

Физическое обоснование возможности использования монокристалльных сенсоров для анализа деформационной поврежденности элементов конструкций

Е. Э. Засимчук, Ю. Г. Гордиенко, Р. Г. Гонтарева

Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, Киев, Украина

Показано, что с помощью качественного и количественного (фрактального) анализа панорам деформационного рельефа монокристалльного сенсора определенной кристаллографической ориентации, жестко скрепленного с механически нагружаемым объектом, можно обнаружить локализацию повреждения как в макроскопически однородных, так и неоднородных (например, сварных) конструктивных элементах. Изучена внутренняя структура рельефных полос на разных масштабных уровнях, что свидетельствует об их определяющей роли в реализации гидродинамического пластического течения кристалла при заторможенности дислокационного скольжения. Рассмотрена возможность практического использования монокристалльных сенсоров.

Ключевые слова: рельеф, фрактальная размерность, сенсор, циклическое растяжение, монокристалл, структура, гидродинамическое пластическое течение.

Введение. В последнее время большое внимание исследователей в разных научных сферах привлекают так называемые “смарт-материалы”, т.е. сенсоры, чувствительные к процессам, происходящим в сложно анализируемых элементах различных конструкций. Для конструкций, которые испытывают нестационарные во времени механические нагрузки, создание и использование таких материалов весьма актуально, поскольку ни расчетные методы, ни методы исследования физических свойств нагружаемых объектов из материалов со сложным химическим и фазовым составом не дают надежных данных о наличии, расположении и динамике участков локализации повреждения, в то время как они необходимы для прогнозирования долговечности реальных элементов конструкций.

Известно, что неоднократно предпринимались попытки использования сенсоров для решения задачи прогнозирования долговечности основного материала, что привело к созданию сенсоров двух типов:

для непосредственного определения уровня деформации;

для оценки деформации на основе измерения физических свойств: электрических и магнитных, акустических, термических и оптических, методы измерения давления и радиационного рассеяния и т.д.

Наилучший вариант первого типа сенсоров описан в ряде работ японских авторов [1–3]. Сенсор представляет собой металлическую фольгу толщиной менее 10 мкм, электролитически нанесенную на поверхность циклически нагружаемого образца. Упругие напряжения оценивались с помощью наблюдения выросших зерен или следов скольжения в фольге. Однако, по нашему мнению, этот тип сенсоров имеет существенные недостатки:

1) фольга, полученная электролитическим осаждением, обладает мелкозернистой поликристаллической структурой. Поэтому выбор анализируемо-

го участка и определение плотности следов скольжения существенно зависят не только от количества циклов нагружения и амплитуды приложенного напряжения, но и от кристаллографической ориентации анализируемых зерен;

2) в тонкой электролитически осажденной фольге может наблюдаться значительная неоднородность механических свойств из-за вариации толщины фольги и ее поликристаллической структуры, что приводит к неоднородности механических свойств по площади фольги;

3) температурные колебания и другие внешние воздействия могут приводить к временным флуктуациями механических свойств тонкой фольги и соответственно к ошибкам при оценке упругих напряжений в основном материале.

Наиболее используемыми сенсорами второго типа являются сенсоры, базирующиеся на измерении электросопротивления. Они изготавливаются в виде тензорезисторов, которые с помощью клея закрепляются на анализируемом узле конструкции. Недостаток этих и других сенсоров второго типа заключается в сложности их использования в реальных условиях эксплуатации (наличие проводов, измерительных приборов) и отсутствии возможности получать информацию о накоплении повреждения в течение длительного периода эксплуатации.

Нами предложен и разработан новый монокристалльный сенсор первого типа без изложенных выше недостатков.

Методика эксперимента. При работе с монокристалльными сенсорами необходимо обратить внимание на такие моменты.

Выбор материала и способа выращивания монокристалла.

Выбор наиболее чувствительной к деформационным воздействиям ориентации кристалла.

Нахождение параметра деформационного структурообразования, необходимого для установления количественной взаимосвязи между уровнем механического воздействия и поврежденностью основного материала.

Методика количественного анализа поврежденности на основе показаний сенсора.

Основную часть экспериментов проводили с использованием алюминия высокой чистоты в качестве материала сенсора и многофазных сплавов алюминия и титана в качестве анализируемых объектов.

Цилиндрические монокристаллы диаметром 15 мм выращивали с помощью метода Бриджмена в вертикальной печи в тигле из окиси иттрия с использованием заправки требуемой ориентации. Монокристаллы выращивали из алюминия высокой чистоты (99,995% вес.) и затем электроэрозионным методом разрезали на пластины толщиной 0,4–0,5 мм, длиной 30 мм и шириной 10 мм. Ориентацию пластин при их изготовлении определяли рентгенографически специальным портативным кристаллодержателем, который использовался как на рентгеновском дифрактометре, так и на электроэрозионной установке. Это позволяло осуществлять резку пластин, не вынимая кристалл из кристаллодержателя, что задавало необходимую ориентацию пластин с высокой точностью. Вырезанные пластины подвергали электрополировке для удаления деформированного в процессе резки

слоя, утонения до толщины ~ 200 мкм и получения зеркальной рабочей поверхности.

Деформацию осуществляли следующим образом. Монокристалльные пластины закрепляли на плоской поверхности образца из сложнолегированного многофазного сплава специальным клеем (в данном случае клей PASCOFix). Нагружение образца с закрепленной на нем пластиной (сенсором) проводили на гидропульсаторе с рабочей частотой ~ 11 Гц. Интервал использованных амплитуд напряжения составлял 100...300 МПа. Форма цикла нагружения – синусоидальная с напряжением минимума, близким к нулю. При всех использованных амплитудах напряжения образец деформировался упруго, а связанный с ним монокристалл – пластически.

В качестве анализируемого параметра деформационного структурообразования использовали поверхностный рельеф сенсора. Это обусловлено тем, что изучение деформационных структурных превращений затрудняется релаксационными процессами после снятия внешней нагрузки и в ряде случаев разрушением деформационных образцов (например, при использовании ТЭМ-метода). Чтобы избежать этого, в качестве объекта наблюдения использовали деформационный рельеф, возникающий на поверхности кристалла в процессе пластической деформации. Такой рельеф сохраняется как угодно долго после снятия нагрузки, и при его исследовании можно получать информацию о накоплении деформационного повреждения не только в монокристалле, но и в образце.

Для выбора наиболее чувствительной к деформационным воздействиям ориентации кристалла провели такой эксперимент. Использовали несколько ориентаций оси растяжения монокристалльных сенсоров (рис. 1). Было изготовлено четыре типа сенсоров: $\langle 001 \rangle \{100\}$, $\langle 111 \rangle \{110\}$, $\langle 221 \rangle \{110\}$, $\langle 335 \rangle \{110\}$.

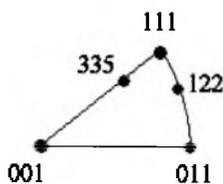


Рис. 1. Кристаллографические ориентации оси растяжения, используемые при нагружении монокристалльных сенсоров.

Необходимое условие появления рельефа на поверхности сенсора в процессе нагружения основного образца – пластическая деформация сенсора, в то время как основной образец деформируется упруго. Хорошо известно, что начальные стадии пластической деформации кристалла связаны с генерацией, перемещением и взаимодействием дислокаций, которые движутся в определенных кристаллографических плоскостях и направлениях. В ГЦК кристаллах (алюминий) плоскостями скольжения служат плоскости $\{111\}$, а направлениями скольжения – кристаллографические направления $\langle 110 \rangle$ в этих плоскостях. Возможность и интенсивность дислокационного скольжения в каждой из возможных плоскостей скольжения зависят от тангенциальной составляющей приложенного напряжения в этой плоскости

в направлении скольжения. Для оценки интенсивности скольжения в каждой из возможных систем скольжения используют величину фактора Шмида S , которая определяется соотношением

$$S = \cos \alpha \cos \beta,$$

где α – угол между осью растяжения и направлением скольжения; β – угол между осью растяжения и нормалью к плоскости скольжения. Максимальное значение $S = 0,5$; при $S = 0$ скольжение в рассматриваемой системе невозможно.

В таблице представлены рассчитанные значения факторов Шмида для возможных систем скольжения использованных ориентаций монокристалльных сенсоров. Данные таблицы позволяют прогнозировать основные черты поверхностного рельефа сенсора, который может проявляться при его пластическом растяжении.

Значения факторов Шмида для систем скольжения $\{111\}\langle 110 \rangle$ ГЦК кристаллов с различной ориентацией оси растяжения (A)

| A | B | S_1 | $N_{S(1)}$ | $K_{S(1)}$ | S_2 | $N_{S(2)}$ | $K_{S(2)}$ | S_3 | $N_{S(3)}$ | $K_{S(3)}$ |
|-----------------------|-----------|-------|------------|------------|-------|------------|------------|-------|------------|------------|
| $\langle 001 \rangle$ | $\{100\}$ | 0,408 | 4 | 2 | | | | | | |
| $\langle 111 \rangle$ | $\{110\}$ | 0,270 | 3 | 2 | | | | | | |
| $\langle 221 \rangle$ | $\{110\}$ | 0,408 | 1 | 2 | 0,186 | 1 | 2 | 0,136 | 1 | 2 |
| $\langle 335 \rangle$ | $\{110\}$ | 0,393 | 2 | 1 | 0,186 | 1 | 2 | | | |

Примечание. B – плоскость поверхности сенсора; $N_{S(n)}$ – количество плоскостей $\{111\}$; $K_{S(n)}$ – количество направлений $\langle 110 \rangle$ в каждой плоскости $\{111\}$.

Исходя из полученных результатов отметим следующее.

В кристаллах кубической ориентации $\langle 001 \rangle \{100\}$ уже во время первого цикла растяжения в процессе увеличения приложенного напряжения одновременно активизируются четыре плоскости скольжения, причем в каждой из них дислокации скользят в двух направлениях. Это приводит к пересечению скользящих дислокаций в каждой из плоскостей, вследствие чего образуется большое количество препятствий дальнейшему перемещению дислокаций. В таких условиях дислокационное скольжение тормозится, и пластическая деформация может продолжаться лишь при включении альтернативного дислокационному скольжению механизма деформации. Ранее [4–6 и др.] было показано, что в ряде случаев в качестве такого механизма может использоваться гидродинамическое течение материала по каналам с жидкоподобной (не кристаллической) структурой, в появлении которых основную роль играет самоорганизация вакансионных дефектов в механическом поле.

Сенсоры ориентации $\langle 001 \rangle \{100\}$ с интенсивным симметричным дислокационным скольжением наиболее чувствительны к деформации образца. В них уже на самых ранних стадиях нагружения формируется некристалло-

графичный деформационный рельеф, который существенно изменяется при последующих циклах нагружения. Сенсоры такой ориентации наиболее пригодны для прогнозирования деформационного повреждения.

Сенсоры ориентации $\langle 111 \rangle \{110\}$ могут использоваться лишь для качественного контроля перегрузок, спонтанного повышения амплитуды напряжения, действующего на образец или элемент конструкции.

Сенсоры ориентации $\langle 221 \rangle \{110\}$ могут быть полезными при изучении количественных параметров корреляции между характеристиками поверхностного рельефа и деформационным повреждением образцов, находящихся под нагрузкой, как это следует из работ [4–6]. Однако для практических целей ориентация $\langle 100 \rangle \{001\}$ более предпочтительна из-за большей чувствительности к деформационному повреждению образца и простоты изготовления монокристалльных пластин такой ориентации.

Сенсоры ориентации $\langle 335 \rangle \{110\}$ нецелесообразно использовать на практике. Однако эта ориентация симметрична ориентации $\langle 221 \rangle$ относительно оси $\langle 111 \rangle$ в плоскости $\{110\}$. Поэтому при производстве сенсоров ориентации $\langle 221 \rangle \{110\}$ необходимо тщательно контролировать ориентацию оси растяжения в плоскости $\{110\}$ (с точностью до долей градуса) рентгеновскими методами, что приводит к замедлению и удорожанию их производства. Этот факт свидетельствует о предпочтительности использования сенсоров ранее рассмотренной кубической ориентации.

Качественную и количественную информацию о поверхностном рельефе сенсора получали с помощью автоматизированного оптического метода. Использовали стереомикроскоп с CCD-камерой, скрепленной с ПК посредством видеоадаптера, при этом автоматически получали панорамы рельефа. Основной объем информации был получен при использовании источника освещения, наклоненного к поверхности кристалла под углом $\sim 35^\circ$.

Качественный анализ поврежденности анализируемых объектов по структурным признакам рельефа сенсора. Предложена следующая классификация структурных элементов, появление и эволюция которых наблюдаются с помощью оптического микроскопа (рис. 2):

плоский горизонтальный полосатый узор высокого контраста (плоские полосы или линии);

теневого узор, созданный эллиптическими экстрюзиями низкого контраста (“холмы”), слияние и укрупнение которых приводит к образованию “гребней”, наклоненных к оси нагружения под углом $34...38^\circ$;

создание решетки гребней (“горы”).

На основании введенных элементарных структурных признаков создана база данных (атлас) стандартных рисунков с указанием соответствующих параметров: количество циклов, амплитуда напряжения, материал образцов. После тщательной обработки изображений обнаружена устойчивая преемственность признаков эволюции поверхностного рельефа (рис. 3), т.е. моментов их появления в зависимости от количества циклов и амплитуды приложенного напряжения.

Построены нормированные по кривой усталостной прочности сплава зависимости появления некоторых признаков поверхностного рельефа (гребни и горы), по которым можно качественно оценить условную степень

исчерпания ресурса долговечности (рис. 4). Истинной степени истощения ресурса долговечности будут соответствовать не первые признаки появления поверхностного рельефа, а их дальнейшее развитие, отражающееся в определяемой количественно фрактальной размерности (см. ниже).

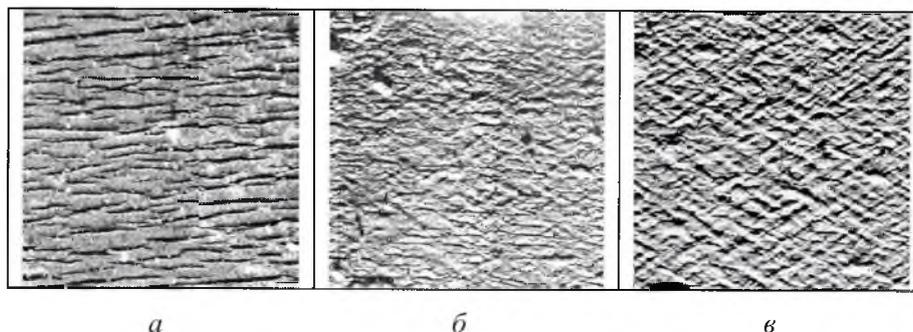


Рис. 2. Типичный вид стабильных признаков поверхностного рельефа, наблюдаемых в диапазоне амплитуд напряжений 146...250 МПа (снимки получены при амплитуде 146 МПа): а – плоские полосы, 56000 цикл; б – гребни, 270000 цикл; в – горы, 970000 цикл.

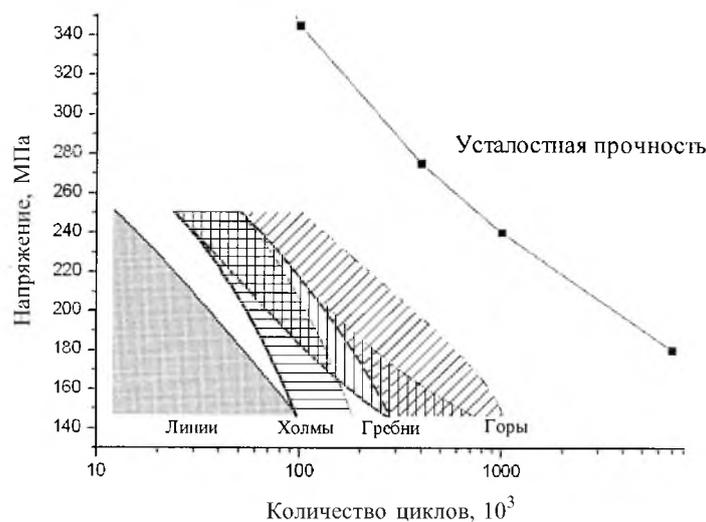


Рис. 3. Устойчивая последовательность появления признаков поверхностного рельефа.

Таким образом, использование монокристалльного сенсора, деформирующегося пластически даже в процессе упругой деформации основного образца, позволяет качественно оценить первые признаки возможного при дальнейшем нагружении истощения ресурса долговечности данного образца по появлению характерных признаков поверхностного рельефа. Это может быть использовано, например, при качественной оценке работоспособности некоторых авиационных конструкций.

Количественный анализ поврежденности конструктивных элементов по структурным проявлениям рельефа монокристалльных сенсоров. Анализируя рис. 2, отметим следующие особенности рельефа сенсора кубической ориентации.

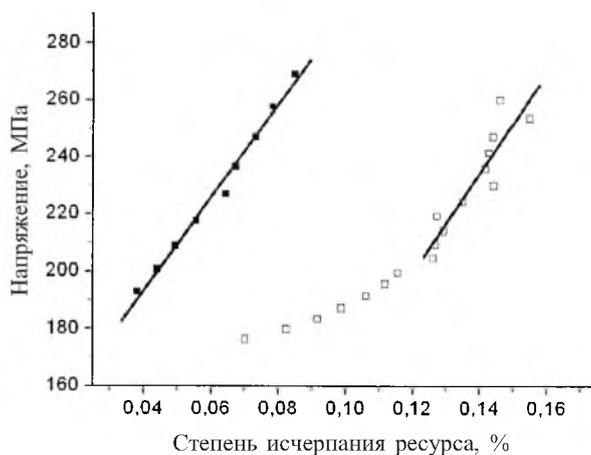


Рис. 4. Зависимость условной степени истощения ресурса долговечности от амплитуды напряжения: ■ – гребни; □ – горы.

Рельефные полосы в плоскости наблюдения (поверхности кристалла) не регулярны и не прямолинейны.

Преимущественная ориентация рельефных полос совпадает с направлением растяжения.

Эти особенности рельефа свидетельствуют о невозможности трактовки их появления и развития с позиций дислокационной физики [7]. Кроме того, обращает на себя внимание значительная (до 30%) экструзия материала в рельефных образованиях, причем плотность экструдированного материала существенно ниже плотности недеформированного кристалла. Все это подтверждает высказанное ранее предположение, что деформационный рельеф, формирующийся на поверхности кристалла в условиях заторможенности дислокационного скольжения, представляет собой остаточный след аморфоподобных каналов гидродинамического пластического течения кристалла. Образование таких каналов является следствием самоорганизации дефектов в механическом поле [4–6, 8].

Для получения количественной характеристики эволюции деформационного рельефа в исследуемых кристаллах использовали аппарат фрактальной геометрии, применяемый для описания и анализа нерегулярных структур [9]. Основной количественный параметр фрактала – фрактальная размерность. После нескольких проверок на объектах с хорошо известными фрактальными размерностями обнаружено, что информационная размерность является наиболее точным методом исследования по сравнению с box-методами, получившими в настоящее время широкое распространение. Идея вычисления информационной размерности, расчетная формула, а также метод оптимизации широко известны [10]. Авторы создали программный код и использовали его в дальнейших вычислениях. Основная расчетная формула имеет следующий вид:

$$D = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\lg[N(\epsilon)]}{\lg[1/\epsilon]}$$

где $N(e)$ – количество ячеек размера e , требуемое для покрытия рассматриваемой плоской фигуры; D – фрактальная размерность.

Для получения качественной и количественной информации о деформационном рельефе использовали автоматизированный оптический метод на базе стереомикроскопа с ССD-камерой, скрепленной с ПК посредством видеоадаптера. С помощью специальных программ получали панорамы рельефа, которые обрабатывались автоматически для определения необходимых фрактальных параметров. Использовали два типа освещения: направленное и рассеянное (диффузное).

После заданного числа циклов нагружения образцы подвергали сканированию на столике микроскопа для получения большого количества единичных (ограниченных площадью освещаемой поверхности) изображений поверхности сенсора. Для получения изображения рельефа всей поверхности сенсора необходимо осуществить 200...300 операций сдвига образца и фокусировки единичного изображения для диффузного освещения и 100...200 – для направленного. Минимальное перекрытие изображений соседних участков составляло 15%, однако для лучшего выполнения следующей стадии (создание панорам) использовали перекрытие единичных изображений до 30%.

Панорамы поверхностного рельефа создавались с помощью специальных программ для автоматического соединения локальных поверхностных картин (с определенным их перекрытием). Полученные данные обрабатывали на основе описанных выше алгоритмов. Для использования аппарата фрактальной геометрии необходимо было убедиться в наличии самоподобия анализируемого свойства. Эта задача существенно зависит от физических размеров системы, поскольку математическое проявление самоподобия в отношении физических объектов связано с определенными размерными ограничениями. Использовали три измерения: вдоль оси X (направление растяжения), вдоль оси Y (перпендикулярно направлению растяжения) и вдоль оси Z (ось цветов).

Минимальный масштабный уровень для цифровых изображений теоретически ограничивается наименьшим значением оптического разрешения ССD-камеры. В данном случае оно равно одному пикселю. С учетом ошибки увеличителя это значение выбирали в интервале 2-3 пикселя. Максимальный масштабный уровень в плоскости $X - Y$ ограничен размером цифровых изображений, который равен 500–600 пикселей для единичных изображений и 1024–2048 пикселей для панорам. В настоящей работе все изображения рассматривали в серой цветовой гамме от нуля (черный цвет) до 255 (белый цвет), поэтому наибольший масштабный уровень по оси Z ограничивался 256 цветовыми уровнями, т.е. немного более двух декад.

Для определения количественной характеристики поверхностного рельефа сенсора необходимо его трехмерное представление. В нашем случае имеется несколько проекций трехмерного рельефа при направленном и диффузном освещении. Эти проекции проявляются в виде различных цветов (ось Z). Основной вывод, полученный из теоретических результатов, состоит в том, что проекции самоподобных объектов наследуют самоподобие оригинальных объектов.

Рассчитывали информационную фрактальную размерность для образцов, в которых отсутствовали видимые участки локализации деформации. Нагружение образцов проводили в различных условиях. Расчет показал, что во всех случаях зависимости фрактальной размерности от числа циклов для различных амплитуд напряжения имеют максимум, что свидетельствует о критическом состоянии основного материала, т.е. об исчерпании ресурса долговечности при выбранных условиях испытания.

При наличии макроскопически неоднородной по фазовому составу и механическим свойствам структуры получено распределение информационной размерности по поверхности сенсора в форме контурных линий, соединяющих одинаковые значения, так называемые контурные эквиразмерные карты. Кроме того, проанализирована анизотропия деформации на поздних стадиях усталостного нагружения, когда наблюдались система пересекающихся гребней рельефа и эффект “размытия” пика. С этой целью рассчитывали информационную размерность для всех продольных сечений и строили ее угловую зависимость в полярных координатах – так называемые полярные размерные фигуры. Примеры конкретных картин рельефа и полученных распределений фрактальной размерности по поверхности сенсора для материалов с различной степенью макроскопической однородности приведены ранее [1–4].

Внутренняя структура рельефных полос. Структуру внутри полос рельефа исследовали с помощью методов сканирующей (СЭМ) (рис. 5) и трансмиссионной электронной микроскопии (ТЭМ). Это обусловлено тем, что аппарат фрактальной геометрии применим лишь к тем нерегулярным структурам, которые обладают свойствами самоподобия на разных масштабных уровнях.

Экспериментально доказать наличие самоподобия структур можно при использовании методов с разной прецизионной способностью. В данном случае такими методами являются оптическая и электронная микроскопия. Сравнение картин рельефа, полученных с помощью оптической микроскопии (рис. 2 и 5,а) и СЭМ (рис. 5,б–г), указывает на наличие эквивалентной (сетчатой) структуры рельефных образований на разных масштабных уровнях. Сетчатая структура рельефа формируется на поверхности монокристалла на ранних стадиях циклического нагружения и сохраняется вплоть до разрушения кристалла. Это подтверждает не только фрактальную природу рельефа, но и целесообразность использования деформационного рельефа как объекта изучения структурообразования в процессе механического нагружения: раз возникший рельеф не исчезает ни после снятия нагрузки, ни в процессе деформации. Интересно отметить также регулярное (в виде сетки) расположение полостей округлой формы и разных размеров. Наличие таких полостей, по нашему мнению, связано с самоорганизацией вакансионных дефектов в процессе деформации. Предполагалось, что, как и при других видах деформации монокристаллов [6], наблюдаемые рельефные образования являются следами гидродинамического пластического течения. Поверхностный рельеф (макроэкструзии) обусловлен локализацией течения в этих структурах, а пониженная плотность макроэкструзий – с определяющей

ролью вакансионных дефектов в их образовании и невозможностью стока вакансий на поверхность из-за наличия окисной пленки на поверхности алюминиевого кристалла. Справедливость такого предположения подтверждается эквивалентностью картин рельефа на двух противоположных поверхностях кристалла [6].

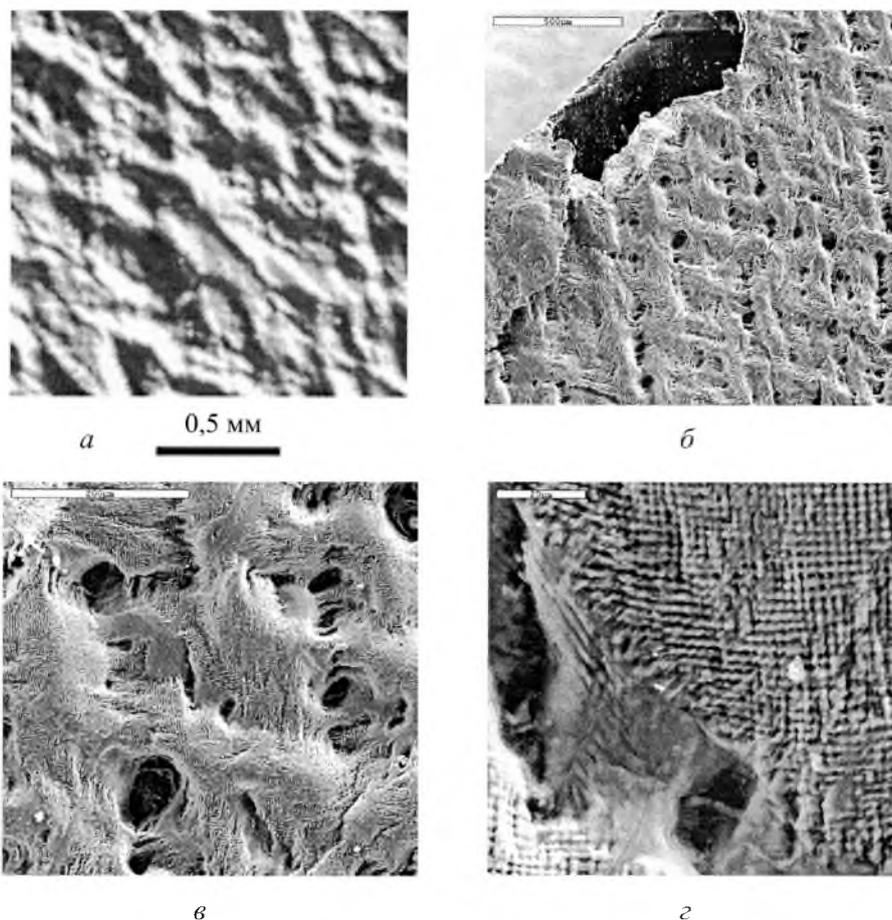


Рис. 5. Поверхностный рельеф сенсора (600000 цикл при 145 МПа): а – оптическая микроскопия; б–г – СЭМ.

Использование метода локальной ТЭМ при исследовании образцов, вырезанных из кристаллов алюминия после циклического растяжения разной продолжительности, позволило наблюдать структурный след локализации деформации в макроэкструзиях в виде микрополосовой структуры. Вне макроэкструзий сохраняется структура исходного монокристалла.

Таким образом, структура материала между рельефными выступами (экструзиями) сохраняется практически в исходном состоянии. Это свидетельствует о локальном характере пластического течения монокристалла. Локализация любого физического процесса связана с его нелинейным характером, что еще раз подтверждает синергетический характер рассматриваемого деформационного структурообразования [4].

Монокристаллические сенсоры деформационного повреждения могут широко применяться в различных областях техники, причем на практике можно использовать простые методы анализа рельефа.

Закключение. Предложены “умные” монокристаллические сенсоры деформационного повреждения элементов конструкций, пригодные для мгновенной оценки степени исчерпания рабочего ресурса конструкции. В основе работы сенсора лежит качественный и количественный анализ панорамы поверхностного рельефа сенсора, жестко скрепленного с анализируемым элементом, который подвержен продолжительному действию механических нагрузок. В макроскопически неоднородных материалах (например, сварных) с помощью предложенных сенсоров можно определить не только наличие, но и местонахождение участков локализации повреждения. Проведение лабораторного анализа скейлинговых характеристик самоподобия рельефных образований посредством стационарного ПК позволило составить атлас структур, соответствующих разным стадиям деформационного повреждения, и рекомендовать его для использования на практике.

Подробно исследована физическая природа деформационного рельефа, формирующегося на поверхности монокристаллического сенсора кубической ориентации, и показано, что рельефные образования самоподобны на разных масштабных уровнях. Это позволяет использовать методы фрактальной геометрии для получения количественной характеристики деформационного рельефа. Анализ структурных данных свидетельствует, что рельеф представляет собой поверхностный след локализованного гидродинамического течения кристалла, а образование каналов такого течения обусловлено самоорганизацией в механическом поле вакансий и их кластеров.

Полученные результаты дают основание рекомендовать простые методы анализа рельефа с помощью переносных карманных персональных компьютеров, соединенных с дешевыми видеокамерами, и получивших широкое распространение мобильных телефонов с дешевыми видеокамерами с достаточно высокой разрешающей способностью (около 1 мегапикселя). Сенсор имеет широкую область применения.

Резюме

Показано, що за допомогою якісного і кількісного (фрактального) аналізу панорам деформаційного рельєфу монокристалльного сенсора визначеної кристало-графічної орієнтації, жорстко з'єданого з механічно навантаженим об'єктом, можна виявити локалізацію пошкодження як в макроскопічно однорідних, так і в неоднорідних (наприклад, зварених) конструкційних елементах. Вивчено внутрішню структуру рельєфних смуг на різних масштабних рівнях, що свідчить про їх головну роль в реалізації гідродинамічної пластичної течії кристалу при загальмованості дислокаційного ковзання. Розглянуто можливість практичного використання монокристалльних сенсорів.

1. *Seika M. and Hosono K.* A basic study of a strain gauge made of nickel foil // *Exper. Mech.* – 1989. – No. 12. – P. 388 – 391.

2. *Seika M. and Kitaoka S.* A study on the improvement in sensitivity of strain gauges made of copper electrodeposited foil // *Bul. JSME.* – 1984. – **27** (234). – P. 2664 – 2669.
3. *Kitaoka S. and Ohshima K.* On the stress measurement method using slip-lines in copper foil with grown grain structure // *JSME Int. J.* – 1987. – **30** (269). – P. 1724 – 1731.
4. *Лихачев В. А., Панин В. Е., Засимчук Е. Э. и др.* Кооперативные деформационные процессы и локализация деформации. – Киев: Наук. думка, 1989. – 320 с.
5. *Gordienko Yu. G. and Zasimchuk E. E.* Synergetic model of structure formation during plastic deformation of crystals // *Phil. Mag. A.* – 1994. – **70**, No. 1. – P. 99 – 107.
6. *Засимчук Е. Э., Гордиенко Ю. Г., Засимчук В. И.* К вопросу о возможности пластического формоизменения кристалла путем гидродинамического течения по каналам с жидкоподобной структурой // *Металлофизика. Новейшие технологии.* – 2002. – **24**, № 9. – С. 1161 – 1176.
7. *Хирт Дж., Лоте И.* Теория дислокаций. – М.: Атомиздат, 1972. – 599 с.
8. *Гордиенко Ю. Г., Гонtareва Р. Г., Засимчук Е. Э., Засимчук И. К.* Фрактальные свойства поверхностного рельефа монокристаллов алюминия при их совместном нагружении с образцами из сложнолегированных сплавов // *Металлофизика. Новейшие технологии.* – 2002. – **24**, № 11. – С. 1561 – 1571.
9. *Федер Е.* Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 260 с.
10. *Иванова В. С., Закирничная М. М., Кузеев И. Р.* Синергетика и фракталы. Универсальность механического поведения материалов. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 1998. – 363 с.

Поступила 04. 03. 2004