

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЛОКАЛИЗОВАННОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ПРИМЕРЕ ДВОЙНИКОВАНИЯ МАГНИЯ И ПОЛОС СДВИГА В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ СТЕКЛЕ

© 2016

М.Н. Селезнев, младший научный сотрудник Научно-исследовательского института прогрессивных технологий
Е.В. Васильев, младший научный сотрудник Научно-исследовательского института прогрессивных технологий

Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

А.Ю. Виноградов, кандидат физико-математических наук, заместитель директора Научно-исследовательского института прогрессивных технологий, профессор кафедры инженерного проектирования и материалов

Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Норвежский технологический университет (NTNU), Тронхейм (Норвегия)

Ключевые слова: цифровая корреляция изображений; КЦИ; деформационное поле; локализованная пластическая деформация; механические испытания; металлические стекла; полосы сдвига; магний; двойникование.

Аннотация: Метод корреляции цифровых изображений (КЦИ) широко используется во всем мире при решении самых разнообразных задач, таких как контроль и мониторинг вибрации мостов, ветряных генераторов, схода снежных лавин, отслеживание перемещений объектов в системах безопасности и краш-тестах, измерение локальных деформаций и их распределения в объектах различного масштабного уровня – от микро- до макро-. Данная работа посвящена решению последней указанной задачи, а именно измерению деформационных полей, образованных в результате локализованной деформации, методом КЦИ. В качестве объектов исследования были выбраны явления, активно обсуждаемые научным сообществом в настоящее время: образование полос сдвига в металлических стеклах и двойникование в магнии. Проведены механические испытания образцов с видеорегистрацией деформируемой поверхности. Отработаны методики подготовки поверхности образцов, получения и обработки данных методом КЦИ. Измерены поля деформации на поверхности образцов металлического стекла и магния. Показано, что экспериментально измеренное поле смещения вокруг вершины полосы сдвига с большой точностью совпадает с теоретически рассчитанным полем дислокации в изотропном материале. Обнаружено, что деформационное поле магниевого образца несимметрично изменяет морфологию при смене знака нагрузки. Установлено, что локальная деформация при двойниковании магния достигает до 20 %. Использование субпиксельного алгоритма позволило достичь разрешения, превышающего на два порядка разрешение оптической системы, применяемой в работе. Сделан вывод о высокой эффективности метода КЦИ при исследовании микродеформации материалов, в т. ч. единичных актов деформации на примере полос сдвига и двойникования.

ВВЕДЕНИЕ

Для управления механическими свойствами прогнозирования деформации и разрушения необходимо изучение процессов, протекающих в материале. В металлических материалах пластичность (однородная или неоднородная) управляется прежде всего механизмами деформации, которые всегда неоднородны при рассмотрении соответствующих масштабных уровней. За последние десятилетия в материаловедении возникло множество новых материалов с уникальными свойствами, полученными благодаря формированию специфической структуры и механизмов деформации: сплавы с высокой пластичностью, наведенной мартенситным превращением и двойникованием (TRIP/TWIP) [1], металлические аморфные сплавы, в которых невозможно двойникование и скольжение по кристаллографическим плоскостям [2], упрочненные магниево-алюминиевые сплавы с длинным периодом порядка упаковки (LPSO) [3] и др.

Таким образом, одной из основных задач материаловедения на сегодняшний день остается непосредственное исследование элементарных механизмов деформации, являющихся ключом к управлению механическими свойствами в перспективных материалах. Эта задача требует, кроме микроскопических наблюдений описанных механизмов, непосредственное измерение деформации, ими производимой. Такие классические устройства измерения деформации, как экстензометр, показывают лишь суммарную деформацию на уровне

образца и не могут быть применены для измерения, например, деформации, привносимой единичным актом двойникования.

Одним из наиболее перспективных и универсальных методов измерения деформации на любом масштабном уровне, разрешимом при помощи современных оптических методов, является метод корреляции цифровых изображений (КЦИ) [4]. Метод КЦИ широко используется во всем мире при решении самых разнообразных задач: контроля и мониторинга вибрации мостов, ветряных генераторов, схода снежных лавин; отслеживания перемещений объектов в системах безопасности и краш-тестах; измерения локальных деформаций и их распределения в объектах различного масштабного уровня – от микро- до макро-. Сущность метода заключается в сравнении изображений поверхности материала до и после деформации и вычисления смещения точек с помощью функции кросс-корреляции [5]. Метод доказал свою эффективность в измерении неоднородной деформации материалов при механических испытаниях на растяжение [6], эффекта Портевена – Ле Шателье [7], раскрытия трещины [8; 9] и т. д. Тем не менее количество работ по измерению деформации на уровне элементарных механизмов – носителей деформации довольно мало. Так, поле деформации, образованное полосой сдвига (ПС) в металлическом стекле (МС), хотя и было измерено методом КЦИ [10], однако лишь вдоль полосы, тогда как наибольшую значимость имеет

характер деформации в ее вершине. Природа полос сдвига до сих пор остается предметом оживленных дискуссий [11], однако определение деформационных полей в вершине ПС однозначно указало бы на тип этого дефекта.

Еще одним примером нереализованности потенциала метода КЦИ является измерение деформации двойникования металлических сплавов (например, в стали Гадфильда [12]). Вышеупомянутые магниевые сплавы имеют ярко выраженную асимметрию двойникования при изменении знака нагрузки, проявление которой значительно влияет на усталостные свойства [13]. Этот эффект мало исследован в рамках деформационного анализа, несмотря на крайне высокий интерес к магнию в настоящее время [14].

Целью данной работы являлась отработка методики измерения локального деформационного поля, возникающего в процессе механического нагружения, на примере двух характерных явлений: образования полосы сдвига в металлическом стекле и двойникования магния при растяжении/сжатии.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для исследования деформации вокруг вершины ПС использовался аморфный сплав $Pd_{40}Cu_{30}Ni_{10}P_{20}$, полученный закалкой в медную изложницу [15]. Подготовка образцов для механических испытаний с КЦИ показана

на рис. 1. Образцы на сжатие с размерами $2,7 \times 2,7 \times 5,5$ мм³ вырезались электроискровым способом. С целью торможения вершины ПС на образце был выполнен радиальный надрез, формирующий неоднородное поле напряжения (рис. 1 а). Такая форма образца препятствует сквозному прохождению ПС, что уже было успешно продемонстрировано в работе [16].

Для исследования локализованной деформации при двойниковании использовался монокристалл чистого магния, из которого электроискровым способом вырезались образцы на растяжение с базой $10 \times 4 \times 3$ мм³ (рис. 1 в). Ось нагружения образца ориентирована по направлению [0001] так, что плоскость двойникования при растяжении (-1, 0, 1, 2) пересекает наблюдаемую поверхность базы образца горизонтально.

Для успешного применения метода КЦИ анализируемые изображения поверхности деформируемого материала должны иметь четкий, контрастный и неповторяющийся пиксельный рисунок. Каждый пиксель задан числом градации серого от 0 до 255. Алгоритм КЦИ отслеживает смещение пиксельного рисунка вокруг каждой измеряемой точки с использованием линейного коэффициента взаимной корреляции. Поэтому полировка поверхности, обычно применяемая при видеорегистрации механических испытаний, недопустима: полированная поверхность не содержит контрастных элементов, смещение которых алгоритм может

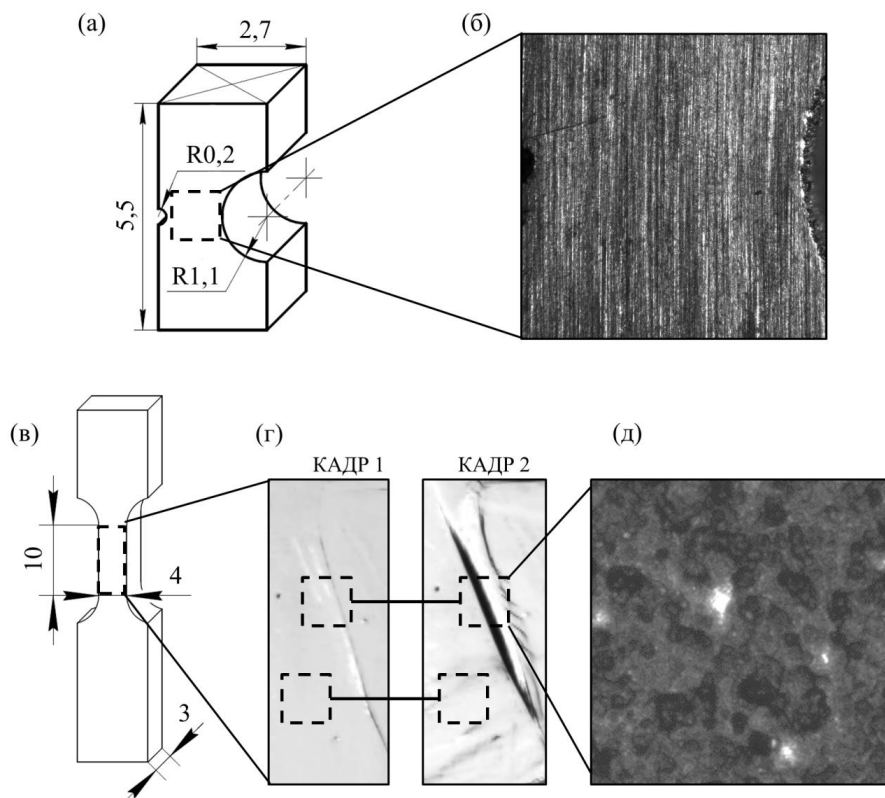


Рис. 1. Подготовка образцов для механических испытаний с КЦИ:

схема образца на сжатие аморфного сплава $Pd_{40}Cu_{30}Ni_{10}P_{20}$ (а)

и регистрируемое изображение его поверхности (б);

схема образца на растяжение/сжатие монокристаллического магния (в);

его поверхность после полировки (г) с наглядным представлением изменения пиксельного рисунка и отсутствия пиксельного контраста (области, выделенные квадратом на кадре 1 и 2);

поверхность образца магния после нанесения покрытия (д)

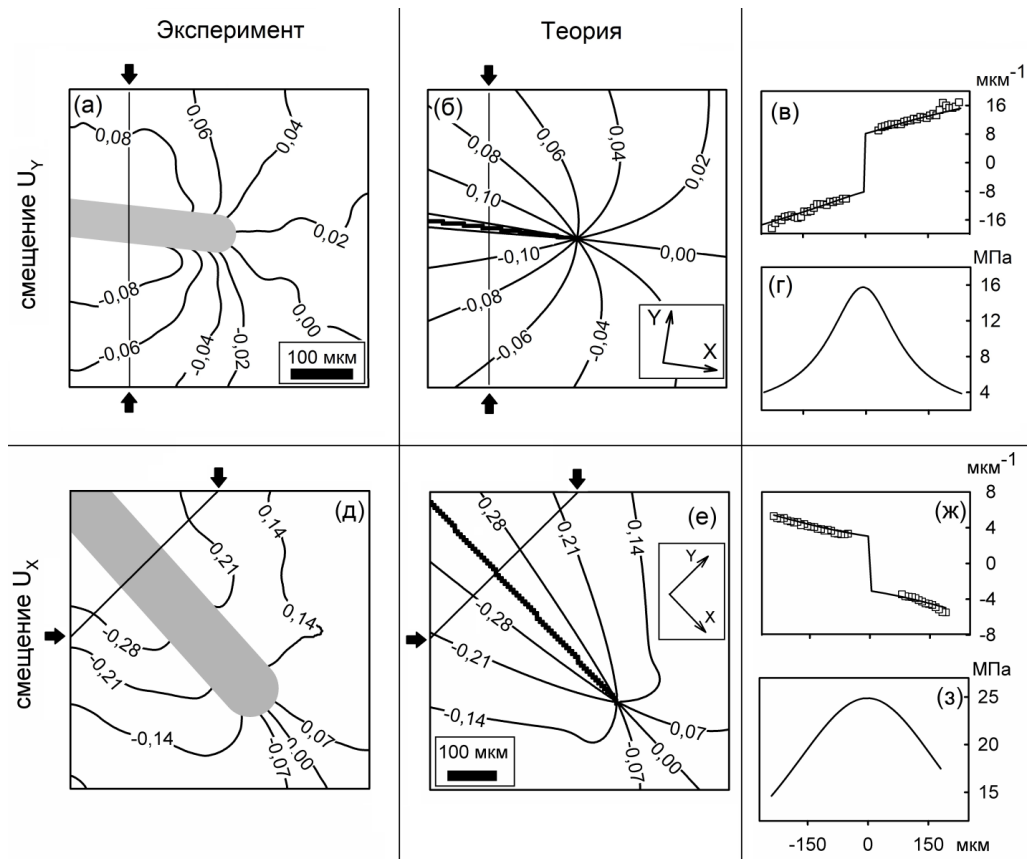


Рис. 2. Поле абсолютной деформации (смещения в мкм) в вершине полосы сдвига металлического стекла на примере винтового (а–г, смещение по оси Y) и краевого (д–з, смещение по оси X) сдвигов, наклоненных под углом 45° к поверхности. Черными стрелками (а, б, д, е) указаны линии сечения, вдоль которых (в, ж) сравнивается обратное значение смещений, полученных экспериментально (квадратные точки) и теоретически (линия).

На (г, з) показано напряжение, оцененное линейно вдоль сечения. Плоскость координат (указана на б, е) развернута так, чтобы ось X лежала вдоль сдвига и указывала на его вершину

отслеживать (рис. 1 г). Кроме того, проявление на полированной поверхности признаков локализованной деформации (например, двойников) существенно изменяет исходный пиксельный рисунок (рис. 1 г). Это также затрудняет работу алгоритма корреляции. С другой стороны, поверхность образца должна быть плоскопараллельной и не иметь ярко выраженного рельефа и перепадов высот, больших, чем глубина фокуса оптической системы. Было найдено, что при заданных настройках глубина фокуса системы, используемой в работе, составляет не более ~ 30 мкм. Таким образом, необходимыми требованиями к исследуемой поверхности являются: 1) плоскопараллельность с шероховатостью не более ~ 30 мкм; 2) наличие четкого, контрастного и неповторяющегося пиксельного рисунка; 3) неизменность пиксельного рисунка в процессе деформации.

Для образцов металлического стекла требованиям (1) и (2) соответствует состояние поверхности после отливки, т. е. без последующей обработки (рис. 1 б). Требование (3) выполняется благодаря сверхлокализованной деформации МС: толщина ПС составляет не более 10 нм [17].

Образцы чистого монокристаллического магния подвергались полировке для удаления химических примесей с поверхности, вызванной электроискровой

резкой – это позволило выполнить требование (1). Для выполнения требований (2) и (3) на поверхность образцов была нанесена дисперсным способом (аэрозоль) акриловая краска (черная матовая). Непрозрачное акриловое покрытие обеспечило хорошую контрастную картину, визуально перекрыв собой двойникование и связанное с ним изменение пиксельного рисунка (рис. 1 д). В то же время высокая эластичность позволила покрытию деформироваться вместе с поверхностью.

Механические испытания производились на базе универсального испытательного стенда [18], состоящего из компактной испытательной машины (Kammrath & Weiss), высокоскоростной видеокамеры (Photron FASTCAM SA3 120K-M2) и оптической системы (Navitar Zoom 6000). Видеокамера Photron (длина записи до ~ 10 секунд) была заменена на камеру UniDAC (частота съемки до 60 кадров в секунду), предназначенную для видеозаписи произвольной длины. Приложенная сила измерялась тензометрическим датчиком нагрузки до 10 кН. Нагрузка и перемещение регистрировались с частотой 50 Гц. Более подробно устройство описано в работе [19].

Сжатие образца МС производилось с постоянной скоростью в 1 мкм/сек. Механическое испытание магниевых

образцов производилось с постоянной скоростью в 10 мкм/сек и контролировалось по перемещению по двум симметричным схемам:

- 1) растяжение до 0,4 мм, возврат в ноль;
- 2) сжатие до 0,4 мм, возврат в ноль.

Расчет полей смещения (абсолютной деформации) был произведен после механических испытаний при помощи специализированной программы для КЦИ – VEDDAS.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате механических испытаний на сжатие образцов металлического стекла было получено и проанализировано несколько десятков полос сдвига. Поле абсолютных деформаций (смещений), разложенное по двум координатам X и Y , разворачивалось вместе с координатами так, чтобы ось X лежала вдоль сдвига и указывала в направлении вершины ПС. Сравнение экспериментальных полей смещения с теоретически рассчитанными полями дисторсий/дислокаций Вольтерра [20] обнаружило их совпадение. Примеры винтового и краевого сдвига представлены на рис. 2 (верхний и нижний ряд соответственно). Отличие в наклоне экспериментальных изолиний смещения (рис. 2 а, 2 д) от теоретических (рис. 2 б, 2 е) вызвано в том числе медианным сглаживанием и ограничением области анализа вблизи линии сдвига (закрашено серым). Исследование образцов после деформации при помощи электронной микроскопии выявило, что сдвиг наклонен под углом 45° к наблюдаемой поверхности [16]. Такой наклон не влияет на величину смещения вдоль краевого сдвига, однако позволяет измерить величину смещения винтового сдвига по оси Z , так как благодаря наклону U_z проецируется на U_y . Результат на рис. 2 приведен с учетом всех вышеописанных разворотов и калькуляций, подробное описание которых приведено в работе [21]. Латеральное разрешение составило не более 0,02 мкм/пиксель, что при оптическом разрешении в 2 мкм/пиксель демонстрирует 100-кратное увеличение точности благодаря субпиксельному алгоритму. Для дополнительной демонстрации совпадения экспериментальных и теоретических данных приведено сравнение величин смещения вдоль секущей линии. Графики (рис. 2 в, 2 ж) отображают величину обратного смещения вдоль линии сечения, демонстрируя, что экспериментальные точки лежат на теоретической кривой в пределах отклонения в 10 %. На графиках (рис. 2 г, 2 з) по сечению оценено напряжение в линейном приближении. Эта оценка также свидетельствует в пользу того, что сдвиг в металлическом стекле порождает дальнедействующее упругое поле.

Полученный результат говорит о том, что дислокационный подход в анализе деформации металлических стекол вполне обоснован (имеются в виду не кристаллографические дислокации, а дислокации в терминах Соммианы [22]). Метод КЦИ показал свою пригодность и высокую эффективность: нет необходимости в дополнительной подготовке образцов, быстрый расчет результатов, высокая точность измерения.

Результаты анализа деформации магния представлены на рис. 3. При одинаковых по величине пределах деформации ($\pm 0,4$ мм) и прочих равных условиях диаграммы нагружения при растяжении (рис. 3 а) и сжатии

(рис. 3 б) существенно отличаются как по форме кривых, так и по заметаемой площади. Максимальная величина нагрузки при сжатии (-621 Н) на порядок выше таковой при растяжении ($+68$ Н), что свидетельствует о существенно большем сопротивлении материала сжатию. Соответственно, диапазон деформации при сжатии $[-17; +19 \text{ \%}]$ также больше такового при растяжении $[-8; +15 \text{ \%}]$. Зубцы сброса нагрузки, видимые на кривых нагружения, соответствуют формированию наиболее крупных двойников, которые могут как попасть в поле наблюдения (например, зубец перед точкой 2 на диаграмме (рис. 3 а) и полоса на кадре 2 (рис. 3 а)), так и сформироваться за его пределами. Видеосъемка всей поверхности базы образца 10×2 позволила бы захватить все двойники на поверхности, однако это снизило бы разрешающую способность в пять раз – с 2 до 0,4 мкм/пиксель. Полученное поле деформации с разрешением не более 1 % свидетельствует о чувствительности метода к смещению одной сотой доли от 2 мкм/пиксель, т. е. 0,02 мкм/пиксель. Шкала деформации в оттенках серого (рис. 3 в) была выполнена с большим шагом для увеличения контрастности и наглядности.

Деформация при растяжении характеризуется образованием небольшого числа поперечных двойников (кадр 2 на рис. 3 а) и их постепенным ростом в ширину (кадр 3 на рис. 3 а). Это приводит к формированию относительно однородных областей растяжения. Возврат в ноль по деформации приводит к почти полной аннигиляции двойников и возникновению небольшого числа двойников обратного знака (кадр 6 на рис. 3 а). Двойникование при испытании на сжатие (рис. 2 б) носит несколько иной характер: число образующихся двойников в несколько раз больше (кадр 2 на рис. 3 б) и не сопровождается их ростом в ширину. Вместо этого в работу включаются дополнительные плоскости (кадр 3 на рис. 3 б). В результате формируется ячеистая структура из недеформированных блоков и сетки сжатия (кадр 4 на рис. 3 б). При возврате по перемещению в ноль раздвойникование происходит лишь частично и сопровождается зарождением (кадр 5 на рис. 3 б) и ростом (кадр 6 на рис. 3 б) двойников растяжения по вышеописанной схеме.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Методом КЦИ выявлено, что поле абсолютных деформаций в вершине полосы сдвига в металлическом стекле совпадает (в пределах 10 % отклонения) с полем абсолютных деформаций дислокации, причем найдены как краевая, так и винтовая компоненты. Это подтверждает применимость дислокационной концепции к описанию локализованной деформации металлических стекол.

2. Метод КЦИ позволил численно измерить распределение относительной деформации при двойниковании магния и выявить различие в механизмах сжатия и растяжения. Обнаружено, что при общей величине деформации до 2 % локальная деформация в двойниках может достигать до 20 %.

3. Показано, что при измерении абсолютных деформаций метод КЦИ благодаря субпиксельному алгоритму демонстрирует разрешение, превышающее оптическое на два порядка, как с покрытием образца, так и без покрытия.

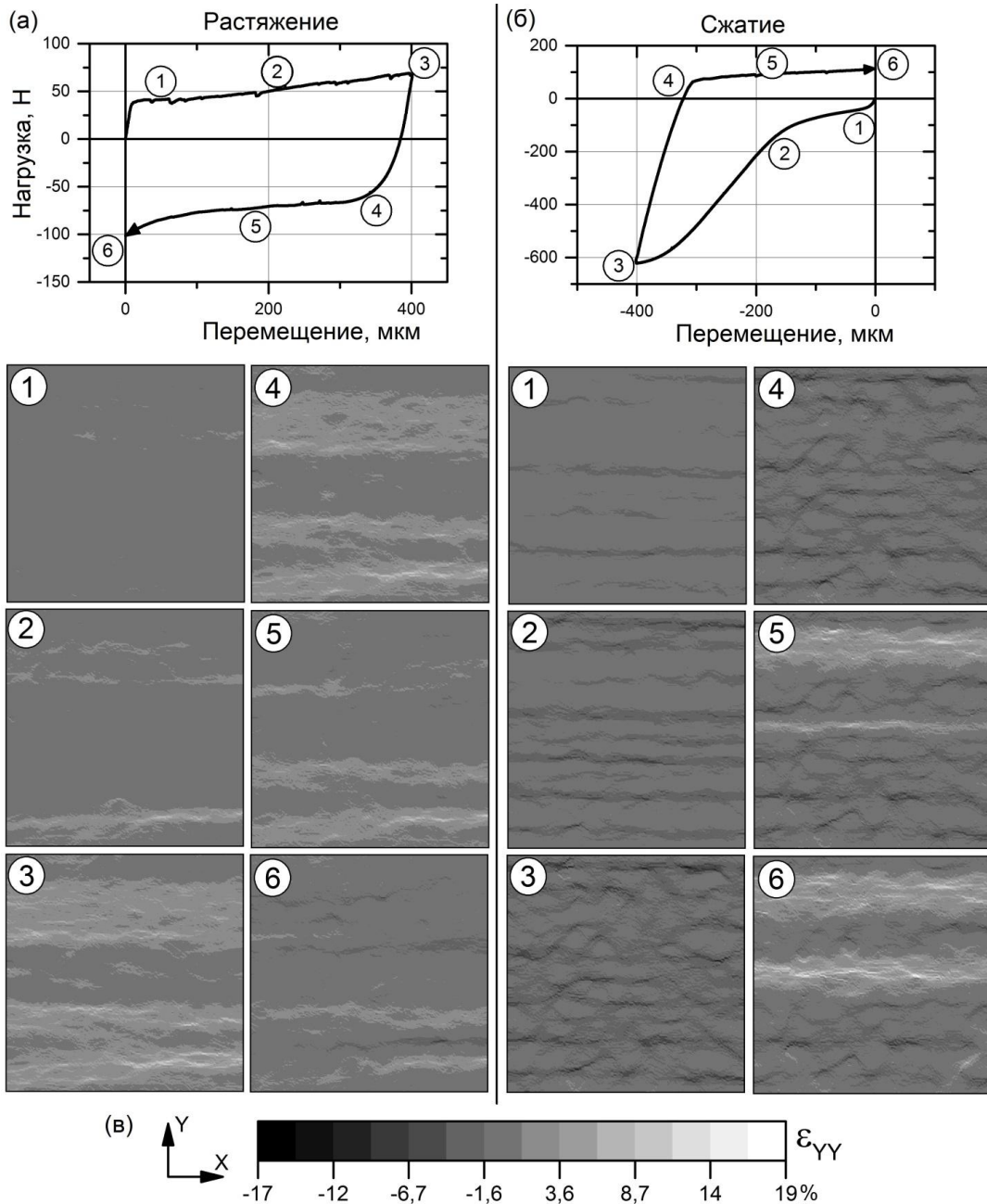


Рис. 3. Эволюция деформированного состояния монокристаллического магния во время растяжения (а) и сжатия (б) с возвратом. Этапы деформации (1)–(6), указанные на кривых нагружения, представлены на кадрах (1)–(6) размером $2 \times 2 \text{ мм}^2$. Шкала продольного компонента деформации ε_{yy} (в) представлена в оттенках серого, от сжатия (темный) к растяжению (светлый)

4. В заключение можно сделать вывод о высокой эффективности метода КЦИ при исследовании микродеформации материалов, в т. ч. единичных актов деформации на примере полосы сдвига и двойника.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках гранта № 15-19-30025.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Martin S., Ullrich C., Rafaja D. Deformation of Austenitic CrMnNi TRIP/TWIP Steels: Nature and Role of the ε -martensite // International Conference on Martensitic Transformations, ICOMAT-2014. Freiberg,

Germany: Elsevier Ltd., 2015. Vol. 2. P. S643–S646.

2. Axinte E. Metallic glasses from “alchemy” to pure science: Present and future of design, processing and applications of glassy metals // Materials and Design. 2012. Vol. 35. P. 518–556.
3. Kawamura Y., Hayashi K., Inoue A., Masumoto T. Rapidly solidified powder metallurgy $\text{Mg}_{97}\text{Zn}_1\text{Y}_2$ alloys with excellent tensile yield strength above 600 MPa // Materials Transactions. 2001. Vol. 42. № 7. P. 1172–1176.
4. Niezrecki C., Avitabile P., Warren C., Pingle P., Helfrick M. A review of digital image correlation

- applied to structural dynamics // AIP Conference Proceedings. 2010. Vol. 1253. P. 219–232.
5. Chu T.C., Ranson W.F., Sutton M.A. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics // *Experimental Mechanics*. 1985. Vol. 25. № 3. P. 232–244.
 6. Tong W. An Evaluation of Digital Image Correlation Criteria for Strain Mapping Applications // *Strain*. 2005. Vol. 41. № 4. P. 167–175.
 7. Yilmaz A. The Portevin – Le Chatelier effect: a review of experimental findings // *Science and Technology of Advanced Materials*. 2011. Vol. 12. № 6. P. 1–16.
 8. Tung S., Sui C. Application of digital-image-correlation techniques in analysing cracked cylindrical pipes // *Sadhana – Academy Proceedings in Engineering Sciences*. 2010. Vol. 35. № 5. P. 557–567.
 9. Sousa A.M.R., Xavier J., Morais J.J.L., Filipe V.M.J., Vaz M. Processing discontinuous displacement fields by a spatio-temporal derivative technique // *Optics and Lasers in Engineering*. 2011. Vol. 49. № 12. P. 1402–1412.
 10. Binkowski I., Schlottbom S., Leuthold J., Ostendorp S., Divinski S.V., Wilde G. Sub-micron strain analysis of local stick-slip motion of individual shear bands in a bulk metallic glass // *Applied Physics Letters*. 2015. Vol. 107. № 22. P. 221902.
 11. Hufnagel T.C., Schuh C.A., Falk M.L. Deformation of metallic glasses: Recent developments in theory, simulations, and experiments // *Acta Materialia*. 2016. Vol. 109. P. 375–393.
 12. Efstathiou C., Sehitoglu H. Strain hardening and heterogeneous deformation during twinning in Hadfield steel // *Acta Materialia*. 2010. Vol. 58. № 5. P. 1479–1488.
 13. Begum S., Chen D.L., Xu S., Luo A.A. Low cycle fatigue properties of an extruded AZ31 magnesium alloy // *International Journal Fatigue*. 2009. Vol. 31. № 4. P. 726–735.
 14. Bettles C., Barnett M. *Advances in wrought magnesium alloys: Fundamentals of processing, properties and applications*. Philadelphia: Woodhead Publishing Ltd., 2012. 463 p.
 15. Vinogradov A., Danyuk A., Khonik V.A. Localized and homogeneous plastic flow in bulk glassy Pd40Cu30Ni10P20: An acoustic emission study // *Journal of Applied Physics*. 2013. Vol. 113. № 15. P. 153503.
 16. Селезнев М.Н., Виноградов А.Ю. Исследование кинетики формирования полос сдвига в металлическом стекле с помощью скоростной видеосъемки // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2013. № 3. С. 256–260.
 17. Pekarskaya E., Kim C.P., Johnson W.L. In situ transmission electron microscopy studies of shear bands in a bulk metallic glass based composite // *Journal of Materials Research*. 2011. Vol. 16. № 9. P. 2513–2518.
 18. Виноградов А.Ю., Костин В.И., Мерсон Д.Л., Селезнев М.Н. Универсальный испытательный стенд: пат. РФ № 155260. Заявка № 2015111379/28; 30.03.2015.
 19. Seleznev M., Vinogradov A. Note: High-speed optical imaging powered by acoustic emission triggering // *Review of Scientific Instruments*. 2014. Vol. 85. № 7. P. 76103.
 20. Volterra V. On the equilibrium of multiply-connected elastic bodies // *Ann. Ec. Norm.* 1907. Vol. 24. № 3. P. 401–517.
 21. Vinogradov A., Seleznev M., Yasnikov I. Dislocation characteristics of shear bands in metallic glasses // *Scripta Materialia*. 2017. Vol. 130. P. 138–142.
 22. Li J.C.M. Dislocations in amorphous metals // *Metallurgical Transactions A*. 1985. Vol. 16. № 12. P. 2227–2230.

REFERENCES

1. Martin S., Ullrich C., Rafaja D. Deformation of Austenitic CrMnNi TRIP/TWIP Steels: Nature and Role of the ϵ -martensite. *International Conference on Martensitic Transformations, ICOMAT-2014*. Freiberg, Germany, Elsevier Ltd., 2015, vol. 2, pp. S643–S646.
2. Axinte E. Metallic glasses from “alchemy” to pure science: Present and future of design, processing and applications of glassy metals. *Materials and Design*, 2012, vol. 35, pp. 518–556.
3. Kawamura Y., Hayashi K., Inoue A., Masumoto T. Rapidly solidified powder metallurgy Mg₉₇Zn₁Y₂ alloys with excellent tensile yield strength above 600 MPa. *Materials Transactions*, 2001, vol. 42, no. 7, pp. 1172–1176.
4. Niezrecki C., Avitabile P., Warren C., Pingle P., Helfrick M. A review of digital image correlation applied to structural dynamics. *AIP Conference Proceedings*, 2010, vol. 1253, pp. 219–232.
5. Chu T.C., Ranson W.F., Sutton M.A. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics. *Experimental Mechanics*, 1985, vol. 25, no. 3, pp. 232–244.
6. Tong W. An Evaluation of Digital Image Correlation Criteria for Strain Mapping Applications. *Strain*, 2005, vol. 41, no. 4, pp. 167–175.
7. Yilmaz A. The Portevin – Le Chatelier effect: a review of experimental findings. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2011, vol. 12, no. 6, pp. 1–16.
8. Tung S., Sui C. Application of digital-image-correlation techniques in analysing cracked cylindrical pipes. *Sadhana – Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 2010, vol. 35, no. 5, pp. 557–567.
9. Sousa A.M.R., Xavier J., Morais J.J.L., Filipe V.M.J., Vaz M. Processing discontinuous displacement fields by a spatio-temporal derivative technique. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, vol. 49, no. 12, pp. 1402–1412.
10. Binkowski I., Schlottbom S., Leuthold J., Ostendorp S., Divinski S.V., Wilde G. Sub-micron strain analysis of local stick-slip motion of individual shear bands in a bulk metallic glass. *Applied Physics Letters*, 2015, vol. 107, no. 22, p. 221902.
11. Hufnagel T.C., Schuh C.A., Falk M.L. Deformation of metallic glasses: Recent developments in theory, simulations, and experiments. *Acta Materialia*, 2016, vol. 109, pp. 375–393.
12. Efstathiou C., Sehitoglu H. Strain hardening and heterogeneous deformation during twinning in Hadfield steel. *Acta Materialia*, 2010, vol. 58, no. 5, pp. 1479–1488.
13. Begum S., Chen D.L., Xu S., Luo A.A. Low cycle fatigue properties of an extruded AZ31 magnesium alloy. *International Journal Fatigue*, 2009, vol. 31, no. 4, pp. 726–735.

14. Bettles C., Barnett M. *Advances in wrought magnesium alloys: Fundamentals of processing, properties and applications*. Philadelphia, Woodhead Publishing Ltd., 2012. 463 p.
15. Vinogradov A., Danyuk A., Khonik V.A. Localized and homogeneous plastic flow in bulk glassy Pd₄₀Cu₃₀Ni₁₀P₂₀: An acoustic emission study. *Journal of Applied Physics*, 2013, vol. 113, no. 15, p. 153503.
16. Seleznev M.N., Vinogradov A.Yu. Study of a kinetics of shear bands in metallic glass using a high speed digital imaging. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2013, no. 3, pp. 256–260.
17. Pekarskaya E., Kim C.P., Johnson W.L. In situ transmission electron microscopy studies of shear bands in a bulk metallic glass based composite. *Journal of Materials Research*, 2011, vol. 16, no. 9, pp. 2513–2518.
18. Vinogradov A.Yu., Kostin V.I., Merson D.L., Seleznev M.N. *Universalny ispytatelny stend* [Universal Test Bench], patent RF no. 155260, 2015.
19. Seleznev M., Vinogradov A. Note: High-speed optical imaging powered by acoustic emission triggering. *Review of Scientific Instruments*, 2014, vol. 85, no. 7, p. 76103.
20. Volterra V. On the equilibrium of multiply-connected elastic bodies. *Ann. Ec. Norm.*, 1907, vol. 24, no. 3, pp. 401–517.
21. Vinogradov A., Seleznev M., Yasnikov I. Dislocation characteristics of shear bands in metallic glasses. *Scripta Materialia*, 2017, vol. 130, pp. 138–142.
22. Li J.C.M. Dislocations in amorphous metals. *Metallurgical Transactions A*, 1985, vol. 16, no. 12, pp. 2227–2230.

**THE APPLICATION OF DIGITAL IMAGE CORRELATION METHOD
FOR MEASURING LOCALIZED DEFORMATION ON THE EXAMPLE
OF TWINNING OF MAGNESIUM AND SHEAR BANDS IN METALLIC GLASS**

© 2016

M.N. Seleznev, junior researcher of the Research Institute of Progressive Technologies

E.V. Vasiliev, junior researcher of the Research Institute of Progressive Technologies

Togliatti State University, Togliatti (Russia)

A.Yu. Vinogradov, PhD (Physics and Mathematics), Deputy Director of the Research Institute of Progressive Technologies, professor of Chair of Engineering Design and Materials

Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim (Norway)

Keywords: digital image correlation; DIC; deformation field; localized plastic deformation; mechanical testing; metallic glasses; shear bands; magnesium; twinning.

Abstract: Digital image correlation (DIC) method is widely used all over the world when solving various tasks such as the control and monitoring of vibration of bridges, wind-power generators, snowslides, following the objects transfer in security systems and crash-tests, measuring local deformations and their distribution within the objects of various scale-levels, from micro- up to macro-. This paper covers the solution of the last specified problem, which is the measuring of deformation fields formed in the result of localized deformation using the DIC method. As the objects of the research, the authors selected such phenomena as the shear bands formation in metallic glasses and the twinning in magnesium, actively discussed by the academic community nowadays. The authors carried out the mechanical testing of samples with video-registration of the deformable surface and followed up the procedure of sample surface preparing, and data getting and processing using the DIC method. The deformation fields on the surfaces of metallic glass and magnesium samples are measured. It is shown, that the experimentally measured field of displacement around the shear band tip to a high accuracy matches the theoretically calculated dislocation field in the isotropic material. The authors identified that the deformation field of magnesium sample changes the morphology asymmetrically during the loading cycle and the local deformation in twins amounts up to 20 %. The application of sub-pixel algorithm allowed achieving the resolution that is two orders greater than the resolution of the optical system used in the study. The authors concluded on the DIC method high efficiency when studying microdeformation of materials, including the deformation events on the example of shear bands and a twinning.