можно считать, что модель КА позволяет качественно описать рельеф поверхности разрыва в аморфных сплавах.

В настоящее время мы не можем точно сказать, на широкой или на узкой поверхности зародилась магистральная трещина. Это связано с малым временем разрыва образца при больших напряжениях.

Формирование монофрактальных структур перед критическим событием отражает общефизическую закономерность: проявления степенных законов в критических событиях типа фазовых переходов и самоорганизованной критичности. При этом происходит нарушение закона больших чисел, характерного для экспоненциальных и гауссовых распределений, и существенно возрастает роль крупномасштабных флуктуаций, приводящих к катастрофам [16,18,21,22,24,25]. Необходимо отметить два момента. Во-первых, тенденция к монофрактализации поверхности и формирование скейлинга поверхностных дефектов перед образованием поверхностных трещин происходят за счет возрастания доли крупных дефектов [18,22]. Это согласуется с механизмом разрушения твердых тел, когда укрупняются зародышевые трещины и формируется локальный очаг разрушения.

Во-вторых, поверхностные фракталы, образовавшиеся под воздействием нагружения, стохастичны. Это отражает элементы случайности, участвующие в их формировании. Можно выделить два главных элемента: 1) термофлуктуационный механизм зарождения поверхностных и магистральных трещин; 2) гетерогенность материала [19,26]. Однако связь фрактального характера разрушения с кинетической концепцией разрушения требует дальнейшего изучения.

5. Заключение

Выявлено три типа возможных рельефов нагруженных боковых поверхностей и поверхностей разрыва в АС: изотропные, анизотропные и промежуточные.

Установлено, что зарождение этих типов рельефа на поверхностях разрыва происходит на боковых поверхностях нагруженной ленты.

Для описания механизма формирования таких поверхностей была привлечена модель клеточного автомата. Показано, что каждый из видов поверхностей соответствует определенному сценарию процесса разрушения, который описывается данной моделью.

Список литературы

- [1] R. Thomson, L.E. Levine. *Phys. Rev. Lett.* **81**, 3884 (1998).
- [2] R. Thomson, L.E. Levine, D. Stauffer. *Physica A* **283**, 307 (2000).
- [3] A. Vinogradov, I.S. Yasnikov, Y. Estrin. *Phys. Rev. Lett.* **108**, 205 504 (2012).
- [4] L.E. Levine, R. Thomson. *Mater. Sci. Eng. A* **400–401**, 202 (2005).
- [5] Г.А. Малыгин. *ФТТ* **43**, 248 (2001).
- [6] P. Hähner, K. Bay, M. Zaiser. *Phys. Rev. Lett.* **81**, 2470 (1998).
- [7] M. Zaiser, F. Madani, V. Koutsos, E.C. Aifantis. *Phys. Rev. Lett.* **93**, 195 507 (2004).
- [8] D.E. Kramer, M.F. Savage, L.E. Levine. *Acta Mater.* **53**, 4655 (2005).
- [9] M. Cai, L.E. Levine, S.C. Langford, J.T. Dickinson. *Mater. Sci. Eng. A* **400–401**, 476 (2005).
- [10] А.М. Глейзер, И.Е. Пермякова. *Нанокристаллы, закаленные из расплава. Физматлит, М.* (2012). 360 с.
- [11] К. Судзуки, Х. Фудзимори, К. Хасимото. *Аморфные металлы. Металлургия, М.* (1987). 328 с.
- [12] В.И. Бетехтин, А.Г. Кадомцев, О.В. Толочко. *ФТТ* **43**, 1815 (2001).
- [13] В.И. Бетехтин, П.Н. Бутенко, А.Г. Кадомцев, В.Е. Корсуков, М.М. Корсукова, Б.А. Обидов, О.В. Толочко. *ФТТ* **49**, 2118 (2007).
- [14] В.И. Бетехтин, П.Н. Бутенко, В.Л. Гиляров, А.Г. Кадомцев, В.Е. Корсуков, М.М. Корсукова, Б.А. Обидов. *ФТТ* **50**, 1800 (2008).
- [15] Г.Е. Абросимова, А.С. Аронин, С.В. Добаткин, И.И. Зверькова, Д.В. Матвеев, О.Г. Рыбченко, Е.В. Татьяна. *ФТТ* **49**, 983 (2007).
- [16] В.Л. Гиляров, В.Е. Корсуков, П.Н. Бутенко, И.Н. Светлов. *ФТТ* **46**, 1806 (2004).
- [17] В.И. Бетехтин, В.Л. Гиляров, А.Г. Кадомцев, В.Е. Корсуков, М.М. Корсукова, Б.А. Обидов. *Изв. РАН. Сер. физ.* **73**, 1506 (2009).
- [18] В.Л. Гиляров. *ФТТ* **47**, 808 (2005).
- [19] В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский. *Кинетическая природа прочности твердых тел. Наука, М.* (1974). 560 с.
- [20] A.A. Griffith. *Phil. Trans. A* **221**, 163 (1921).
- [21] Е. Федер. *Фракталы. Мир, М.* (1991). 254 с.
- [22] В.Л. Гиляров, М.С. Варкентин, В.Е. Корсуков, М.М. Корсукова, В.С. Куксенко. *ФТТ* **52**, 1311 (2010).
- [23] В.Л. Гиляров. *ФТТ* **53**, 707 (2010).
- [24] F. Arneodo, J.E. Vacry. *Physica A* **213**, 232 (1995).
- [25] Г.Г. Малинецкий, С.П. Курдюмов. *Вестн. РАН* **71**, 210 (2001).
- [26] В.Р. Регель, А.И. Слуцкер. *Сорос. образоват. журн.* **8**, 8686 (2004).