

УДК 539.3

**МАКРОНОСИТЕЛИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ  
В ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ,  
ОПРЕДЕЛЕННЫЕ МЕТОДОМ КОРРЕЛЯЦИИ  
ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ\***

Д.Г. Копаница<sup>1</sup>, А.М. Устинов<sup>1</sup>, А.И. Потекаев<sup>2</sup>, А.А. Клопотов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия,

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет г. Томск, Россия

E-mail: artemustinov@mail.ru

В работе представлены результаты эксперимента на испытательной машине «Universal Testing Machine 4500» с использованием цифровой оптической системы Vic-3D деформации поверхности образцов из низколегированной стали. Установлено, что на поверхности образцов в процессе деформации сжатием образуются пространственные структурные элементы деформации с характерными размерами и их взаимным расположением в зависимости от степени деформации.

При исследовании макропластической деформации кристаллических твердых тел подход, основанный на использовании традиционных дислокационных механизмов, не позволяет получить полного описания этого явления. Для ее описания вводят пространственные структурные элементы деформации, причем в зависимости от вида и степени деформации металлов и сплавов эти пространственные структурные элементы при своем движении кроме трансляции могут осуществлять и повороты [1]. В настоящее время полагают, что носителями пластической деформации кристаллических твердых тел являются дефекты различной природы. Эти дефекты, как правило, обладают обусловленным их природой полем упругих напряжений или наводятся внешними напряжениями. Естественно, что тип дефекта и создаваемое им поле упругих напряжений взаимосвязаны [2].

Результирующее перемещение пространственных структурных элементов деформации в поле внешних напряжений происходит в результате как взаимодействия с внешним полем, так и в результате их взаимодействий друг с другом. Носителями пластической деформации (т. е. пространственными структурными элементами деформации) могут быть любые «элементы», имеющие собственное поле напряжений. Размеры этих элементов значительно больше атомных [1, 2].

По своей природе носитель пластической макродеформации имеет макроскопические размеры, которые образуются из совокупности микроскопических.

---

\* В статье использованы результаты, полученные при частичной поддержке проекта (№ 8.1.42.2015), в рамках Программы «Научный фонд им. Д.И. Менделеева Томского государственного университета» в 2015 г. и по проекту Министерства образования и науки Российской Федерации и в рамках государственного задания в сфере научной деятельности по заданиям № 11.351.2014/К и 3.295. 2014/К.

Это наблюдается в том случае, если на расстоянии порядка нескольких характерных размеров макроносителей пластической деформации индивидуальные поля отдельных микродефектов неразличимы. Тогда можно выделить собственное поле макроносителя пластической деформации. Важно отметить, что характерные источники внутренних напряжений могут иметь самую разную природу в кристаллических твердых телах и, соответственно, иметь широкий спектр характерных размеров от 10–100 нм до 0,1–100 мкм. Причем сами источники внутренних напряжений могут существовать в исходном состоянии и создаваться в процессе приложения внешних напряжений [1–3].

В настоящее время появились новые технические возможности для изучения деформации поверхности твердых тел на макро- и микроуровнях системы, основанные на методе корреляции стереоскопических изображений. Применение стереосистемы позволяет наглядно получить эволюцию микросмещений и выбрать для этой цели пространственные структурные элементы деформации на поверхности образца в трех осях в процессе деформационного воздействия.

Метод «цифровой корреляции изображений» позволяет получить качественную и количественную информацию о полях деформаций, перемещений и скоростей на основе анализа изображений исследуемой поверхности твердого образца в результате приложенных различных внешних воздействий.

Цель данной работы – методом обработки цифровых стереоскопических изображений при помощи оптической системы Vic-3D выбрать пространственные структурные элементы деформации на поверхности образца, провести изучение их перемещений в приповерхностных слоях стальных образцов при деформации сжатием.

Цифровая оптическая система Vic-3D использует принцип корреляции цифровых стереоскопических изображений. В результате были получены данные по перемещению микрообъемов в трехмерном пространстве (рис. 1). Поля перемещений представляют собой проекции смещений локальных участков поверхности вдоль оси  $OX$  «поперечная деформация», вдоль оси  $OY$  «продольная деформация» и вдоль оси,  $OZ$  «поперечная деформация» (рис. 1). Деформационная картина поверхности получается путем объединения изменений микрообластей. С этой целью используют спекл-структуры, которые искусственно создают на поверхности образцов. Для

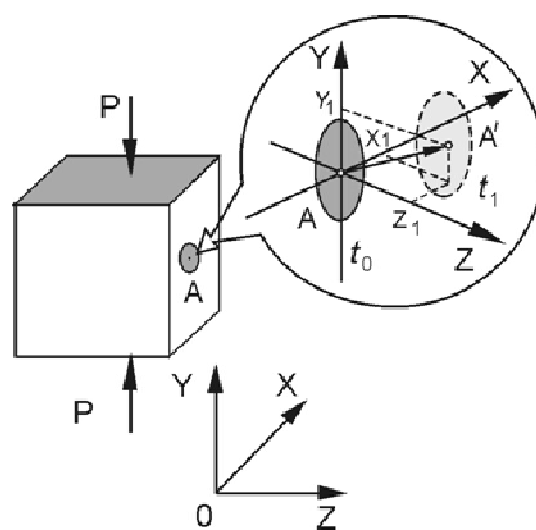


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая формирование локальных смещений на поверхности образца при деформации. Локальный участок  $A$  на поверхности образца в момент времени  $t_0$  и в момент времени  $t_1$  после деформации и проекции смещений участка  $A$  на оси  $OX$ ,  $OY$  и  $OZ$

ее получения на поверхность образца наносили контрастную мелкодисперсную окраску с помощью белой и черной матовой аэрозольной красок. Такая обработка поверхности позволила создать поверхность с множеством контрастных точек, нанесенных нерегулярно по поверхности.

В процессе испытания программа VicSnap позволяет вести синхронную запись изображений с двух камер (рис. 1), которые затем обрабатываются программой Vic-3D. В результате вычисляются геометрические параметры поверхности (координаты  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  для каждой анализируемой точки), а также перемещения в каждой точке ( $U$ ,  $V$  и  $W$ , указывающие перемещения по осям координат  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  в трехмерном пространстве соответственно), относительные деформации ( $\epsilon_{xx}$  – по оси  $X$ ,  $\epsilon_{yy}$  – по оси  $Y$ ,  $\epsilon_{xy}$  – деформации сдвига), скорости изменения перемещения и деформаций, кривизна поверхности. В качестве примера соответствующие картины полей перемещения и деформаций, полученные при деформации стального образца размером  $6 \times 6 \times 6$  см до деформации 0,171 % сжатием, приведены на рис. 2.

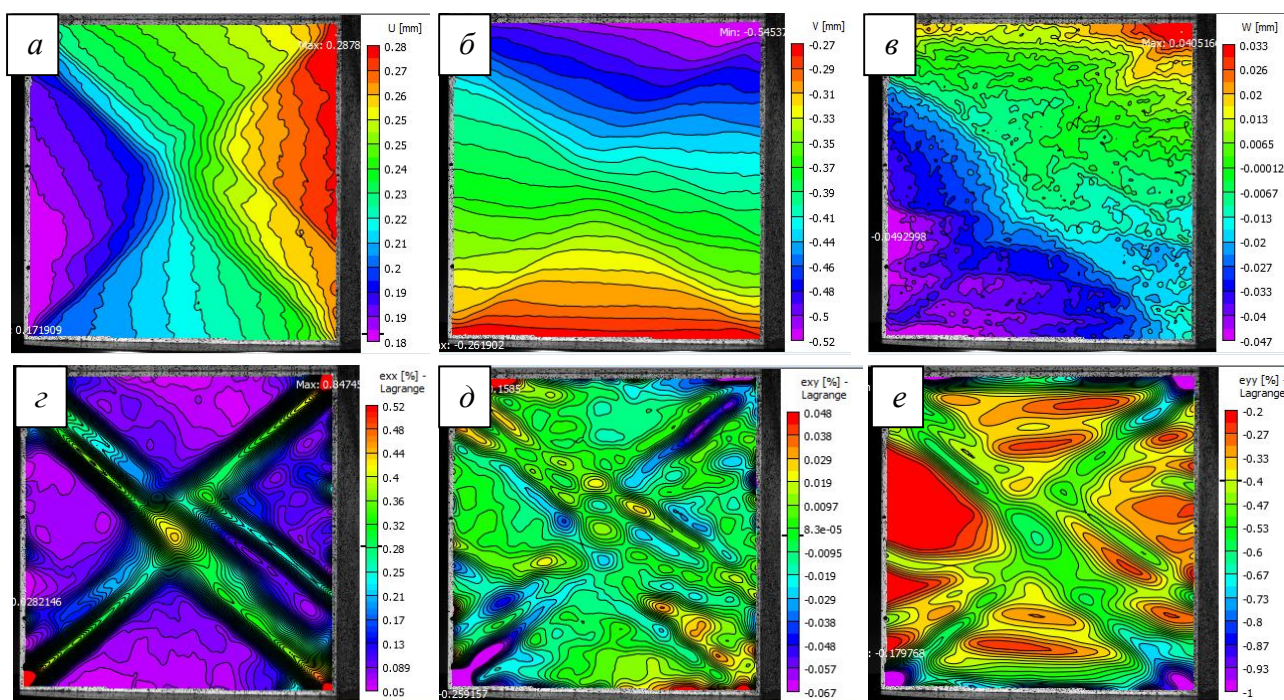


Рис. 2. Поля перемещений по оси  $X$  (а), по оси  $Y$  (б), по оси  $Z$  (в) и полей деформаций  $\epsilon_{xx}$  (г),  $\epsilon_{xy}$  (д) и  $\epsilon_{yy}$  (е) согласно схеме на рис. 1. Диаграммы в виде столбиков показывают величину смещений и деформации в зависимости от цветовой гаммы соответственно

На приведенных картинах распределений деформационных полей видно, что на поверхности образца можно выделить пространственные структурные элементы деформации. Анализ полученных данных позволил установить корре-

ляцию между эволюцией пространственных структурных элементов деформации на поверхности образцов со стадиями на деформационных диаграммах  $\sigma = f(\varepsilon)$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Структурные уровни деформации твердых тел / В.Е. Панин, Ю.В. Гриняев, Т.Ф. Елсукова [и др.] // Известие вузов. Физика. – 1982. – № 6. – С. 5–27.
2. Иванова, В.С. Синергетика. Прочность и разрушение металлических материалов / В.С. Иванова. – М. : Наука, 1992. – 453 с.
3. Алехин, В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов / В.П. Алехин. – М. : Наука, 1983.