Краткие сообщения

05;07

Визуализация неоднородностей пластического течения полями декорреляции и скорости мерцаний видеоспеклов

© С.Н. Поляков, С.А. Бикбаев, Л.Б. Зуев

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
634021 Томск, Россия
e-mail: levzuev@mail.tomsknet.ru

(Поступило в Редакцию 18 февраля 2004 г.)

Представлены алгоритмы реализуемых in situ методов визуализации зон локализации пластической деформации, экспериментальные зависимости визуализирующих сигналов и параметров, обратных качеству измерений, от визуализируемой деформации, а также примеры типичного результата визуализации пластического течения в случае распространением полос Чернова–Людерса.

Исследования неоднородности и локализации пластического течения, предпринятые в последние годы [1], были выполнены главным образом с использованием методики двухэкспозиционной спекл-фотографии, которая не позволяет анализировать ход процесса в реальном времени. Общий интерес к проблеме неоднородности пластического течения привел к разработке многочисленных методик электронной спекл-интерферометрии, исключающей фотографический процесс (см., например, [2,3]). Однако все эти методики характеризуются высоким уровнем шума в выходных данных и при анализе пластического течения ограничены узким диапазоном приростов деформации. Названные недостатки, очевидно, непреодолимы, поскольку порождены декорреляцией спеклов, вызванной неразделимой комбинацией смещения точек поверхности (информативная часть сигнала) и изменения ее рельефа, неизбежного при пластической деформации (помехи).

Поиск альтернативных путей отображения картин неоднородной деформации привел к двум вариантам непосрдественного использования эффекта декорреляции для наблюдения зон локализации деформации. Первый подход был реализован нами в работах [4–6], где неоднородное по образцу распределение деформации визуализировалось полем выборочного коэффициента взаимной декорреляции D видеосигнала S, вычисляемого *in situ* в пределах $(m \times n)$-пиксельных окрестностей отображаемых точек спекл-видеоизображений деформируемой поверхности и определяемого как

$$D_{ijk}^{(m\times n,p)} = 1 - \Big|\Big\langle \left(S_{ijk} - \langle S_{ijk}\rangle\right)/\sigma S_{ijk} \times \left(S_{ij(k-p)} - \langle S_{ij(k-p)}\rangle\right)/\sigma S_{ij(k-p)}\Big\rangle\Big|. \quad (1)$$

Здесь i, j — координаты в пиксельном представлении; k — номер видеокадра; $p \geq 1$ — межкадровый сдвиг (число кадров между сравниваемыми спекл-изображениями); σS_{ijk} — среднеквадратичное отклонение видеосигнала в пределах $(m \times n)$-пиксельной окрестности отображаемых точек. Алгоритм (1) обеспечил визуализацию полос Чернова–Людерса (рис. 1) и восстановление положения их фронтов с погрешностью не хуже 1.5–2 ps при межкадровом приросте общей деформации растяжения $\Delta\varepsilon \geq 3 \cdot 10^{-5}$ и применении линейного регрессионного сглаживания координат фронтов. Однако область применения метода также оказалась ограниченной нелинейностью зависимости D от лежащих в плоскости наблюдения компонент деформации ε_{xx} и ε_{yy} и ее насыщением при $\varepsilon \geq 0.00075$ (рис. 2, кривая *2*).

Указанные недостатки непосредственного использования явления декорреляции спеклов для визуализации пластического течения удалось преодолеть при усовершенствовании процедуры счета числа мерцаний спеклов M, описанной в [7]. В этом случае пластическое течение успешно визуализировалось in situ полем скорости мерцаний спеклов, определяемой усреднением по ансамблю статистически независимых одновременных измерений в $(m \times n)$-пиксельной окрестности отображаемой точки

$$\dot{\overline{M}}{}_{ij(k-p/2)}^{(m\times n,p)} = -\frac{1}{p}\,\overline{M}_{ij(k-p)}^{(m\times n)} + \frac{1}{p^2}\int\limits_{k-p}^{k} dq \cdot \overline{M}_{ijq}^{(m\times n)}. \quad (2)$$

При этом само мерцание в процессе каждого независимого измерения определяется как акт межкадрового (в интервале $[k-1, k]$) перехода видеосигнала S_{ijk} через соответствующий счетный порог $(1+\beta) \cdot \overline{S}_{ijk}^{(m' \times n')}$, заданный некоторым относительным уровнем β видеосигнала S_{ijk}, усредненного по $(m' \times n')$-пиксельной окрестности отображаемой точки. При этом при переходах S_{ijk} через счетные β-пороги (как снизу вверх, так и сверху вниз) вычисляются текущие значения числа мерцаний по правилу $M_{ijk}(\beta) = M_{ij(k-1)}(\beta) + 1$, а окрестность выбирается, исходя из требования ее статистической представительности для определения средне-

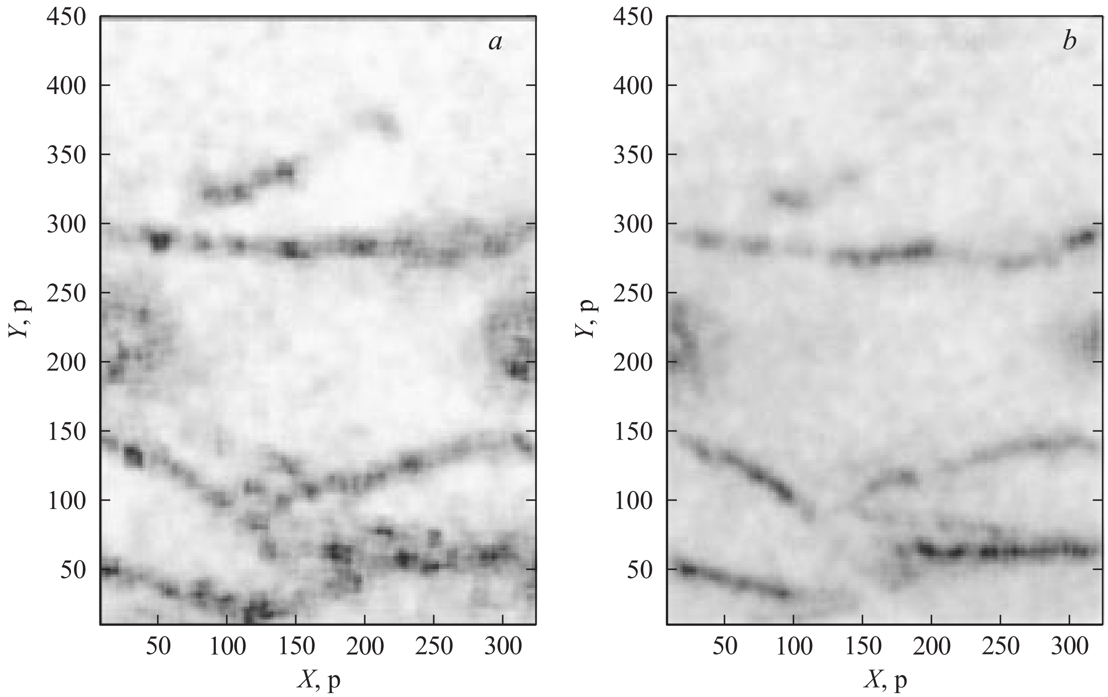

Рис. 1. Визуализация пластического течения при одноосном растяжении плоского образца малоуглеродистой стали с симметричными поперечными надрезами, выполненная с пространственно ограниченным (по окрестности $11 \times 11p$, $1p = 8\,\mu$m) усреднением: *a* — методом вычислительной декорреляции; *b* — полем скорости мерцания видеоспеклов (11 статистически независимых одновременных измерений, параметр регрессионного сглаживания $p = 5$). В обоих случаях фронты полос Людерса и другие области локализованной деформации отображаются потемнениями полутоновых картин.

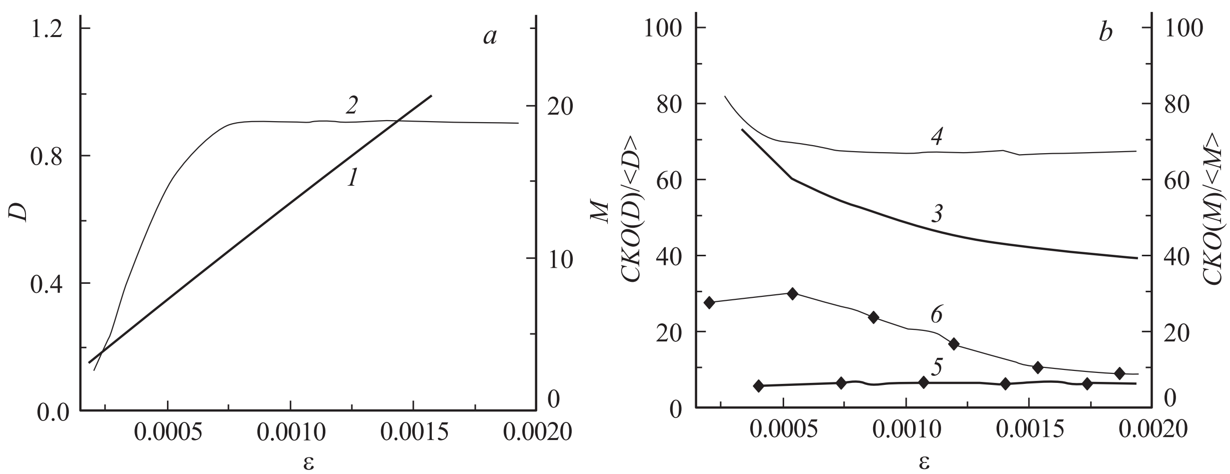

Рис. 2. Экспериментально установленные для алгоритмов (*1*) и (*2*) зависимости от прироста общей деформации ε: *a* — визуализирующих сигналов, *1* — *M*, *2* — *D*; *b* — параметров обратного качества измерений; *3* — *СКО* $(M)/\langle M\rangle$, $1 \times 1p$; *4* — *СКО* $(D)/\langle D\rangle$, $2 \times 2p$; *5* — *СКО* $(M)/\langle M\rangle$, $21 \times 21p$. $(p = 5)$; *6* — *СКО* $(D/\langle D\rangle)$, $20 \times 20p$. $(p = 1)$.

го уровня S спекл-поля, приближающегося к среднему по генеральной выборке. Удалось установить, что при выборе окрестности можно ограничиться 2–3 средними размерами спекла, поскольку уменьшение их числа неоправданно увеличивает дисперсию величины $M(\beta)$, а увеличение ухудшает качество визуализации из-за неравномерной освещенности объекта. Усреднение $M(\beta)$ по ансамблю β проводится с учетом весовых коэффициентов, определенных на упругом участке растяжения в процессе получения калибровок $M(\beta) = M(\beta, \varepsilon_{xx})$. Реализуемое (2) в результате интегрирования линейное регрессионное сглаживание текущих значений $\overline{M}_{ijk}^{(m\times n)}$ в интервале $[k - p, k]$ по методу Гаусса способствует подавлению шумов, обусловленных случайным характером распределения спекл-поля, если справедливо предположение о линейном по времени нарастании деформации. Аналогичный результат достигается усреднением межкадрового прироста числа мерцаний в $(m \times n)$-пиксельной окрестности при условии параллельности компонент ε_{xx} и ε_{yy} наблюдаемой плоской поверхности исследуемого объекта.

Положим, что обусловленный временны́м ходом пластической деформации процесс декорреляции спеклов является случайным стационарным гауссовым процессом и имеет такое же распределение временно́й производной и описывает динамику мерцаний законом [8] $M \sim t/\tau$ (τ — интервал корреляции процесса). В этом случае с учетом полученной нами зависимости $\overline{M}_{ijk}^{m\times n}(\varepsilon_{xx})$ (рис. 2, кривая *1*) межкадровым приращениям $\overline{M}_{ijk}^{(m\times n)} - \overline{M}_{ij(k-p)}^{(m\times n)}$ может быть поставлен в соответствие прирост деформации, что позволяет интерпретировать сигнал, определенный алгоритмом (2), как величину, линейно связанную с компонентами деформации $\dot{\varepsilon}_{xx}$ и $\dot{\varepsilon}_{yy}$.

Таким образом, алгоритм (2) обеспечивает визуализацию деформации с единственным временны́м параметром — меткой времени $k - p/2$. При линейном нарастании деформации ширина интервала регрессионного сглаживания p не определяет явно значение визуализирующего сигнала — скорости мерцания спеклов в отличие от алгоритма (1), сигнал которого D прямо связан с межкадровым сдвигом p. Следовательно, алгоритм (2) имеет однопараметрический характер, что при линейном характере зависимости прироста мерцаний от ε_{xx} и ε_{yy} существенно облегчает сбор данных о пространственно-временно́й структуре деформационного поля, упрощает их интерпретацию и допускает оценку накопления деформации интегрированием сигнала по времени.

Благодаря линейности зависимости $\overline{M}_{ijk}^{(m\times n)}(\varepsilon_{xx})$ алгоритм (2) выгодно отличается от спекл-декорреляционного алгоритма (1) точностью и информативностью отображения деформационного поля. Не менее важно явное превосходство алгоритма (2) по уровню шума, о чем свидетельствуют более низкие значения среднего квадратичного отклонения и его независимость от деформации (рис. 2, кривые *3*, *5*). Названные обстоятельства обусловливают очевидное (рис. 1) превосходство его изобразительных возможностей этого алгоритма для визуализации пластического течения.

Список литературы

[1] *Zuev L.B.* // Ann. Phys. 2001. Vol. 10. N 11–12. P. 965–984.

[2] *Rastogi P.K.* // Optics and Laser Engng. 1997. Vol. 26. N 1. P. 93–100.

[3] *Sjudahl M.* Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques. New York: J. Wiley and Sons LTD, 2001. P. 289–336.

[4] *Горбатенко В.В., Поляков С.Н., Зуев Л.Б.* // Завод. лаб. 2001. Т. 67. № 7. С. 29–32.

[5] *Zuev L.B., Polyakov S.N., Gorbatenko V.V.* // Proc. SPIE. 2002. Vol. 4900. Pt. 2. P. 1197–1206.

[6] *Поляков С.Н., Горбатенко В.В., Лопаев Е.Л., Зуев Л.Б.* // Автометрия. 2003. Т. 39. № 5. С. 102–111.

[7] *Владимиров А.П.* Докт. дис. Екатеринбург, 2002. 393 с.

[8] *Тихонов В.И.* Выбросы случайных процессов. М.: Наука, 1970. 143 с.