

DOI: 10.7242/1999-6691/2014.7.2.17

УДК 620.179.18

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ VIC-3D, РЕАЛИЗУЮЩЕГО МЕТОД КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, В ПРИЛОЖЕНИИ К ИССЛЕДОВАНИЮ ПОЛЕЙ НЕУПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ

Т.В. Третьякова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация

В настоящей работе рассмотрены особенности использования видеосистемы Vic-3D со специализированным программным обеспечением, реализующим метод корреляции цифровых изображений, в приложении к экспериментальному изучению полей неупругих деформаций в условиях проявления эффекта прерывистой текучести материала и формирования полос Портевена–Ле-Шателье. Обсуждаются методические аспекты численной обработки экспериментальных данных, получаемых в испытаниях на одноосное растяжение плоских образцов из алюминий-магниевого сплава AlMg2m. Показан алгоритм нахождения оптимальных параметров корреляционной обработки (размера подмножества и величины шага по координате), проведена оценка их влияния на точность анализа, на сходимость решения, на степень детализации полей перемещений и деформаций, на размер краевой зоны и временные затраты вычислений. В качестве примера представлены результаты построения неоднородных полей продольных деформаций для момента времени, соответствующего продвижению по поверхности образца полосы локализованного пластического течения.

Ключевые слова: алюминий-магниевый сплав, деформация Людерса, прерывистая текучесть, эффект Портевена–Ле Шателье, корреляция цифровых изображений, критерий математической оценки соответствия изображений, поля деформаций

SINGULARITIES IN USING VIC-3D™ DIGITAL IMAGE CORRELATION SOFTWARE AND ITS APPLICATION TO THE STUDY OF INELASTIC STRAIN FIELDS

T.V. Tretyakova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

The present paper deals with the numerical processing of experimental data recorded by the Vic-3D digital image correlation measurement system, which provides estimation of the strain fields in the tension tests of flat Al-Mg alloy specimens. The influence of the subset and the step size selection on the inelastic strain field configuration has been studied by the algorithms for motion estimation in successive images. It is shown that these parameters have different effects on the accuracy of the digital image correlation analysis, the size of the marginal zone and the refinement of the strain fields. The paper contains the results of estimation of inhomogeneous strain fields due to the Portevin–Le Chatelier effect in the tension tests of the Al-Mg alloy flat specimens obtained using the Vic-3D digital image correlation measurement system.

Key words: aluminum-magnesium alloy, Lüder's deformation, jerky flow, Portevin–Le Chatelier effect, digital image correlation, optimization criteria for pattern matching, strain field

1. Введение

В настоящее время актуальным вопросом механики деформируемого твердого тела является проведение комплексных экспериментальных исследований фундаментальных закономерностей неупругого поведения конструкционных металлов и сплавов в условиях проявления пространственно-временной неоднородности пластического деформирования на основе совместного использования современного научного испытательного оборудования и высокоточных средств регистрации и измерений [1, 2]. Применение аппаратуры с многоканальным сбором данных требует решения вопросов численной обработки экспериментальных данных и представления результатов исследований [3].

В данной работе рассмотрен высокоэффективный метод корреляции цифровых изображений (Digital Image Correlation — DIC), предложенный в начале 80-х годов и активно развиваемый группой исследователей из университета Южной Каролины (США) [4, 5]. Метод нашел широкое применение в области экспериментальной механики, в частности, для получения новых данных о пространственно-временной неоднородности пластического течения материала [6–16]. Он позволяет: восстанавливать поле векторов перемещений на поверхности исследуемых образцов или элементов конструкций путем сопоставления опорного изображения (фотографии объекта в исходном состоянии) с изображениями, снятыми в процессе нагружения или эксплуатации; изучать закономерности развития неоднородных полей деформаций в областях концентраторов напряжений; исследовать процессы деформирования, накопление повреждений, развитие трещин и разрушение материалов. С помощью метода осуществляется анализ напряженно-деформированного состояния на поверхности полунатурных образцов различной геометрии, элементов конструкций и сооружений, оценка остаточных напряжений путем сочетания метода сверления отверстий и регистрации деформационного отклика [1, 4, 5, 17, 20–25].

Интерес представляет получение новых экспериментальных данных, характеризующих явление запаздывания текучести материала [13–16], закономерности формирования и распространения полос локализованной пластической деформации (полосы Людерса) вдоль растягиваемого образца на стадии формирования зуба и площадки текучести [6, 7, 9], особенности поведения при скачкообразном характере деформирования, известного в научной литературе как эффект Савара–Массона (при силовом нагружении) или эффект Портевена–Ле Шателье (в условиях кинематического нагружения) [6–28].

Проведено сопоставление исследуемых эффектов механического поведения металлов и сплавов, в частности закономерностей развития неоднородных полей деформаций, в условиях формирования зон локализованного пластического течения материала в зависимости от типа прерывистой текучести с аналогичными эффектами, изучаемыми другими авторами методами фотоупругости, двухэкспозиционной спекл-фотографии, инфракрасного сканирования, корреляции цифровых изображений, регистрации сигналов акустической эмиссии для различных сплавов и условий внешних воздействий [6–11, 18, 19, 29–33]. Сравнение подтвердило качественное соответствие результатов [1, 2, 17, 20, 34].

Настоящая работа посвящена методическим аспектам численной обработки экспериментальных данных, получаемых при использовании метода корреляции цифровых изображений и цифровой оптической системы регистрации полей деформаций в испытаниях на одноосное растяжение плоских образцов из алюминий-магниевого сплава. Рассмотрены вопросы численного анализа данных, обеспечения точности построения полей перемещений и деформаций в зависимости от степени дискретизации области расчета. Проведена оценка влияния вычислительных параметров корреляционной обработки (размера подмножества и величины шага по координате) на сходимость решения. Обсуждаются особенности применения программного обеспечения Vic-3D при математической обработке цифровых изображений с целью изучения механических процессов деформирования материалов.

2. Особенности численной обработки экспериментальных данных, полученных видеосистемой анализа полей деформаций

Экспериментальное исследование неупругого поведения конструкционного алюминий-магниевого сплава АМг2м (ГОСТ 4784-97) в условиях проявления эффектов прерывистой текучести и формирования областей локализованного пластического деформирования [20] осуществлялось с помощью бесконтактной трёхмерной цифровой оптической системы Vic-3D (Рис. 1а). В состав видеосистемы входят: две цифровые чёрно-белые камеры с разрешением 4,0 Мп и соответствующей ему максимальной скоростью съёмки 15–20 кадров в секунду, а также комплекты сменных объективов к камерам; специализированное программное обеспечение для управления процессом съёмки — Vic-Snap, и постобработки зарегистрированных фотографий поверхности исследуемого объекта — Vic-3D; система подсветки поверхности образца; блок синхронизации работы видеосистемы с контроллером испытательной машины; набор калибровочных таблиц [1, 17, 20, 25–28, 34]. Математический аппарат программного обеспечения оптической системы основан на методе корреляции цифровых изображений.

Одноосному растяжению подвергались плоские образцы в форме двухсторонних лопаток толщиной 2,0 мм, длиной рабочей части 50,0 мм и различной шириной рабочей части 4,0 мм, 8,0 мм, 12,0 мм и 20,0 мм. Механическое нагружение проводилось на универсальной сервогидравлической двухосевой испытательной системе Instron 8850 с постоянной скоростью деформирования материала $\dot{\epsilon} = 1,67 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ при комнатной температуре 23°C. Видеофиксация процесса деформирования производилась камерами с объективами Schneider Kreuznach Xenoplan 2,0/28-0901. Скорость съёмки составляла 15 кадров в секунду с установленным разрешением камер 4,0 Мп.

На рисунке 1б представлена характерная диаграмма деформирования алюминий-магниевого сплава, полученная для образца с рабочей частью длиной 50,0 мм и шириной 12,0 мм. По оси абсцисс отложено напряжение (МПа), по оси ординат — деформация. Кривая имеет стадию формирования «зуба» и площадки текучести, протяжённую стадию упрочнения материала, а также участок закритического деформирования [1]. Следует отметить наличие большого числа локальных спадов нагрузки, или «зубцов», на диаграмме, известное в научной литературе как явление прерывистой текучести [6–8, 18, 19].

Проведение испытаний с использованием видеосистемы Vic-3D включает в себя несколько этапов. Подготовительный этап состоит в нанесении на поверхность исследуемого объекта контрастного мелкодисперсного напыления, установке и настройке цифровых черно-белых камер, калибровке камер, настройке испытательной системы и синхронизации процесса регистрации фотографий с контроллером испытательной машины. Далее следует этап нагружения согласно программе исследований с одновременной видеозаписью поверхности образца. После проведения механических испытаний — на этапе постобработки, подбираются оптимальные параметры корреляционного анализа цифровых фотографий для оценки перемещений локальных участков на поверхности исследуемого материала и вычисляются компоненты деформации.

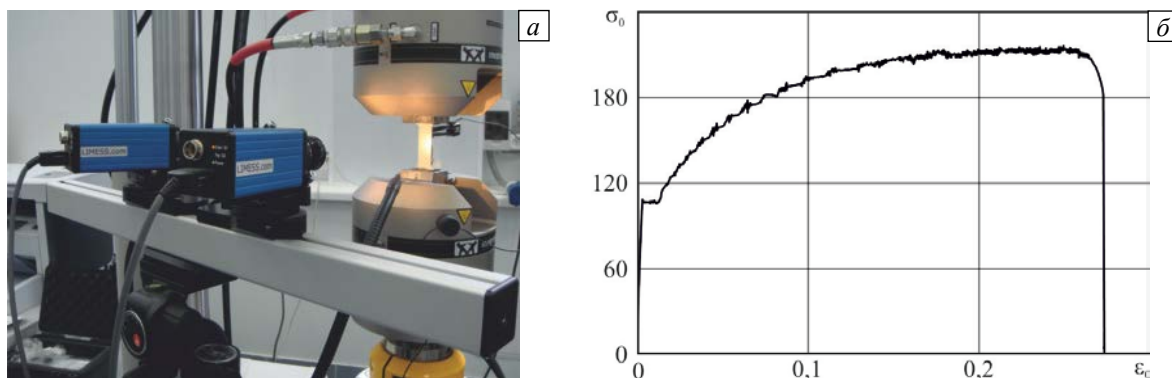


Рис. 1. Фотография цифровой оптической системы при испытании на одноосное растяжение плоских образцов Al-Mg сплава с регистрацией полей деформаций (а) и характерная диаграмма деформирования для исследуемого материала (б)

Необходимо отметить, что с целью оценки достоверности данных, снимаемых трёхмерной цифровой оптической системой Vic-3D, проведен ряд тестовых испытаний при помощи навесного динамического датчика осевых деформаций [34]. Методика определения погрешности измерений видеосистемы заключалась в одновременной регистрации процесса деформирования на поверхности плоского образца с помощью дополнительного модуля в программном обеспечении видеосистемы, так называемого «виртуального экстензометра», и навесного экстензометра. Показано, что видеосистема позволяет находить значения деформации с точностью, сопоставимой с точностью навесного динамического датчика осевых деформаций, максимальная погрешность измерений которого не превышает +0,059% и не менее –0,022% измеряемой величины (согласно сертификату заводских испытаний).

Своё название метод корреляции цифровых изображений получил благодаря заложенному в алгоритм построения векторов перемещений критерию нормированной кросс-корреляции [5, 35], необходимому при установлении соответствия между участками двух изображений:

$$\chi_{NCC}^2 = 1 - \frac{\sum F(x, y)G(x', y')}{\sqrt{\sum F(x, y)^2 \sum G(x', y')^2}}, \quad (1)$$

где $F(x, y)$ — значения уровней интенсивности (яркости) пикселей с координатами (x, y) для первого (опорного) изображения, $G(x', y')$ — значения уровней яркости пикселей с координатами (x', y') для второго (последующего) изображения.

В программном обеспечении видеосистемы Vic-3D предусмотрены следующие корреляционные критерии математической оценки соответствия цифровых изображений: критерий суммы квадратов разностей; критерий нормированной суммы квадратов разностей; критерий нормированной суммы квадратов разностей с нулевым средним [5, 35–40]. В настоящей работе используется критерий нормированной суммы квадратов разностей как наименее чувствительный к изменению освещенности (яркости) образца в процессе деформирования и обеспечивающий наилучшее сочетание временных затрат и точности результатов [5]:

$$\chi_{NSSD}^2 = \sum \left(\frac{\sum F(x, y)G(x', y')}{\sum G(x', y')^2} G(x', y') - F(x, y) \right)^2. \quad (2)$$

Одно из преимуществ метода корреляции цифровых изображений — это возможность проведения измерений как при малых, так и при больших значениях деформаций, что позволяет исследовать широкий класс материалов, включая керамики, горные породы, металлы, сплавы, полимерные и композиционные материалы, резины [1, 5, 28]. При значительном уровне деформаций материала (свыше 100%) в программном обеспечении применяется пошаговый корреляционный алгоритм с целью минимизации погрешности математической оценки изображений. При этом каждое изображение, например снятое в момент времени $t = t_2$, сравнивается с предыдущим, снятым в момент времени $t = t_1$, а не с опорным (при $t = t_0$). В случае регистрации процессов деформирования материала двумя камерами корреляционная обработка цифровых изображений проводится в двух направлениях: вертикальном (сравниваются опорное (при $t = t_0$) и текущее (при $t = t_n$) изображения) и горизонтальном (сравниваются левое и правое изображения, полученные с помощью двух камер в один и тот же момент времени).

При корреляционной обработке цифровых фотографий векторы смещений вычисляются не в каждой отдельной точке изображения (пикселе), а по небольшим локальным областям или подмножествам размером $X \times X$ пикселей, которые образуются путем дискретизации области исследования [5]. Размер подмножеств устанавливается таким, чтобы представленная в дискретном виде область обладала характерной структурой или уникальностью распределения пикселей для однозначности идентификации локальных областей на изображении. Выбор размеров подмножеств оказывает существенное влияние на точность корреляционного анализа, степень детализации полей перемещений и деформаций, а также на размер краевой зоны. Эта зона имеет место на краю образца или вблизи концентраторов напряжений (отверстий, включений, трещин), и корректное установление здесь перемещений не представляется возможным. Ширина краевой зоны равняется половине линейного размера X . Величина шага ΔX — это еще один параметр, который необходимо знать для работы алгоритма построения полей векторов перемещений. Он обуславливает процедуру поиска и идентификации участков изображений, задает расстояние в пикселях между точками (центральными пикселями подмножеств). Так, при шаге в 1 пиксель корреляционному анализу подвергается каждый пиксель области исследования, при шаге в 2 пикселя — каждый второй пиксель изображения как в вертикальном, так и горизонтальном направлениях.

Выбор размера подмножества и величины шага осуществляется в соответствии с условиями производимой съёмки, с результатами калибровки стереосистемы, а также с учетом зависимости от геометрических параметров объекта исследования. Нерезкая фокусировка, сильные изменения степени освещенности отдельных участков поверхности образца, яркие блики на образце, отслоение мелкодисперсного покрытия от поверхности в связи с разрушением материала или развитием дефектных структур и трещин существенным образом сказываются на точности регистрации данных в эксперименте. Также на точность корреляционной обработки цифровых фотографий влияет эпиполярная ошибка проецирования [5], которая вычисляется при калибровке стереосистемы и характеризует точность определения трёхмерных координат регистрируемого объекта по изображениям двух камер, расположенных под углом друг к другу.

3. Оценка влияния размера подмножества и величины шага на результаты корреляционной обработки изображений

С целью подбора оптимальных параметров корреляционной обработки для изучения закономерностей пространственно-временной неоднородности пластического деформирования алюминивно-магниевого сплава проведена серия вычислений полей перемещений и деформаций для одного кадра съёмки при различных значениях размера подмножества (X) и величины шага (ΔX). При установлении соответствия изображений для каждого подмножества система Vic-3D вычисляет доверительный интервал соответствия (σ) в текущей точке изображения (в пикселях) [5]. При этом размер подмножества ($X \times X$ пикселей) является допустимым, если среднее значение доверительного интервала не превышает $\sigma \leq 0,01$; при значениях доверительного интервала в текущей точке $\sigma \geq 0,05$ данные исключаются из последующих вычислений [5, 35].

Результаты корреляционного анализа и данные построения полей деформаций приведены на рисунке 2 для момента времени, соответствующего продвижению полосы Портевена–Ле Шателье по поверхности плоского образца с рабочей частью длиной 50,0 мм и шириной 12,0 мм при $\sigma = 115,3$ МПа. Размер подмножества изменялся в интервале $X = 9 \div 79$ пикселей, шаг имел фиксированное значение $\Delta X = 3$. Представлены зависимости от линейного размера X максимального (σ_{\max}), среднего (σ_{mean}) и минимального (σ_{\min}) значений доверительного интервала (Рис. 2а) и стандартного отклонения доверительного интервала (s) (Рис. 2б), который вычисляется по формуле:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2},$$

где N — количество точек в области исследования, \bar{x} — среднее арифметическое выборки $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$

[5, 36]. Из полученных данных следует, что подмножество размером 19×19 пикселей является минимально допустимым для исследуемой области. Тем не менее, в отдельных точках изображения максимальное значение доверительного интервала соответствия достигает значения $\sigma_{\max} = 0,01940$. Для уменьшения шума и повышения точности корреляционной обработки следует устанавливать размер подмножества, при котором $\sigma_{\max} \leq 0,01$. Для данного изображения оптимальным размером локальных областей оказался размер 29×29 пикселей, для которого $\sigma_{\min} = 0,00346$, $\sigma_{\max} = 0,01021$, $\sigma_{\text{mean}} = 0,00637$ и $s = 0,00134$.

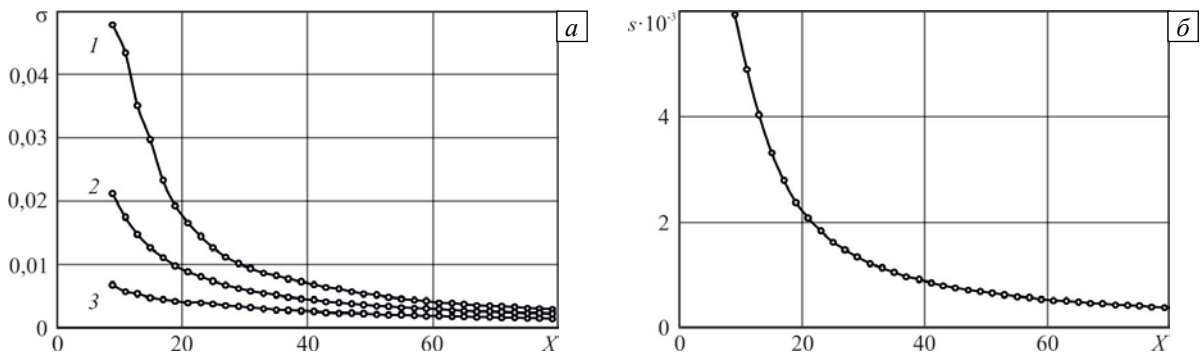


Рис. 2. Влияние размера подмножества X на результаты вычисления максимального (кривая 1), среднего (2) и минимального (3) значений доверительного интервала соответствия (а); характер стандартного отклонения доверительного интервала соответствия (б)

Если цель экспериментального исследования заключается в изучении закономерностей неупругого поведения материалов при больших значениях деформаций, то следует учитывать, что они могут привести к значительным искажениям контрастной мелкодисперсной структуры изображения в сравнении с опорным изображением. Во избежание этого целесообразно задавать значение параметра X выше минимально допустимого. Необходимо отметить, что увеличение размера подмножеств приводит к сглаживанию данных в области сканирования, кроме того, расширяет границы краевой зоны. Эффект сглаживания данных проиллюстрирован на рисунке 3 в виде зависимостей значений продольных деформаций от размера подмножества. С возрастанием X наблюдается приближение величины максимальных и минимальных перемещений и деформаций к средним значениям.

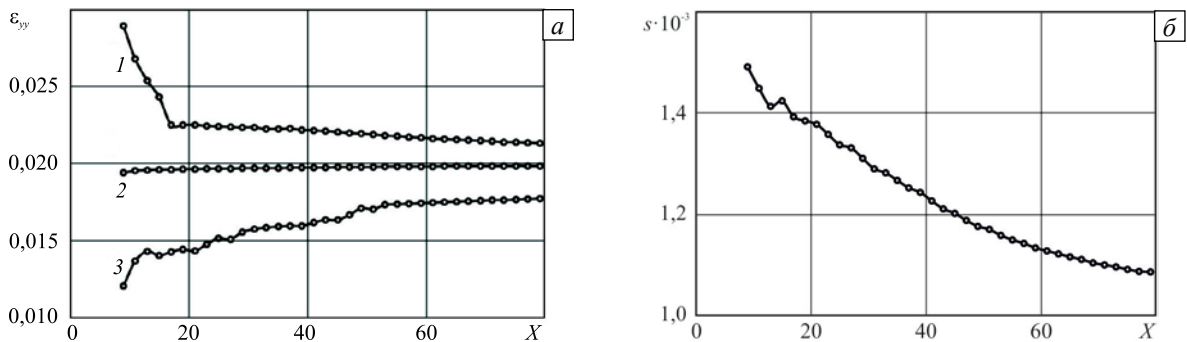


Рис. 3. Влияние размера подмножества на результаты вычисления максимального (кривая 1), среднего (2) и минимального (3) значений осевых деформаций (а); характер стандартного отклонения доверительного интервала осевых деформаций (б)

После подбора оптимального размера подмножества устанавливается величина шага ΔX . Итерационный подбор требуемой величины ΔX для подмножества размером 29×29 пикселей производился в интервале $1 \div 29$ пикселей. В связи с тем, что значение шага не влияет на точность корреляционной обработки цифровых изображений (Рис. 4), подбор величины шага должен осуществляться в соответствии с целью исследования. Параметр ΔX оказывает влияние на степень

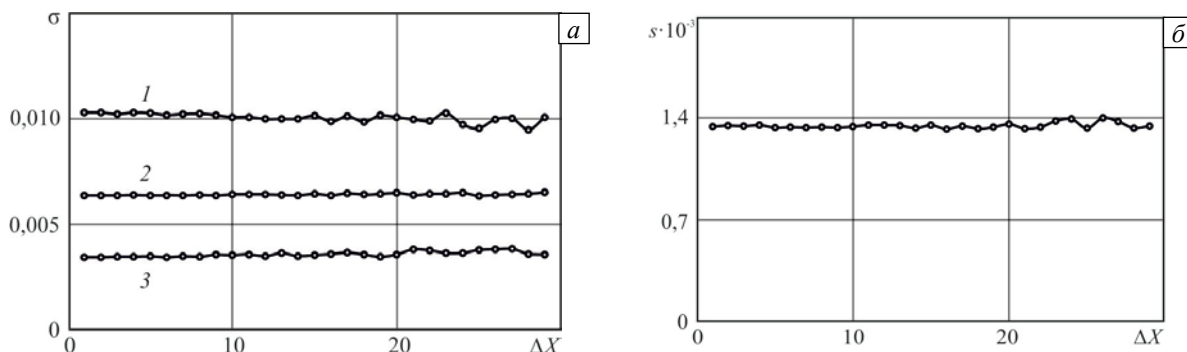


Рис. 4. Влияние величины шага на результаты вычисления максимального (1), среднего (2) и минимального (3) значений доверительного интервала (а); характер стандартного отклонения доверительного интервала соответствия (б)

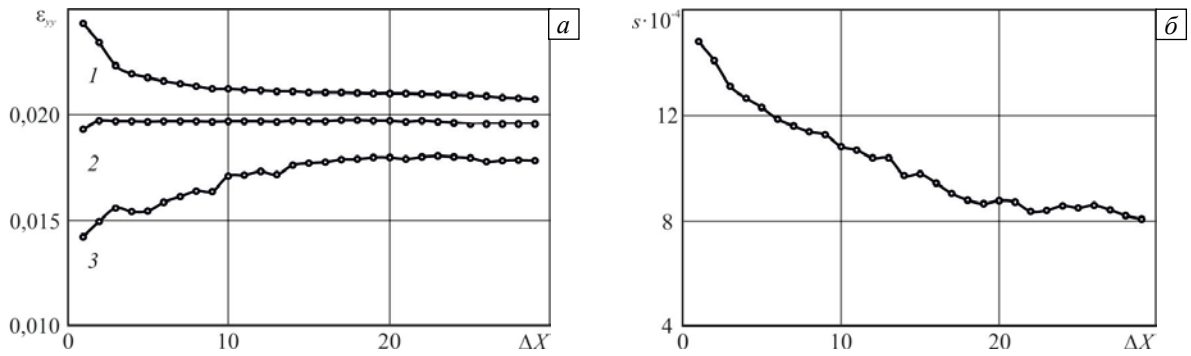


Рис. 5. Влияние величины шага на результаты вычисления максимального (1), среднего (2) и минимального (3) значений осевых деформаций (а); характер стандартного отклонения доверительного интервала осевых деформаций (б)

детализации полей перемещений и деформаций (Рис. 5). Так, при $\Delta X = 1$ общее количество точек вычисления для текущей области исследования равняется $N = 84527$. При увеличении шага всего на 1 пиксель (при $\Delta X = 2$) число точек уменьшается в четыре раза и составляет $N = 21232$ при тех же размерах области исследования.

На рисунке 6 представлены результаты оценки влияния на степень детализации данных размера X и величины шага в алгоритме численной оценки соответствия изображений. Следует пояснить начальный участок кривой на рисунке 6а. Меньшее значение N для подмножеств размером 9×9 , 11×11 и 13×13 пикселей свидетельствует о том, что в локальных областях изображения распределение пикселей оказалось не «уникальным», и оценка соответствия ряда точек области расчета привела к значениям доверительного интервала соответствия $\sigma_{\max} \geq 0,05$, поэтому значительное число точек было исключено из алгоритма построения векторов смещений на поверхности.

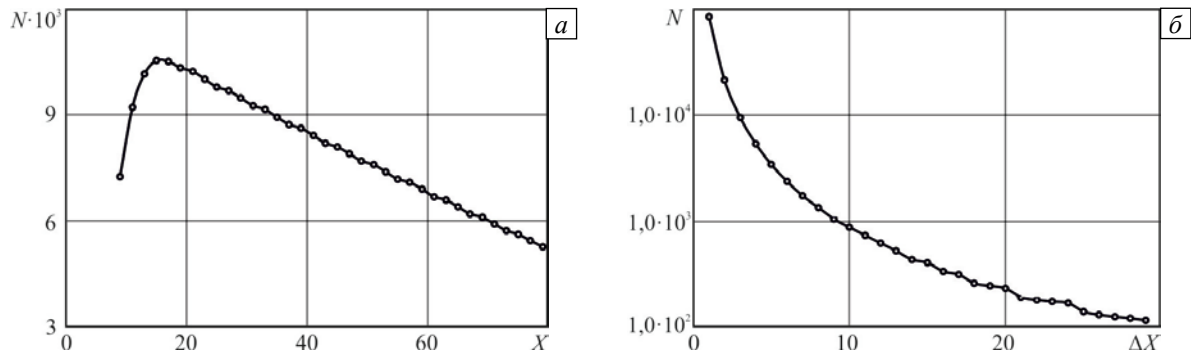


Рис. 6. Влияние линейного размера подмножества (а) и величины шага (б) на детализацию полей перемещений и деформаций

Влияние параметров корреляционного анализа изображений на конфигурацию неоднородных полей неупругих деформаций проиллюстрировано на примере возникновения и распространения полос локализованной пластической деформации (полос Портевена–Ле Шателье) в условиях проявления прерывистой текучести при испытаниях на одноосное растяжение плоских образцов. На рисунках 7 и 8 приведены, соответственно, поля продольных деформаций (ε_{yy}) и скоростей продольных деформаций ($\dot{\varepsilon}_{yy}$), полученные для подмножества размером 29×29 пикселей при величине шага $\Delta X = 1$, $\Delta X = 3$ и $\Delta X = 5$. Проведение вычислений для каждого пикселя цифрового изображения поверхности исследуемого объекта, то есть при $\Delta X = 1$ пиксель, является предпочтительным для изучения тонких эффектов деформирования и разрушения материалов, но в то же время требует больших вычислительных ресурсов: время обработки экспериментальных данных составило 1922,48 с (для сравнения: при $\Delta X = 3$ время обработки 182,11 с; при $\Delta X = 5$ — 73,25 с) при условии использования одного и того же компьютера Intel Core 2 Duo P8800, 2,66 ГГц, 1,98 ГБ ОЗУ. Имеющиеся данные согласуются с результатами других авторов, работы которых посвящены математическим алгоритмам оценки деформаций материала по изображениям поверхности, а также методическим особенностям применения метода корреляции цифровых изображений [5, 35–37, 39].

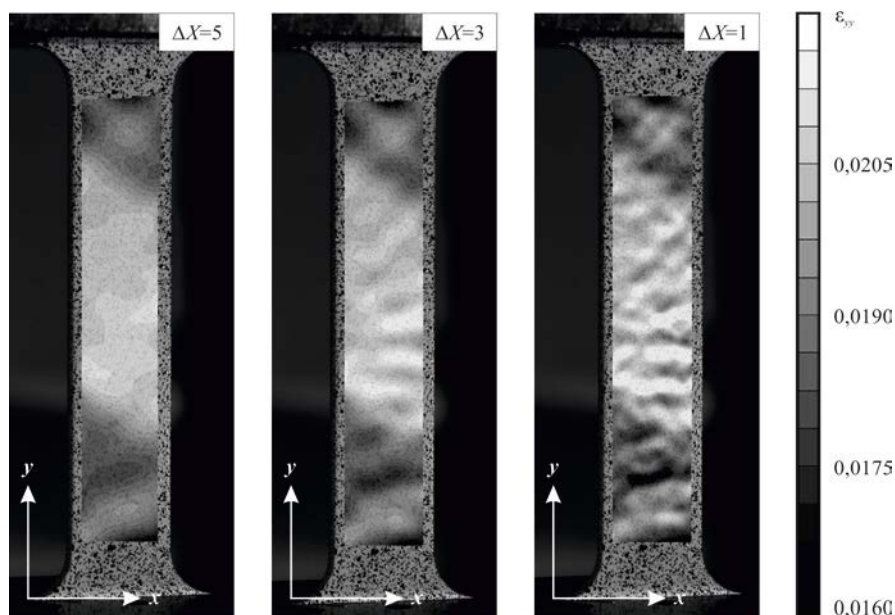


Рис. 7. Неоднородные поля продольных деформаций при различных величинах шага; размер подмножеств 29×29 пикселей

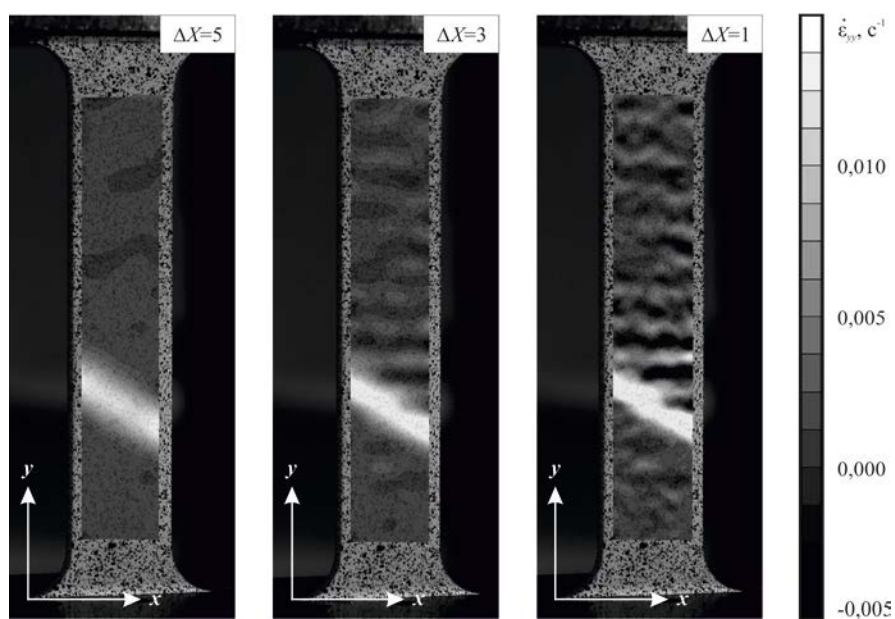


Рис. 8. Неоднородные поля скоростей продольных деформаций при различных величинах шага; размер подмножеств 29×29 пикселей

Следует сделать одно существенное замечание. В связи с тем, что параметры корреляционной обработки изображений оказывают влияние на построение полей перемещений и деформаций, при представлении результатов, полученных методом DIC, необходимо указывать параметры регистрирующей аппаратуры (разрешение и тип камер), размер подмножества, величину шага, количество текущих точек в области исследования.

4. Заключение

В работе рассмотрены методические аспекты применения метода корреляции цифровых изображений и бесконтактной трёхмерной цифровой оптической системы Vic-3D для изучения закономерностей неупругого поведения конструкционных металлов и сплавов. Представлены результаты подбора оптимальных параметров корреляционной обработки цифровых фотографий на примере численного определения неоднородных полей пластических деформаций в условиях проявления эффектов прерывистой текучести и формирования полос Портевена–Ле Шателье. Проведена оценка влияния размера

подмножества и величины шага на точность корреляционного анализа, степень детализации полей перемещений и деформаций на поверхности образца, размер краевой зоны и временные затраты на математическую обработку фотографий. Приведены результаты построения неоднородных полей продольных деформаций и полей скоростей продольных деформаций, инициированных эффектом Портевена–Ле Шателье в испытаниях на одноосное растяжение плоских образцов из алюминий-магниевого сплава при различных значениях величины шага.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 13-08-00304-а, 13-08-96016-р_урал_а, 14-08-31387-мол).

Литература

1. Вильдеман В.Э., Третьяков М.П., Третьякова Т.В., Бульбович Р.В., Словигов С.В., Бабушкин А.В., Ильиных А.В., Лобанов Д.С., Ипатова А.В. Экспериментальные исследования свойств материалов при сложных термомеханических воздействиях / Под ред. В.Э. Вильдемана. – М.: Физматлит, 2012. – 204 с.
2. Вильдеман В.Э., Бабушкин А.В., Третьяков М.П., Ильиных А.В., Третьякова Т.В., Ипатова А.В., Словигов С.В., Лобанов Д.С. Механика материалов. Методы и средства экспериментальных исследований: учебное пособие / Под ред. В.Э. Вильдемана. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2011. – 165 с.
3. Адамов А.А. Численная обработка экспериментальных данных, полученных с использованием современных испытательных машин, для идентификации реологических моделей // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2013. – Т. 6, № 2. – С. 131-139. DOI
4. Sutton M.A., Wolters W.J., Peters W.H., Ranson W.F., McNeill S.R. Determination of displacement using an improved digital correlation method // Image Vision Comput. – 1983. – Vol. 1, no. 3. – P. 133-139. DOI
5. Sutton M.A., Orteu J.-J., Schreier H.W. Image correlation for shape, motion and deformation measurements. – Columbia, SC, USA: University of South Carolina, 2009. – 364 p.
6. Криштал М.М. Неустойчивость и мезоскопическая неоднородность пластической деформации (аналитический обзор). Часть I. Феноменология зуба текучести и прерывистой текучести // Физ. мезомех. – 2004. – Т. 7, № 5. – С. 5-29.
7. Криштал М.М. Неустойчивость и мезоскопическая неоднородность пластической деформации (аналитический обзор). Часть II. Теоретические представления о механизмах неустойчивости пластической деформации // Физ. мезомех. – 2004. – Т. 7, № 5. – С. 31-45.
8. Зуев Л.Б., Данилов В.И., Баранникова С.А. Физика макролокализации пластического течения. – Новосибирск: Наука, 2008. – 328 с.
9. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. – М.: ИЛ, 1954. – Т. 1. – 648 с.
10. Панин В.Е., Гриняев Ю.В., Данилов В.И. Структурные уровни пластической деформации и разрушения. – Новосибирск: Наука, 1990. – 255 с.
11. Панин В.Е., Егорушкин В.Е. Неравновесная термодинамика деформируемого твердого тела как многоуровневой системы. Корпускулярно волновой дуализм пластического сдвига // Физ. мезомех. – 2008. – Т. 11, № 2. – С. 9-30.
12. Соколов М.А., Баяндин Ю.В., Ляпунова Е.А., Плехов О.А., Чудинов В.В., Наймарк О.Б. Локализация пластического сдвига и механизмы разрушения при динамическом нагружении металлов // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2013. – Т. 6, № 4. – С. 467-474. DOI
13. Работнов Ю.Н. Элементы наследственной механики твердых тел. – М.: Наука, 1977. – 384 с.
14. Работнов Ю.Н. Модель упруго-пластической среды с запаздыванием текучести // ПМТФ. – 1968. – № 3. – С. 45-54. DOI
15. Ломакин Е.В., Мельшианов А.Ф. Поведение малоуглеродистых сталей при растяжении // МТТ. – 1971. – № 4. – С. 150-158.
16. Работнов Ю.Н., Суворова Ю.В. О законе деформирования металлов при одноосном нагружении // МТТ. – 1972. – № 4. – С. 41-54.
17. Tretyakova T.V., Vildeman V.E. Relay-race deformation mechanism during uniaxial tension of cylindrical samples of carbon steel: using digital image correlation technique // Fracture and Structural Integrity. – 2013. – No. 24. – P. 1-6. DOI
18. Portevin A., Le Chatelier F. Sur un phénomène observé lors de l'essai de traction d'alliages en cours de transformation // Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris. – 1923. – No. 176. – P. 507-510.
19. Криштал М.М., Хрусталева А.К., Волков А.В., Бородин С.А. Зарождение и рост макрофлуктуаций пластической деформации при прерывистой текучести и деформации Людерса: результаты высокоскоростной видеосъемки // ДАН. – 2009. – Т. 426, № 1. – С. 36-40.
20. Tretyakova T.V., Wildemann V.E. Study of spatial-time inhomogeneity of serrated plastic flow Al-Mg alloy: using DIC-technique // Fracture and Structural Integrity. – 2014. – No. 27. – P. 83-97. DOI
21. Sutton M.A., Zhao W., McNeill S.R., Helm J.D., Piascik R.S., Riddell W.T. Local crack closure measurements: development of a measurement system using computer vision and a far-field microscope // Advances in fatigue crack closure measurement and analysis / Ed. by R.C. McClung, J.C. Newman. – American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1999. – Vol. 2. – P. 145-156.
22. Sutton M.A., Helm J.D., Boone M.L. Experimental study of crack growth in thin sheet 2024-T3 aluminum under tension-torsion loading // Int. J. Fracture. – 2001. – Vol. 109, no. 3. – P. 285-301. DOI
23. McGinnis M.J., Pessiki S., Turker H. Application of three-dimensional digital image correlation to the core-drilling method // Exp. Mech. – 2005. – Vol. 45, no. 4. – P. 359-367. DOI
24. Lord J.D., Penn D., Whitehead P. The application of digital image correlation for measuring residual stress by incremental hole drilling // Appl. Mech. Mater. – 2008. – Vol. 13-14. – P. 65-73. DOI
25. Третьякова Т.В., Вильдеман В.Э. Исследование развития трещин при сложных режимах нагружения методом корреляции цифровых изображений // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2012. – Т. 78, № 6. – С. 54-58.

26. Третьякова Т.В., Спаськова Е.М. Экспериментальное исследование предельных напряженно-деформированных состояний квазихрупкого материала с использованием метода корреляции цифровых изображений // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2013. – № 2. – С. 186-198.
27. Вильдеман В.Э., Третьякова Т.В., Лобанов Д.С. Методика экспериментального исследования закритического деформирования на образцах специальной усложненной конфигурации с применением метода корреляции цифровых изображений // Вестник ПГТУ. Механика. – 2011. – № 4. – С. 15-28.
28. Вильдеман В.Э., Третьякова Т.В., Лобанов Д.С. Учёт жёсткости нагружающей системы при испытаниях полунатурных образцов крупноячеистого композиционного материала // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2012. – № 2. – С. 34-49.
29. Шибков А.А., Желтов М.А., Золотов А.Е., Денисов А.А. Акустическая эмиссия при распространении полосы Людерса в сплаве АМг6 // Вестник Тамбовского государственного университета. Естественные и технические науки. – 2010. – Т. 15, № 3-2. – С. 1269-1273.
30. Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А. Акустический предвестник неустойчивой пластической деформации // ФТТ. – 2010. – Т. 52, № 11. – С. 2223-2231. DOI
31. Hartman W.F. Acoustic emission and the Portevin–Le Chatelier effect // Exp. Mech. – 1974. – Vol. 14, no. 1. – P. 19-23. DOI
32. Louche H., Bouabdallah K., Vacher P., Couderc T., Balland P. Kinematic fields and acoustic emission with the Portevin–Le Chatelier effect on an Al–Mg alloy // Exp. Mech. – 2008. – Vol. 48, no. 6. – P. 741-751. DOI
33. Benallal A., Berstad T., Børvik T., Hopperstad O.S., Koutiri I., Nogueira de Codesa R. An experimental and numerical investigation of the behaviour of AA5083 aluminium alloy in presence of the Portevin–Le Chatelier effect // Int. J. Plasticity. – 2008. – Vol. 24, no. 10. – P. 1916-1945. DOI
34. Третьякова Т.В., Третьяков М.П., Вильдеман В.Э. Оценка точности измерений с использованием видеосистемы анализа полей перемещений и деформаций // Вестник ПГТУ. Механика. – 2011. – № 2. – С. 92-100.
35. Любутин П.С. Алгоритмы и программные средства анализа оптических изображений поверхности материалов для оценки их деформаций: Автореф. дис. канд. тех. наук. – Томск, ИФПМ СО РАН, 2009. – 20 с.
36. Панин С.В., Сырымкин В.И., Любутин П.С. Оценка деформаций твердых тел по изображениям поверхности // Автометрия. – 2005. – Т. 41, № 2. – С. 44-58.
37. Любутин П.С., Панин С.В. Исследование точности и помехоустойчивости построения векторов перемещений при оценке деформаций оптико-телевизионным методом // ЖВТ. – 2006. – Т. 11, № 2. – С. 52-66.
38. Плешанов В.С., Кибиткин В.В., Панин В.Е. Экспериментальная оценка типа разрушения и характеристик трещиностойкости поликристаллов оптико-телевизионным методом на мезоуровне при циклическом нагружении // Физ. мезомех. – 1999. – Т. 2, № 2. – С. 87-90.
39. Pan B., Xie H., Wang Zh., Qian K., Wang Zh. Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns // Opt. Express. – 2008. – Vol. 16, no. 10. – pp. 7037-7048. DOI
40. Степнов М.Н. Вероятностные методы оценки характеристик механических свойств материалов и несущей способности элементов конструкций. – Новосибирск: Наука, 2005. – 342 с.

References

1. Vildeman V.E., Tretyakov M.P., Tretyakova T.V., Bulbovich R.V., Slovikov S.V., Babushkin A.V., Ilinykh A.V., Lobanov D.S., Ipatova A.V. *Ekspperimental'nye issledovaniya svoystv materialov pri slozhnykh termomekhanicheskikh vozdeistviyakh* [Experimental studies of the properties of materials under complex thermomechanical effects], ed. V.E. Vil'deman. Moscow: Fizmatlit, 2012. 204 p.
2. Vildeman V.E., Babushkin A.V., Tretyakov M.P., Ilinykh A.V., Tretyakova T.V., Ipatova A.V., Slovikov S.V., Lobanov D.S. *Mekhanika materialov. Metody i sredstva eksperimental'nykh issledovaniy* [Mechanics of materials. Methods and means of experimental research: tutorial], ed. V.E. Vildeman. Perm: Perm National Research Polytechnic University, 2011. 165 p.
3. Adamov A.A. Primary processing of experimental data of modern testing machine for identification of rheological models. *Vycisl. meh. splos. sred – Computational Continuum Mechanics*, 2013, vol. 6, no. 2, pp. 131-139. DOI
4. Sutton M.A., Wolters W.J., Peters W.H., Ranson W.F., McNeill S.R. Determination of displacement using an improved digital correlation method. *Image Vision Comput.*, 1983, vol. 1, no. 3, P. 133-139. DOI
5. Sutton M.A., Ortu J.-J., Schreier H. *Image correlation for shape, motion and deformation measurements*. Columbia, SC, USA: University of South Carolina, 2009. 364 p.
6. Krishtal M.M. Instability and mesoscopic inhomogeneity of plastic deformation (analytical review). Part I. Phenomenology of yield drop and serrated flow. *Phys. Mesomech.*, 2004. vol. 7, no. 5, pp. 5-29.
7. Krishtal M.M. Instability and mesoscopic inhomogeneity of plastic deformation (analytical review). Part II. Theoretical concepts of the mechanisms of plastic deformation instability. *Phys. Mesomech.*, 2004. vol. 7, no. 5, pp. 31-45.
8. Zuev L.B., Danilov V.I., Barannikova S.A. *Fizika makrolokalizatsii plasticheskogo techeniya* [Physics of plastic flow macrolocalization]. Novosibirsk: Nauka, 2008. 328 p.
9. Nadai A. *Plastichnost' i razrushenie tverdykh tel* [Ductility and fracture of solids]. Moscow: IL, 1954. Vol. 1, 648 p.
10. Panin V.E., Grinyaev Yu.V., Danilov V.I. *Strukturnye urovni plasticheskoi deformatsii i razrusheniya* [Structural levels of plastic deformation and fracture]. Novosibirsk: Nauka, 1990. 255 p.
11. Panin V.E., Egorushkin V.E. Nonequilibrium thermodynamics of a deformed solid as a multilevel system. Corpuscular-wave dualism of plastic shear. *Phys. Mesomech.*, 2008. vol. 11, no. 2, pp. 9-30.
12. Sokovikov M.A., Bayandin Y.V., Lyapunova E.A., Plekhov O.A., Chudinov V.V., Naimark O.B. Plastic strain localization and fracture mechanisms of metals subjected to dynamic loading. *Vycisl. meh. splos. sred – Computational Continuum Mechanics*, 2013, vol. 6, no. 4, pp. 467-474. DOI
13. Rabotnov Yu.N. *Elementy nasledstvennoi mekhaniki tverdykh tel* [Elements of hereditary solid mechanics]. Moscow: Nauka, 1977. 384 p.

14. Rabotnov Yu.N. A model of an elastic-plastic medium with delayed yield. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 1968, vol. 9, no. 3, pp. 265-269. DOI
15. Lomakin E.V., Mel'shanov A.F. Povedenie malouglerodistykh stalei pri rastyazhenii [Behavior of low-carbon steels in tension]. *Izv. Akad. Nauk S.S.S.R. Mekh. Tverd. Tela*, 1971, no. 4, pp. 150-158.
16. Rabotnov Yu.N., Suvorova Yu.V. O zakone deformirovaniya metallov pri odnoosnom nagruzhении [A law of deformation of metals under a uniaxial load]. *Izv. Akad. Nauk SSSR. Mekh. Tverd. Tela*, 1972, no. 4, pp. 41-54.
17. Tretyakova T.V., Vildeman V.E. Relay-race deformation mechanism during uniaxial tension of cylindrical samples of carbon steel: using digital image correlation technique. *Fracture and Structural Integrity*, 2013, no. 24, pp. 1-6. DOI
18. Portevin A., Le Chatelier F. Sur un phénomène observé lors de l'essai de traction d'alliages en cours de transformation [Tensile tests of alloys undergoing transformation]. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris*, 1923, no. 176, pp. 507-510.
19. Krishtal M.M., Khrustalev A.K., Volkov A.V., Borodin S.A. Zarozhdenie i rost makrofluktuatsii plasticheskoi deformatsii pri preryvistoi tekuchesti i deformatsii Liudersa: rezul'taty vysokoskorostnoi videos'emki [Nucleation and growth of macrofluctuations of plastic strain with discontinuous yield and Lüders deformation: Results of high-speed video filming]. *Dokl. Akad. Nauk – Doklady Physics*, 2009, vol. 426, no. 1, pp. 36-40.
20. Tretyakova T.V., Wildemann V.E. Study of spatial-time inhomogeneity of serrated plastic flow Al-Mg alloy: using DIC-technique. *Fracture and Structural Integrity*, 2014, no. 27, pp. 83-97. DOI
21. Sutton M.A., Zhao W., McNeill S.R., Helm J.D., Piascik R.S., Riddell W.T. Local crack closure measurements: development of a measurement system using computer vision and a far-field microscope. *Advances in fatigue crack closure measurement and analysis*, ed. by R.C. McClung, J.C. Newman. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1999, vol. 2, pp. 145-156.
22. Sutton M.A., Helm J.D., Boone M.L. Experimental study of crack growth in thin sheet 2024-T3 aluminum under tension-torsion loading. *Int. J. Fracture*, 2001, vol. 109, no. 3, pp. 285-301. DOI
23. McGinnis M.J., Pessiki S., Turker H. Application of three-dimensional digital image correlation to the core-drilling method. *Exp. Mech.*, 2005, vol. 45, no. 4, pp. 359-367. DOI
24. Lord J.D., Penn D., Whitehead P. The application of digital image correlation for measuring residual stress by incremental hole drilling. *Appl. Mech. Mater.*, 2008, vol. 13-14, pp. 65-73. DOI
25. Tretyakova T.V., Vildeman V.E. Study of cracks development in complex loading conditions using correlation of digital image. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Industrial Laboratory*, 2012, vol. 78, no. 6, pp. 54-58.
26. Tretyakova T.V., Spaskova E.M. Experimental study of limit stress-strain state quasi-brittle material using correlation techniques digital images. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2013, no. 2, pp. 186-198.
27. Vildeman V.E., Tretyakova T.V., Lobanov D.S. Technique of experimental investigation of postcritical deformation on test samples with special complicated configuration by using digital image correlation. *PSTU Mechanics Bulletin*, 2011, no. 4, pp. 15-28.
28. Vildeman V.E., Tretyakova T.V., Lobanov D.S. Accounting of loading system stiffness in tests on scaled-down wide-meshed composite specimens. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2012, no. 2, pp. 34-49.
29. Shibkov A.A., Zheltov M.A., Zolotov A.E., Denisov A.A. Akusticheskaya emissiya pri rasprostranении polosity Liudersa v splave AMg6 [Acoustic emission in the propagation of Lüders bands in the alloy AMg6]. *Tambov State University Bulletin. Series: Natural and Engineering Sciences*, 2010, vol. 15, no. 3-2, pp. 1269-1273.
30. Shibkov A.A.; Zolotov A.E.; Zheltov M.A. Acoustic precursor of unstable plastic deformation in the aluminum-magnesium alloy AMg6. *Physics of the Solid State*, 2010, vol. 52, no. 11, pp. 2376-2384 DOI
31. Hartman W.F. Acoustic emission and the Portevin–Le Chatelier effect. *Exp. Mech.*, 1974, vol. 14, no. 1, pp. 19-23. DOI
32. Louche H., Bouabdallah K., Vacher P., Coudert T., Balland P. Kinematic fields and acoustic emission with the Portevin-Le Chatelier effect on an Al–Mg alloy. *Exp. Mech.*, 2008, vol. 48, no. 6, pp. 741-751. DOI
33. Benallal A., Berstad T., Børvik T., Hopperstad O.S., Koutiri I., Nogueira de Codesa R. An experimental and numerical investigation of the behaviour of AA5083 aluminium alloy in presence of the Portevin–Le Chatelier effect. *Int. J. Plasticity*, 2008, vol. 24, no. 10, pp. 1916-1945. DOI
34. Tretyakova T.V., Tretyakov M.P., Wildemann V.E. Estimate of measurements accuracy by using video-system of displacement and strain fields analysis. *PSTU Mechanics Bulletin*, 2011, no. 2, pp. 92-100.
35. Lyubutin P.S. *Algoritmy i programmnye sredstva analiza opticheskikh izobrazhenii poverkhnosti materialov dlya otsenki ikh deformatsii* [Algorithms and software tools for analyzing optical images of materials surfaces to assess their deformation]. Abstract PhD, Tomsk, ISPMS SB RAS, 2009. 20 p.
36. Panin S.V., Syryamkin V.I., Lyubutin P.S. Otsenka deformatsii tverdykh tel po izobrazheniyam poverkhnosti [Evaluation of deformation of solids by surface imaging analysis]. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2005, vol. 41, no. 2, pp. 44-58.
37. Lyubutin P.S., Panin S.V. Investigation of accuracy and error rate performance of the displacement vector construction in evaluation of strains using TV-optical technique. *Vychisl. Tekhnol.*, 2006, vol. 11, no. 2, pp. 52-66.
38. Pleshanov V.S., Kibitkin V.V., Panin V.E. Fracture mode and crack resistance of polycrystals at the mesolevel experimentally evaluated under cyclic loading by TV-optical method, *Phys. Mesomech.*, 1999, vol. 2, no. 4, pp. 81-84.
39. Pan B., Xie H., Wang Zh., Qian K., Wang Zh. Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns. *Opt. Express*, 2008, vol. 16, no. 10, pp. 7037-7048. DOI
40. Stepnov M.N. *Veroyatnostnye metody otsenki kharakteristik mekhanicheskikh svoystv materialov i nesushchei sposobnosti elementov konstruksii* [Probabilistic methods for evaluation of the mechanical properties of materials and the bearing capacity of structural elements]. Novosibirsk: Nauka, 2005. 342 p.

Поступила в редакцию 26.02.2014; опубликована в электронном виде 24.06.2014

Сведения об авторе

Третьякова Татьяна Викторовна, асп., мнс, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), 614990, Пермь, Комсомольский проспект, д. 29; e-mail: cem.tretyakova@gmail.com