

УДК 621.791.05:620.179

Абабков Н.В., к.т.н., доцент
Пимонов М.В., к.т.н., старший преподаватель
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.
Горбачева
Смирнов А.Н., д.т.н., профессор
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.
Горбачева

Ababkov NV, PhD, associate professor
Pimonov MV, PhD, Senior Lecturer
Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry SB RAS
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University
Smirnov AN, D.Sc., professor
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ЗОН ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИЙ В КОНСТРУКЦИОННЫХ И ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ СТАЛЯХ

APPLICATION OF NON-DESTRUCTIVE CONTROL METHODS FOR IDENTIFICATION OF DEFORMATION LOCALIZATION ZONES IN STRUCTURAL AND HEAT-RESISTANT STEELS

Введение

Одной из главных задач современной промышленности является обеспечение защищенности жизненно важных интересов личности и общества от аварий на опасных производственных объектах, достичь которую можно при помощи надежной диагностики оборудования и точной оценки остаточного ресурса. В процессе эксплуатации энергетического оборудования с металлом под действием тяжелых условий эксплуатации происходят сложные физико-химические процессы, приводят к изменению структурно-фазового состояния, зарождению и накоплению микродефектов, которые затем приводят к разрушению элементов оборудования.

С каждым годом увеличивается количество оборудования, выработавшего парковый ресурс, на начало 2019 года по официальной статистике процент такого оборудования составляет 49 %, однако для отдельных групп оборудования и предприятий может достигать 95 %. При этом большее количество аварий и несчастных случаев на объектах котлонадзора приходится на Сибирский федеральный округ. Согласно

результатам анализа причин аварий и несчастных случаев, произошедших за последние 5 лет при использовании оборудования, работающего под избыточным давлением, трубопроводы пара и горячей воды, несмотря на отсутствие таких опасных факторов, как наличие взрыво-, пожароопасной и токсичной сред, остаются одним из наиболее аварийно-опасных видов оборудования, работающего под избыточным давлением [1].

Анализ основных причин аварий и несчастных случаев, произошедших в период 2015-2019 гг. показывает, что наличие положительного заключения экспертизы ПБ не является гарантией безопасности оборудования. С эксплуатационными дефектами оборудования связано менее 10 % происшествий (аварий и несчастных случаев), в то же время почти 40 % из них произошли из-за низкого качества обслуживания, освидетельствования, диагностирования и экспертизы ПБ оборудования [2, 3]. В настоящее развиваются методы неразрушающих испытаний, связанные с исследованием структурного состояния. Для параметров перспективных методов неразрушающих испытаний получены важные зависимости с количественными показателями структурно-фазового состояния. На основе этих зависимостей разработан ряд критериев предельного состояния основного и наплавленного металла, а также сварных соединений [4, 5].

Однако, данные критерии требуют уточнения, т.к. связаны с предельным состоянием оборудованием. С другой стороны, повышения точности и достоверности проводимой оценки можно достичь при помощи анализа как структурно-фазового состояния, так и механических характеристик металла длительной работающего энергетического оборудования. Важным является установление характерной зоны предразрушения или зоны локализации деформаций.

Материалы и экспериментальные процедуры

Для проведения заявленных исследований были использованы образцы, вырезанные из водоопускной трубы фронтового экрана теплоэнергетической установки после эксплуатации в течение 219 тысяч часов без разрушения, материал – сталь 20. А также образцы из гиба паропровода перед выхлопным клапаном после эксплуатации в течение 360 тысяч часов без разрушения, материал – сталь 12Х1МФ. Использовалась форма образцов – «dog-bone» с размерами рабочей части $40 \times 6 \times 3$ мм. Анализировалась микроструктура с использованием оптического микроскопа Neophot-21 с цифровой технической видеокамерой UCMOS03100KPA, и определялись механические характеристики при одноосном растяжении с постоянной скоростью на испытательной машине Walter+Bai AG LFM-125 при комнатной температуре. Скорость перемещения подвижного захвата составляла 0,4 мм/мин. (квазистатические испытания). Одновременно с растяжением проводилась регистрация картин локализации деформации методом цифровой

корреляции изображений (DIC) [6–8], который был реализован с помощью видеокамеры PL-B781F при освещении лазером SNF-xxx-635-30-KB. Для сравнения те же самые эксперименты были выполнены на аналогичных образцах, вырезанных из труб таких же типоразмеров, которые в эксплуатации не были (исходное состояние).

На образцах после пластической деформации проводились испытания неразрушающими методами: спектрально-акустический (измерительно-вычислительный комплекс «АСТРОН» [9–10]) и магнито-шумовой методы (анализатор структуры и напряжений «Introscan» [11]). Определялись такие характеристики, как время задержки поверхностных акустических волн, коэффициент затухания, размах амплитуды принятого сигнала, интенсивность магнитного шума.

Результаты и обсуждение

Наибольшие изменения произошли в характере локализации деформации материала при одноосном растяжении. Обнаружено, что на начальном этапе нагружения в эксплуатировавшем металле не происходит формирования подвижных фронтов локализованной деформации, связанных с распространением полос Чернова – Людерса, зато задолго до появления видимой шейки разрушения появляется устойчивая зона локализации макродеформации [6–8]. Положение такой зоны совпадает с местом, где в дальнейшем происходит разрушение. Похожая картина наблюдалась и для стали 12Х1МФ. Время появления устойчивой зоны локализации макродеформации коррелирует с общим временем растяжения образца до разрушения. Соотношение этих времен характеризует ресурс израсходованной пластичности материала до разрушения и может быть в перспективе использовано для разработки структурно-механического критерия локализованной деформации для диагностики состояния теплоэнергетического оборудования [12–16].

Для образцов разных состояний из стали 20 до деформаций характеристики неразрушающих испытаний изменялись в пределах: время задержки поверхностной акустической волны от 4650 ± 4 нс до 4750 ± 4 нс (рис. 1, а); коэффициент затухания поверхностной акустической волны $0,001 \pm 0,001$ 1/мкс до $0,2 \pm 0,002$ 1/мкс (рис. 1, б); размах амплитуды принятого сигнала поверхностной акустической волны от 387 ± 12 1/мм до 172 ± 13 1/мм (рис. 1, в) и интенсивность магнитного шума 290 ± 30 до 350 ± 20 единиц (рис. 1, г). Для всех исследованных состояний образцов из стали 20 в зонах локализации деформации характеристики неразрушающих испытаний имели близкие значения: время задержки поверхностной акустической волны 4700 ± 4 нс (рис. 1, а); коэффициент затухания поверхностной акустической волны $0,006 \pm 0,002$ 1/мкс (рис. 1, б); размах амплитуды принятого сигнала поверхностной акустической волны 227 ± 13 1/мм (рис. 1, в) и интенсивность магнитного шума 275 ± 30 единиц (рис. 1, г), что свидетельствует о постоянстве характеристик

неразрушающих испытаний в зоне устойчивой локализации деформации. Характер распределения акустических и магнитных характеристик неразрушающего контроля по поверхности металла исследованных образцов из стали 20 показывает принципиальную возможность идентификации зон УЛД (рис. 2, а и б).

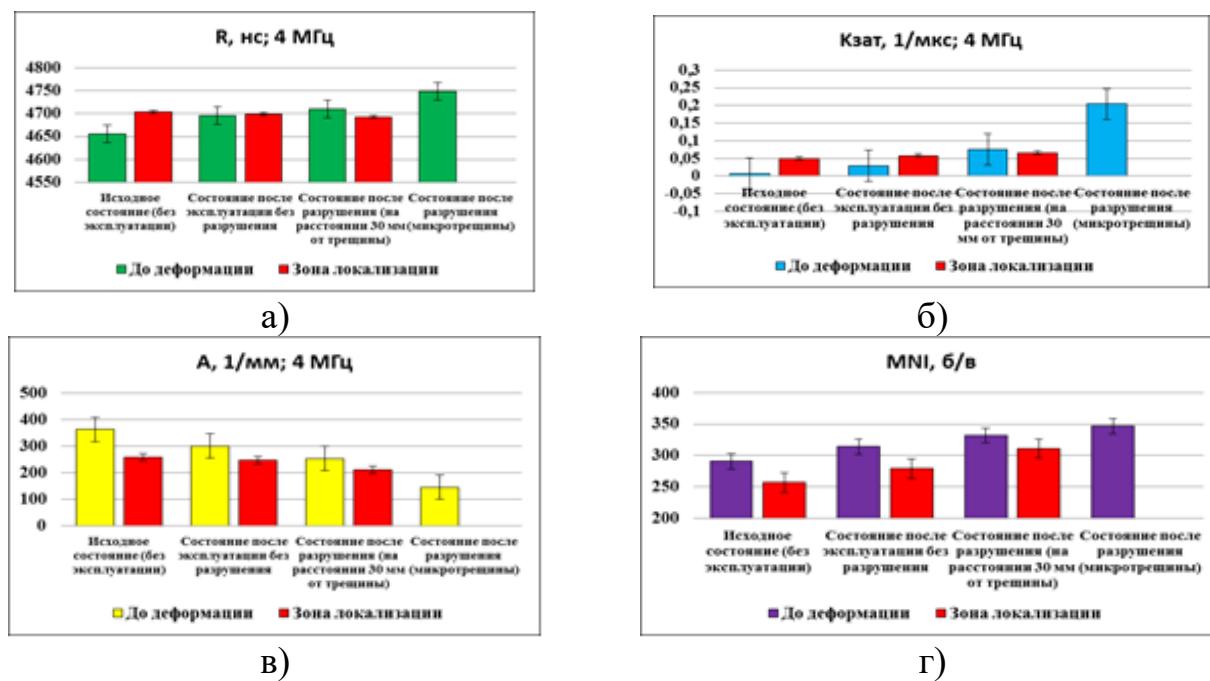


Рис. 1. Результаты измерения акустических и магнитных характеристик исследованных образцов из стали 20 до деформации и в зоне локализации деформации:

а - время задержки поверхностной акустической волны; б - коэффициент затухания поверхностной акустической волны; размах амплитуды принятого сигнала поверхностной акустической волны; в - интенсивность магнитного шума

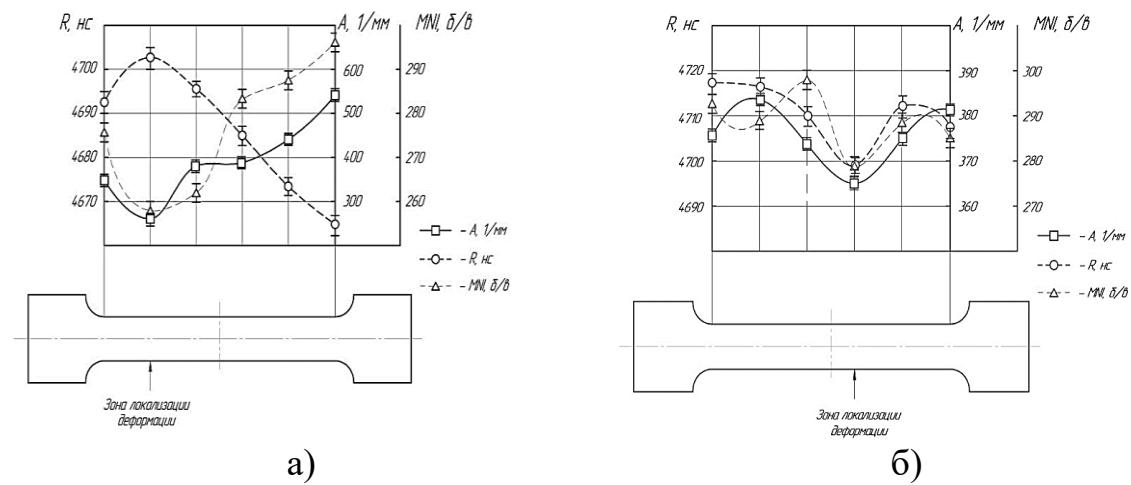


Рис. 2. Изменение акустических и магнитных характеристик по поверхности образцов из стали 20:

а – исходное состояние; б – после эксплуатации без разрушения

Для образцов стали 12Х1МФ получены схожие результаты по испытаниям неразрушающими методами (рис. 3 и 4). Таким образом, показана возможность обнаружения зон локализованной деформации спектрально-акустическим методом контроля в конструкционных и теплоустойчивых сталях.

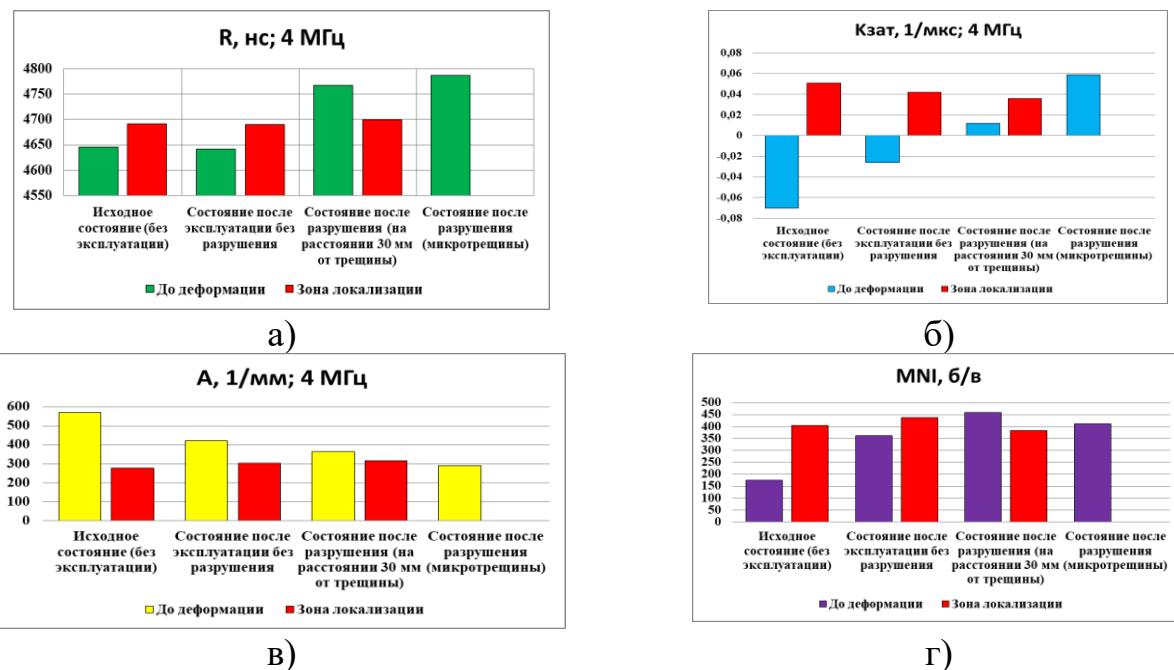


Рис. 3. Результаты измерения акустических и магнитных характеристик исследованных образцов из стали 12Х1МФ до деформации и в зоне локализации деформации:

а - время задержки поверхностной акустической волны; б - коэффициент затухания поверхностной акустической волны; размах амплитуды принятого сигнала поверхностной акустической волны; в - интенсивность магнитного шума

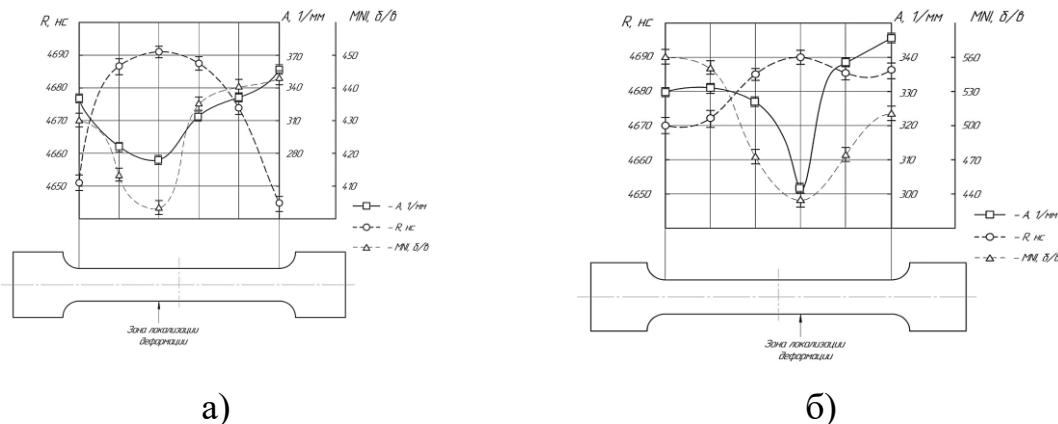


Рис. 4. Изменение акустических и магнитных характеристик по поверхности образцов из стали 12Х1МФ:

а – исходное состояние; б – после эксплуатации без разрушения

Выводы

Структурно-фазовое состояние в зонах локализации деформаций оказывает непосредственное влияние на характеристики неразрушающих испытаний. Для всех исследованных состояний образцов из конструкционных и теплоустойчивых сталей в зонах локализации деформации характеристики неразрушающих испытаний имели близкие значения: время задержки поверхностной акустической волны 4700 ± 4 нс; коэффициент затухания поверхностной акустической волны $0,006 \pm 0,002$ 1/мкс и $0,004 \pm 2$ 1/мкс; размах амплитуды принятого сигнала поверхностной акустической волны 227 ± 13 1/мм и 302 ± 15 1/мм и интенсивность магнитного шума 275 ± 30 единиц и 400 ± 20 единиц для сталей 20 и 12Х1МФ соответственно. Показана возможность идентификации зон локализованной деформации спектрально-акустическим методом контроля в конструкционных и теплоустойчивых стальях.

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для поддержки молодых кандидатов наук МК-1084.2020.8.

Список литературы

1. Информационный бюллетень Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. – М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2020, №1(106). – С. 22–24.
2. РД 34.17.421-92. Типовая инструкция по контролю и продлению срока службы металла основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций.
3. СТО-021-21-21-2003. Основные элементы котлов, турбин и трубопроводов тепловых электрических станций. Контроль состояния металла. Нормы и требования.
4. Смирнов А. Н., Козлов Э.В. Субструктура, внутренние поля напряжений и проблема разрушения паропроводов из стали 12Х1МФ. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2004. – 163 с.
5. Смирнов, А. Н. Акустические и физико-механические показатели теплоустойчивой стали в окрестности трещины / А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков, А. С. Глинка и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – №10. – С. 40–45.
6. Зуев, Л. Б. О природе упругопластического инварианта деформации / Л. Б. Зуев, В. И. Данилов, С. А. Баранникова и др. // ЖТФ. 2018. Т. 88. № 6. С. 855-859.
7. Смирнов, А.Н. Влияние степени деформации сварных соединений углеродистых сталей на структурно-фазовое состояние и поля внутренних

напряжений/ А. Н. Смирнов, Э. В. Козлов, Е. А. Ожиганов и др. // Сварка и диагностика. 2016. – № 3. – С. 25–28.

8. Смирнов, А.Н. Особенности упругопластического перехода в сварных соединениях стали 09Г2С, выполненных дуговой сваркой при различных режимах тепловложения / А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков, Е. А. Ожиганов и др. // Сварка и диагностика. 2017. – № 4. – С. 15–20.

9. Абабков, Н. В. Современное методическое обеспечение для оценки состояния металла потенциально опасного оборудования. Часть 2. Спектрально-акустический метод контроля/Н. В. Абабков, А. В. Бенедиктов, А. Н. Смирнов и др. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2010. - № 5. - С. 101-106.

10. Смирнов, А. Н. Анализ проблем, связанных с безопасной эксплуатацией элементов энергетического машиностроения/А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков // Вестник Кузбасского государственного технического университета. - 2010. - №2. - С. 12-17.

11. Смирнов А. Н., Абабков Н. В. Комплексный подход к оценке работоспособности элементов энергетического оборудования // Известия Самарского научного центра РАН. - 2010. - Т. 12. № 1 (2). - С. 520-524.

12. Иванов, Ю. Ф. Объемная и поверхностная закалка конструкционной стали – морфологический анализ структуры / Ю. Ф. Иванов, Э. В. Козлов // Изв. вузов. Физика. – 2002. – №3. – С.5-23.

13. Козлов, Э. В. Фрагментированная субструктура, формирующаяся в ОЦК-сталих при деформации / Э. В. Козлов, Н. А. Попова, Н. А. Конева // Изв. РАН. Серия физическая. – 2004. – Т.68, №10. – С.1419-1427.

14. Конева, Н. А. Физическая природа стадийности пластической деформации / Н. А. Конева, Э. В. Козлов // Структурные уровни пластической деформации и разрушения. Под ред. В.Е. Панина. – Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1990. – С. 123–186.

15. Смирнов, А. Н. Современное методическое обеспечение для оценки состояния металла потенциально опасного оборудования. Часть 1. Микроскопия и рентгеноструктурный анализ / А. Н. Смирнов, Э. В. Козлов, Н. В. Абабков и др. // Вестник КузГТУ. – 2010. – №4. – С.62–68.

16. Смирнов А.Н. Оценка ресурса длительно работающего металла оборудования топливно-энергетического комплекса на основе структурных критериев / А.Н. Смирнов, Н.В. Абабков, Н.Ф. Ощепков и др. // Сварка и диагностика, 2015. - № 5. - С. 9-12.

References

1. Information bulletin of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision. - M.: Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision, 2020, No. 1 (106). - S. 22-24.

2. RD 34.17.421-92. Typical instructions for monitoring and extending the service life of the metal of the main elements of boilers, turbines and pipelines of thermal power plants.

3. STO-021-21-21-2003. The main elements of boilers, turbines and pipelines of thermal power plants. Metal condition monitoring. Norms and requirements.

4. Smirnov A. N., Kozlov E. V. Substructure, internal stress fields and the problem of destruction of steam pipelines made of 12Kh1MF steel. - Kemerovo: Kuzbassvuzizdat, 2004 . - 163 p.

5. Smirnov, AN Acoustic and physical-mechanical indicators of heat-resistant steel in the vicinity of the crack / AN Smirnov, NV Ababkov, AS Glinka et al. // Strengthening technologies and coatings. - 2011. - No. 10. - S. 40–45.

6. Zuev, LB On the nature of the elastoplastic invariant of deformation / LB Zuev, VI Danilov, SA Barannikova et al. // ZhTF. 2018.Vol. 88.No. 6.P. 855-859.

7. Smirnov, A.N. Smirnov A.N., Kozlov E.V., Ozhiganov E.A. 2016. - No. 3. - P. 25–28.

8. Smirnov, A.N. Features of elastoplastic transition in welded joints of 09G2S steel made by arc welding at different heat input modes / A. N. Smirnov, N. V. Ababkov, E. A. Ozhiganov et al. // Welding and diagnostics. 2017. - No. 4. - P. 15–20.

9. Ababkov, NV Modern methodological support for assessing the state of metal of potentially hazardous equipment. Part 2. Spectral-acoustic control method / N. V. Ababkov, A. V. Benediktov, A. N. Smirnov and others // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2010. - No. 5. - S. 101-106.

10. Smirnov, AN Analysis of problems associated with safe operation of elements of power engineering / A. N. Smirnov, N. V. Ababkov // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. - 2010. - No. 2. - S. 12-17.

11. Smirnov AN, Ababkov NV An integrated approach to assessing the performance of elements of power equipment // Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. - 2010. - T. 12.No. 1 (2). - S. 520-524.

12. Ivanov, Yu. F. Volume and surface hardening of structural steel - morphological analysis of the structure / Yu. F. Ivanov, EV Kozlov // Izv. universities. Physics. - 2002. - No. 3. - S.5-23.

13. Kozlov, E. V. Fragmented substructure forming in bcc steels during deformation / E. V. Kozlov, N. A. Popova, N. A. Koneva // Izv. RAS. Physical series. - 2004. - T. 68, No. 10. - S. 1419-1427.

14. Koneva, N. A. Physical nature of the stages of plastic deformation / N. A. Koneva, E. V. Kozlov // Structural levels of plastic deformation and destruction. Ed. V.E. Panin. - Novosibirsk: Science. Sib. department, 1990. - S. 123-186.

15. Smirnov, AN Modern methodological support for assessing the state of metal of potentially hazardous equipment. Part 1. Microscopy and X-ray structural analysis / A. N. Smirnov, E. V. Kozlov, N. V. Ababkov and others // Bulletin of KuzSTU. - 2010. - No. 4. - P.62–68.

16. Smirnov A.N. Evaluation of the resource of a long-term operating metal of the equipment of the fuel and energy complex on the basis of structural criteria. Smirnov, N.V. Ababkov, N.F. Oshchepkov et al. // Welding and Diagnostics, 2015. - No. 5. - P. 9-12.