

**Владимир Михайлович Фарбер<sup>1</sup>, Ольга Николаевна Полухина<sup>2</sup>, Ольга Владимировна Селиванова<sup>1\*</sup>, Анна Николаевна Морозова<sup>3</sup>, Дмитрий Иванович Вычужанин<sup>4</sup>, Оливия Рублетовна Тагирова<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> УрФУ имени первого президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

<sup>2</sup> Первоуральский Новотрубный завод, г. Первоуральск

<sup>3</sup> Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

<sup>4</sup> Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН, г. Екатеринбург

\*sov23@mail.ru

## ПРЕДТЕКУЧЕСТЬ И ФОРМИРОВАНИЕ ЗАРОДЫША ПОЛОСЫ ЛОКАЛИЗОВАННОЙ ДЕФОРМАЦИИ В НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ С ДЕФОРМАЦИОННЫМ СТАРЕНИЕМ

С использованием метода корреляции цифровых изображений изучены особенности пластического течения в ходе деформации растяжением образцов стали 08Г2Б, проявляющей эффект деформационного старения. Стандартные плоские образцы, вырезанные из листа, изготовленного по режиму контролируемой прокатки, испытаны на растяжение после термообработки: 680 °С, выдержка 30 мин, охлаждение на воздухе. Показано, что на стадии макроупругой деформации происходит как рассеянное пластическое течение в отдельных участках растягиваемого образца, так и возникновение зародышевого центра в приповерхностной области, из которой впоследствии вырастает зародыш полосы локализованной деформации.

*Ключевые слова:* низкоуглеродистые стали, деформационное старение, полоса локализованной деформации, метод корреляции цифровых изображений

**Vladimir M. Farber<sup>1</sup>, Olga N. Polukhina<sup>2</sup>, Olga V. Selivanova<sup>1</sup>, Anna N. Morozova<sup>3</sup>, Dmitry I. Vichuzhanin<sup>4</sup>, Olivia R. Tagirova<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> UrFU named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg

<sup>2</sup> Pervouralsky Novotrubny plant, Pervouralsk

<sup>3</sup> M.N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg

<sup>4</sup> E.S. Gorkunov Institute of Mechanical Engineering, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg

## PRE-FLOW AND OF A NUCLEUS FORMATION OF LOCALIZED DEFORMATION BAND IN LOW-CARBON STEEL WITH DEFORMATION AGING

By means of digital image correlation method, the features of plastic flow during tensile deformation of 08G2B steel samples exhibiting the effect of deformation aging were studied. Standard flat samples were tested for tensile strength after heat treatment according to the mode: 680 °C, holding time 30 min, air cooling. It was shown that at the stage of macroelastic deformation, both scattered

flow occurs in individual parts of the stretched sample, and the emergence of the nucleus center, the region from which the nucleus of the localized deformation band subsequently grows.

*Key words:* low-carbon steels, deformation aging, localized deformation band, digital image correlations

В гражданском строительстве, при изготовлении труб для транспортировки топливопродуктов широко используются стали типа 09Г2 с небольшими добавками легирующих элементов (Si, V, Nb и др.). Склонность этих сталей к деформационному старению при изготовлении конструкций или эксплуатации может привести к снижению вязкопластических свойств. Эффект деформационного старения проявляется на начальных стадиях растяжения образцов в виде полос локализованной деформации (ПЛД), вызывающих формирование на диаграмме растяжения  $\sigma$  ( $\delta$ ) площадки и зуба текучести.

Целью настоящей работы явилось изучение с помощью метода корреляции цифровых изображений (КЦИ) деформации предтекучести, возникающей до зуба (площадки) текучести, и зародыша ПЛД.

Метод КЦИ, появившийся в последние десятилетия, дает детальную информацию о величине компонент тензора деформации  $\varepsilon_{ij}$  и их распределении по поверхности растягиваемого образца в виде карт изображений и профилей распределения  $\varepsilon_{ij}$  вдоль заданных трасс [1, 2]

Исследовали образцы, вырезанные из штрипса стали 08Г2Б ((% масс.): 0,08 С; 1,85 Mn;  $\Sigma(\text{Ti-V-Nb}) \approx 0,10\%$ ), изготовленные по схеме безрекристаллизационной контролируемой прокатки с ускоренным (спрейерным) охлаждением; термическую обработку проводили по режиму: нагрев на 680°C, выдержка 30 минут, охлаждение на воздухе.

Испытания на растяжение плоских образцов размером 3×20×60 мм проводились на машине Instron 8801, снабженной оптическим комплексом Strain Master для анализа полей перемещений и деформации методом корреляции цифровых изображений. Анализировались карты продольной компоненты тензора деформации  $\varepsilon_{yy}$  и профили распределения вдоль 11 трасс, параллельных оси растяжения.

На рис. 1, а приведен участок диаграммы растяжения  $\sigma$ –( $\delta$ ) исследованного образца, на которой указаны следующие ключевые точки:

- т.1 – образование зародышевого центра;
- т.1' – предел пропорциональности (точка отклонения кривой  $\sigma$ – $\delta$  от линейного хода);
- т.2 – промежуточная точка на стадии предтекучести;
- т.3 – зуб текучести ( $\sigma_T^B$ );
- т.4 – начало площадки текучести ( $\sigma_T^H$ );
- т.4' – точка на площадке текучести ( $\sigma_T^H$ );
- т.А, лежащая на пересечении прямых т.1'–т.А и т.3–т.А: т.А показывает деформацию предтекучести.

Деформация предтекучности состоит из рассеянной пластической деформации в отдельных зернах, хаотично распределенных в объеме образца, и пластической деформации в зародышевом центре (ЗЦ), выросшем из дипольного максимума (стрелки на рис1, б).

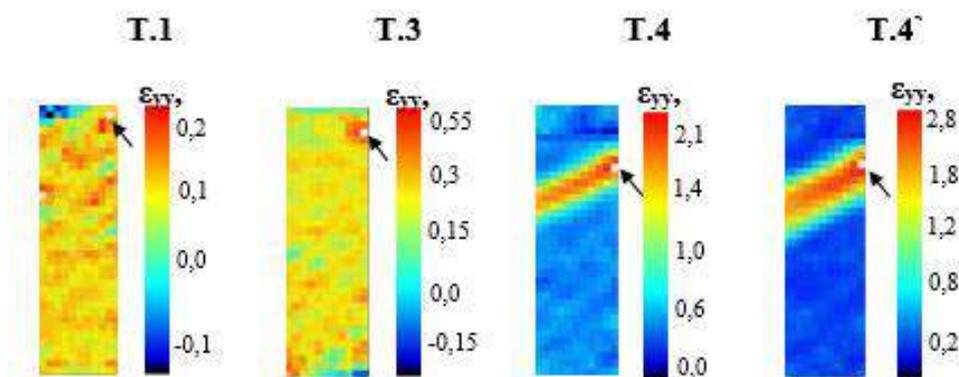
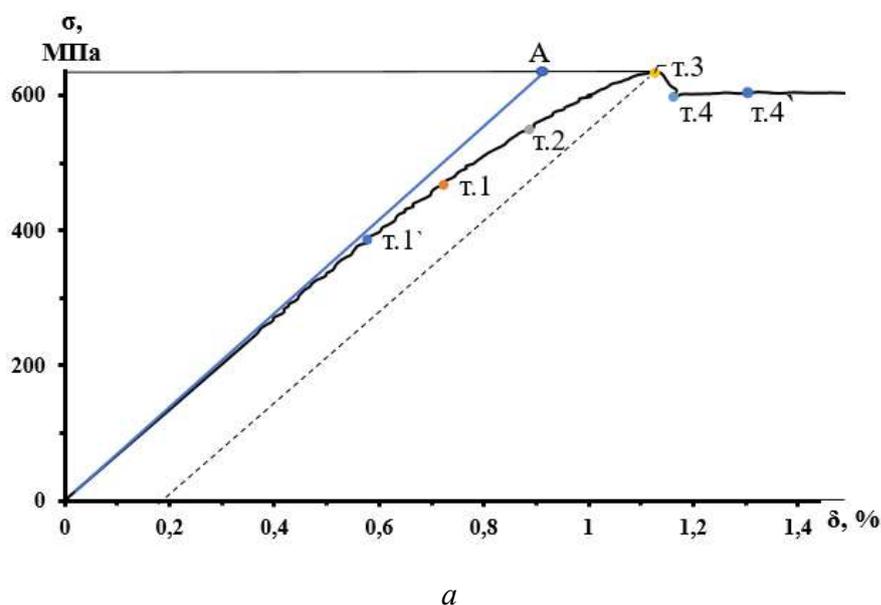


Рис. 1. Участок кривой растяжения исследуемого образца (а); карты продольной компоненты тензора деформации  $\epsilon_{yy}$ , соответствующие точкам на диаграмме растяжения (б)

Пластическая деформация – это процесс релаксации упругих напряжений в областях их концентрации. Концентраторы упругих напряжений – дипольные максимумы, формирующиеся вблизи порога упругости (близкого к пределу пропорциональности). Они находятся примерно на одинаковых расстояниях, что является следствием возникновения стоячей упругой волны в растягиваемом образце [1].

Микрообъемы (зерна), в которых происходит деформация предтекучности, вначале разбросаны хаотически, что позволяет рассматривать ее как рассеянную деформацию. Под действием нарастающих напряжений в участках, где прошла микропластическая деформация, начинают

формироваться каналы течений вдоль направлений максимальных касательных напряжений, расположенных под углом  $\sim 60^\circ$  к оси нагружения.

В приповерхностных слоях рассматривается испускание дислокации поверхностной ступенькой и генерирование дислокационных полупетель одноконечными источниками [3]. Одноконечные источники имеют напряжение старта примерно в два раза меньшее, чем двухконечные источники [3]. Исследованием методом КЦИ установлено, что стадии макроупругой деформации в растягиваемом образце кроме рассеянного течения происходит возникновение зародышевого центра (ЗЦ)– области, из которой впоследствии вырастает зародыш ПЛД (рис.1, б, 2).

Рассеянная деформация в отдельных зернах достигает  $\varepsilon_{yy} \sim 0,2\%$  и далее не возрастает, очевидно благодаря появлению ЗЦ, пластическая деформация в котором разгружает другие области. Считается, что в зернах, где произошла деформация предтекучности, не происходит размножения дислокаций. Таким образом, основная часть деформации предтекучности приходится на непрерывно увеличивающееся пластическое течение в ЗЦ, в которых  $\varepsilon_{yy}$  возрастает до  $0,55\%$ , и их размер увеличивается с  $\sim 4$  до  $6$  мм, что составляет  $\sim 15\%$  от длины зародыша. Поэтому оценить текущие размеры и  $\varepsilon_{yy}$  в ЗЦ при росте времени  $t$  и деформации ( $\delta$ ) образца удастся по первым двум трассам, которые пересекают его.

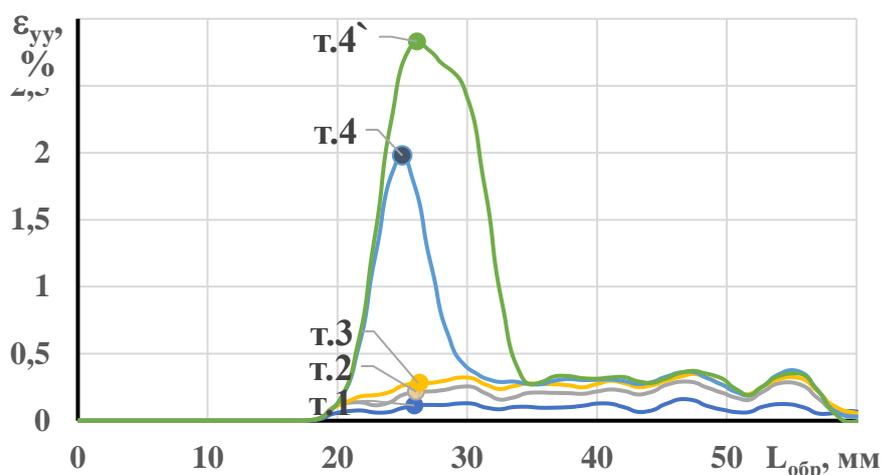


Рис.2. Профили продольной деформации  $\varepsilon_{yy}$  по трассе 11 (18,0 мм) для точек (1-4) на диаграмме  $\sigma-(\delta)$

Данные распределения  $\varepsilon_{yy}$  по длине образца  $L_{обр}$  в ходе растяжения на площадке текучести (от т.4 до т.5) по всем 11 трассам были положены в основу построения зависимостей максимальная деформация  $\varepsilon_{yy}^{max}$  как функция степени (времени) растяжения образца ( $\delta$ , %,  $t$ , сек). Область зародышевого центра пересекается трассой 11.

Анализ этих кривых показал:

–  $\varepsilon_{yy}^{max}$  в ЗЦ всегда больше, чем в любой другой части выходящего из него зародыша;

– скорость деформации  $V_{\varepsilon_{yy}^{max}} = \frac{\Delta\varepsilon_{yy}^{max}}{\Delta t}$  в отдельных участках образца различна и немонотонно возрастает при увеличении  $\delta$  (t).

Известно, что рост зародыша и деформация в нем происходит в результате движения серии дислокаций, выходящих из источника. На картах КЦИ (рис 1, б) об этом свидетельствует белая точка внутри ЗЦ, где величина  $\varepsilon_{yy}$  превышает ту, которую в данный момент растяжения образца смог оценить прибор. Следовательно, можно считать, что белые точки показывают расположенные в ЗЦ источники, испускающие серии дислокаций.

#### Выводы

1. Методом корреляции цифровых изображений показано, что в образце стали 08Г2Б с деформационным старением микропластическая деформация до зуба текучести реализуется в виде рассредоточенных по объему образца зернах, а также в зародышевом центре, из которого впоследствии вырастает зародыш полосы локализованной деформации.
2. Найдено, что значительная доля деформации предтекучести (до 80%) связана пластическим течением в зародышевом центре.
3. Установлено, что в любой момент роста зародыша деформация (компонента  $\varepsilon_{yy}^{max}$ ) в его отдельных участках всегда меньше, чем в зародышевом центре.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Farber V.M., Polukhina O.N., Khotinov V.A., Vichuzhanin D.I., Smirnov S.V. A study of plastic deformation of 08G2B steel before and at the yield plateau by digital image correlation technique. Part 1. Formation of plastic and elastic deformation waves // Metal Science and Heat Treatment. 2019. Т. 61. № 5-6. С. 274-279
2. Фарбер В.М. Деформационное старение в сталях: учеб. Пособие / В.М. Фарбер, О.В. Селиванова, В.А. Хотинов, О.Н. Полухина – Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2018 – 72 с.
3. Штремель М. А. Прочность сплавов. Деформация. – М.: МИСиС, 1999. – Ч. 2. – 384 с

#### REFERENCES

1. Farber V.M., Polukhina O.N., Khotinov V.A., Vichuzhanin D.I., Smirnov S.V. A study of plastic deformation of 08G2B steel before and at the yield plateau by digital image correlation technique. Part 1. Formation of plastic and elastic deformation waves // Metal Science and Heat Treatment. 2019. Т. 61. № 5-6. С. 274-279
2. Farber V.M. Strain aging in steels: tutorial/ V.M. Farber, O.V. Selivanova, V.A. Khotinov, O.N. Polukhina - Ekaterinburg: Ural University Publishing House, 2018 - 72 p.
3. Shtremel M. A. Strength of alloys. Deformation. – M.: MISIS, 1999. – Part 2. – 384 p.