

Received: 15.12.2023
Revised: 30.010.2024
Accepted: 16.02.2024
DOI: 10.17804/2410-9908.2024.1.045-051

PRE-YIELD AND LOCALIZED DEFORMATION BAND NUCLEATION IN A STRAIN-AGING LOW-CARBON STEEL

V. M. Farber^{1, a)}, O. N. Polukhina^{2, b)}, O. V. Selivanova^{1, c), *}, A. N. Morozova^{3, d)},
 D. I. Vichuzhanin^{4, e)}, and O. R. Tagirova^{3, f)}

¹Ural Federal University, 19 Mira St., Ekaterinburg, 620002, Russia

²Pervouralsk New Pipe Plant, 1 Torgovaya St., Pervouralsk, Sverdlovsk Reg., 623100, Russia

³M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
 18 S. Kovalevskoy St., Ekaterinburg, 620108, Russia

⁴Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
 34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620219, Russia

- a)  <https://orcid.org/0009-0006-7213-3808>  v.m.farber@urfu.ru;
 b)  <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>  o.polukhina90@yandex.ru;
 c)  <https://orcid.org/0009-0002-4874-4482>  sov23@mail.ru
 d)  <https://orcid.org/0000-0002-7071-2527>  zazma7@mail.ru;
 e)  <https://orcid.org/0000-0002-6508-6859>  mmm@imach.uran.ru;
 f)  <https://orcid.org/0009-0000-4178-5738>  taghirovq@gmail.com

*Corresponding author. E-mail: sov23@mail.ru

Address for correspondence: ul. Mira, 19, Ekaterinburg, 620002, Russia

Tel.: +7 (912) 246-6755

The features of plastic flow during tensile deformation of 08G2B steel samples exhibiting the effect of strain aging are studied by means of the digital image correlation method. Standard flat samples cut out from a sheet made by controlled rolling are tested for tensile strength after heat treatment according to the following conditions: 680 °C, holding time of 30 min, air cooling. It is shown that, at the stage of macroelastic deformation, there occur both diffuse plastic flow in separate parts of the sample under tension and the emergence of a nucleus center in the near-surface region, wherefrom a localized deformation band nucleus subsequently grows.

Keywords: low-carbon steels, strain aging, localized deformation band, digital image correlation method

Acknowledgment

The work was carried out in UrFU with a financial support from the Ministry of Science and Higher Education of Russia (development program within the framework of the Priority 2030 program), in the IMP UB RAS as part of the state assignment from the Russian Ministry of Science and Higher Education (theme Structure, No. 122021000033-2), and as part of the state assignment for the IES UB RAS, No. 124020700063-3. The equipment of the Plastometriya shared research facilities (IES UB RAS) was used in the tests.

References

- Farber, V.M., Polukhina, O.N., Khotinov, V.A., Vichuzhanin, D.I., and 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, 61 (5–6), 274–279. DOI: 10.1007/s11041-019-00416-z.

2. Farber, V.M., Selivanova, O.V., Khotinov, V.A., and Polukhina, O.N. *Deformatsionnoe starenie v stalyakh* [Strain Aging in Steels]. Izd-vo Uralskogo Universiteta Publ., Ekaterinburg, 2018, 72 p. (In Russian).
3. Shtremel, M.A. *Prochnost splavov. Deformatsiya* [Strength of Alloys. Deformation: Part 2]. MISiS Publ., Moscow, 1997, 527 p. (In Russian).

Подана в журнал: 15.12.2023

УДК 620.172

DOI: 10.17804/2410-9908.2024.1.045-051

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



В. М. Фарбер^{1, а)}, О. Н. Полухина^{2, б)}, О. В. Селиванова^{1, в), *}, А. Н. Морозова^{3, г)},
Д. И. Вичужанин^{4, д)}, О. Р. Тагирова^{3, е)}



¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»,
ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, 620002, Россия



²Первоуральский Новотрубный завод,
ул. Торговая, д. 1, г. Первоуральск, Свердловская обл., 623100, Россия



³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук,
ул. Софьи Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, 620108, Россия



⁴Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения имени Э. С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук,
ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, 620049, Россия



а)  <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>  v.m.farber@urfu.ru;

б)  <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>  o.polukhina90@yandex.ru;

в)  <https://orcid.org/0009-0002-4874-4482>  sov23@mail.ru

г)  <https://orcid.org/0000-0002-7071-2527>  zazma7@mail.ru;

д)  <https://orcid.org/0000-0002-6508-6859>  mmm@imach.uran.ru;

е)  <https://orcid.org/0009-0000-4178-5738>  taghirovq@gmail.com

*Ответственный автор. Электронная почта: sov23@mail.ru

Адрес для переписки: ул. Мира, 28, г. Екатеринбург, 620002, Россия
Тел.: +7 (912) 246–67–55

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 при 680 °С с выдержкой 30 мин и охлаждением 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

1. Введение

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.

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

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

2. Материал и методика

Исследовали образцы, вырезанные из штрипса стали 08Г2Б (0,08 С; 1,85 Мп; ~0,10 Σ (Ti-V-Nb), масс. %), изготовленные по схеме безрекристаллизационной контролируемой прокатки с ускоренным (спрейерным) охлаждением; термическую обработку проводили по следующему режиму: нагрев на 680 °С, 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 ε_{yy} и профили распределения вдоль 11 трасс, параллельных оси растяжения.

3. Результаты и обсуждение

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

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

Деформация предтекучести состоит из рассеянной пластической деформации в отдельных зернах, хаотично распределенных в объеме образца, и пластической деформации в ЗЦ, выросшем из дипольного максимума (стрелки на рис. 1 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 друг от друга, что является следствием возникновения стоячей упругой волны в растягиваемом образце [1].

Микрообъемы (зерна), в которых происходит деформация предтекучести, 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 ~60° к оси нагружения.

В приповерхностных слоях рассматривается испускание дислокаций поверхностной ступенькой и генерирование дислокационных полупетель одноконечными источниками [3]. Одноконечные источники имеют примерно в два раза меньшее напряжение старта, чем двухконечные источники [3]. Исследованием методом КЦИ установлено, что на стадии макроупругой деформации в растягиваемом образце кроме рассеянного течения происходит воз-

никновение зародышевого центра, т. е. области, из которой впоследствии вырастает зародыш ПЛД (рис.1 б и 2).

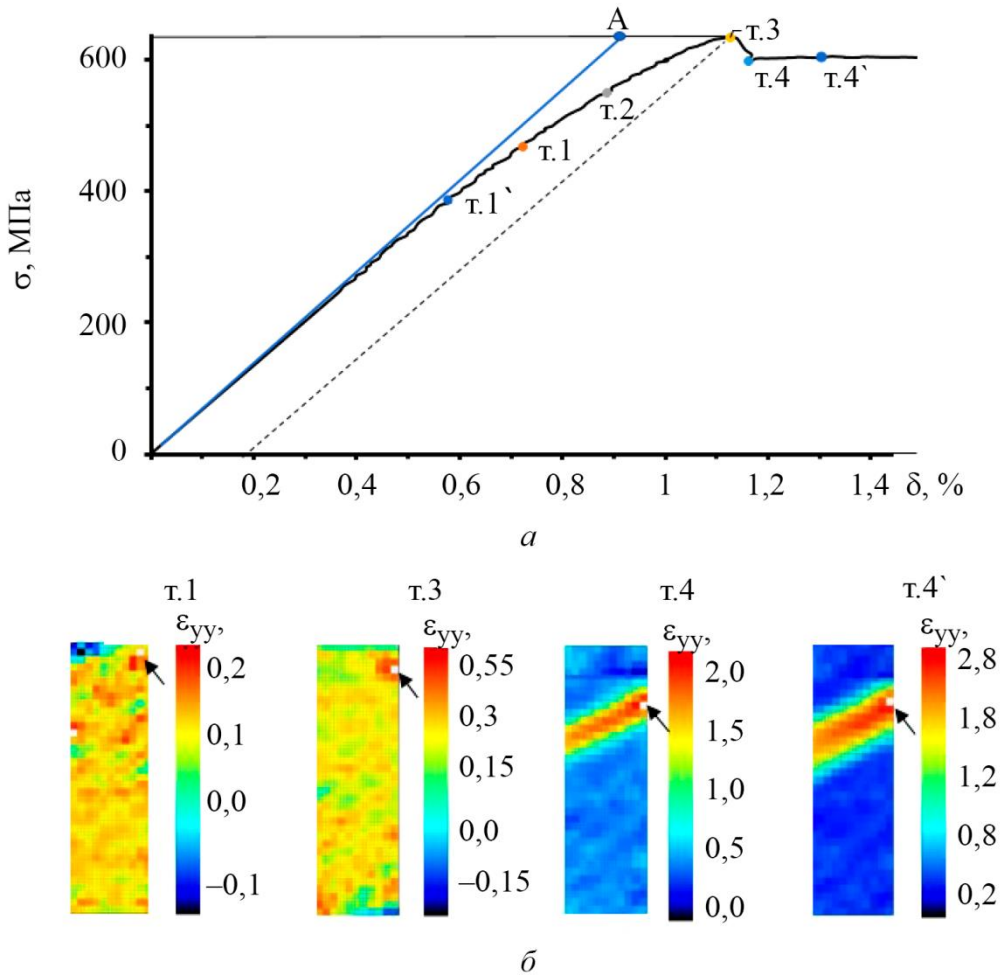


Рис. 1. Участок кривой растяжения исследуемого образца (а); карты продольной компоненты тензора деформации ϵ_{yy} , соответствующие точкам на диаграмме растяжения (б)

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

Данные распределения ϵ_{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 максимальной деформации ϵ_{yy}^{max} от степени/времени (δ , % / t , с) растяжения образца. Область зародышевого центра пересекается трассой 11.

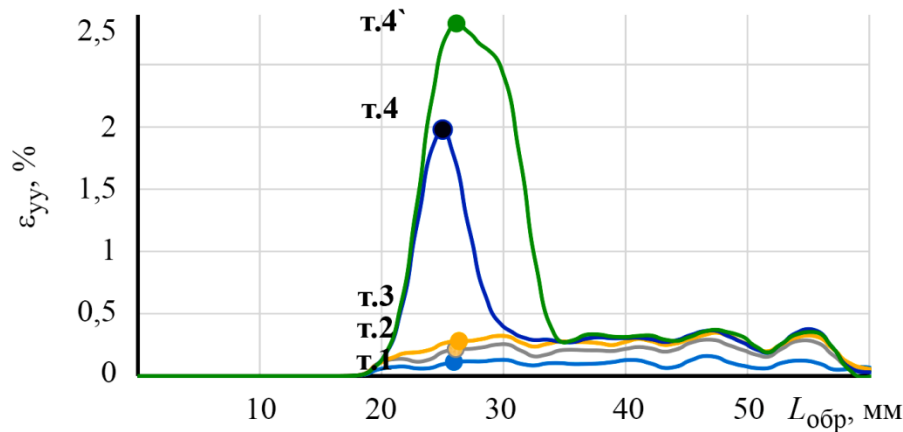


Рис. 2. Профили продольной деформации ε_{yy} по трассе 11 (18,0 мм) для точек (1–4) на диаграмме $\sigma(\delta)$

Анализ этих кривых показал:

- ε_{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 не-

монотонно возрастает при увеличении $\delta(t)$.

Известно, что рост зародыша и деформация в нем происходят в результате движения серии дислокаций, выходящих из источника. На картах КЦИ (рис. 1 б) об этом свидетельствует белая точка внутри ЗЦ, где величина ε_{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.

4. Заключение

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

Благодарность

Работа выполнена в УрФУ при финансовой поддержке Минобрнауки России (программа развития в рамках программы «Приоритет-2030»), а также в ИФМ УрО РАН в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Структура», № 122021000033-2) и в рамках государственного задания ИМАШ УрО РАН, № 124020700063-3. Испытания проведены на оборудовании центра коллективного пользования «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН.

Литература

1. 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 / V. M. Farber, O. N. Polukhina, V. A. Khotinov, D. I. Vichuzhanin, S. V. Smirnov // Metal Science and Heat Treatment. – 2019. – Vol. 61 (5–6). – P. 274–279. – DOI: 10.1007/s11041-019-00416-z.

2. Деформационное старение в сталях : учеб. пособие / В. М. Фарбер, О. В. Селиванова, В. А. Хотинков, О. Н. Полухина. – Екатеринбург : Изд-во Уральского университета, 2018. – 72 с.
3. Штремель М. А. Прочность сплавов. Деформация. Ч. 2. – М. : МИСиС, 1997. – 527 с.