

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-6-55-61>

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОДЕФОРМАЦИИ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ

© Владимир Петрович Гуляев^{1*}, Петр Петрович Петров², Ксения Валерьевна Степанова², Анатолий Андреевич Платонов², Михаил Иванович Макаров², Михаил Алексеевич Платонов²

¹ Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, Россия, 677891, г. Якутск, Белинского ул., д. 58; *e-mail: uekztddg@mail.ru

² Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН, Россия, 677890, г. Якутск, Октябрьская ул., д. 1; e-mail: ppp32@mail.ru

Статья поступила 23 апреля 2019 г. Поступила после доработки 17 сентября 2019 г. Принята к публикации 26 декабря 2019 г.

Диагностику несущей способности машин и конструкций, служебных свойств конструкционных материалов проводят разрушающими и неразрушающими методами. В системе неразрушающих методов исследования служебных свойств материалов и изделий особое место занимают радиационные способы, обладающие инструментальными возможностями диагностирования и контроля изменений сплошности твердого тела на разных структурных уровнях. Методом рентгеновской дифрактометрии установлена стабильность напряженно-деформированного состояния образцов конструкционной стали, подвергнутых действию длительных (более 5 лет) статических нагрузок, не превышающих предела текучести материала. Цель данной работы — экспериментальное определение влияния упругих напряжений, постоянно действующих в течение длительного времени, и климатического фактора на изменение полуширины профиля дифракционной линии. Установлено, что прямолинейная зависимость полуширины профиля дифракционной линии сохраняется в диапазоне упругих напряжений, не превышающих $0,5\sigma_T$. Представлены результаты изменения микроструктурного состояния (микродеформаций), полученные по характеристикам профиля дифракционных линий. Экспериментально установлено, что длительное действие малых упругих напряжений при периодическом годовом колебании температур (2013 – 2018 гг.) существенно не изменяет характеристики профиля дифракционных линий образцов конструкционной стали 08пс. Напротив, низкие климатические температуры способствовали устранению отдельных инструментальных погрешностей, обусловленных конструктивными условиями эксперимента. Резкое изменение значений истинной полуширины профиля дифракционных линий при напряжениях $\sigma > 0,5\sigma_T$ указывает, возможно, на минимальный предел запаса прочности конструкционной стали 08пс при установлении величины допускаемого напряжения (σ). Обнаруженные новые закономерности изменений микропластической деформации в конструкционных сталях в диапазоне упругих напряжений, соответствующих реальным эксплуатационным нагрузкам, требуют дальнейшего изучения и анализа.

Ключевые слова: растяжение; длительные статические нагружения; годовое колебание температуры; напряженно-деформированное состояние; микроструктура; рентгеноструктурный анализ.

EXPERIMENTAL STUDY OF MICRO-DEFORMATION OF STRUCTURAL STEEL UNDER SIMULATION OF OPERATING CONDITIONS

© Vladimir P. Gulyaev^{1*}, Petr P. Petrov², Ksenia V. Stepanova², Anatoliy A. Platonov², Mikhail I. Makarov², Mikhail A. Platonov²

¹ M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Belinskogo ul. 58, Yakutsk, 677891 Russia; *e-mail: uekztddg@mail.ru

² V. P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS, Oktyabrskaya ul. 1, Yakutsk, 677890 Russia; e-mail: ppp32@mail.ru

Received April 23, 2019. Revised September 17, 2019. Accepted December 26, 2019.

Diagnostics of the load bearing capacity of machines and structures, service properties of structural materials are carried out by destructive and non-destructive methods. In the system of non-destructive meth-

ods of diagnosing and monitoring of the service properties of materials and products, radiation technologies are of particular importance, since they have instrumental capabilities for diagnosing and controlling changes in the soundness of a solid body at different structural levels. The X-ray diffractometry method provided determination of the stability of the stress-strain state of structural steel samples subjected to prolonged (over 5 years) static loads not exceeding the yield strength of the material. The purpose of the study is to determine experimentally the effect of continuous (since 2013) elastic stress and climatic factors on the change in the half-width of the diffraction line profile. It is shown that the straight-line dependence of the half-width of the diffraction line profile is maintained in the range of elastic stresses not exceeding $0.5\sigma_t$. The results of changes in the microstructural state (micro-strains) identified by the characteristics of the diffraction lines profile are presented and discussed. The results of the experimental study of the effect of small steady elastic stresses reveal that periodic annual fluctuation of temperatures (2013 – 2018) does not cause a significant change in the properties of the diffraction line profile of the 08ps structural steel samples. On the contrary, low climatic temperatures contributed to the elimination of individual instrumental errors attributed to design conditions of the experiment. A sharp change in the true half-width of the diffraction line profile at the stress values $\sigma > 0.5\sigma_t$, probably indicates the minimum margin of safety of 08ps structural steel when setting the permissible stress value (σ). The revealed changes in microplastic deformation observed in structural steels in the range of elastic stresses corresponding to real operational loads require further study and analysis.

Keywords: tension; long-term static load; annual temperature fluctuation; stress-strain state; microstructure; X-ray diffraction analysis.

Введение

Опыт эксплуатации горных машин и оборудования, магистральных газо- и нефтепроводов, других технических систем показывает, что совокупность регламентов работы и обслуживания не в полной мере обеспечивает их надежность в течение длительного периода [1 – 3]. Об актуальности совершенствования регламентов эксплуатации, в том числе с диагностированием несущей способности технических систем, свидетельствует расширение хозяйственной деятельности предприятий и организаций в арктических и субарктических регионах страны, отличающихся длительным периодом воздействия низких климатических температур [4, 5]. С другой стороны, надежность несущих элементов машин и конструкций определяется их оптимальной металлоемкостью или коэффициентами запаса прочности. Коэффициенты запаса прочности несущих элементов выбирают на основе экспериментального и теоретического установления предельных границ использования потенциальных служебных свойств конструкционных материалов [6 – 8].

В настоящее время несущую способность машин и конструкций, служебные свойства конструкционных материалов диагностируют разрушающими и неразрушающими методами. В системе неразрушающих методов диагностики и контроля служебных свойств материалов и изделий особое место занимают радиационные способы, обладающие инструментальными возможностями исследования и контроля изменений сплошности твердого тела на разных структурных уровнях.

Определение надежности эксплуатируемых металлических изделий и конструкций методами рентгеновской дифрактометрии — приоритетное

направление исследований и практического применения. В работах [9 – 11] отмечена высокая эффективность использования рентгеновских дифрактометров, в том числе портативных, для технической диагностики и неразрушающего контроля эксплуатируемых промышленных объектов, контроля качества изготовления деталей и т.п. Методы рентгеновской деформометрии обеспечивают также изучение процессов деформирования на субструктурных уровнях, на которых, возможно, могут быть выявлены характерные особенности деформации кристаллического строения конструкционных материалов при напряженно-деформированном состоянии, вызванном эксплуатационными воздействиями [12 – 16].

Цель данной работы — экспериментальное определение влияния упругих напряжений, постоянно действующих в течение длительного времени (с 2013 г.), и климатического фактора на изменение полуширины профиля дифракционной линии (B).

Программа исследования включала:

1) нагружение идентичных образцов конструкционного материала растягивающей нагрузкой, обеспечивающей постоянное действие в поперечном сечении напряжений σ , равных $0,3\sigma_t$, $0,5\sigma_t$, $0,7\sigma_t$ и $0,9\sigma_t$, в течение длительного времени (в годах);

2) периодическую рентгеновскую съемку фиксированной области поверхности образцов на дифрактометре для определения истинной полуширины дифракционного профиля B , межплоскостного расстояния кристаллической решетки и других характеристик;

3) статическое нагружение образцов на открытой атмосферной площадке и в закрытом помещении для установления влияния климатических факторов на изменение характеристик ди-

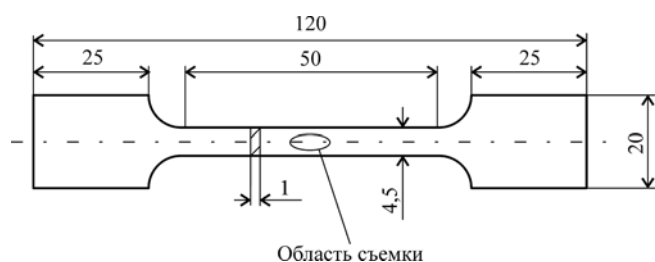


Рис. 1. Схема образцов конструкционной стали 08пс, находившихся под действием статических нагрузок на открытой атмосферной площадке и в закрытом помещении

Fig. 1. Diagram of 08ps steel samples exposed to static loads on an open atmospheric platform and indoors

фракционного профиля материала образцов в диапазоне упругих напряжений, постоянно действующих в течение длительного времени.

Исследования проводили на строительной стали 08пс, кристаллическая структура которой имеет объемно-центрированную кубическую (ОЦК) решетку. Первичные микропластические деформации в такой структуре наблюдались по плотноупакованным плоскостям скольжения второго порядка, в частности $hkl = (220)$.

Схема и геометрические размеры образцов стали 08пс представлены на рис. 1.

Характеристики механических свойств стали 08пс определяли путем испытания плоских пропорциональных образцов типа I по ГОСТ 1497–84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение (с Изменениями № 1, 2, 3)». Полученная в результате испытаний усредненная диаграмма растяжения образцов представлена на рис. 2.

Статические нагрузки, развиваемые грузами разной массы, прикладывали к сборкам, составленным из трех последовательно соединенных между собой идентичных образцов (рис. 3). Такая сборка образцов в единую цепь, вертикально нагруженную грузом, позволяла проводить рентгеновскую съемку центральной области рабочей части каждого из трех образцов (см. рис. 1). Массы грузов подбирали таким образом, чтобы в поперечном сечении каждого образца первой сборки действовали напряжения растяжения $\sigma = 0,9\sigma_T$, для второй сборки $\sigma = 0,5\sigma_T$, третьей сборки — $\sigma = 0,7\sigma_T$, четвертой сборки — $\sigma = 0,3\sigma_T$.

Таким образом, на протяжении более пяти лет под действием статических нагрузок находились четыре сборки образцов стали на открытой атмосферной площадке, и четыре сборки — в закрытом помещении. В январе 2013 г. на открытой атмосферной площадке и в закрытом помещении были выставлены первая и вторая сборки под действием постоянных растягивающих напряжений $\sigma = 0,9\sigma_T$ и $\sigma = 0,5\sigma_T$, в 2015 г. —

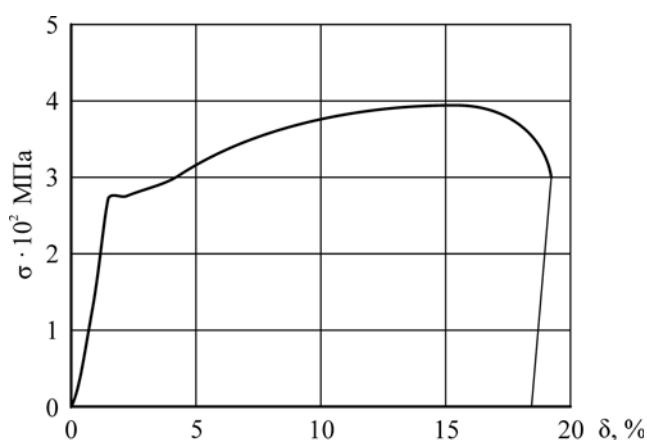


Рис. 2. Диаграмма растяжения образцов конструкционной стали 08пс

Fig. 2. Stress-strain diagrams of the studied structural steel 08ps



Рис. 3. Схема нагружения сборки из трех последовательно соединенных образцов грузами различной массы (повернуто на 90°)

Fig. 3. The scheme of loading the assembly of 3 serially connected samples (rotated by 90°)

третья и четвертая сборки под действием напряжений $\sigma = 0,7\sigma_T$ и $\sigma = 0,3\sigma_T$.

Метод исследования

Для проведения рентгеновской съемки сборки разгружали и разбирали на отдельные образцы на период времени, необходимый для съемки. Предварительно образцы осматривали, измеряли их геометрические размеры. Поверхности образцов очищали и подготавливали к рентгеновской съемке. После съемки образцы соединяли в сборку, устанавливали на стенды открытой атмосферной площадки и закрытого помещения для дальнейшей выдержки под действием прежней массы груза.

Для получения статистически значимых результатов измерений проводили трехкратную рентгеновскую съемку в центре рабочей части каждого образца сборки. Таким образом, при одном уровне нагружения было получено девять профилей дифракционных линий.

На рис. 4 показаны годовое колебание среднемесячной температуры окружающего воздуха на открытой атмосферной площадке (по данным Якутского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды — сплошная линия) и температура (+ 18 °С) в закрытом помещении (штриховая линия) в течение всего периода выдержки исследуемых образцов под действи-

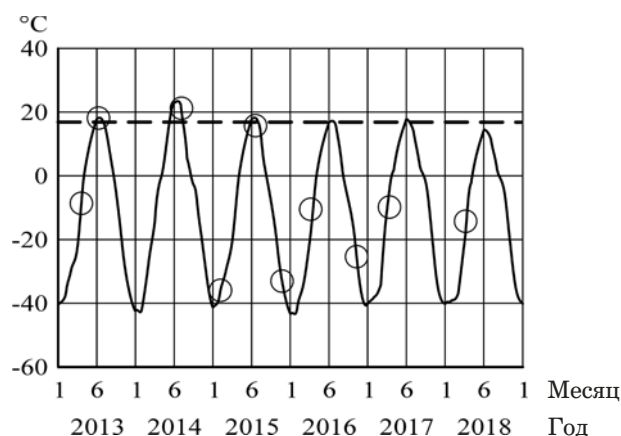


Рис. 4. Годовое колебание температуры окружающего воздуха на открытой атмосферной площадке (сплошная линия) и температура воздуха в закрытом помещении (штриховая линия)

Fig. 4. Annual fluctuation of ambient air temperature: open atmospheric platform (solid line) and air temperature indoors (dashed line)

ем статических нагрузок. Даты рентгеновских съемок образцов, выдерживаемых на открытом воздухе и в закрытом помещении, совпадали.

Рентгенодифракционные спектры образцов регистрировали на рентгеновском дифрактометре Rigaku Ultima IV производства Rigaku International Corporation (Япония) с высокоточным горизонтальным гониометром. В гониометре образец закрепляли горизонтально и сканировали генератором рентгеновского излучения и датчиком, представляющим собой сцинтилляционный счетчик, расположенным и вращающимся в вертикальной плоскости на рычаге гониометра.

Съемку дифракционного спектра проводили по схеме $\theta - 2\theta$ сканирования с фокусировкой по Брэггу – Брентано в излучении Co (длина волны $\lambda = 0,179020$ нм). Во вторичном пучке использовался графитовый монохроматор. Размер щели,

ограничивающей падающий пучок: по горизонтали — 10 мм, по вертикали — 0,5 мм. Щели Соллера на падающем и дифрагированном пучках — 5° ; ширина щели, ограничивающей дифрагированный пучок по вертикали перед приемной щелью, — $0,5^\circ$.

Рабочий режим источника рентгеновского излучения: $U = 40$ кВ; $I = 40$ мА; скорость сканирования — 0,1 град/мин; шаг — 0,01 град; ось сканирования — $2\theta/\theta$. Дифрактометр автоматически (комплекс программ PDXL-2, аппроксимация функцией псевдо-Фойгта) выводит профиль дифракционной линии в координатах интенсивность — угол 2θ , угол 2θ (в градусах) пика профиля, межплоскостное расстояние d (в ангстремах), максимум интенсивности $I_{\max}$ отраженного излучения (в имп/с), полуширину профиля B (в градусах) и другие характеристики.

Обсуждение результатов

В таблице представлена часть результатов рентгеновских съемок образца стали 08пс, выдерживаемого под действием постоянного растягивающего напряжения $\sigma = 0,9\sigma_t$ на открытой атмосферной площадке. Как показал рентгеноструктурный анализ (см. таблицу), интенсивность дифракционного профиля линии резко (почти в 10 раз) уменьшается после первого года натурных испытаний и сохраняется практически на одном уровне все последующие годы испытаний. Полуширина профиля B относительно исходного состояния увеличивается в три и более раз, смещения положений максимумов профилей дифракционных линий $2\theta_{\max}$, а также изменения межплоскостных расстояний d не наблюдаются, что указывает на отсутствие существенных остаточных напряжений.

Профили дифракционных линий образцов стали 08пс регистрируются в интервале углов

Характеристики профиля дифракционных линий образца стали 08пс (напряжение $\sigma = 0,9\sigma_t$, открытая атмосферная площадка)

Characteristics of the diffraction lines profile of 08ps steel samples (stress $\sigma = 0.9$ yield strength, open atmospheric platform)

Дата съемки	2θ , град.	d , град.	$I_{\max}$, имп/с	B , град.
Исходное состояние 12.04.2013	123,9215	1,013434	1344	0,1695
27.06.2014	123,890	1,01358	168	0,336
28.01.2015	123,892	1,01357	326	0,323
24.11.2015	123,932	1,01338	286	0,333
22.04.2016	124,010	1,01301	175	0,429
01.11.2016	123,942	1,01334	196	0,363
20.04.2017	123,844	1,01380	186	0,500
05.10.2017	124,020	1,01295	138	0,451
21.03.2018	123,936	1,01336	166	0,490
30.10.2018	123,960	1,01326	152	0,470

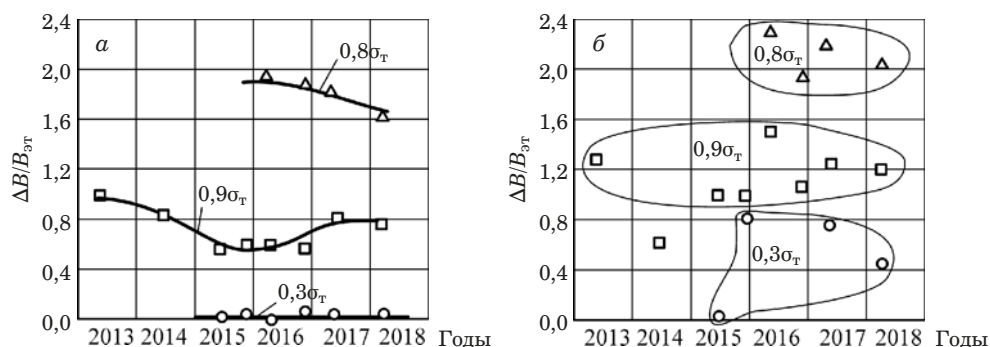


Рис. 5. Изменение величины относительной полуширины профиля дифракционных линий, полученных съемкой поверхности образцов, находящихся под действием постоянно приложенной статической растягивающей нагрузки на открытой атмосферной площадке (а) и в закрытом помещении (б)

Fig. 5. Change in the relative half-width of the diffraction line profile under the impact of continuous static tensile load (a — outdoor; b — indoors)

$2\theta = 123,00 - 125,00^\circ$ от плоскостей отражения второго порядка (hkl) = (220). Исходные (эталонные) значения истинной полуширины $B_{\text{эт}}$ дифракционных линий конструкционной стали 08пс были определены в январе 2013 г. Для снятия искажений, внесенных предварительной механической обработкой, образцы подвергали рекристаллизационной обработке — отжигу в вакуумной печи при температуре 700°C в течение 1 ч с последующим охлаждением в печи. Для исключения влияния на результат поверхностных дефектов поверхности всех образцов подвергали полировке и последующему химическому травлению. Диапазон разброса значений полуширины профиля B (в градусах), полученных по результатам съемок исследуемых образцов и приведенных на графиках, составил $\pm 0,053^\circ$.

В связи с длительностью реализации программы исследований, проведением рентгеновских съемок образцов через большие промежутки времени (5 – 6 мес), при которых образцы многократно устанавливали в держателях координатного столика дифрактометра, абсолютно точную фиксацию их относительно падающего пучка рентгеновского излучения обеспечить невозможно. Для повышения статистической достоверности измерений образцы устанавливали с применением специальных шаблонов, ограничивающих их боковые и продольные смещения более чем на $0,001$ мм. Поэтому сравнительный анализ полученных результатов проводили по величине относительной полуширины профиля $\Delta B/B_{\text{эт}}$ дифракционной линии, где $\Delta B = B_{\text{тек}} - B_{\text{эт}}$ ($B_{\text{тек}}$ — усредненное значение полуширины профиля по трем измерениям каждого образца).

На рис. 5 показано изменение величины относительной полуширины $\Delta B/B_{\text{эт}}$ дифракционных линий, полученных рентгеновской съемкой поверхности образцов, выдержанных под действием разного уровня упругих напряжений на от-

крытой атмосферной площадке и в закрытом помещении в течение продолжительного времени.

Относительная полуширина профилей дифракционных линий образцов, находящихся под действием упругих напряжений в закрытом помещении (см. рис. 5, б), имеет широкий разброс, однако области значений $\Delta B/B_{\text{эт}}$ для уровней напряжений $0,3\sigma_T$, $0,8\sigma_T$, $0,9\sigma_T$ имеют такое же взаимное расположение, как и значения $\Delta B/B_{\text{эт}}$ для образцов, выдерживаемых на открытой атмосферной площадке (см. рис. 5, а). Изменение относительной полуширины профилей $\Delta B/B_{\text{эт}}$ дифракционных линий при промежуточных уровнях постоянно действующих упругих напряжений ($0,5\sigma_T$ и $0,7\sigma_T$) здесь не показано.

При анализе основных характеристик профиля дифракционных линий образцов конструкционной стали 08пс, находящихся в поле действия эксплуатационных напряжений в диапазоне от $0,3\sigma_T$ до $0,9\sigma_T$, выявлено, что длительность постоянного действия упругих напряжений практически не вызывает существенного изменения $\Delta B/B_{\text{эт}}$ (см. рис. 5). Разброс значений относительной полуширины профиля дифракционных линий образцов, выдерживаемых в закрытом помещении ($17 - 18^\circ\text{C}$) в течение всего периода эксперимента значительно больше, чем $\Delta B/B_{\text{эт}}$ образцов, выдерживаемых на открытой атмосферной площадке (см. рис. 5, б). Предварительно это можно объяснить влиянием отдельных эффектов, вызванных узлами соединения образцов в сборку, а также узлами крепления сборки и нагружения грузами. Вероятность такого влияния подтверждается меньшим разбросом значений $\Delta B/B_{\text{эт}}$ дифракционных линий образцов, выдерживаемых на открытой атмосферной площадке (см. рис. 5, а). Очевидно, что данное предположение должно детально изучаться в ходе дальнейших исследований.

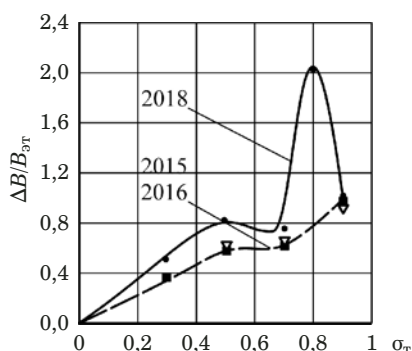


Рис. 6. Зависимость относительной полуширины профиля дифракционной линии от уровня упругих напряжений

Fig. 6. Dependence of the relative half-width of the diffraction line profile on the level of elastic stresses

Изменение значений относительной полуширины профиля $\Delta B / B_{\text{эп}}$ дифракционных линий в зависимости от уровня действующих упругих напряжений в образцах, выдерживаемых как на открытой атмосферной площадке, так и в закрытом помещении, имеет достаточно закономерный характер (рис. 6). Прямолинейная зависимость $\Delta B / B_{\text{эп}}$ от величины действующих напряжений устойчиво сохраняется в пределах $\sigma = (0 - 0,5)\sigma_T$. В диапазоне действия растягивающих напряжений $0,7\sigma_T > \sigma > 0,5\sigma_T$ изменения относительной полуширины профиля $\Delta B / B_{\text{эп}}$ дифракционных линий не происходит. Кривая $\Delta B / B_{\text{эп}} = f(\sigma)$ в этом диапазоне напряжений не отражает каких-либо деформационных процессов на микроструктурном уровне. Однако при напряжении $\sigma > 0,7\sigma_T$ наблюдается резкий рост значений относительной полуширины профиля $\Delta B / B_{\text{эп}}$ дифракционных линий (см. рис. 6).

Экспериментально обнаруженные отклонения от прямолинейной зависимости $\Delta B / B_{\text{эп}} = f(\sigma)$ при действующих в течение длительного времени напряжениях, превышающих $\sigma = 0,5\sigma_T$, указывают, что деформация ферритно-перлитной субструктуры конструкционной стали 08пс может быть представлена различными физическими моделями. Так, в работах [15 – 19] отмечено, что экспериментально наблюдаемые эффекты снижения или повышения микродеформаций кристаллических решеток сталей, параметров твердого раствора при напряжениях, соответствующих макроскопическим стадиям течения, упрочнения, вызываются субструктурными изменениями, в частности, образованием интерметаллидных фаз по границам ферритных зерен или другими структурно-фазовыми превращениями. Изучение динамики механической деформации некоторых кристаллов методом нейтронной дифрактометрии *in situ* также показало, что линейная зависимость деформации от уровня напряжений переходит в квадратичную [19].

Заключение

Представлены результаты экспериментального изучения влияния малых упругих напряжений, постоянно действующих в течение длительного времени, и климатического фактора на изменение полуширины профиля дифракционной линии. Установлено, что периодическое годовое колебание температур (2013 – 2018 гг.) не сопровождается существенным изменением характеристик профиля дифракционных линий образцов конструкционной стали 08пс. Напротив, низкие климатические температуры способствовали устранению отдельных инструментальных погрешностей, обусловленных конструктивными условиями эксперимента. Резкое изменение значений истинной полуширины профиля дифракционных линий при напряжениях $\sigma > 0,5\sigma_T$ указывает, возможно, на минимальный предел запаса прочности конструкционной стали 08пс при установлении величины допускаемого напряжения (σ).

Обнаруженные новые закономерности изменения микропластической деформации в конструкционных сталях в диапазоне упругих напряжений, соответствующих реальным эксплуатационным нагрузкам в металлических конструкциях, требуют дальнейшего изучения и анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арабей А. Б. Развитие технических требований к металлу труб магистральных газопроводов / Изв. вузов. Черная металлургия. 2010. № 7. С. 3 – 10.
2. Воробьев Ю. Л., Акимов В. А., Соколов Ю. И. Системные аварии и катастрофы в техносфере России. — М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ) МЧС России, 2012. — 308 с.
3. Кушнарченко В. М., Чирков Ю. А., Материнко К. Н., Лукашов А. В., Щепинов Д. Н. Методы прогнозирования остаточного ресурса опасных производственных объектов / Машиностроение и машиноведение. Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2016. № 7. С. 177 – 123.
4. Бондарева Н. Н. Опыт и перспективы освоения Арктики промышленно развитыми странами: сб. науч. тр. «Стратегические приоритеты развития Российской Арктики» / Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. — М.: Наука, 2014. С. 154 – 179.
5. Костюченко С. Л. Стратегия освоения минеральных ресурсов Российской Арктики / Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2017. № 1. С. 3 – 12.
6. Москвичев В. В. Основы конструкционной прочности технических систем и инженерных сооружений. — Новосибирск: Наука, 2002. — 106 с.
7. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты, Управление ресурсом эксплуатации высокорисковых объектов / Под общ. ред. Н. А. Махутова. — М.: МГОФ «Знание», 2015. — 600 с.
8. Доронин С. В. Моделирование прочности и разрушения несущих конструкций технических систем. — Новосибирск: Наука, 2005. — 250 с.
9. Алешин Н. П. Оценка остаточного ресурса сварных конструкций / Сварка и диагностика. 2007. № 2. С. 4 – 10.
10. Клоев В. В., Артемьев Б. В., Матвеев В. И. Состояние и развитие методов технической диагностики / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Том 81. № 4. С. 73 – 78.

11. **Алешин Н. П.** Возможности методов неразрушающего контроля при оценке напряженно-деформированного состояния нагруженных металлоконструкций / Сварка и Диагностика. 2011. № 6. С. 44 – 47.
12. **Gulyaev V. P., Petrov P. P., Stepanova K. V.** Diagnostics of critical states of constructions operated under low temperature conditions / Polar Mechanics 2018, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 193. 012015. DOI: 10.1088/1755-1315/193/1/012015.
13. **Гуляев В. П., Сибиряков М. М., Петров П. П., Степанова К. В.** Влияние формы включений графита в чугунах на искажения кристаллической решетки и трещиностойкость при моделировании эксплуатационных нагрузок на рабочие органы горных машин, работающих в условиях естественных низких температур / Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2018. Т. 24. № 2. С. 58 – 65.
14. **Баракхтин Б. К., Лебедев М. П., Петров П. П., Макаров В. В.** Оптимизация внутреннего строения материалов для работы в экстремальных условиях. — М.: Академия, 2000. — 156 с.
15. **Бокучава Г. Д., Папушкин И. В., Сумин В. В., Балагуров А. М., Шептяков Д. В.** Изучение микродеформации в дисперсионно-упрочненных сталях / Физика твердого тела. 2014. Т. 56. № 1. С. 165 – 169.
16. **Конева Н. А., Киселева С. Ф., Попова Н. А., Козлов Э. В.** Распределение избыточной плотности дислокаций при деформации аустенитной стали / Изв. РАН. Серия физическая. 2015. Т. 79. № 9. С. 1311 – 1313.
17. **Киле Е. О., Корчевский В. В., Сюй А. В.** Влияние инструментальных погрешностей рентгеновского дифрактометра на ширину дифракционной линии / Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2011. Т. 8. № 4. С. 7 – 10.
18. **Перевалова О. Б., Панин А. В.** Влияние пластической деформации на микроискажения и среднеквадратичные смещения атомов в твердом растворе α -фазы малоуглеродистой ферритно-мартенситной стали / Известия РАН. Сер. физическая. 2012. Т. 76. № 10. С. 1257 – 1261.
19. **Балагуров А. М., Благов А. Е., Занавескина И. С., Ковальчук М. В., Писаревский Ю. В., Таргонский А. В.** Изучение дефектной структуры кристаллических материалов на основе нейтронной и рентгеноакустической дифрактометрии. Разработка рентгеноакустического метода изучения динамики механической деформации кристаллов «in situ» / Вестник РФФИ. 2015. Т. 86. № 2. С. 85 – 89.
20. **Алешин Н. П.** — St. Petersburg – Moscow: Nauka, 2014. P. 154 – 179 [in Russian].
21. **Kostyuchenko S. L.** Mineral Resources Development Strategy of the Russian Arctic / Min. Resursy Rossii. Ekon. Upravl. 2017. N 1. P. 3 – 12 [in Russian].
22. **Moskvichev V. V.** Fundamentals of structural strength of technical systems and engineering structures. — Novosibirsk: Nauka, 2002 [in Russian].
23. Security of Russia. Legal, socio-economic and scientific-technical aspects. Resource management of high-risk facilities / N. A. Makhutov, ed.. — Moscow: MGOF “Znanie”, 2015. — 600 p. [in Russian].
24. **Doronin S. V.** The strength and destruction simulation of the supporting structures of technical systems. — Novosibirsk: Nauka, 2005. — 250 p. [in Russian].
25. **Aleshin N. P.** Residual life assessment of welded structures / Svarka Diagn. 2007. N 2. P. 4 – 10 [in Russian].
26. **Kluyev V. V., Artemyev B. V., Matveev V. I.** State and development of technical diagnostic methods / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2015. Vol. 81. N 4. P. 73 – 78 [in Russian].
27. **Aleshin N. P.** The possibilities of non-destructive testing methods in assessing of the stress-strain state of loaded metal structures / Svarka Diagn. 2011. N 6. P. 44 – 47 [in Russian].
28. **Gulyaev V. P., Petrov P. P., Stepanova K. V.** Diagnostics of critical states of constructions operated under low temperature conditions / Polar Mechanics 2018, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 193. 012015. DOI: 10.1088/1755-1315/193/1/012015.
29. **Gulyaev V. P., Sibiryaev M. M., Petrov P. P., Stepanova K. V.** Effect of graphite inclusions form in cast irons on distortions of a crystal lattice and crack resistance at modeling of operational loads of working elements of mining machines functioning in natural low temperatures conditions / Prirod. Resursy Arktiki Subarkt. 2018. Vol. 24. N 2. P. 58 – 65 [in Russian].
30. **Barakhtin B. K., Lebedev M. P., Petrov P. P., Makarov V. V.** Optimization of the internal structure of materials for operation under extreme conditions. — Moscow: Akademiya, 2000. — 156 p. [in Russian].
31. **Bokuchava G. D., Papushkin I. V., Sumin V. V., et al.** Study of microstrain in dispersion-strengthened steels / Fiz. Tv. Tela. 2014. Vol. 56. N 1. P. 165 – 169 [in Russian].
32. **Koneva N. A., Kiseleva S. F., Popova N. A., Kozlov E. V.** Distribution of excess dislocation density at austenitic steel deformation / Izv. RAN. Ser. Fiz. 2015. Vol. 79. N 9. P. 1311 – 1313 [in Russian].
33. **Kile E. O., Korchevskiy V. V., Syuy A. V.** The effect of instrumental errors of the X-ray diffractometer on the diffraction line width / Fund. Probl. Sovr. Materialoved. 2011. Vol. 8. N 4. P. 7 – 10 [in Russian].
34. **Perevalova O. B., Panin A. V.** Effect of plastic deformation on microdistortion and root-mean-square atomic displacements in the solid solution of the α -phase of low-carbon ferritic-martensitic steel / Izv. RAN. Ser. Fiz. 2012. Vol. 76. N 10. P. 1257 – 1261 [in Russian].
35. **Balagurov A. M., Blagov A. E., Zanaevskina I. S., et al.** Study of the defect structure of crystalline materials based on neutron and X-ray acoustic diffractometry. Development of an X-ray acoustic method for study of mechanical deformation dynamics of crystals in-situ / Vestn. RFFI. 2015. Vol. 86. N 2. P. 85 – 89 [in Russian].

REFERENCES