

Received: 27.12.2022

Revised: 15.02.2023

Accepted: 28.02.2023

DOI: 10.17804/2410-9908.2023.1.024-040

DETECTION OF PREFRACTURE ZONES IN STRUCTURAL MATERIALS BY MAGNETIC AND OPTICAL METHODS

Yu. V. Khudorozhkova^{a),*}, S. M. Zadvorkin^{b)}, S. V. Burov^{c)}, and I. S. Kamantsev^{d)}

*Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russia*

a)  <https://orcid.org/0000-0003-3832-1419>  khjv@mail.ru;

b)  <https://orcid.org/0000-0002-7918-8207>  zadvorkin@imach.uran.ru;

c)  <https://orcid.org/0000-0002-0413-1054>  burchitai@mail.ru;

d)  <https://orcid.org/0000-0003-0775-4043>  ks@imach.uran.ru

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

Address for correspondence: ul. Komsomolskaya, 34, Ekaterinburg, 620049, Russia

Tel.: +7 (343) 362 3017

The study of the applicability of magnetic and optical methods to the detection of prefracture zones under fatigue degradation of structural materials is exemplified by the 09G2S steel. The regularities of changes in the signal of an attached fluxgate gradiometer with the increasing number of loading cycles have been revealed; namely, significant changes in the gradiometer readings on individual specimen surface areas prove to result from the formation of fracture zones. The change in the value of the coefficient of correlation among the speckle images is studied at different stages of cyclic testing. Speckle image heterogeneity is shown to appear due to fracture nucleation. Thus, the applicability of magnetic and speckle-interferometric methods to detecting prefracture zones in objects under cyclic loading is substantiated.

Keywords: magnetic state, flux gate, gradiometer, leakage field, speckle image, surface profile, cyclic testing, nondestructive testing, pipe steel.

Acknowledgment

The work was performed under the state assignment, theme No. AAAA-A18-118020790148-1. The study used the equipment of the Plastometriya shared research facilities.

We appreciate the assistance of Prof. A. P. Vladimirov, staff member of the laboratory of engineering diagnostics, IES UB RAS, who has developed the original procedure of dynamic optical speckle interferometry.

References

1. Panin V.E., Derevyagina L.S., Deryugin Ye.Ye., Panin A.V., Panin S.V., Antipina N.A. Prefracture stage mechanisms in physical mesomechanics. *Physical Mesomechanics*, 2003, vol. 6, No. 5–6, pp. 63–71. (In Russian).
2. Panin V.E. Overview on mesomechanics of plastic deformation and fracture of solids. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 1998, vol. 30, No. 1, pp. 1–11. DOI: 10.1016/S0167-8442(98)00038-X.
3. Gorkunov E.S. Magnetic Structural-Phase Analysis as Applied to Diagnosing and Evaluating the Lifetime of Products and Structural Components. Part 1. *Diagnostics, Resource and Mechanics*

- of materials and structures, 2015, iss. 1, pp. 6–40. DOI: 10.17804/2410-9908.2015.1.006-040. Available at: https://dream-journal.org/DREAM_Issue_1_2015_Gorkunov_E._S..pdf
4. Gilanyi A., Morishita K., Sukegawa T., Uesaka M., Miya K. Magnetic nondestructive evaluation of fatigue damage of ferromagnetic steels for nuclear fusion energy systems. *Fusion Engineering and Design*, 1998, vol. 42, iss. 1–4, pp. 485–491. DOI: 10.1016/S0920-3796(98)00180-X.
 5. Plekhov O.A., Pantelev I.A., and Leontiev V.A. Peculiarities of heat release and generation of acoustic emission signals in armco iron under cyclic deformation. *Fiz. Mezomekh.*, 2009, vol. 12, No. 5, pp. 37–43.
 6. Boulanger T., Chrysochoos A., Mabru C., Galtier A. Calorimetric analysis of dissipative and thermoelastic effects associated with the fatigue behavior of steels. *International Journal of Fatigue*, 2004, vol. 26, iss. 3, pp. 221–229. DOI: 10.1016/S0142-1123(03)00171-3.
 7. Palumbo D., Galietti U. Characterisation of steel welded joints by infrared thermographic methods. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 2014, vol. 11 (1), pp. 29–42. DOI: 10.1080/17686733.2013.874220.
 8. Benaarbia A., Chrysochoos A., Robert G. In: *Photomechanics Conference: book of abstracts*, 25–27 May 2015, Delft, Netherlands, 2015, pp. 86–88.
 9. Gorkunov E.S., Mushnikov A.N. Magnetic methods of evaluating elastic stresses in ferromagnetic steels (review). *Kontrol'. Diagnostika* (“Testing. Diagnostics”), 2020, vol. 23, iss. 12, pp. 4–23. DOI: 10.14489/td.2020.12.pp.004-023 . (In Russian).
 10. Gorkunov E.S., Zadvorkin S.M., Dimitrov R. Application of magnetic methods for detection of localization zones of plastic deformation in structural steels. *Kontrol'. Diagnostika* (“Testing. Diagnostics”), 2017, iss. 1, pp. 12–15. DOI: 10.14489/td.2017.01.pp.012-015 . (In Russian).
 11. Wang Z.F., Li J., Ke W., Zhu Z. Characteristics of acoustic emission for A537 structural steel during fatigue crack propagation. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 1992, vol. 27 (5), pp. 641–646. DOI: 10.1016/0956-716X(92)90354-H.
 12. Razumovsky Igor A. *Interference-Optical Methods of Solid Mechanics*, Springer–Verlag, Berlin, Heidelberg, 2011.
 13. Vildeman V.E., Tretyakov M.P., Tretyakova T.V., Bulbovich R.V. et al. *Ekspperimentalnye issledovaniya svoistv materialov pri slozhnykh termomekhanicheskikh vozdeystviyakh* [Experimental Studies of the Properties of Materials under Complex Thermomechanical Processing]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2012, 204 p. (In Russian).
 14. Gorkunov E.S. Magnetic Structural–phase Analysis. Part II. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2015, iss. 3, pp. 6–50. DOI: 10.17804/2410-9908.2015.3.006-050. Available at: https://dream-journal.org/DREAM_Issue_3_2015_Gorkunov_E._S._006_050.pdf
 15. Murav’ev V.V., Volkova L.V., Platunov A.V., and Kulikov V.A. An electromagnetic-acoustic method for studying stress-strain states of rails. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2016, vol. 52 (7), pp. 370–376. DOI: 10.1134/S1061830916070044.
 16. Lasar J., Hola M., and Cip O. Differential interferometry for real-time measurement in high cycle fatigue metal testing. In: *Proceedings of the Conference PhotoMechanics : book of abstracts*, Delft University, Netherlands, 25–27 May 2015, pp. 64–65.
 17. Serbin Evgeny D., Kostin Vladimir N., Vasilenko Olga N., Ksenofontov Danila G., Gerasimov Evgeny G., Terentev Pavel B. Influence of the two-stage plastic deformation on the complex of the magnetoacoustic characteristics of low-carbon steel and diagnostics of its structural state. *NDT & E International*, 2020, vol. 116, article 102330. DOI: 10.1016/j.ndteint.2020.102330.
 18. Vladimirov A.P. Dynamic speckle interferometry of microscopic and macroscopic processes in deformable media. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2015, iss. 6, pp. 27–57. DOI: 10.17804/2410-9908.2015.6.027-057. Available at: https://dream-journal.org/DREAM_Issue_6_2015_Vladimirov_A.P._027_057.pdf
 19. Arutyunyan A.R., Zimin B.A., Sud'enkov Yu.V. The investigation of cyclic durability of construction materials by the method of optical-acoustic spectroscopy. *Vestnik Sankt-*

- Peterburgskogo Universiteta, Matematika, Mekhanika, Astronomiya*, 2008, No. 3, P. 88–96. (In Russian).
20. Ivanova V.S. *Razrushenie metallov* [Metal Destruction]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979, 168 p. (In Russian).
 21. Botvina L.R. *Razrushenie: kinetika, mekhanizmy, obshchie zakonomernosti* [Destruction: Kinetics, Mechanisms, General Regulations]. Moscow, Nauka Publ., 2008. (In Russian).
 22. Terentyev V.F., Petukhov A.N. *Ustalost vysokoprochnykh metallicheskih materialov* [Fatigue of High Strength Metallic Materials]. Moscow, IMET RAS–ZIAM Publ., 2013, 515 p. (In Russian).
 23. Vinogradov A.Yu., Hashimoto S. Fatigue of ultrafine-grained materials produced by equal-channel angular pressing. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2004, No. 1, pp. 42–51.
 24. Nichipuruk A.P., Stashkov A.N., Kostin V.N., Korkh M.K. Possibilities of magnetic inspection of plastic deformations preceding failures of low-carbon steels constructions. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2009, vol. 45 (9), pp. 616–622.
 25. Terentyev V.F. *Ustalostnaya prochnost metallov i splavov* [Fatigue Strength of Metals and Alloys]. Moscow, Internet Inzhiniring Publ., 2002. (In Russian).
 26. Bida G.V., Nichipuruk A.P. *Magnitnye svoystva termoobrabotannykh staley* [Magnetic Properties of Heat-treated Steels]. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2005. (In Russian).
 27. Gorkunov E.S., Povolotskaya A.M., Zadvorkin S.M., Putilova E.A., Mushnikov A.N., Bazulin E.G., Vopilkin A.Kh. Some Features in the Behavior of Magnetic and Acoustic Characteristics of Hot-Rolled 08G2B Steel under Cyclic Loading. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2019, vol. 55, No. 11, pp. 827–836. DOI: 10.1134/S1061830919110044.
 28. Gorkunov E.S., Savrai R.A., Makarov A.V., Zadvorkin S.M. Magnetic Techniques for Estimating Elastic and Plastic Strains in Steels under Cyclic Loading. *Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2015, iss. 2, pp. 6–15. DOI: 10.17804/2410-9908.2015.2.006-015. Available at: https://dream-journal.org/DREAM_Issue_2_2015_Gorkunov_E.S._et_al._6_15.pdf
 29. Gorkunov E.S., Povolotskaya A.M., Zadvorkin S.M., Putilova E.A., Mushnikov A.N. The Effect of Cyclic Preloading on the Magnetic Behavior of the Hot-Rolled 08G2B Steel Under Elastic Uniaxial Tension. *Research in Nondestructive Evaluation*, 2021, vol. 32, No. 6, pp. 276–294. DOI: 10.1080/09349847.2021.2002487.
 30. Gorkunov E.S., Zadvorkin S.M., Mushnikov A.N., Smirnov S.V., Yakushenko E.I. Effect of mechanical stresses on the magnetic characteristics of pipe steel. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2014, vol. 55 (3), pp. 530–538. DOI:10.1134/S002189441403016X.
 31. Mushnikov A.N., Putilova E.A., Povolotskaya A.M., Goruleva L.S. Effect of plastic deformation on the structure and magnetic properties of hull steel. *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov*, 2022, No. 11 (809), pp. 3–10. DOI: 10.30906/mitom.2022.11.3-10. (In Russian).

Подана в журнал: 27.12.2022

УДК 620.179.143

DOI: 10.17804/2410-9908.2023.1.024-040

ОБНАРУЖЕНИЕ ЗОН ПРЕДРАЗРУШЕНИЯ В КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ МАГНИТНЫМИ И ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Ю. В. Худорожкова^{a),*}, С. М. Задворкин^{b)}, С. В. Буров^{b)}, И. С. Каманцев^{г)}

*Институт машиноведения имени Э. С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук,
ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация*

- ^{a)}  <https://orcid.org/0000-0003-3832-1419>  khjv@mail.ru;
^{b)}  <https://orcid.org/0000-0002-7918-8207>  zadvorkin@imach.uran.ru;
^{b)}  <https://orcid.org/0000-0002-0413-1054>  burchitai@mail.ru;
^{г)}  <https://orcid.org/0000-0003-0775-4043>  ks@imach.uran.ru

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

Адрес для переписки: ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация

Тел.: +7 (343) 362–30–17

На примере стали 09Г2С изучены возможности магнитных и оптических методов обнаружения зон предразрушения при усталостной деградации конструкционных материалов. Выявлены закономерности изменения сигнала приставного феррозондового градиентометра с ростом числа циклов нагружения, а именно, установлено, что значительные изменения показаний градиентометра на отдельных участках поверхности исследованных образцов обусловлены формированием очагов разрушения. Исследовано изменение величины коэффициента корреляции спекловых изображений на разных стадиях циклических испытаний. Показано, что возникновение неоднородности на картине спекловых изображений связано с зарождением очага разрушения. Таким образом, обоснована возможность использования магнитных и спекл-интерферометрических методов для обнаружения зон предразрушения при циклическом нагружении объектов.

Ключевые слова: магнитное состояние, феррозонд, градиентометр, поле рассеяния, спекловое изображение, профиль поверхности, циклические испытания, неразрушающий контроль, трубная сталь.

1. Введение

Оценка текущего состояния и определение остаточного ресурса материала является актуальной проблемой и носит как фундаментальный, так и прикладной характер. Процесс разрушения материала в общем случае является многоуровневым. При любом виде разрушения стадии зарождения трещины предшествует стадия локальной пластической деформации в зоне макроконцентратора напряжений, а необходимым условием зарождения и распространения магистральной трещины является развитие макролокализации пластической деформации по всему сечению образца [1, 2]. Остаточные напряжения, суммируясь с напряжениями, возникающими в процессе эксплуатации, могут приводить к образованию зон предразрушения и формированию трещин. В настоящее время для изучения процессов разрушения материала применяют различные физические методы исследования [3–10]. Активно используют методы акустической эмиссии и дифференциальной интерферометрии [11–19]. Результаты исследований многоциклового усталости свидетельствуют о том, что в процессе многоциклового нагружения в металлах и сплавах происходят существенные микроструктурные изменения, связанные с дислокационной

структурой [20–23]. Возможности использования различных физических методов для изучения процессов зарождения и роста усталостной трещины, в том числе без остановки циклического нагружения, показаны в работах [4, 5].

Несмотря на широкое применение физических методов неразрушающего контроля для изучения усталостной прочности конструкционных материалов, исследователи сталкиваются с трудностями при создании устройств и методик, позволяющих без остановки процесса нагружения обнаруживать области возникновения признаков необратимых процессов в материале и изучать их развитие в реальном времени [24].

Одной из основных целей исследования была отработка методики изучения магнитного состояния испытываемого материала в процессе статического или циклического нагружения.

2. Образцы и методика исследований

Для определения возможностей физических неразрушающих методов по обнаружению зон предразрушения при циклическом одноосном растяжении изготовили плоские разрывные образцы с головками из отожженной стали 09Г2С с U-образными надрезами посередине рабочей части. Нанесенные на образцы надрезы позволили локализовать место зарождения усталостной трещины и ограничить область для проведения исследований. Начальная рабочая длина образцов составляла 80 мм. Сечение рабочей части образца вне надрезов составляло $16 \times 4 \text{ мм}^2$, а в области надрезов – $6 \times 4 \text{ мм}^2$. Эскиз образца приведен на рис. 1. Предварительными механическими испытаниями было установлено, что для исследованных образцов физический предел текучести $\sigma_T = 350 \text{ МПа}$, $\sigma_B = 500 \text{ МПа}$. Соответствующая диаграмма «напряжение – деформация» приведена на рис. 2.

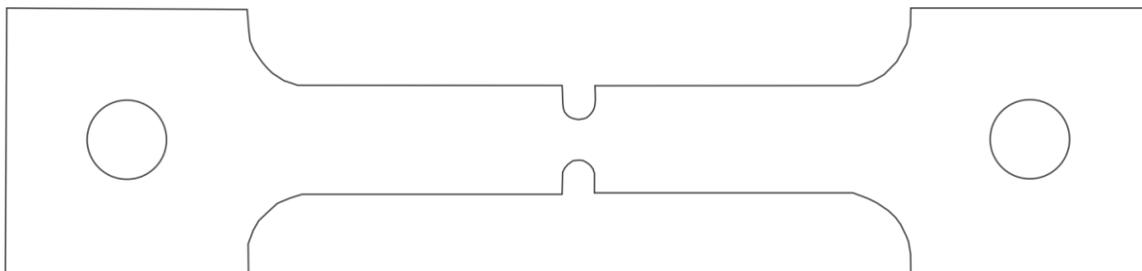


Рис. 1. Эскиз образца из стали 09Г2С с U-образными надрезами на боковых поверхностях рабочей части для статических и циклических испытаний на одноосное растяжение

Для исследования магнитного состояния образцов из стали 09Г2С в процессе статического или циклического нагружения специально сконструировали и изготовили градиентометры, регистрирующие разность индукции магнитных полей рассеяния на гладком, недеформируемом в процессе испытаний участке рабочей части образца и в области минимального сечения. Градиентометр представляет собой два одинаковых феррозонда, включенных встречно-последовательно. Каждый феррозонд состоит из сердечника диаметром 0,2 мм, длиной 10 мм из пермаллоя 80НХС с двумя обмотками из медного провода диаметром 0,08 мм; одна из них, обмотка возбуждения, содержит 150 витков, а вторая, измерительная, – 200 витков.

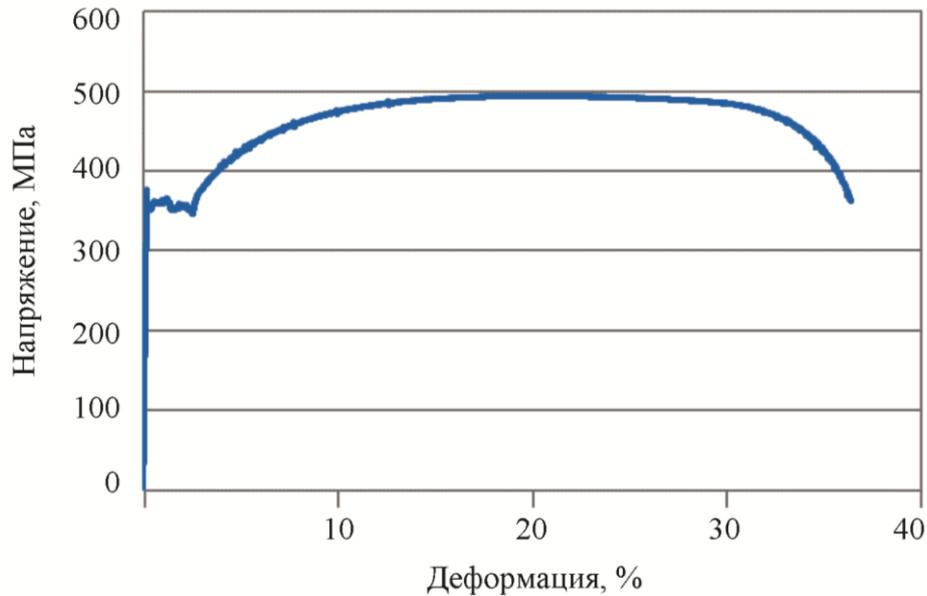


Рис. 2. Диаграмма «напряжение–деформация» отожженной стали 09Г2С

Были изготовлены градиентометры двух типов: один для размещения на фронтальной поверхности образца, а другой – на боковой поверхности. В градиентометре, размещаемом на боковой поверхности образца, один из феррозондов находится в середине надреза, а второй, формирующий опорный сигнал градиентометра, – на боковой поверхности рабочей части образца на удалении 20 мм от середины надреза. В градиентометре, размещаемом на фронтальной поверхности образца, один из феррозондов находится в центре, в области минимального сечения, а второй – на гладкой части образца на удалении 20 мм от середины U-образного надреза. Конструкция градиентометров обеспечивала их единообразную установку на образцы при испытаниях. На обоих градиентометрах феррозонды расположены перпендикулярно поверхностям образца. Градиентометры в сборе показаны на рис. 3. Перед проведением испытаний образцы размагничивали.

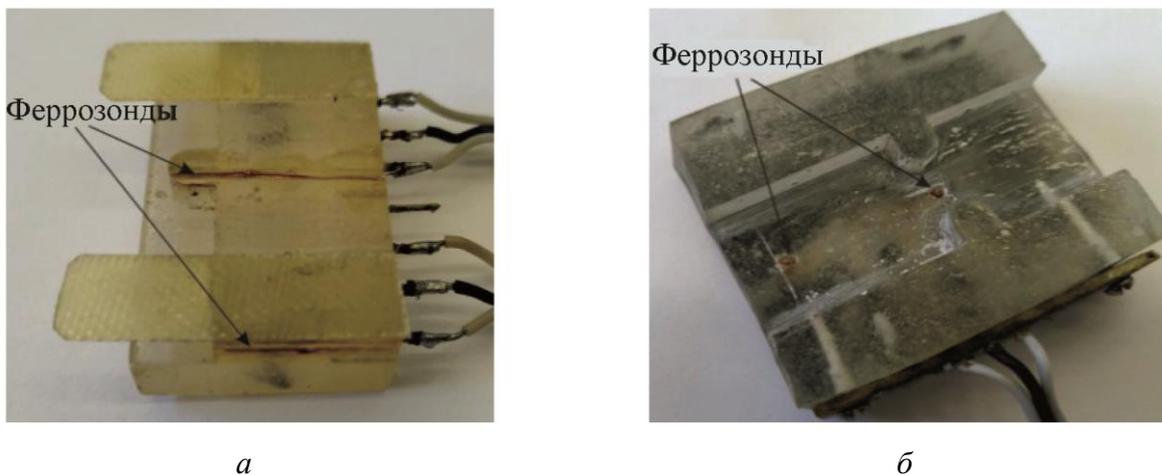


Рис. 3. Феррозондовый градиентометр в сборе: *а* – для размещения на боковой поверхности образца (торцевой); *б* – для размещения на рабочей поверхности образца (фронтальный)

Циклические испытания проведены на высокочастотной испытательной машине Mikrotron (RUMUL) с постоянным максимальным усилием цикла при частоте нагружения 103 Гц. Нагружение выполнялось по схеме «растяжение-растяжение» с коэффициентом

асимметрии $R = 0,05$ со свободным закреплением головок (на шарнирах) и максимальным усилием в цикле 7874 Н, что соответствует максимальному напряжению цикла 300 МПа. Предварительно размагниченный образец подвергался циклическому нагружению, остановки проводили при числе циклов 1128, 5000, 10 000, 50 000, 309 000, 320 000. По достижению каждой из указанных выше величин нагружение останавливали и проводили регистрацию показаний градиентометра, после чего возобновляли процесс нагружения.

Схема размещения градиентометров во время проведения эксперимента приведена на рис. 4. Из этого рисунка видно, что при проведении экспериментов показания градиентометров регистрировали при их расположении на обеих фронтальных и обеих боковых сторонах образцов, а также при размещении феррозондов, формирующих опорные сигналы градиентометров, по обе стороны от U-образных надрезов.

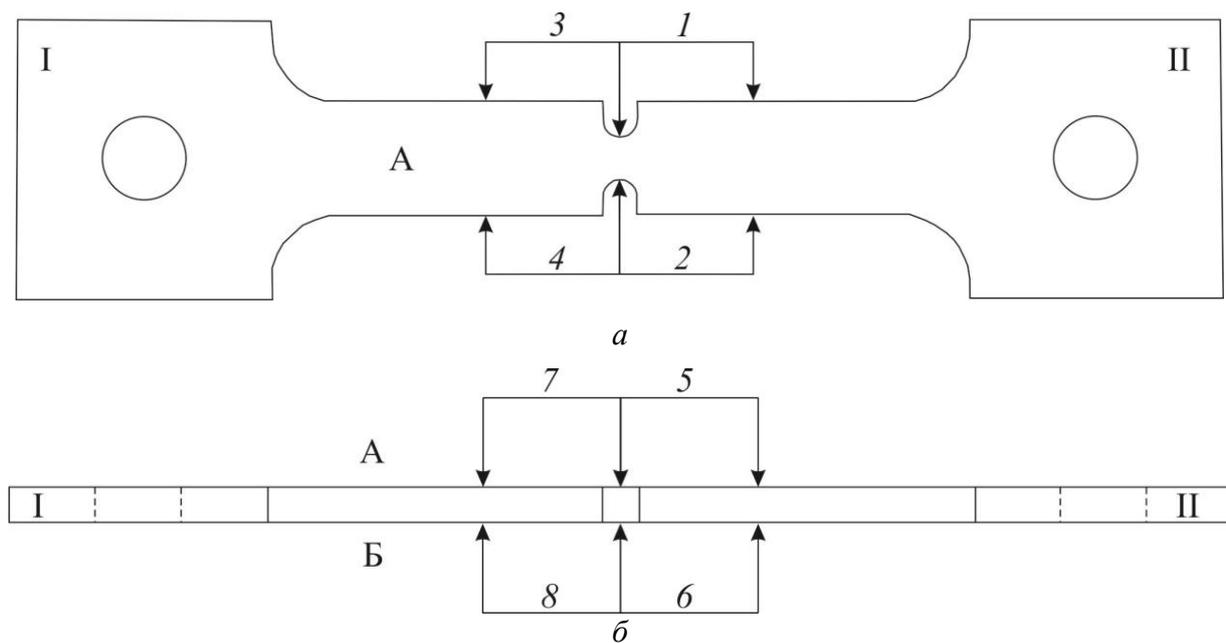


Рис. 4. Схема расположения градиентометров во время проведения эксперимента:
а – для размещения на боковой поверхности рабочей части образца; *б* – для размещения на фронтальной поверхности рабочей части образца. Цифрами отмечены положения градиентометра при регистрации показаний в процессе эксперимента

Головка образца, помеченная цифрой I, размещалась в верхнем захвате испытательной машины, цифрой II – в нижнем.

Определение топографии поверхности образцов проводилось с использованием оптического профилометра Wyko NT 1100. Профилометр позволяет проводить исследования рельефа поверхности с увеличением от $\times 1,25$ до $\times 100$ в поле зрения от 50 мкм до 4,95 мм при диапазоне измерения по вертикали от 160 нм до 2 мм и разрешении менее 0,1 нм.

Статические механические испытания на одноосное растяжение проводили на гидравлической испытательной машине Tinius Olsen Super L60 со скоростью перемещения активного захвата 0,5 мм/мин.

Химический состав исследуемой стали марки 09Г2С, масс. %

Элемент	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Al	Fe
Содержание	0,073	0,680	1,110	0,066	0,061	0,125	0,039	Основа

Химический состав стали, определенный на установке Spectromaxx, приведен в таблице.

Контроль изменения рельефа боковой поверхности, вызванного формированием локализованной зоны пластической деформации, выполнен с использованием методики на основе лазерной динамической спекл-интерферометрии. Оптическая система, использованная для формирования спеклов, располагалась рядом с испытательной машиной. Образец освещали лазерным модулем с длиной волны $\lambda = 650$ мкм, мощностью 20 мВт по нормали к поверхности. В системе координат, в которой ось oy параллельна оси образца, а ось oz совпадает с нормалью поверхности, углы между направлением освещения и осями ox , oy и oz равнялись 6, 10 и 76 градусам соответственно. Для регистрации кадров спекловых изображений объекта использовали монохромную камеру типа Видеоскан 451М. Время экспонирования кадра соответствовало 50 циклам нагружения. Разработанная оригинальная методика динамической лазерной спекл-интерферометрии позволяет проводить регистрацию спекловых изображений без остановки усталостных испытаний.

3. Результаты и их обсуждение

При проведении циклических испытаний на высокочастотной резонансной испытательной машине Mikrotron (RUMUL) регистрировали частоту нагружения, уменьшение которой свидетельствует о появлении очага разрушения. На рис. 5 приведена зависимость изменения частоты от количества циклов нагружения.

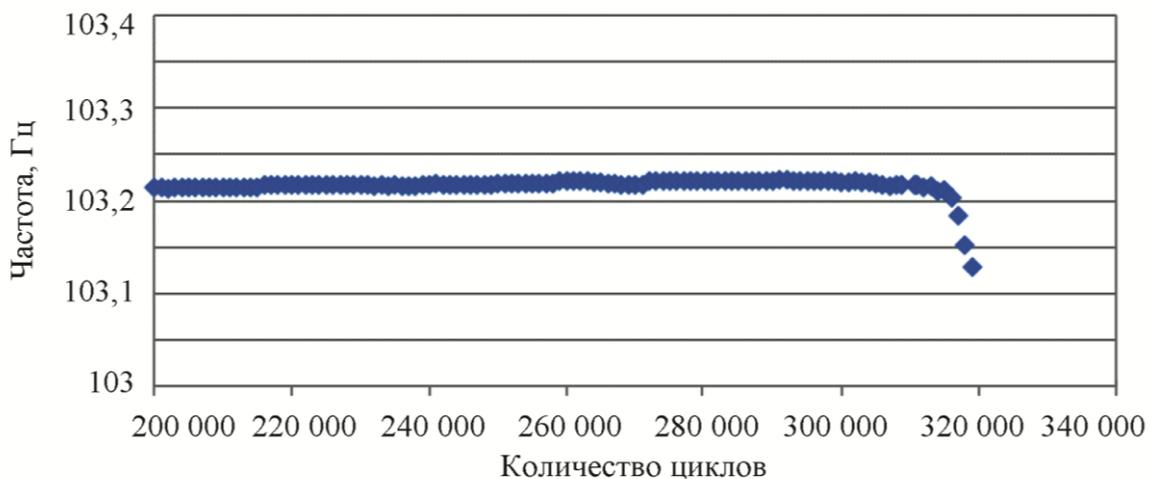


Рис. 5. Зависимость частоты нагружения от количества циклов

Как видно, при достижении примерно 314 000 циклов нагружения резонансная частота начинает уменьшаться. При этом микроскопическими исследованиями было зафиксировано образование полос скольжения в области минимального сечения рабочей части образца. По достижении 319 000 циклов нагружения испытания остановили. Визуальным осмотром вблизи середины одного из U-образных надрезов была обнаружена трещина длиной около 3 мм и раскрытием 0,156 мм. Трещина обнаружена на стороне А и не выходит на сторону Б (см. рис. 4). Структура поверхности образца после циклических испытаний показана на рис. 6.

Следует отметить, что трещина захватывает практически всю боковую поверхность одного из надрезов, но не доходит и до середины фронтальной поверхности А образца.

Регистрация спекловых изображений в процессе циклических испытаний производилась при наблюдении за поверхностью Б образца (рис. 4), то есть со стороны, противоположной появлению трещины. Спекловое изображение участка образца и распределения величины коэффициента корреляции спекловых изображений η на разных стадиях циклических испытаний приведены на рис. 7. Методика расчета η приведена в работе [18].

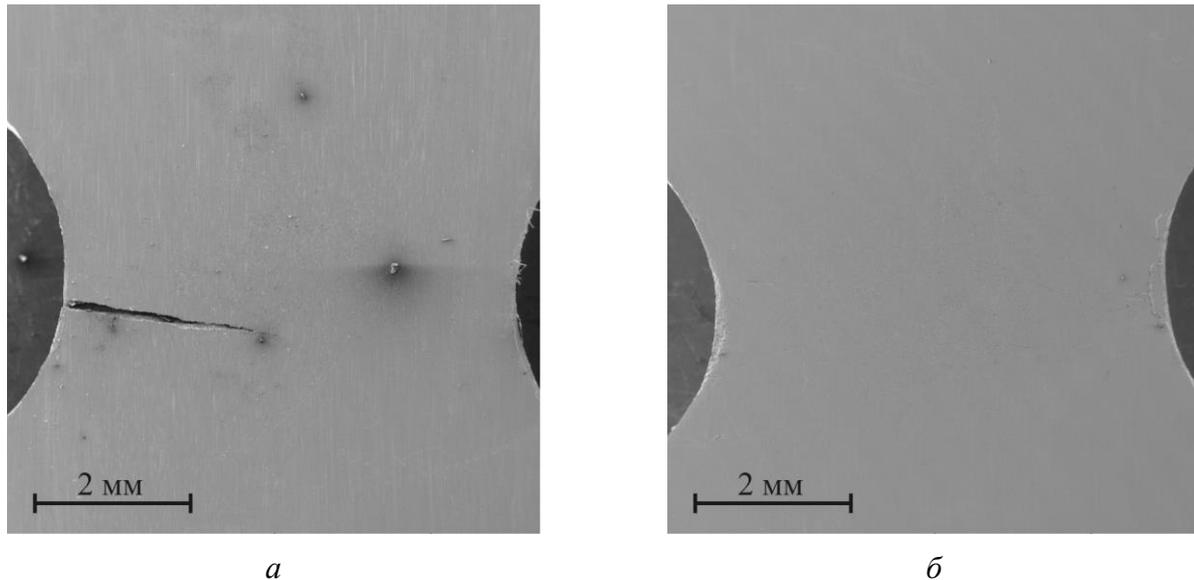


Рис. 6. Структура поверхности образца стали 09Г2С в области U-образных надрезов после циклических испытаний: *а* – сторона А; *б* – сторона Б

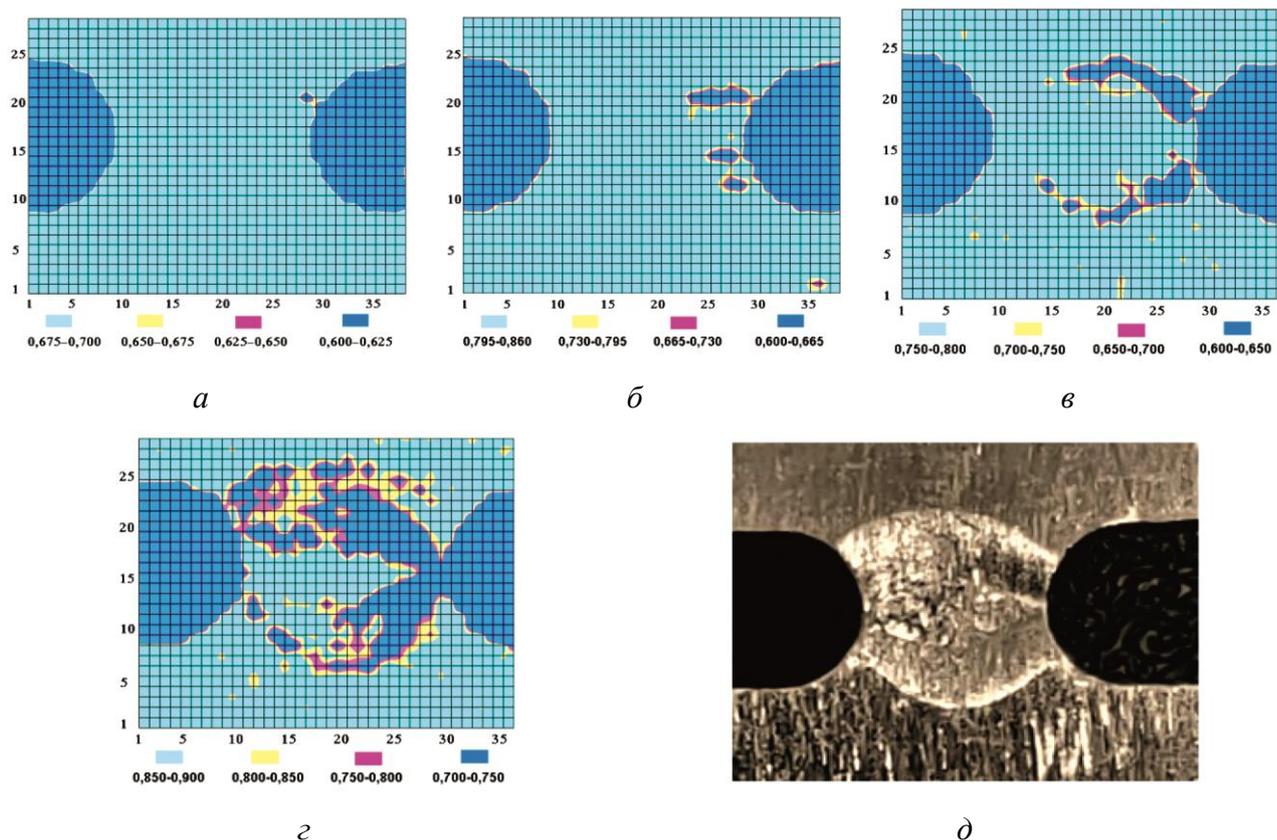


Рис. 7. Распределения величины коэффициента корреляции спекловых изображений η после 296 000 циклов нагружения (*а*), после 308 000 циклов нагружения (*б*), после 315 000 циклов нагружения (*в*), после 319 000 циклов нагружения (*г*), а также фотография зоны усталостного повреждения образца после 319000 циклов нагружения (*д*). Цветом обозначены диапазоны величин коэффициента корреляции спекловых изображений

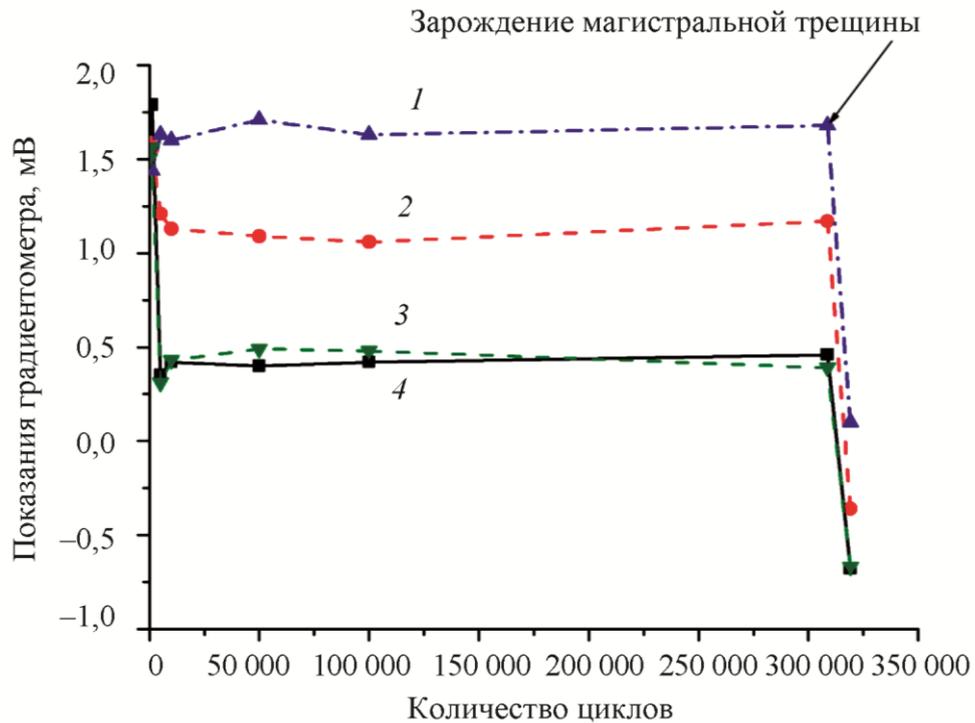
Регистрируемое снижение частоты нагружения произошло при 314 000 циклов нагружения. По достижении примерно 300 000 циклов на картине спекловых изображений была зафиксирована неоднородность, которую можно объяснить началом формирования полос скольжения. Следует отметить, что появление этой неоднородности произошло до заметного уменьшения частоты нагружения, свидетельствующего о зарождении очага разрушения и зафиксированного при микроскопическом исследовании полос скольжения по достижении 309 000 циклов. Это может свидетельствовать о большей чувствительности лазерной спеклинтерферометрии к усталостной деградации материала. После 309 000 циклов начались существенные изменения в картине спеклов, связанные с появлением множественных полос скольжения и последующим образованием и развитием усталостной трещины.

Кривые зависимостей показаний градиентометра от количества циклов нагружения для бокового и фронтального размещения градиентометров приведены на рис. 8. Цифрами на графике отмечены положения градиентометров (рис. 4) при регистрации показаний в процессе эксперимента. Разница показаний сигналов градиентометров при различном расположении их «опорных» феррозондов может быть обусловлена асимметрией ферромагнитных масс системы «испытательная машина – образец». Как видно из рис. 8, появление полос скольжения и последующей усталостной трещины приводит к значительному изменению показаний градиентометров.

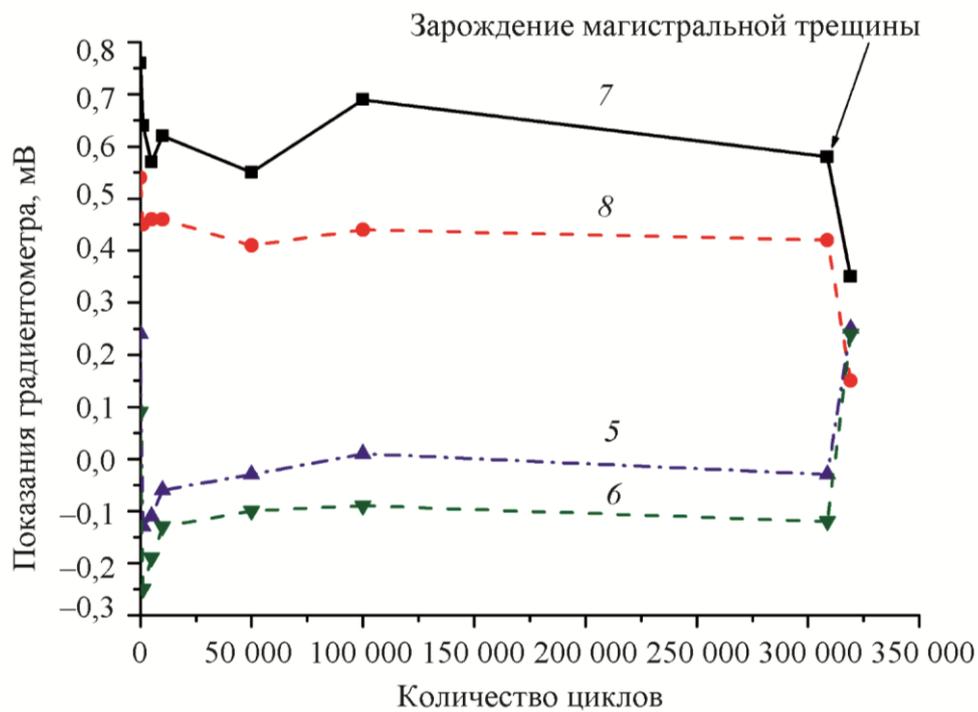
Показания градиентометра, расположенного на боковой поверхности образца, уменьшаются при всех вариантах его размещения, что можно объяснить увеличением дефектности структуры, сопровождающимся появлением полос скольжения и, соответственно, магнитных полей рассеяния. Тем самым нивелируется влияние разности площади сечений образца в местах расположения «опорного» феррозонда и феррозонда, расположенного в области минимального сечения образца в центре U-образных надрезов.

Результаты оптической профилометрии образца в исходном состоянии и после 319 000 циклов отнулевого растяжения приведены на рис. 9 для стороны с усталостной трещиной (сторона А на рис. 4) и на рис. 10 для стороны без трещины (сторона Б на рис. 4).

Согласно данным оптической профилометрии, перепад высот на поверхности сторон исследуемого образца в исходном состоянии не превышает 10 мкм на базе 18 мм. После проведения усталостных испытаний на обеих сторонах образца в области наименьшего сечения наблюдаются изменения рельефа поверхностей в виде «утяжек» со средним уменьшением толщины образца примерно на 0,14 мм. Таким образом, наименьшее сечение рабочей части образца после испытания уменьшилось почти на 4 %. Это изменение рельефа свидетельствует о пластической деформации данного участка образца. Причем зона пластической деформации имеет четкие границы с обеих сторон образца. Следует отметить, что по краям усталостной трещины на стороне А (рис. 4) не наблюдается изменений рельефа поверхности, в то время как с противоположной стороны образца (под трещиной) эти изменения максимальны, так что глубина выемки достигает 80 мкм. Вблизи вершины трещины также находится зона со значительным изменением рельефа поверхности диаметром около 4 мм и глубиной около 60 мкм. Такое поведение материала при циклической нагрузке вероятно обусловлено достижением циклического предела текучести [25]. Данные оптической профилометрии, представленные на рис. 10, коррелируют с распределением величины коэффициента корреляции спекловых изображений η после 319 000 циклов нагружения на рис. 7.



a



б

Рис. 8. Зависимости показаний градиентометров от количества циклов нагружения:
a – при размещении градиентометра на боковой поверхности образца;
б – при фронтальном расположении градиентометра

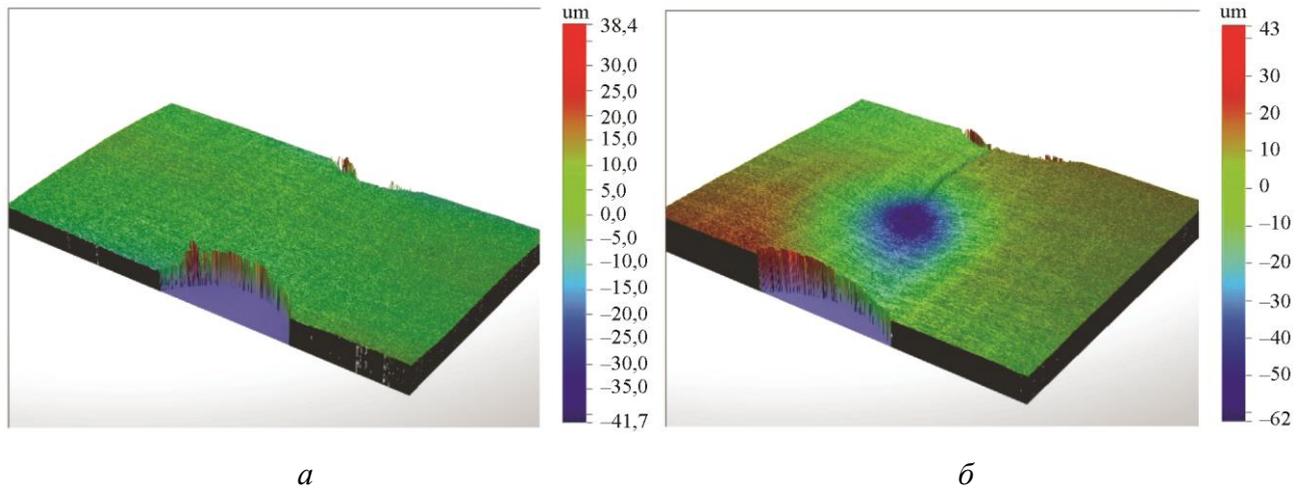


Рис. 9. 3D-профиль поверхности образца стали 09Г2С в области U-образных надрезов (сторона А): *а* – до циклических испытаний; *б* – после циклических испытаний

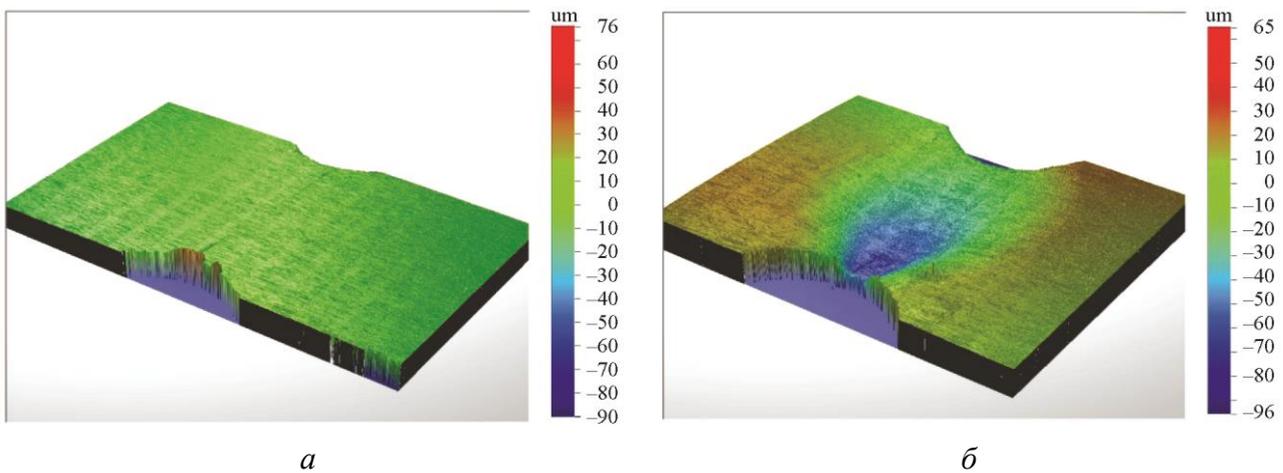


Рис. 10. 3D-профиль поверхности образца стали 09Г2С в области U-образных надрезов (сторона Б): *а* – до циклических испытаний; *б* – после циклических испытаний

Кроме усталостных испытаний, на таких же образцах из стали 09Г2С проводили пошаговое одноосное растяжение со снятием нагрузки после каждого шага нагружения и возрастанием нагрузки при следующем шаге с регистрацией магнитных характеристик (относительной максимальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{Гмакс}}$, коэрцитивной силы H_c , остаточной индукции B_r и показаний магнитного градиентометра, установленного на боковой поверхности рабочей части образца) в нагруженном состоянии и после снятия нагрузки. Таким образом, при каждом шаге испытаний проводилось поэтапное увеличение максимального напряжения от 0 до 580 МПа с шагом 63 МПа в упругой области и 42 МПа в области развитой пластической деформации. Измерения с помощью магнитного градиентометра проводили только в исходном состоянии и в области развитой пластической деформации. Полученные результаты магнитных измерений приведены на рис. 11. Видно, что зависимости $\mu_{\text{Гмакс}}$ и B_r от приложенных напряжений σ имеют характер, обратный зависимости $H_c(\sigma)$, что соответствует многочисленным литературным данным [26–31]. При $\sigma < \sigma_T$ при приложенной нагрузке в образце происходит формирование магнитной текстуры деформации. Как следствие, значения $\mu_{\text{Гмакс}}$ растут, а значения H_c уменьшаются, что обусловлено положительным магнитоупругим эффектом. В случае $\sigma < \sigma_T$ после снятия нагрузки магнитные характеристики образца практически не изменяются по сравнению с исходными (до растяжения) значениями.

Таким образом, при пошаговом упругом растяжении образца не происходит необратимых изменений его магнитных свойств.

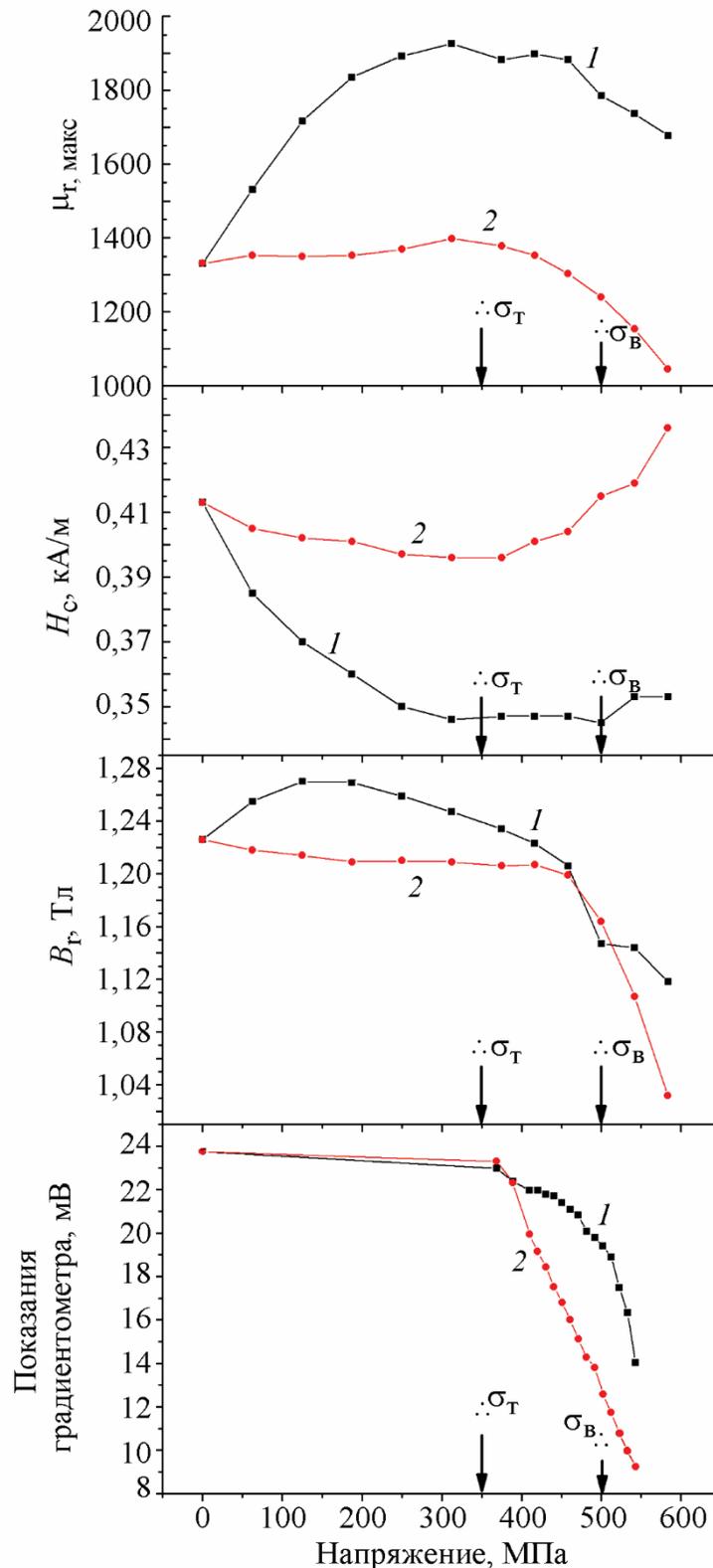


Рис. 11. Зависимости магнитных характеристик при пошаговом одноосном растяжении с возрастающей нагрузкой и снятии нагрузки до нуля после достижения максимального напряжения в цикле: 1 – при приложенной нагрузке; 2 – после снятия нагрузки

При переходе из области упругого деформирования в область развитой деформации происходит изменение хода кривых для всех измеренных магнитных характеристик. Стадия деформационного упрочнения характеризуется интенсивным повышением плотности дислокаций. Следует отметить, что в условиях приложенной нагрузки в интервале $\sigma_T < \sigma < \sigma_B$ магнитные характеристики изменяются слабо, что обусловлено взаимным уравновешиванием разнонаправленного влияния на них упругой и пластической деформации. После снятия нагрузки H_c увеличивается, а $\mu_{\text{гмакс}}$ уменьшается, что вызвано исчезновением магнитной текстуры. При дальнейшем увеличении приложенной нагрузки фактор увеличения плотности дефектов начинает превалировать, а это вызывает заметный рост H_c и снижение $\mu_{\text{гмакс}}$ и B_T .

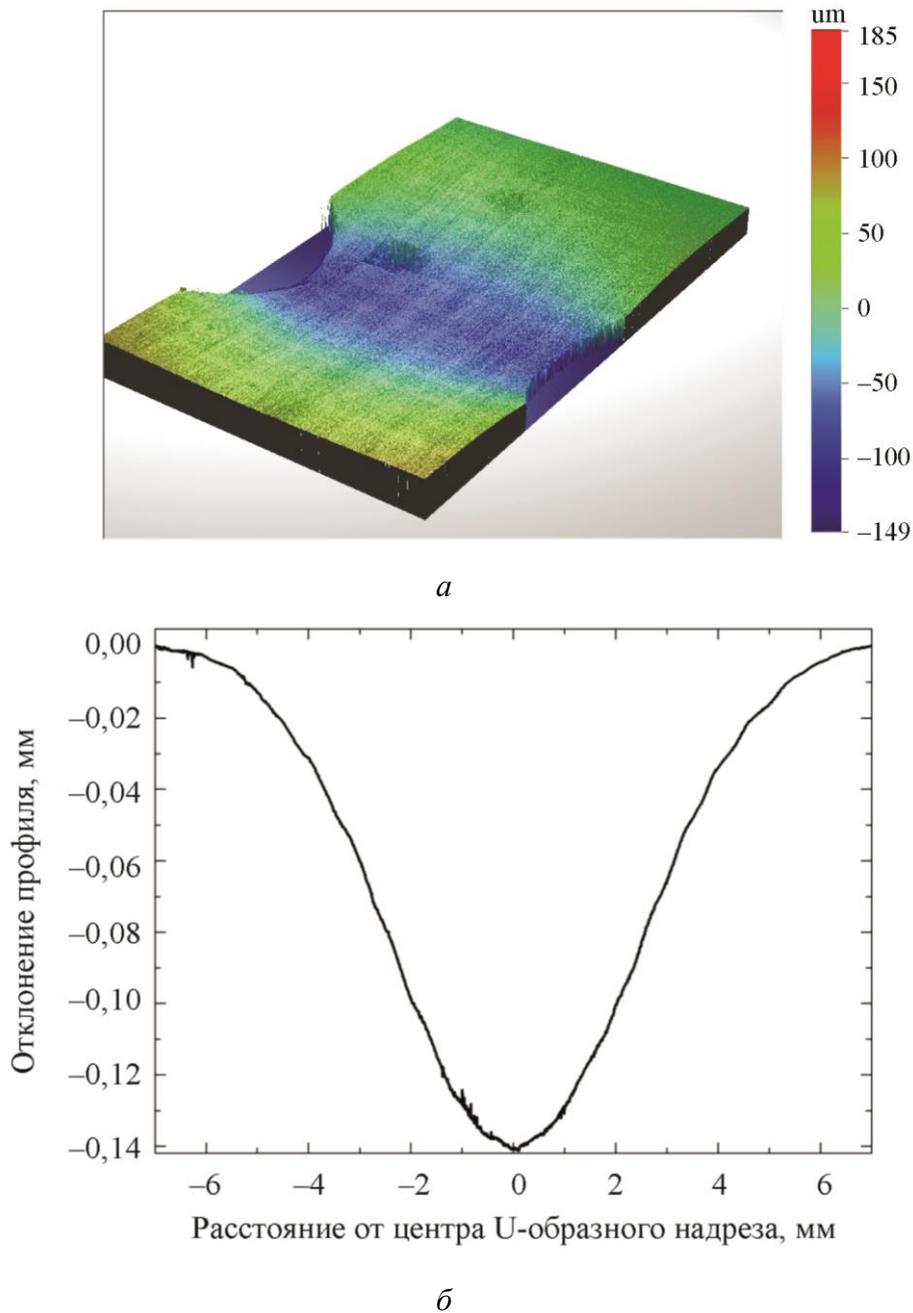


Рис. 12. Поверхность образца стали 09Г2С в области U-образных надрезов после растяжения:
a – 3D профиль; *б* – профиль поверхности

Показания градиентометра при максимальных напряжениях в цикле и после снятия нагрузки практически совпадают при напряжениях ниже предела текучести исследуемого материала. Это свидетельствует об отсутствии существенных необратимых изменений структуры и магнитного состояния материала при упругой деформации. Значительные отклонения в показаниях градиентометра наблюдаются при увеличении нагрузки выше предела текучести, причем, чем больше нагрузка, тем больше разница в этих показаниях. Однозначность зависимостей, показанных на рис. 11, свидетельствует о возможности использования данной методики для контроля накопленной деформации при нагружении объекта.

Результаты оптической профилометрии, выполненной с помощью бесконтактного профилометра Wyko NT 1100, для образца, подвергнутого растяжению до напряжения 580 МПа, приведены на рис. 12.

Толщина образца в месте надрезов после нагружения до 580 МПа уменьшилась на 0,28 мм, до 3,72 мм. Ширина образца, измеренная по середине надрезов, то есть в области минимального сечения, после нагружения до 580 МПа уменьшилась на 0,21 мм, до 5,79 мм. Таким образом, наименьшее сечение рабочей части образца после растяжения стало равно 21,54 мм² и уменьшилось почти на 11 %.

4. Заключение

Проведен комплексный анализ с целью обнаружения зон предразрушения при циклическом одноосном растяжении плоских разрывных образцов из отожженной стали 09Г2С с U-образными надрезами посередине рабочей части, позволяющими локализовать место зарождения усталостной трещины и ограничить область для проведения исследований. Выявлены закономерности изменения сигнала приставного феррозондового градиентометра с ростом числа циклов нагружения. В процессе пошагового одноосного растяжения при увеличении нагрузки выше предела текучести показания градиентометра снижаются. Это обусловлено увеличением дефектности структуры. Установлено, что значительные изменения показаний градиентометра на отдельных участках поверхности исследованных образцов обусловлены формированием очагов разрушения.

Исследовано изменение величины коэффициента корреляции спекловых изображений на разных стадиях циклических испытаний. Снижение частоты нагружения, характеризующее начальную стадию деформации, зафиксировано при 314 000 циклов нагружения, а неоднородность на картине спекловых изображений, связанная с началом формирования полос скольжения, – при 300 000 циклах. Показано, что возникновение неоднородности на картине спекловых изображений связано с зарождением очага разрушения.

Таким образом, в ходе проведенных исследований была обоснована возможность использования магнитных и спекл-интерферометрических методов для обнаружения зон предразрушения при циклическом нагружении объектов.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № АААА-А18-118020790148-1. При проведении исследований использовано оборудование ЦКП «Пластометрия».

Авторы выражают благодарность сотруднику лаборатории технической диагностики ИМАШ УрО РАН Владимирову А. П. за разработанную оригинальную методику динамического варианта оптической спекл-интерферометрии.

Литература

1. Закономерности стадии предразрушения в физической мезомеханике / В. Е. Панин, Л. С. Деревягина, Е. Е. Дерюгин, А. В. Панин, С. В. Панин, Н. А. Антипина // Физическая мезомеханика. – 2003. – Т. 6, № 6. – С. 97–106.
2. Panin V. E. Overview on mesomechanics of plastic deformation and fracture of solids // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 1998. – Vol. 30, No. 1. – P. 1–11. – DOI: 10.1016/S0167-8442(98)00038-X.
3. Gorkunov E. S. Magnetic Structural-Phase Analysis as Applied to Diagnosing and Evaluating the Lifetime of Products and Structural Components. Part 1 // Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2015. – Iss. 1. – P. 6–40. – DOI: 10.17804/2410-9908.2015.1.006-040. – URL: https://dream-journal.org/DREAM_Issue_1_2015_Gorkunov_E._S..pdf
4. Magnetic nondestructive evaluation of fatigue damage of ferromagnetic steels for nuclear fusion energy systems / A. Gilanyi, K. Morishita, T. Sukegawa, M. Uesaka., K. Miya // Fusion Engineering and Design. – 1998. – Vol. 42, iss. 1–4. – С. 485–491. – DOI: 10.1016/S0920-3796(98)00180-X.
5. Плехов О. А., Пантелеев И. А., Леонтьев В. А. Особенности выделения тепла и генерации сигналов акустической эмиссии при циклическом деформировании армко-железа // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12, № 5. – С. 37–43.
6. Calorimetric analysis of dissipative and thermoelastic effects associated with the fatigue behavior of steels / T. Boulanger, A. Chrysochoos, C. Mabru, A. Galtier // International Journal of Fatigue. – 2004. – Vol. 26, iss. 3. – P. 221–229. – DOI: 10.1016/S0142-1123(03)00171-3.
7. Palumbo D., Galietti U. Characterisation of steel welded joints by infrared thermographic methods // Quantitative InfraRed Thermography Journal. – 2014. – Vol. 11 (1). – P. 29–42. – DOI: 10.1080/17686733.2013.874220.
8. Benaarbia A., Chrysochoos A., Robert G. // Photomechanics Conference, 25–27 May 2015, Delft, Netherlands : book of abstracts. – 2015. – P. 86–88.
9. Горкунов Э. С., Мушников А. Н. Магнитные методы оценки упругих напряжений в ферромагнитных сталях (обзор) // Контроль. Диагностика. – 2020. – Т. 23, № 12 (270). – С. 4–23. – DOI: 10.14489/td.2020.12.pp.004-023 .
10. Горкунов Э. С., Задворкин С. М., Дмитров Р. Применение магнитных методов для обнаружения зон локализации пластической деформации в конструкционных сталях // Контроль. Диагностика. – 2017. – № 1. – С. 12–15. – DOI: 10.14489/td.2017.01.pp.012-015.
11. Characteristics of acoustic emission for A537 structural steel during fatigue crack propagation / Z. F. Wang, J. Li, W. Ke, Z. Zhu // Scripta Metallurgica et Materialia. – 1992. – Vol. 27 (5). – P. 641–646. – DOI: 10.1016/0956-716X(92)90354-H.
12. Разумовский И. А. Интерференционно-оптические методы механики деформируемого твердого тела : учеб. пособие. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 240 с.
13. Экспериментальные исследования свойств материалов при сложных термомеханических воздействиях / В. Э. Вильдеман, М. П. Третьяков, Т. В. Третьякова, Р. В. Бульбович, С. В. Словиков, А. В. Бабушкин, А. В. Ильиных, Д. С. Лобанов, А. В. Ипатова / под ред. В. Э. Вильдемана. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 204 с.
14. Gorkunov E. S. Magnetic Structural-phase Analysis. Part II // Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2015. – Iss. 3. – P. 6–50. – DOI: 10.17804/2410-9908.2015.3.006-050. – URL: https://dream-journal.org/DREAM_Issue_3_2015_Gorkunov_E._S._006_050.pdf
15. An electromagnetic-acoustic method for studying stress-strain states of rails / V. V. Murav'ev, L. V. Volkova, A. V. Platonov, and V. A. Kulikov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2016. – Vol. 52 (7). – P. 370–376. – DOI: 10.1134/S1061830916070044.
16. Lasar J., Hola M., and Cip O. Differential interferometry for real-time measurement in high cycle fatigue metal testing // Proceedings of the Conference PhotoMechanics, Delft University, Netherlands, 25–27 May 2015 : book of abstracts, pp. 64–65.

17. Influence of the two-stage plastic deformation on the complex of the magnetoacoustic characteristics of low-carbon steel and diagnostics of its structural state / Evgeny D. Serbin, Vladimir N. Kostin, Olga N. Vasilenko, Danila G. Ksenofontov, Evgeny G. Gerasimov, Pavel B. Terentev // *NDT & E International*. – 2020. – Vol. 116, article 102330. – DOI: 10.1016/j.ndteint.2020.102330.
18. Vladimirov A. P. Dynamic speckle interferometry of microscopic and macroscopic processes in deformable media // *Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2015. – Iss. 6. – P. 27–57. – DOI: 10.17804/2410-9908.2015.6.027-057. – URL: https://dream-journal.org/DREAM_Issue_6_2015_Vladimirov_A.P._027_057.pdf
19. Арутюнян А. Р., Зимин Б. А., Судьенков Ю. В. Исследование циклической долговечности конструкционных материалов методом оптико-акустической спектроскопии // *Вестник Санкт-Петербургского Университета. Математика. Механика. Астрономия*. – 2008. – № 3. – С. 88–96.
20. Иванов В. С. Разрушение металлов. – М. : Metallurgiya, 1979. – 168 с.
21. Ботвина Л. Р. Разрушение. Кинетика, механизмы, общие закономерности / ИМЕТ им. А. А. Байкова РАН. – М. : Наука, 2008. – 334 с.
22. Терентьев В. Ф., Петухов А. Н. Усталость высокопрочных металлических материалов. – М. : ИМЕТ–ЦИАМ, 2013. – 514 с.
23. Vinogradov A. Yu., Hashimoto S. Fatigue of ultrafine-grained materials produced by equal-channel angular pressing // *Russian Metallurgy (Metally)*. – 2004. – No. 1. – P. 42–51.
24. Possibilities of magnetic inspection of plastic deformations preceding failures of low-carbon steels constructions / A. P. Nichipuruk, A. N. Stashkov, V. N. Kostin, M. K. Korkh // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2009. – Vol. 45 (9). – P. 616–622.
25. Терентьев В. Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов : монография. – М. : Интермет Инжиниринг, 2002. – 287 с.
26. Бида Г. В., Ничипурук А. П. Магнитные свойства термообработанных сталей. – Екатеринбург : УрО РАН, 2005. – 218 с.
27. Some features in the behavior of magnetic and acoustic characteristics of hot-rolled 08G2B steel under cyclic loading / E. S. Gorkunov, A. M. Povolotskaya, S. M. Zadvorkin, E. A. Putilova, A. N. Mushnikov, E. G. Bazulin, A. Kh. Vopilkin // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2019. – Vol. 55, No. 11. – P. 827–836. – DOI: 10.1134/S1061830919110044.
28. Magnetic Techniques for Estimating Elastic and Plastic Strains in Steels under Cyclic Loading / E. S. Gorkunov, R. A. Savrai, A. V. Makarov, S. M. Zadvorkin // *Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2015. – Iss. 2. – P. 6–15. – DOI: 10.17804/2410-9908.2015.2.006-015. – URL: https://dream-journal.org/DREAM_Issue_2_2015_Gorkunov_E.S._et_al._6_15.pdf
29. The Effect of Cyclic Preloading on the Magnetic Behavior of the Hot-Rolled 08G2B Steel Under Elastic Uniaxial Tension / E. S. Gorkunov, A. M. Povolotskaya, S. M. Zadvorkin, E. A. Putilova, A. N. Mushnikov // *Research in Nondestructive Evaluation*. – 2021. – Vol. 32, No. 6. – P. 276–294. – DOI: 10.1080/09349847.2021.2002487.
30. Effect of mechanical stresses on the magnetic characteristics of pipe steel / E. S. Gorkunov, S. M. Zadvorkin, A. N. Mushnikov, S. V. Smirnov, E. I. Yakushenko // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. – 2014. – Vol. 55 (3). – P. 530–538. – DOI: 10.1134/S002189441403016X.
31. Влияние пластической деформации на структуру и магнитные свойства корпусной стали / А. Н. Мушников, Е. А. Путилова, А. М. Поволоцкая, Л. С. Горюлева // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2022. – № 11 (809). – С. 3–10. – DOI: 10.30906/mitom.2022.11.3-10.