

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
А В Т О М Е Т Р И Я

2003, том 39, № 5

УДК 539.374 : 530.145 : 535.8

С. Н. Поляков, В. В. Горбатенко, Е. Л. Лопаев, Л. Б. Зув

(Томск)

**МЕТОД ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ДЕКОРРЕЛЯЦИИ
ЦИФРОВЫХ СПЕКЛ-ИЗОБРАЖЕНИЙ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ**

Рассмотрены принципы работы и программное обеспечение оптических и оптико-телевизионных приборов, предназначенных для детального количественного исследования процессов пластического течения и разрушения металлов и сплавов. Приведены данные об их разрешении, точности измерений и быстродействии. Оценены экспериментальные возможности предложенных методик, которые использованы при исследованиях локализации пластической деформации с помощью специально разработанных схем, применяющих декорреляцию двух спекл-картин поверхности деформируемого твердого тела. В качестве примеров представлены данные об особенностях кинетики процесса пластического формоизменения, полученные с помощью описанных методик.

Введение. Исследование особенностей пластического течения твердых тел при приложении механической нагрузки является одной из наиболее старых и трудных проблем экспериментальной механики. Многообразие используемых материалов и различие их механических свойств делает необычайно трудной проблему установления общих для всех деформируемых сред закономерностей пластического течения, что совершенно необходимо для создания сколько-нибудь общей физической теории пластичности. Традиционные пути исследования пластических свойств материалов имеют два предельных по масштабу варианта: макроскопический состоит в исследовании формы кривой пластического течения с одновременным наблюдением за крупными деталями формоизменения объекта и сопутствующими явлениями [1], а микроскопический – в детальном анализе распределений дефектов в микрообъеме с помощью, например, электронной микроскопии тонких фольг [2]. Сопоставление данных, полученных с помощью этих методик, весьма затруднительно и требует использования не всегда оправданных предположений. Это приводит к трудностям интерпретации экспериментальных результатов и является одной из причин торможения прогресса в науке о прочности и пластичности, что было отмечено уже к началу 80-х годов XX века.

В связи с этим была осознана необходимость создания экспериментальной методики, сочетающей в себе возможности наблюдения деформируемого образца в целом (характерный размер поля зрения ~ 100 мм) с разрешающей способностью на уровне оптического микроскопа (~ 1 мкм). Поиск путей оптимального решения такой задачи был ориентирован на использование многочисленных вариантов голографической интерферометрии [3], позволяющей добиться такого сочетания возможностей экспериментальной методики.

Однако методы голографической интерферометрии, широко применяемые при исследовании упругих деформаций деталей и конструкций под нагрузкой, оказались излишне чувствительными при исследовании пластических деформаций и разрушения, когда относительные деформации могут достигать значений ~ 1 . Кроме того, высокая чувствительность к вибрациям сделала эти методики практически недоступными для большинства исследовательских и промышленных лабораторий. Более удобны различные варианты спекл-интерферометрии [4], которые позволяют измерять смещения до 100 мкм, что при размере объекта ~ 100 мм соответствует деформациям $\sim 10^{-3}$. Это обстоятельство, а также сравнительно низкая чувствительность к вибрациям и качеству оптических схем и лазеров сделали спекл-интерферометрию весьма перспективным вариантом исследовательской методики в области физики и механики пластичности.

Один из вариантов такой методики был разработан в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН [5] и применен в исследованиях локализации пластического течения металлов и сплавов [6–10]. Полученная таким образом информация о характере пластического течения и картинах локализации деформации, обобщенная в обзоре [11], позволила обнаружить новый тип волновых процессов и установить их наиболее важные характеристики. Оказалось, что локализация пластического течения является общим для всех стадий деформации явлением и ее различные формы возникают и эволюционируют от начала течения до разрушения.

Несмотря на успехи спекл-фотографического метода в исследованиях пластического течения, ряд его очевидных недостатков, а также большой прогресс в развитии компьютеров и ПЗС-видеокамер привели нас к разработке альтернативного оптико-телевизионного метода визуализации локализованной деформации [12–14]. При его создании прежде всего необходимо было обеспечить возможность регистрации процессов формоизменения и разрушения в реальном времени, а затем повысить пространственное и временное разрешение при исследовании неоднородности фронтов пластического течения и тонкой структуры его отдельных очагов.

Заметим, что в последние годы электронная спекл-интерферометрия и ряд смежных направлений в развитии техники наблюдения для анализа неоднородности деформации получили широкое развитие, основанное на использовании когерентной оптики в сочетании с вычислительными методами обработки изображений, модулированных спеклами [15–17]. Явный прогресс в этой области [18] вызван, по-видимому, возрастающими требованиями, предъявляемыми к экспериментальной технике со стороны высоко развитого теоретического аппарата механики деформируемого твердого тела. Однако непреодоленными до сих пор проблемами электронной спекл-интерферометрии остаются высокий уровень шума в выходных данных и ограниченный диапазон области непрерывных измерений, обусловленные декорреляцией спекл-изображений. Подход, развиваемый в настоящей работе, на-

против, предполагает использование явления декорреляции для отображения изменений в объекте при локализованной пластической деформации.

Основы метода. Поскольку нивелировать влияние межкадровой декорреляции при ограниченности динамического диапазона видеокамер не удается, мы сочли более естественным обратить ее во благо, попутно упростив аппаратуру и вычислительный алгоритм визуализации деформации. Развиваемый метод предполагает полный отказ от оптической корреляции, традиционной для спекл-интерферометрии и реализуемой аппаратным или вычислительным путем. Вместо этого для визуализации неоднородности деформации используется вычисляемая *in situ* с частотой видеоввода $f_{\text{вр}}$ мера декорреляции, за которую принимается распределение выборочного (по окну $m \times n$ пиксел) коэффициента взаимной корреляции (ВКВК) цифровых изображений поверхности при ее когерентном освещении:

$$R_{xy, m \times n}(t, t_1) = \left\langle \frac{S_{ij}(t) - \langle S_{xy, m \times n}(t) \rangle}{\sigma_{S_y(t), m \times n}} \times \frac{S_{ij}(t_1) - \langle S_{xy, m \times n}(t_1) \rangle}{\sigma_{S_y(t_1), m \times n}} \right\rangle_{i, j \in [x+m, y+n]} \quad (1)$$

где $S(t)$ и $S(t_1)$ – видеосигналы сдвинутых на время $t_1 - t$ цифровых изображений, $\sigma_{s, m \times n}$ – среднее квадратичное отклонение видеосигнала в окне $m \times n$ пиксел.

При этом ВКВК может рассматриваться как результат однократного измерения «истинного» коэффициента взаимной корреляции $\langle R_{xy, m \times n}(t, t_1) \rangle$, определенного как среднее по генеральной выборке аналогичных статистически независимых измерений, различающихся амплитудно-фазовыми распределениями освещающей волны, и связанного с локальными межкадровыми смещениями и деформационными компонентами поверхности монотонно убывающей зависимостью. Рассчитываемая последовательность полей ВКВК выводится на полутонный дисплей и визуализирует распределения деформации по образцу. Программно-реализуемая регулировка размеров корреляционного окна $m \times n$ и временного сдвига $t - t_1$ обеспечивает задание интервала пространственного осреднения визуализируемой деформации и значений ее общего прироста соответственно. Заметим, что нормально распределенная статистическая погрешность ВКВК-приближения $\langle R_{xy, m \times n}(t, t_1) \rangle$ в случае высоких градиентов деформаций, наблюдаемых на фронтах локализованной деформации, не оказалась фатальной для их удовлетворительной визуализации, благодаря когерентному освещению и применению описанного ниже специального алгоритма регрессионного сглаживания при восстановлении координат их фронтов. При этом спекл-структурам, детерминированным микрорельефом деформируемой поверхности, отводится роль наведенных признаков ее формы, обостряющих корреляцию разномоментных изображений. При переходе же к визуализации менее локализованных деформаций метод обладает дополнительным резервом подавления шумов на основе регрессионного приближения временной зависимости ВКВК [19].

Блок-схема разработанной системы, приведенная на рис. 1, включает освещающее образец 1 устройство на основе He-Ne- или полупроводникового лазера ($\lambda = 630 - 680$ нм, выходная мощность < 1 мВт) 2, $1/2''$ ПЗС-видео-

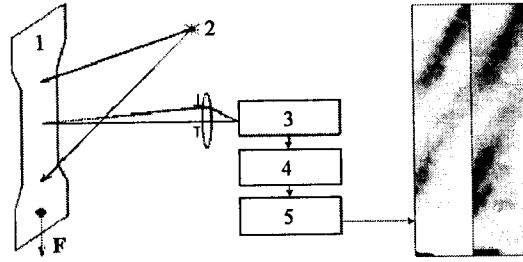


Рис. 1. Блок-схема системы декорреляционной визуализации

камеру 3 модели OS-45D с устройством видеоввода 4 и компьютер 5. При реализации на базе компьютера РП 350, частоте видеоввода 5 Гц, с оцифровкой изображения с разрешением до 480×360 пиксел время вычисления элемента ВКВК по окну 16 пиксел составляет ~ 1 мкс, что обеспечивает визуализацию в реальном времени. Весь видеоряд испытаний сохраняется на жестком диске, что допускает апостериорную визуализацию ВКВК с заданными значениями корреляционной выборки от 2×2 до 16×16 пиксел и временного интервала сравнения с дискретностью 200 мс.

Примеры применения методики. Работа метода и визуализирующей системы проверялась на объектах, на которых неоднородность пластического течения уже была установлена с помощью спекл-фотографии [5–10]. Так были исследованы зарождение и кинетика фронтов Людерса (ФЛ) при одноосном растяжении плоских образцов из малоуглеродистых сталей, упорядоченного сплава Ni_3Mn , а также полос локализованной деформации (ПЛД) в монокристаллических образцах стали Гатфильда ($\text{Fe} + 13 \text{ мас. \% Mn}$). Регистрация производилась в пределах сцен размерами от 13×10 до 55×10 мм с разрешением видеозаписи от 28 до 175 мкм/пиксел. ФЛ наблюдались в пределах указанных сцен при приростах общей деформации $\Delta \epsilon \geq 3 \cdot 10^{-5}$ за интервал корреляции. Координаты ФЛ, совпадающего с изолиниями максимальной декорреляции, связанной с ВКВК соотношением

$$D_{xy, m \times n}(t, t_1) = 1 - |R_{xy, m \times n}(t, t_1)|,$$

восстанавливались в сечениях полосы лучами $s(x, y)$, заданными в зависимости от ориентации полосы одним из четырех способов: $x = \text{const}$, $y = \text{const}$ и $y = \pm x$, по формуле

$$s_b = \int_{s_{\beta,-}}^{s_{\beta,+}} \frac{D(s) ds}{\sigma_{\langle D \rangle}^2(s)} \bigg/ \int_{s_{\beta,-}}^{s_{\beta,+}} \frac{D(s) ds}{\sigma_{\langle D \rangle}^2(s)}, \quad (2)$$

где $s_{\beta,-}$ и $s_{\beta,+}$ – координаты границ доверительного интервала определения максимума истинной декорреляции $\langle D_{\text{max}} \rangle$ в заданном сечении, являющиеся корнями уравнения

$$D(s) + \beta \sigma_{\langle D \rangle}(D(s)) = D_{\text{max}} - \beta \sigma_{\langle D \rangle}(D_{\text{max}}) \quad (3)$$

(здесь D_{\max} – максимальное значение выборочной декорреляции в рассматриваемом сечении полосы; β – параметр, задающий значение доверительной вероятности, которая при $\beta=1,2,3$ принимает значения 68,3, 95,5, 99,7% соответственно). Присутствующее в (2) и (3) среднее квадратичное отклонение $\sigma_{\langle D \rangle}$ задавалось апостериорной экспериментальной зависимостью $\sigma_{\langle D \rangle}(D, \alpha)$, определяемой совместно с зависимостью $\langle D_{xy, m \times n}(t, t_1) \rangle$ от межкадровых смещений плоскости в направлении нормали к фронтам визуализированных полос (α – угол, определяющий ориентацию ФЛ относительно направления растяжения). Средние квадратичные отклонения восстановленных координат ФЛ от их же значений, приближенных линейной регрессией по методу наименьших квадратов, не превосходят 1–2 пиксел. Такая оценка погрешности получена для практически значимых интервалов значений усредненного вдоль полосы декорреляционного максимума $\langle D_{\max} \rangle_{\text{band}} = 0,1-1$ и корреляционной выборки $m \times n = 16-100$ при наблюдении ФЛ с фронтами шириной до 40 мкм в образцах с размером зерна 10–20 мкм.

Распространение ФЛ в образцах из малоуглеродистой стали визуализировалось на всех стадиях их развития: от возникновения на нижнем пределе текучести одной или нескольких полос до их исчезновения при переходе к параболической стадии деформационного упрочнения. Анализировались также случаи формирования и распространения полос в условиях неоднородного деформированного состояния, обусловленного действием макроконцентраторов напряжений (рис. 2). Превосходство во временном разрешении по сравнению со спекл-интерферометрией позволило получить достаточно подробные хронограммы перемещений этих объектов и установить неравномерный характер их движения в ансамбле одновременно и/или по-

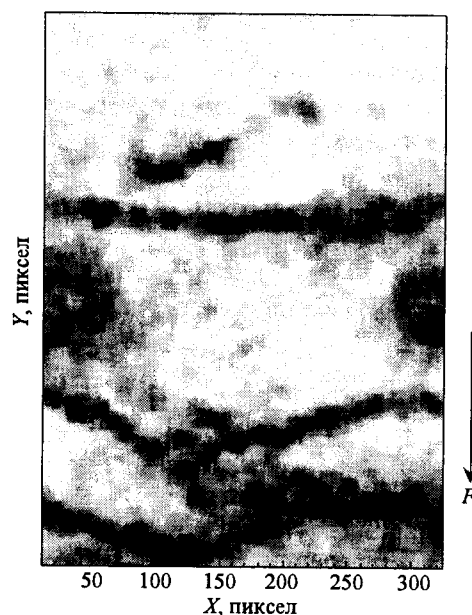


Рис. 2. Начальная стадия формирования ФЛ в малоуглеродистой стали в окрестности симметричных концентраторов напряжений (межкадровый прирост общей деформации $\Delta \epsilon \approx 4 \cdot 10^{-4}$, рабочее поле 13×10 мм, пространственное разрешение видеозаписи 27,8 мкм/пиксел)

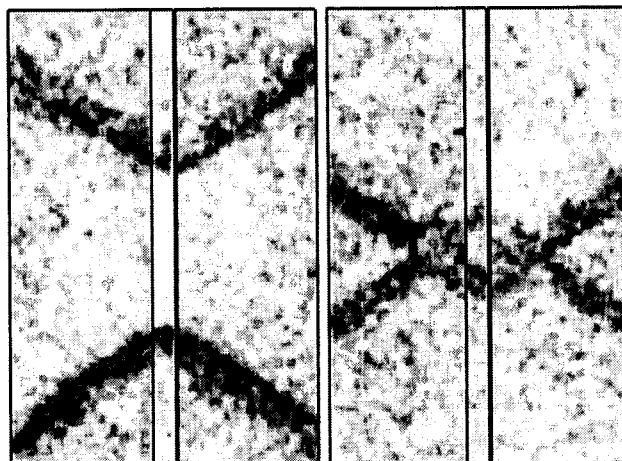


Рис. 3. Трехракурсная декорреляционная визуализация ФЛ с переменной пространственной ориентацией и взаимным прохождением фронтов в малоуглеродистой стали ($\Delta\epsilon \approx 4 \cdot 10^{-4}$, размеры рабочей части образца $50 \times 10 \times 2,5$ мм, пространственное разрешение видеозаписи 142 мкм/пиксел)

следовательно наблюдаемых полос (вплоть до временных остановок с прекращением визуализации одних полос и ускорения других). В некоторых случаях в наблюдаемых ФЛ удалось фиксировать изменение пространственной ориентации фронтов полос, что равносильно изменению объема, приходящегося на очаг деформации. Контроль пространственного расположения фронтов (и соответственно указанных объемов) осуществлялся с помощью трехракурсной схемы, обеспечивающей одновременную визуализацию деформации на трех гранях плоского образца (рис. 3).

Отметим также наблюдения распространения ФЛ в монокристаллах стали Гатфильда на площадке текучести при растяжении в направлении $[1\ 1\ 1]$. В этом случае удалось наблюдать тонкую структуру фронта и проследить за его неравномерным развитием и поворотами при деформации двойникованием. Достигаемые в этом случае пространственное и временное разрешение позволяют определять размеры и ориентацию отдельных двойников. При переходе от стадии площадки текучести к стадии линейного деформационного упрочнения удалось наблюдать повторное прохождение через ранее деформированные области материала расходящихся деформационных фронтов, образованных двойниковыми прослойками, формирующимися у противоположных кромок образца. На стадии линейного упрочнения зафиксировано устойчивое движение вдоль образца деформационных очагов в виде пространственно-периодических ПЛД, образованных двойниками, растущими от одной грани к другой (рис. 4, фрагменты для $\epsilon = 0,2656$ и $\epsilon = 0,2698$).

При растяжении аналогичного монокристалла в направлении $[1\ 2\ 3]$ в диапазоне $\epsilon \in [0,024; 0,49]$ метод обеспечил наблюдение циклического воспроизведения разнотипных пространственно-временных картин локализованной деформации, сменяющих друг друга с ростом деформации. Наиболее интересные примеры представлены на рис. 5, где можно видеть чередующееся движение в противоположных направлениях пар скрещенных ПЛД (рис. 5, *a, b*), прохождение одиночного фронта локализованной деформации (рис. 5, *c*), возникновение ПЛД между захватами нагружающего устройства

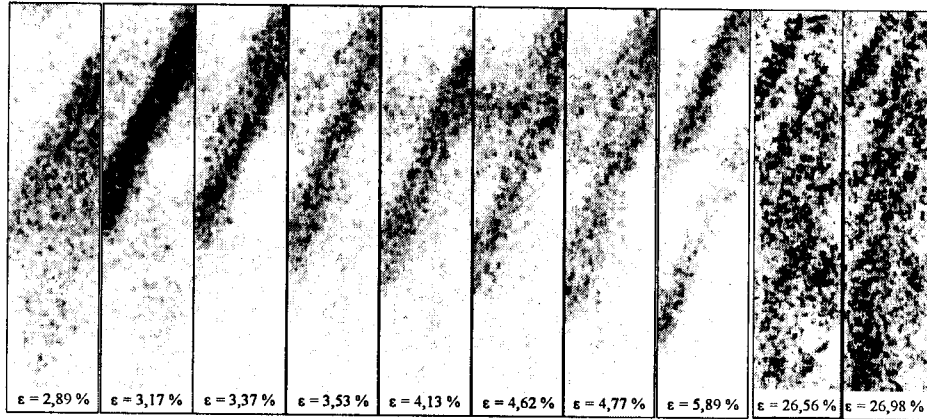


Рис. 4. Распространение ПЛД в монокристалле стали Гатфильда при деформации двойникованием: декорреляционная визуализация с межкадровым приростом $\Delta \epsilon \approx 8 \cdot 10^{-5}$ (рабочее поле $22,5 \times 5$ мм, пространственное разрешение видеозаписи 67 мкм/пиксел)

с последующим расхождением ее фронтов (рис. 5, *d*), формирование у противоположных захватов двух движущихся навстречу друг другу ПЛД (рис. 5, *e*), формирование обширной неоднородной зоны локализованной деформации (рис. 5, *f*) с последующим превращением ее в одиночный перемещающийся фронт (рис. 5, *g*).

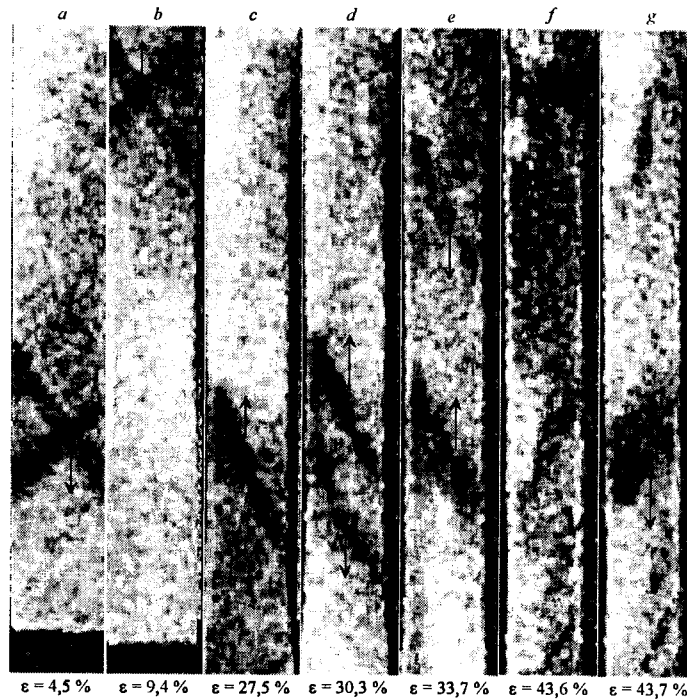


Рис. 5. Выборочный видеоряд декорреляционных изображений картин локализации деформации в монокристалле стали Гатфильда при растяжении вдоль направления $[1\ 2\ 3]$ с межкадровым приростом $\Delta \epsilon \approx 8 \cdot 10^{-5}$ (рабочее поле 30×5 мм, пространственное разрешение видеозаписи 26 мкм/пиксел)

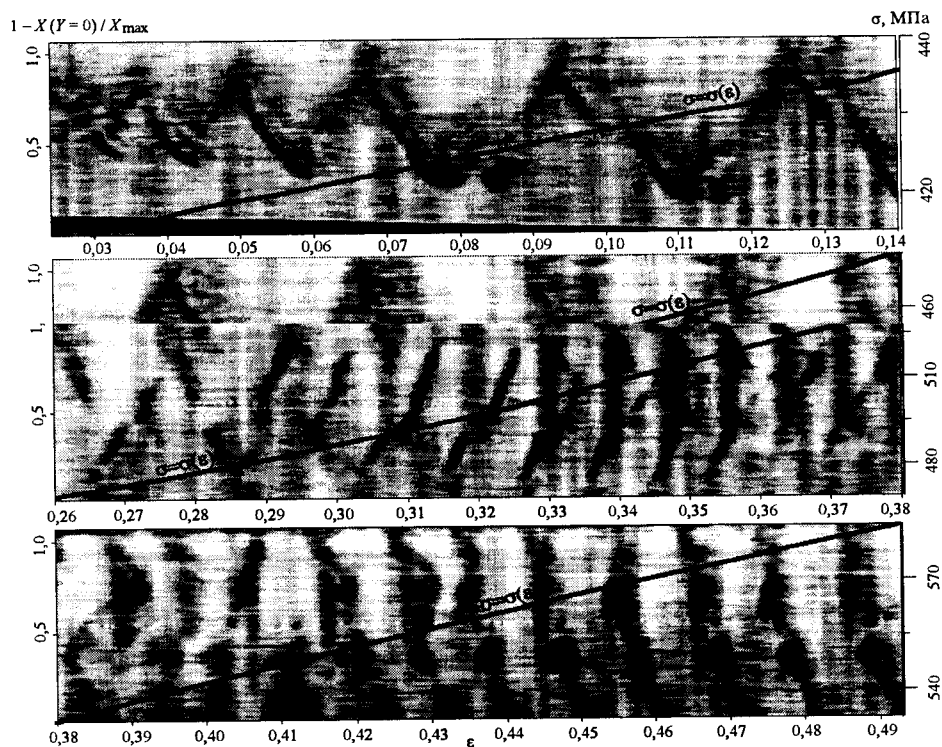


Рис. 6. Временная развертка распределения декорреляции цифрового спекл-изображения в продольном сечении монокристалла стали Гатфильда (ось растяжения $[\bar{1}23]$), совмещенная с кривой растяжения $\sigma(\epsilon)$

Наконец, приведенная на рис. 6 кинетическая характеристика испытания, построенная как временная развертка распределения декорреляции в продольном сечении образца и совмещенная с диаграммой растяжения $\sigma(\epsilon)$, демонстрирует как нарастание частоты циклов смены картин локализации, так и возрастание скорости распространения фронтов ПЛД с ростом деформации.

Заключение. Предложенная процедура может рассматриваться как удачное развитие и дополнение существующих методов анализа состояния материала при деформировании, так как позволяет визуализировать в режиме реального времени неоднородности пластического течения и локализацию деформации с недостижимыми ранее пространственным и временным разрешением, а также выявлять детали тонкого строения очагов локализации пластической деформации. Особенно перспективной такая методика представляется в исследованиях влияния режима нагружения на форму ПЛД и кинетику их движения. Сравнительная простота реализации позволяет наде-

яться на широкое распространение таких (и родственных) методов в актуальных исследованиях природы пластической деформации и разрушения, а также зон локализованной деформации в окрестностях трещин [20], вырезов и концентраторов напряжений других типов. Важно заметить, что результат достигается при значительном (в сравнении со спекл-интерферометрией) упрощении алгоритма и аппаратного обеспечения измерений.

Авторы выражают благодарность профессору В. И. Данилову за плодотворную дискуссию, а также инженеру Е. С. Поляковой и аспиранту С. А. Бикбаеву за помощь в проведении экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Экспериментальная механика** /Под ред. А. Кобаяши. М.: Мир, 1990.
2. **Хирш П., Хови А., Николсон Р. и др.** Электронная микроскопия тонких кристаллов. М.: Мир, 1968.
3. **Вест Ч.** Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982.
4. **Джоунс Р., Уайкс К.** Голографическая и спекл-интерферометрия. М.: Мир, 1986.
5. **Зуев Л. Б., Данилов В. И., Мних Н. М.** Спекл-интерферометрический метод регистрации полей смещений при пластической деформации // Завод. лаб. 1990. **56**, вып. 2. С. 90.
6. **Зуев Л. Б., Данилов В. И., Горбатенко В. В.** Автоволны локализованной пластической деформации // ЖТФ. 1995. **65**, вып. 5. С. 91.
7. **Зуев Л. Б., Данилов В. И.** О природе крупномасштабных корреляций при пластическом течении // ФТТ. 1997. **39**, вып. 8. С. 1399.
8. **Zuev L. B., Danilov V. I.** A self-excited wave model of plastic deformation in solids // Phil. Mag. A. 1999. **79**, N 1. P. 43.
9. **Zuev L. B., Danilov V. I., Varannikova S. A.** Pattern formation in the work-hardening process of single alloyed γ -Fe crystals // Intern. Journ. Plasticity. 2001. **17**, N 1. P. 47.
10. **Zuev L. B.** Wave phenomena in low-rate plastic flow of solids // Ann. Phys. 2001. **10**, N 11–12. P. 965.
11. **Зуев Л. Б., Данилов В. И., Семухин Б. С.** Пространственно-временное упорядочение при пластическом течении твердых тел // Успехи физики металлов. 2002. **3**, вып. 3. С. 237.
12. **Горбатенко В. В., Поляков С. Н., Зуев Л. Б.** Визуализация зон локализации деформации вычислительной декорреляцией видеоизображений со спекл-структурой (на примере полос Чернова – Людерса) // Завод. лаб. 2001. **67**, вып. 7. С. 29.
13. **Горбатенко В. В., Поляков С. Н., Зуев Л. Б.** Система визуализации пластической деформации по спекл-видеоизображениям // Приборы и техника эксперимента. 2002. Вып. 3. С. 164.
14. **Zuev L. B., Gorbatenko V. V., Polyakov S. N.** Instrumentation for speckle interferometry and techniques for investigating deformation and fracture // Proc. SPIE. 2002. **4900**. Pt. 2. P. 1197.
15. **Lückberg O. J., Seeberg B. E., Vestly K.** Microscopic video speckle interferometry // Opt. Lasers Eng. 1997. **26**, N 4–5. P. 313.

16. **Aebischer H. A., Waldner S.** Strain distributions made visible with image-shearing speckle pattern interferometry // Ibid. P. 407.
17. **Gülker G., Hinsch K. D.** Detection of surface microstructure changes by electronic speckle pattern interferometry // Ibid. N 2–3. P. 165.
18. **Digital speckle pattern interferometry and related techniques** /Ed. P. K. Rastogi. N. Y.: J. Willey & Sons, 2001.
19. **Пат. 2192621 РФ.** Способ отображения зон локализации деформации поверхности и оптико-телевизионное устройство для его осуществления /В. В. Горбатенко, С. Н. Поляков, Л. Б. Зуев. Опубл. 10.11.2002, Бюл. № 31.
20. **Danilov V. I., Narimanova G. N., Zuev L. B.** On evolution of plasticity zone in the vicinity of crack tip // Intern. Journ. Fract. 2000. **101**, N 4. P. L35.

*Институт физики прочности
и материаловедения СО РАН,
E-mail: lewzuev@mail.tomsknet.ru*

*Поступила в редакцию
7 мая 2003 г.*

Подписка на наш журнал – залог Вашего успеха!