

Received: 10.01.2025 Revised: 18.02.2025 Accepted: 28.02.2025 DOI: 10.17804/2410-9908.2025.1.057-070

http://dream-journal.org

FEATURES OF ASSESSING THE SERVICE LIFE OF FURNACE TUBES OF HIGH-PRESSURE BOILERS WITH REGARD FOR OPERATION-INDUCED HETEROGENEITY

N. Yu. Gurkina^{1, a, *}, A. V. Nechaeva^{1, b}, V. V. Shalagaev^{1, 2, c}, and V. A. Polyansky^{2, d}

¹Russian Laboratory Ltd,

9/A, 3-N, 1 Pushkarskiy Lane, Saint Petersburg, 197101, Russia ²Institute of Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, 61 Bolshoy Ave., Vasilievskiy Island, Saint Petersburg, 199178, Russia

a) b https://orcid.org/0009-0008-5767-7967
 b) b https://orcid.org/0009-0005-2617-9736
 b) pomazova@yandex.ru;
 c) b https://orcid.org/0009-0004-9558-9539
 b) Vladimir.Shalagaev@ruslab.org;
 d) b https://orcid.org/0000-0002-1199-1028
 b) vapol@mail.ru

*Corresponding author. Email: Nadezhda.Gurkina@ruslab.org Address for correspondence: pr-kt Gubkina, 7/8, Omsk, 644035, Russia

Regular inspections of the state of boiler tubes are an indispensable condition for energy security. They are performed according to the regulations approved by the RF Ministry of Energy, which prescribe a number of tests of special samples cut from these tubes. In particular, the decision to extend the service life is to be based on measurements of tube wall thickness and on tabular data of yield strength. For additional testing, the yield strength of the metal at room temperature is determined, which must fall within the range specified in these documents. To determine the mechanical properties of tube steels when inspecting boiler tubes, the guidelines prescribe the use of samples cut along the tube axis.

The paper examines samples cut from boiler tubes made of steel 20 after 200,000 hours of operation at the parameters of the internal pressure of the steam-water mixture P = 16.2 MPa and the temperature T = 350 °C with recorded signs of hydrogen embrittlement.

Our studies show that the predicted value of the residual life of heating surface tubes significantly depends on the selected place of cutting the sample for testing (fire or rear or lateral tube sides). This difference leads to significant uncertainty in the results of the examination if the samples are not cut from the fire side, this being unspecified in the current company or industry standards. A relationship was found between low yield strength at the operating temperature and high hydrogen concentration in the tube wall. The presence of operational heterogeneity and its relation to hydrogen concentration are also confirmed by metallographic studies. It was found that, with the development of hydrogen damage, standard methods give unfounded predictions of equipment life. Non-standard ring-shaped samples were tested for tension at room and operating temperatures to determine the actual allowable stress. The values obtained were then used to calculate the actual residual life, which corresponded to the actual state of the tube at both room and operating temperatures.

Keywords: residual life of heating surface tubes, hydrogen embrittlement, thermal stations, ring samples

Acknowledgment

The study is part of R&D for the Territorial Generating Company No 11 JSC (TGK-11 JSC), contract No 01.123.720.23.

Features of assessing the service life of furnace tubes of high-pressure boilers with regard for operation-induced heterogeneity / N. Yu. Gurkina, A. V. Nechaeva, V. V. Shalagaev, and V. A. Polyansky // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2025. – Iss. 1. – P. 57–70. – DOI: 10.17804/2410-9908.2025.1.057-070.



References

1. Pomazova, A.V., Artamontsev, A.A., and Zavorin, A.S. Features of microstructural inhomogeneity of steel 20 boiler pipes in delivery state. *Izvestiya Tomskogo Politekhnicheskogo Universiteta. Inzhiniring Georesursov*, 2016, 327 (11), 68–75. (In Russian).

2. Livanova, O.V. *Degradatsiya mekhanicheskikh svoystv i parametrov soprotivleniya razrusheniyu ferrto-perlitnykh staley pri dlitelnoy ekspluatatsii* [Degradation of the Mechanical Properties and Rupture Strength Parameters of Ferrite-Pearlite Steels During Long-Term Operation: Candidate Thesis Abstract]. Moscow, 2006, 28 p. (In Russian).

3. Kazakov, V.S. and Alekseev, A.S. Diagnosis and assessment of the residual operating life of thermal power equipment. *Vestnik Bryanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*, 2015, 2 (46), 32–39. (In Russian).

4. Kamenetsky, B.Ya. Strength of baffle water boilers. *Novosti Teplosnabzheniya*, 2012, 5 (141). (In Russian). Available at: https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=2967

5. Ignatenko, V.E. and Marshakov, A.I. The effect of hydrogen on the growth rate of a corrosion crack in the outer wall of high-pressure underground gas pipelines. In: *VI Mezhdunarodnyi nauchno-prakticheskiy seminar "Povyshenie nadezhnosti magistralnykh gazoprovodov, podverzhennykh korrozionnomu rastreskivaniyu pod napryazheniem"* [The 6th International Scientific and Practical Seminar on Increasing the Reliability of Main Gas Pipelines Subject to Stress Corrosion Cracking, Kislovodsk, 2022: Proceedings]. KRN Publ., Kislovodsk, 2022. (In Russian).

6. Ovchinnikov, I.I. Research of behavior of the shell model which are maintaining in environments, causing corrosion cracking. *Internet-Zhurnal Naukovedenie*, 2012, 4, 1–30. (In Russian).

7. Chaudhuri, S. and Singh, R. High temperature boiler tube failures – case studies. In: *COFA– 1997*, India: Proceeding, 1997, pp. 107–120.

8. *IV Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Diagnostika i resurs metalla teplosilovogo oborudovaniya elektrostantsiy"* [The 4th International Scientific and Technical Conference on the Diagnostics and Service Life of the Metal of Heat and Power Equipment in Power Plants: Proceedings]. VTI Publ., Moscow, 2023, 102 p. (In Russian).

9. *IV Vsesoyuznyi seminar "Vodorod v metallakh"* [The 4th All-Union Seminar on Hydrogen in Metals: Abstracts]. MATI Publ., Moscow, 1984, 347 p. (In Russian).

10. Archakov, Yu.I. and Grebeshkova, I.D. Hydrogen corrosion of steel in gas phase. In: *Korroziya i zashchita ot korrozii (itogi nauki i tekhniki)* [Corrosion and Corrosion Protection (Results of Science and Technology), vol. 4]. Nauka Publ., Moscow, 1975, pp. 113–174. (In Russian).

11. Nelson, G.A. Hydrogenation plant steels. In: Beachem, C.D., ed., *Hydrogen Damage*, American Society for Metals, Metals Park, OH, 1977, pp. 377–394.

12. Shashkova, L.V. On the methodical approach to studying the kinetics of hydrogen embrittlement of steels. *Mezhdunarodnyj Nauchno-Issledovatelskiy Zhurnal*, 2012, 5 (5), 30–36. (In Russian).

13. Shashkova, L.V. *Fraktalno-sinergeticheskie aspekty mikropovrezhdaemosti, razrusheniya i optimizatsii struktury stali v usloviyakh vodorodnoi khrupkosti i serovodorodnogo rastreskivaniya, monografiya* [Fractal-Synergetic Aspects of Microdamage, Fracture, and Optimization of the Steel Structure under Conditions of Hydrogen Brittleness and Sulfide Stress Cracking]. OGU Publ., Orenburg, 2013, 305 p. (In Russian).

14. Yakovlev, Yu.A., Polyanskiy, V.A., Sedova, Yu.S., and Belyaev, A.K. Models of hydrogen influence on the mechanical properties of metals and alloys. *Vestnik PNIPU. Mekhanika*, 2020, 3, 136–160. (In Russian). DOI: 10.15593/perm.mech/2020.3.13.

15. Sofronis, P., Liang, Y., and Aravas, N. Hydrogen induced shear localization of the plastic flow in metals and alloys. *European Journal of Mechanics–A/Solids*, 2001, 20 (6), 857–872. DOI: 10.1016/s0997-7538(01)01179-2.



16. TU 14–3R–55–2001. Seamless steel pipes for steam boilers and pipelines. (In Russian).

17. Kostyukhina, A.V. Mekhanicheskie svoystva i deformatsionnoe povedenie materialov obolochek tvelov energeticheskikh reaktorov po rezultatam ispytaniy koltsevykh obraztsov na rastyazhnie [Mechanical Properties and Deformation Behavior of Canning Materials of Power Reactors Resulting from Tensile Testing of Ring Samples: Cand. Thesis]. Moscow, 2020, 145 p. (In Russian).

18. Polyanskiy, A.M., Polyanskiy, V.A., Frolova, K.P., and Yakovlev, Yu.A. Hydrogen diagnostics of metals and alloys. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2018, 6, 37–50. DOI: 10.17804/2410-9908.2018.6.037-050. Available at: http://dream-journal.org/issues/2018-6/2018-6_190.html

19. Nindiyasari, F., Pierick, P.T, Boomstra, D., and Pandit, A. Ring tensile test of reference zircaloy cladding tube as a proof of principle for hotcell setup. In: *TopFuel-2018 Conf.*, Prague, Czech Republic, 2018.

20. Khalfallah, A., Ktari, Z., Leitão, C., and Fernandes, J.V. New mandrel design for ring hoop tensile testing. *Experimental Techniques*, 2021, 45 (3), 769–787. DOI: 10.1007/s40799-021-00462-4.

21. Kim, S.-K., Bang, J.-G., Kim, D.-H., Yang, Y.-S., Song, K.-W., and Kim, D.-S. Mechanical property evaluation of high burn-up nuclear fuel cladding using the ring tensile test. *Metals and Materials International*, 2009, 15 (4), 547–553. DOI: 10.1007/s12540-009-0547-0.

22. Nagase, F., Sugiyama, T., and Fuketa, T. Optimized ring tensile test method and hydrogen effect on mechanical properties of zircaloy cladding in hoop direction. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2009, 46 (6), 545–552. DOI: 10.3327/jnst.46.545.

23. Mosin, A.M., Evseev, M.V., Protnykh, I.A., Shcherbakov, E.N., Shikhalev, V.S., Mitrofanova, N.M., and Kozlov, A.V. A change in the physical and mechanical properties of the fuel-element cladding made of EK–164 and ChS–68 steel operating in the BN-600 reactor during four microruns. *Izvestiya Vuzov. Yadernaya Energetika*, 2011, 1, 224–230. (In Russian).

24. Travica, M., Mitrović, N., Petrović, A., and Milošević, M. Experimental strain measurements on ring tensile specimens made of S235JRH steel pipe. *Procedia Structural Integrity*, 2023, 48 (7), 280–287. DOI: 10.1016/j.prostr.2023.07.131.

25. Port, R.D. and Herro, H.M. *The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*, McGraw-Hill, 1991, 293 p.

26. Dayal, R.K. and Parvathavarthini, N. Hydrogen embrittlement in power plant steels. *Sadhana*, 2003, 28, 431–451. DOI: 10.1007/BF02706442.

27. Ahmad, J. and Purbolaksono, J. Hydrogen damage in a rear riser water wall tube of a power plant. *Engineering Failure Analysis*, 2010, 17 (5), 1239–1245. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2010.01.005.

28. Saha A. Chapter 3 – Boiler tube failures: some case studies. In: *Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Chemicals, Concrete and Power Industries,* Butterworth-Heinemann, 2016, pp. 49–68. DOI: 10.1016/B978-0-08-100116-5.00003-X.

29. Kim, Y.S., Kim, W.C., Jain, J., Huang, E.-W., and Lee, S.Y. Hydrogen embrittlement of a boiler water wall tube in a district heating system. *Metals*, 2022, 12, 1276. DOI: 10.3390/met12081276.



ISSN 2410-9908

Подана в журнал: 10.01.2025 УДК 620.18: 620.19 DOI: 10.17804/2410-9908.2025.1.057-070

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ РЕСУРСА ЭКРАННЫХ ТРУБ КОТЛОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ С УЧЕТОМ ВОЗНИКАЮЩЕЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ неоднородности

Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures Issue 1, 2025

Н. Ю. Гуркина^{1, а,} *, А. В. Нечаева^{1, б}, В. В. Шалагаев^{1, 2, в}, В. А. Полянский^{2, г}

¹Акционерное общество

«Научно-диагностический иентр «Научно-производственная фирма «Русская лаборатория». пер. Пушкарский, д. 9, литер А, пом. 3-Н, часть 1, г. Санкт-Петербург, 197101, Россия $^2\Phi$ едеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук, В. О., Большой пр-кт, 61, г. Санкт-Петербург, 199178, Россия

^{a)} D https://orcid.org/0009-0008-5767-7967 Nadezhda.Gurkina@ruslab.org;

⁶⁾ ⁽ⁱ⁾ https://orcid.org/0009-0005-2617-9736 ⁽ⁱ⁾ pomazova@yandex.ru; ^{B)} ⁽ⁱ⁾ https://orcid.org/0009-0004-9558-9539 ⁽ⁱ⁾ Vladimir.Shalagaev@ruslab.org;

^{r)} D https://orcid.org/0000-0002-1199-1028 vapol@mail.ru

*Ответственный автор. Электронная почта: Nadezhda.Gurkina@ruslab.org Адрес для переписки: пр-кт Губкина, 7/8, г. Омск, 644035, Россия

Регулярные обследования состояния труб котельных агрегатов являются необходимым условием энергобезопасности. Они проводятся в соответствии с утвержденным Минэнерго регламентом, который предписывает проведение целого ряда испытаний специальных образцов, вырезанных их этих труб. В частности, решение о продлении ресурса работы принимается на основании результатов измерения толщины стенок труб и табличных данных о пределе текучести. Для дополнительного контроля определяется величина предела текучести металла при комнатной температуре, которая должна лежать в интервалах, указанных в этих документах. При обследованиях котельных труб руководящие документы предписывают использовать для определения механических свойств трубных сталей образцы, вырезанные вдоль оси трубы.

В работе рассмотрены вырезки котельных труб из стали 20 после эксплуатации в течение 200 тысяч часов при внутреннем давлении пароводяной смеси P = 16,2 МПа и температуре $T = 350 \,^{\circ}\text{C}$ с зафиксированными признаками водородного охрупчивания.

Наши исследования показывают, что расчетная величина остаточного ресурса труб поверхностей нагрева существенно зависит от выбранного места вырезки образца для проведения испытаний (огневая, тыловая или боковые стороны труб). Эта разница приводит к существенной неопределенности результатов обследования, в случае если образцы вырезаны не с огневой стороны, что никак не оговорено в действующих СТО и РД. Обнаружена связь низкого предела текучести при рабочей температуре с высокой концентрацией водорода в стенке трубы. Наличие эксплуатационной неоднородности и ее связь с концентрацией водорода также подтверждены металлографическими исследованиями. Установлено, что при развитии водородных повреждений стандартные методы дают необоснованный прогноз ресурса оборудования.

Были испытаны на растяжение при комнатной и рабочей температурах нестандартные кольцевые образцы для определения фактического допускаемого напряжения. Полученные значения далее были использованы в расчетах фактического остаточного ресурса, который и при комнатной, и при рабочей температуре соответствовал реальному состоянию трубы.



Ключевые слова: остаточный ресурс труб поверхностей нагрева, водородное охрупчивание, тепловые станции, кольцевые образцы

1. Введение

Повышение надежности работы тепломеханического оборудования является одной из ключевых задач для энергетического сектора России. Теплоэнергетическое оборудование, включая котлы и турбины, относится к объектам повышенной опасности. Одним из наиболее уязвимых элементов в конструкции энергетических котлов являются трубы поверхностей нагрева, или экранные трубы [1]. При длительной эксплуатации труб под воздействием таких факторов, как термомеханические нагрузки, внутренняя и внешняя среды, происходят изменения свойств металла, что приводит к их повреждению (отказу) [2]. Правильное определение состояния труб является одним из главных условий безаварийной эксплуатации котельных агрегатов.

Регулярные технические освидетельствования труб поверхностей нагрева проводятся в процессе эксплуатации на плановой основе и при ремонтах. Они включают внешний осмотр и выемку участков труб для проведения механических испытаний [1].

Если оборудование не подлежит восстановлению, то такое состояние считается предельным.

Одним из критериев того, что трубы не находятся в предельном состоянии, является ненулевой остаточный ресурс. Это запас возможного времени эксплуатации оборудования после момента контроля его технического состояния, в течение которого обеспечивается соответствие требованиям нормативно-технической документации всех его основных технических и экономических показателей [3].

Стандартизированный расчет остаточного ресурса, согласно действующим СТО 70238424.27.100.005-2008 и РД 10-249-98 для экранных труб, изготовленных из углеродистой стали 20, учитывает только степень утонения стенки за счет равномерных коррозионных процессов. Постепенно накапливаются факты, говорящие о недостатках такого подхода. Например, в работе [4] опубликованы данные, которые могут служить обоснованием необходимости дополнительного учета температурных напряжений при расчете экранных труб на прочность.

Вместе с тем известно, что наиболее опасными (и не прогнозируемыми по стандартизованному расчету) являются хрупкие бездеформационные повреждения. К таким повреждениям относятся коррозионная усталость и стресс-коррозия. В работах [5, 6] показано, что такие повреждения в основном индуцированы водородом. Преимущественное влияние водорода на развитие этих коррозионных процессов подтверждается тем, что в металле стенок наблюдается такой явный признак высокотемпературной водородной атаки, как обезуглероживание микроструктуры [7]. На долю таких повреждений труб поверхностей нагрева выпадает не менее 20 % от общего числа повреждений [8]. Необходимость учета концентрации различных фаз водорода в металле была отмечена еще в 1984 г. в рамках IV Всесоюзного семинара «Водород в металлах» [9].

В применяемых в настоящий момент методиках расчета остаточного ресурса влияние накопленного растворенного водорода на прочность стенок труб никак не учтено, что не позволяет сделать обоснованный прогноз ресурса оборудования.

Механизмы индуцированного водородом разрушения сталей при различных температурах исследуются много десятков лет [10]. Для углеродистых сталей, работающих в газообразном водороде под давлением, построена диаграмма Нельсона [11], которая позволяет предсказать ресурс эксплуатации стальной конструкции в зависимости от температуры и давления водорода во внутренней среде. Для всех остальных случаев индуцированного водородом разрушения никаких подобных данных нет.



В обзорной работе [12] и монографии [13] предлагаются методики, позволяющие сопоставлять сопротивление сталей разрыву с концентрацией растворенного водорода в зоне разрыва. При этом автор разграничивает два состояния водорода: диффузионно-подвижный или связанный в ловушках. Но фрактально-энтропийные соображения, лежащие в основе предлагаемых в работах [12, 13] методик, являются качественными физическими соображениями. Стандартизация и использование этих методик для прогнозирования ресурса котельного оборудования не представляются возможными.

Главной методической проблемой учета водородной деградации труб поверхностей нагрева является то, что расчет на прочность новой трубы производится таким образом, чтобы при эксплуатации она с запасом примерно в полтора раза находилась в чисто упругой области деформаций. В местах наиболее частого разрушения труб поверхностей нагрева нет никаких концентраторов напряжений: ни значительных изгибов оси трубы, ни сварных, ни фланцевых соединений. Сама труба по технологии изготовления (бесшовная, горячекатаная) никаких технологических концентраторов напряжений тоже не содержит. Обследования новых труб, согласно ТУ, при поставке и перед их использованием не показывают наличия в них значительных по размеру дефектов типа трещин и других подобных концентраторов напряжений. А наиболее известные модели водородной хрупкости предполагают, что для развития хрупкого разрушения необходимо наличие довольно большой трещины [14].

Как известно из множества экспериментальных исследований, насыщение водородом не приводит к значительному снижению эффективного предела текучести металла, определя ляемого по инженерной кривой «напряжения – деформации». Локальное снижение предела текучести предполагается в модели водородной хрупкости HELP [15], но только в малой локальной области в вершине трещины.

С учетом вышеперечисленных факторов влияние водорода на разрушение стенок труб поверхностей нагрева становится труднообъяснимым, тем более что нет никаких методик для того, чтобы обоснованно определить у такой трубы остаточный ресурс.

Целью данной работы является исследование особенностей индуцированной водородом деградации металла при эксплуатации котельных агрегатов и оценки остаточного ресурса экранных труб из стали 20.

2. Материал и методика

Для экспериментов были использованы вырезки из экранных труб котлов высокого давления типоразмером $Ø50 \times 5,0$ мм, изготовленных из стали 20 по ТУ 14-3P-55-2001 [16], в которых зафиксировано водородное охрупчивание в процессе эксплуатации. Средняя наработка труб составила примерно 200 тысяч часов. Трубы эксплуатировались при температуре пароводяной смеси T = 350 °C и внутреннем давлении пароводяной смеси P = 16,2 МПа.

Для оценки неоднородности в ходе исследования проведена оценка распределения свойств труб по окружности, осуществленная путем изготовления из труб пяти типов образцов для механических испытаний в соответствии с рис. 1 и проведения комплекса испытаний для каждого образца. Комплекс испытаний для стандартных продольных образцов № 1–4 (изготовленных согласно требованиям СТО 70238424.27.100.005-2008 и РД 10-249-98) включает в себя определение химического состава, механические испытания на растяжение при комнатной и рабочей температурах, металлографический анализ, анализ концентрации водорода. Также были проведены механические испытания на растяжение нестандартных кольцевых поперечных образцов с шириной кольца 7 мм при комнатной и рабочей температурах (маркировка образцов № 5–8). Анализ концентрации водорода также проводился в образцах размером $5 \times 5 \times 5$ мм, вырезанных рядом с образцами № 1–4 (с каждой стороны труб).



Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures Issue 1, 2025



ISSN 2410-9908



Рис. 1. Схема маркировки образцов: продольные образцы № 1 (вырезаны по центру огневой стороны), № 2 (вырезаны по центру тыловой стороны), № 3 (вырезаны по центру левой боковой стороны) и № 4 (вырезаны по центру правой боковой стороны); кольцевые образцы № 5–8 (вырезаны поперек оси трубы)

Согласно техническим условиям [16], химический состав стали 20 следующий: С (0,17–0,24 %), Mn (0,35–0,65 %), Si (0,17–0,37 %), Cr (\leq 0,25 %), Ni (\leq 0,25 %), S (\leq 0,025 %), Cu (\leq 0,30 %), P (\leq 0,030 %). Химический анализ выполнялся нами по методике определения количественного элементного состава по ГОСТ Р 54153-2010 с помощью оптико-эмиссионного анализатора Foundry-Master Smart.

Механические испытания образцов проводились на разрывной машине ИР-5113-100. Отбор и вырезка образцов, а также их испытания проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 1497-2023, ГОСТ 10006-80, ГОСТ 19040-81. Для механических испытаний на растяжение кольцевых образцов была модернизирована оснастка разрывной машины – изготовлены полукруглые опоры. Образцы для испытания устанавливались таким образом, чтобы центры огневой и тыловой сторон трубы при растяжении находились между опорами. Рабочая длина образцов рассчитана по формуле [17]

$$l_p = \frac{\pi}{2} \left(D_{\rm H} - 0.83 \cdot \left(\frac{D_{\rm H}}{d_{\rm ou} + 2t} \right)^{0.626} \cdot (d_{\rm ou} + 2t) \right),\tag{1}$$

где $D_{\rm H}$ – наружный диаметр образца, мм; t – толщина стенки образца, мм; $d_{\rm on}$ – диаметр опор, мм.

Относительное удлинение рассчитывалось с помощью расстояния, измеренного до и после испытания, между двумя точками в пределах рабочей длины, расположенными симметрично относительно ее центра.

Металлографический анализ проводился с помощью анализатора фрагментов микроструктуры твердых тел, включающего в себя инвертированный микроскоп Olympus GX53 с программным обеспечением SIAMS Photolab.

Для определения массовой доли водорода в соответствии с ГОСТ 17745-90 проведен анализ методом вакуум-нагрева с использованием масс-спектрометрического анализатора водорода AB-1 при температуре экстракции 750 °C.

Все испытания проведены в аккредитованной на примененные методы лаборатории (свидетельство ИЛ/ЛРИ-02005). Испытания проводились аттестованными специалистами. Все используемое оборудование поверено либо аттестовано в установленном порядке согласно требованиям Федерального закона «Об обеспечении единства измерений» от 26.06.2008 № 102-ФЗ и ГОСТ Р 8.568–2017.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Результаты испытаний

Химический состав металла всех исследованных труб соответствовал ТУ для стали 20. Отклонения значений концентраций химических элементов по окружности труб находятся в пределах погрешности измерений.

ISSN 2410-9908

Нами был использован метод вакуум-нагрева, который позволяет получить хорошую сходимость для стандартных образцов с водородом [18]. Анализ концентрации водорода показал неоднородное распределение водорода по окружности трубы. Отношение максимальной и минимальной величин концентрации растворенного водорода (с огневой и тыловой сторон соответственно) составило 3,7 раза. Результаты экспериментального определения массовой доли водорода приведены в табл. 1. В процессе вакуумной экстракции водорода из образцов было идентифицировано три энергетических состояния водорода. Их можно классифицировать следующим образом: слабосвязанный водород, водород со средней энергией активации и сильно связанный водород (ССВ). Концентрация диффузионно-подвижного водорода (ДПВ) в табл. 1 является суммой концентраций водорода первых двух категорий, то есть слабосвязанного водорода и водорода со средней энергией активации. Такое определение позволяет лучше понять поведение водорода в различных условиях и его роль в процессах, происходящих в материалах. Обозначение $\sum Q$ используется для указания суммарного значения массовой доли водорода (в миллионах на единицу), который выделяется при температуре экстракции 750 °C. Это значение включает в себя как ДПВ, так и ССВ. Анализ данных показывает, что концентрации ДПВ и ССВ практически идентичны с одной и той же стороны трубы. В поперечном сечении трубы они имеют тенденцию к увеличению по мере приближения по окружности к огневой стороне.

Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures Issue 1, 2025

Таблица 1

Образец	$Q_{ m Д\Pi B},$ млн $^{-1}$	$Q_{ m CCB},$ млн $^{-1}$	$\sum Q$, млн $^{-1}$
Образец № 1 (огневая сторона)	0,145	0,150	0,295
Образец № 2 (тыловая сторона)	0,033	0,046	0,079
Образцы № 3 (боковая сторона)	0,070	0,057	0,127
Образцы № 4 (боковая сторона)	0,065	0,059	0,124

Массовая доля водорода в образцах

Результаты механических испытаний на растяжение продольных образцов при комнатной и рабочей температурах приведены в табл. 2. По результатам испытаний, предусмотренных регламентами обследования продольных образцов на растяжение при комнатной температуре, значительной неоднородности механических свойств по окружности труб не зафиксировано. Все измеренные нами параметры (временное сопротивление, предел текучести, относительное удлинение) удовлетворяют требованиям нормативных документов.

Совсем другие результаты были получены в испытаниях образцов при рабочей температуре. Наблюдается существенное понижение значений временного сопротивления и предела текучести для образцов, вырезанных из огневой стороны трубы. Снижение у образцов с огневой стороны составляет 19 и 32–34 % относительно тыловой и боковых сторон соответственно.

Снижение пределов пластичности и прочности металла труб с огневой стороны сочетается с повышенной концентрацией водорода и с парадоксальным увеличением пластичных свойств (примерно в 2 раза по сравнению с тыловой стороной). Во всех известных нам работах (например, [13, 14, 18]) показано, что относительное удлинение сталей резко снижается с увеличением концентрации ДПВ, которое сопровождается диффузией водорода и его кинетическими превращениями. Однако во всех известных нам источниках, в том числе и в приведенных работах, использовалось несколько режимов искусственного наводороживания в течение ограниченного времени, что может объяснить отсутствие обнаруженных нами эффектов, которые возникают в реальных котельных трубах после 200 000 ч эксплуатации.

Измеренное нами значение предела текучести образцов с огневой стороны при рабочей температуре эксплуатации не соответствует требованиям нормативных документов,



ISSN 2410-9908

в отличие от металла труб с боковых и тыловой сторон. Нормативное минимально допускаемое значение предела текучести составляет 156 Н/мм². Следовательно, остаточный ресурс трубы, учитывая состояние металла с огневой стороны (150 Н/мм²), можно считать исчерпанным, и необходимо планировать замену таких поверхностей нагрева. Вместе с тем в СТО 70238424.27.100.005-2008 и РД 10-249-98 значения временного сопротивления и относительного удлинения при рабочей температуре не нормируются.

Таблица 2

Howen of norma	Временное сопротивление	Предел текучести	Относительное		
помер образца	разрыву $\sigma_{\rm B}$, H/мм ² $\sigma_{0.2}$, H/мм		удлинение,б5, %		
При комнатной температуре					
Требования [16]	412–549	≥216	≥24		
Образец № 1	473	310	26,0		
Образец № 2	470	330	28,0		
Образец № 3	462	325	28,0		
Образец № 4	460	320	27,0		
При рабочей температуре					
Требования [16]	_	≥156	_		
Образец № 1	280	150	32,0		
Образец № 2	421	193	15,0		
Образец № 3	305	230	42,0		
Образец № 4	312	235	41,0		

Результаты механических испытаний на растяжение продольных образцов при комнатной и рабочей температурах

Обследование котельных труб, согласно руководящим документам для определения механических свойств трубных сталей, проведено на образцах, вырезанных вдоль оси труб. Сторона вырезки никак не регламентирована, поэтому наши исследования показывают, что из одной и той же трубы могут быть вырезаны образцы, дающие противоречащие друг другу результаты вычисления остаточного ресурса конструкции.

Еще одним противоречием существующих методов механических испытаний труб поверхностей нагрева является принципиальное несоответствие испытательных механических нагрузок эксплуатационным. Согласно теории упругости, при свободных концах трубы под внутренним давлением максимальными являются тангенциальные механические напряжения в трубе. Они кратно больше максимальных радиальных и продольных относительно оси трубы напряжений. Следовательно, предусмотренный руководящими документами тест на растяжение продольных образцов обеспечивает приложение нагрузки в направлении, перпендикулярном направлению максимальных напряжений при эксплуатации.

Для преодоления этого противоречия была использована новая для толстостенных горячекатаных труб методика испытаний. Были использованы кольцевые образцы, схема нагружения которых более близка к условиям, возникающим в процессе эксплуатации труб. Нестандартные кольцевые образцы были изготовлены (как показано на рис. 1) из тех же вырезок труб, из которых вырезались продольные образцы. Образцы такого типа широко применяются для испытаний охрупченных металлических труб в атомной промышленности [19–24].

Результаты испытаний кольцевых образцов приведены в табл. 3. Как при комнатной, так и при рабочей температуре получено значение предела текучести, составившее 160 и 130 Н/мм² соответственно, что на 26 и 16 % ниже допускаемого минимального значения и почти в два раза ниже исходных значений.

ISSN 2410-9908

Во всех случаях испытания кольцевых образцов разрушение происходило с огневой стороны труб, что подтверждает снижение эксплуатационной надежности стороны трубы, обращенной к топочному пространству.

На продольных образцах получены высокие значения относительного удлинения с огневой стороны при рабочей температуре. Такое увеличение пластичности хорошо коррелирует с часто наблюдаемым на практике эффектом пластической деформации труб (образование отдулин, выпучин) при длительной высокотемпературной эксплуатации [25]. Образование этих дефектов в дальнейшем приводит к развитию продольных трещин. Наблюдаемый эффект значительного увеличения пластичности можно объяснить водород-индуцированным разупрочнением, обусловленным развитием коллекторов молекулярного водорода [13]. Пример такого повреждения показан на рис. 2.

Таблица 3

паименование птд,	временное сопротивление	предел текучести	Относительное		
номер образца	разрыву $\sigma_{\rm B}$, Н/мм ²	$\sigma_{0,2}$, $H/мм^2$	удлинение δ_5 , %		
При комнатной температуре					
Требования [10]	412–549	≥216	≥22		
Образец № 5	440	163	21,0		
Образец № 6	445	160	20,0		
При рабочей температуре					
Требования [10]	—	≥156	-		
Образец № 7	330	130	106,0		
Образец № 8	320	135	111,0		

Результаты механических испытаний на растяжение кольцевых образцов при комнатной и рабочей температурах



Рис. 2. Отдулина на огневой стороне трубы

Металлографический анализ микроструктурного строения по толщине стенки показал, что наблюдаются разные соотношения количества ферритных и перлитных зерен относительно огневой и тыловой сторон (рис. 3). Наблюдается частичное обезуглероживание металла с огневой стороны. При этом полного обезуглероживания (областей феррита) на наружной или внутренней поверхностях у исследованных образцов не обнаружено. Среднее содержание феррита составляло 73 и 64 %, перлита – 27 и 36 % для огневой и тыловой сторон соответственно. Разницы в микроструктурном строении между тыловой и боковыми сторонами не зафиксировано. Наличие обезуглероживания является классическим признаком высокотемпературной водородной атаки [26–29]. Неоднородное обезуглероживание по окружности труб хорошо коррелирует с установленными концентрациями водорода в исследованных областях.

Features of assessing the service life of furnace tubes of high-pressure boilers with regard for operation-induced heterogeneity / N. Yu. Gurkina, A. V. Nechaeva, V. V. Shalagaev, and V. A. Polyansky // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2025. – Iss. 1. – P. 57–70. – DOI: 10.17804/2410-9908.2025.1.057-070.



Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures Issue 1, 2025

ISSN 2410-9908



Рис. 3. Микроструктура (×500) на огневой (*a*) и тыловой (*б*) сторонах трубы (образцы № 1 и 2)

3.2. Расчет остаточного ресурса труб на основе проведенных испытаний

Согласно методике оценки остаточного ресурса труб поверхностей нагрева СТО 70238424.27.100.005-2008, расчет остаточного ресурса проводится по формуле

$$\tau_{\rm oct} = \frac{(s_{\rm min} - s_{\rm pacy})}{V_{\rm H.K.}},\tag{2}$$

где τ_{oct} – остаточный ресурс, 10^5 ч; S_{min} – минимальная фактическая толщина стенки трубы, мм; S_{pac4} – расчетная толщина стенки трубы, мм; $V_{H.K.}$ – скорость коррозии, мм за 10^5 ч.

Скорость коррозии определяется по формуле согласно СТО 70238424.27.100.005-2008:

$$V_{\rm H.K.} = \frac{(S_0 - S_{\rm min})}{\tau_3},$$
 (3)

где *S*₀ – номинальная толщина стенки трубы, мм; т_{ост} – длительность эксплуатации, ч. Расчетная толщина стенки трубы рассчитывается по формуле РД 10-249-98

$$S_{\text{pacy}} = \frac{p \cdot D_a}{2 \cdot [\sigma] + p},\tag{4}$$

где p – рабочее давление, МПа; D_a – наружный диаметр, мм; [σ] – номинальное допускаемое напряжение, МПа.

Обычно эксперты используют табличное значение номинального допускаемого напряжения, приведенное в таблице 2.2 РД 10-249-98. Для прочностного расчета исследованных труб по фактическому состоянию были определены номинальные допускаемые напряжения при комнатной и рабочей температурах согласно РД 10-249-98:

$$[\sigma]_t = \frac{\sigma_{0,2}}{\frac{t}{1,5}},\tag{5}$$

где $\sigma_{0,2/t}$ – предел текучести, полученный экспериментально при комнатной/рабочей температуре (*t*).

Расчет номинального допускаемого напряжения по фактическим значениям механических свойств не проводился при получении характеристик, не удовлетворяющих нормативным требованиям (в случае с образцами № 1, 5–8). В этом случае остаточный ресурс отсутствует ($\tau_{oct}' = 0$).



ISSN 2410-9908

В табл. 4 представлены результаты расчетов. Значения остаточного ресурса τ_{ocr} , τ_{ocr} рассчитаны через значения табличного и фактического номинального допускаемого напряжения соответственно.

Таблица 4

Наименование параметра / № образца	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3	Образец № 4	Кольцевой образец (образцы № 5-8)
$ au_{ m oct}$	$13,4 \times 10^{5}$				
τ_{oct}	0	$20,1 \times 10^5$	$24,6 \times 10^5$	$25,7 \times 10^5$	0
Степень ошибки при					
определении ресурса	+100	-50	-84	-92	+100
по табличным вели-	100	50	01	12	100
чинам, %					

Расчет остаточного ресурса трубы

По результатам анализа полученных данных установлено, что расчет остаточного ресурса с учетом только коррозионного утонения стенки и использованием табличного значения номинального допускаемого напряжения дает завышенный на 100 % ресурс в случае с образцами № 1, 5–8, что не соответствует фактическому состоянию исследуемых труб, а в случае с образцами № 2–4 – ресурс, заниженный на 50–92 %, что также не соответствует фактическому состоянию трубы. Вероятно, необходимо заменять табличный предел текучести фактическим.

Данные табл. 4 демонстрируют сильную зависимость результатов вычисления ресурса эксплуатации от места вырезки и типа образцов для проведения стандартных испытаний. С практической точки зрения это означает, что, в зависимости от места вырезки образцов из одной и той же трубы, ее ресурс может быть продлен на максимальный срок, а может быть выдана рекомендация к срочной замене трубы.

4. Заключение

Были исследованы вырезки из труб поверхностей нагрева котлов после продолжительной эксплуатации. Проведены как регламентированные СТО и РД стандартные испытания, так и дополнительные: измерена концентрация водорода, испытаны продольные образцы, вырезанные с разных сторон трубы, и кольцевые образцы. Показано, что стандартные испытания не дают возможности адекватно оценить остаточный ресурс эксплуатации труб. При комнатной температуре пределы текучести, измеренные на продольных образцах, лежат в рамках допускаемых ТУ отклонений, что означает продление ресурса на 10 %. При учете данных испытаний продольных образцов с огневой стороны при рабочей температуре и данных испытаний кольцевых образцов при комнатной температуре ресурс равен 0, что очень точно соответствует действительности. Это связано с тем, что в этом случае удается зафиксировать и измерить эксплуатационную неоднородность труб, обусловленную в том числе и накоплением водорода. Имеется сильная зависимость оценки величины ресурса от места вырезки образцов, предусмотренного требованиями руководящих документов, для проведения испытаний. Анализ данных стандартных испытаний, серийно осуществляемых в АО НДЦ НПФ «Русская Лаборатория», показал, что необоснованный прогноз ресурса оборудования может наблюдаться как минимум в 20 % случаев в результате развития хрупких повреждений стенок труб.

Полученные нами данные показывают, что исключить ошибку расчета остаточного ресурса можно, применяя кольцевые образцы. При этом метод испытаний колец прост в применении и на одном образце выявляет как анизотропию механических характеристик, так

Features of assessing the service life of furnace tubes of high-pressure boilers with regard for operation-induced heterogeneity / N. Yu. Gurkina, A. V. Nechaeva, V. V. Shalagaev, and V. A. Polyansky // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2025. – Iss. 1. – P. 57–70. – DOI: 10.17804/2410-9908.2025.1.057-070.



Обнаруженная нами анизотропия механических свойств металла стенок труб при деформации в различных направлениях требует дополнительного исследования механизмов ее образования, однако ее необходимо учитывать при расчете ресурса труб.

Благодарность

Работа выполнена в рамках НИОКР для акционерного общества «Территориальная генерирующая компания № 11» (АО «ТГК-11») по договору № 01.123.720.23.

Литература

1. Помазова А. В. Особенности микроструктурной неоднородности котельных труб из стали 20 в состоянии заводской поставки // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327 (11). – С. 68–75.

2. Ливанова О. В. Деградация механических свойств и параметров сопротивления разрушению феррито-перлитных сталей при длительной эксплуатации : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.01. – Москва, 2006. – 28 с.

3. Казаков В. С., Алексеев А. С. Диагностирование и оценка остаточного ресурса эксплуатации теплоэнергетического оборудования // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2015. – № 2 (46). – С. 32–39.

4. Каменецкий Б. Я. Прочность экранных водогрейных котлов // Новости теплоснабжения. – № 5 (141). – 2012. – URL: https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=2967 (дата обращения: 22.12.2023).

5. Игнатенко В. Э., Маршаков А. И. Влияние водорода на скорость роста коррозионной трещины во внешней стенке подземных газопроводов высокого давления // VI Международный научно-практический семинар «Повышение надежности магистральных газопроводов, подверженных коррозионному растрескиванию под напряжением», Кисловодск, 2022 : материалы науч. конф. – КРН, 2022.

6. Овчинников И. И. Исследование поведения оболочечных конструкций, эксплуатирующихся в средах, вызывающих коррозионное растрескивание // Интернет-журнал «Науковедение». – 2012. – № 4.– С. 1–30.

7. Chaudhuri S., Singh R. High temperature boiler tube failures – case studies // COFA–1997, India : Proceeding. – 1997. – P. 107–120.

8. IV Международная научно-техническая конференция «Диагностика и ресурс металла теплосилового оборудования электростанций», Москва, 21 сентября 2023 г. : сборник докладов. – М. : ВТИ, 2023. – 102 с.

9. IV Всесоюзный семинар «Водород в металлах» : тезисы докладов / под ред. В. В. Панасюка, Б. А. Колачева. – М. : МАТИ, 1984. – 347 с.

10. Арчаков Ю. И., Гребешкова И. Д. Водородная коррозия сталей в газовой фазе // Коррозия и защита от коррозии (итоги науки и техники). Т. 4. – М. : Наука, 1975. – С. 113–174.

11. Nelson G. A. Hydrogenation plant steels // Hydrogen Damage / ed. by C. D. Beachem. – OH : American Society for Metals, Metals Park, 1977. – P. 377–394.

12. Шашкова Л. В. О методическом подходе к изучению кинетики водородного охрупчивания сталей // Международный научно-исследовательский журнал. – 2012. – № 5 (5). – С. 30–36.



13. Шашкова Л. В. Фрактально-синергетические аспекты микроповреждаемости, разрушения и оптимизации структуры стали в условиях водородной хрупкости и сероводородного коррозионного растрескивания : монография. – Оренбург : ОГУ, 2013. – 305 с.

14. Модели влияния водорода на механические свойства металлов и сплавов / Ю. А. Яковлев, В. А. Полянский, Ю. С. Седова, А. К. Беляев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2020. – № 3. – С. 136–160. – DOI: 10.15593/perm.mech/2020.3.13.

15. Sofronis P., Liang Y., Aravas N. Hydrogen induced shear localization of the plastic flow in metals and alloys // European Journal of Mechanics–A/Solids. – 2001. – Vol. 20 (6). – P. 857–872. – DOI: 10.1016/S0997-7538(01)01179-2.

16. ТУ 14–3Р–55–2001. Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов. – М. : РНИИТП, 2001. – 80 с.

17. Костюхина А. В. Механические свойства и деформационное поведение материалов оболочек твэлов энергетических реакторов по результатам испытаний кольцевых образцов на растяжение : дисс. ... канд. техн. наук : 05.16.09. – Москва, 2020. – 145 с.

18. Hydrogen diagnostics of metals and alloys / A. M. Polyanskiy, V. A. Polyanskiy, K. P. Frolova, Yu. A. Yakovlev // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2018. – Iss. 6. – P. 37–50. – DOI: 10.17804/2410-9908.2018.6.037-050. – URL: http://dream-journal.org/issues/2018-6/2018-6_190.html

19. Ring tensile test of reference zircaloy cladding tube as a proof of principle for hotcell setup / F. Nindiyasari, P. T. Pierick, D. Boomstra, A. Pandit // TopFuel-2018 Conf., Prague, Czech Republic, September 30–October 4, 2018. – 2018.

20. New mandrel design for ring hoop tensile testing / A. Khalfallah, Z. Ktari, C. Leitão, J. V. Fernandes // Experimental Techniques. – 2021. – Vol. 45 (3). – P. 769–787. – DOI: 10.1007/s40799-021-00462-4.

21. Mechanical property evaluation of high burn-up nuclear fuel cladding using the ring tensile test / S.-K. Kim, J.-G. Bang, D.-H. Kim, Y.-S. Yang, K.-W. Song, D.-S. Kim // Metals and Materials International. – 2009. – Vol. 15 (4). – P. 547–553. – DOI: 10.1007/s12540-009-0547-0.

22. Nagase F., Sugiyama T., Fuketa T. Optimized ring tensile test method and hydrogen effect on mechanical properties of zircaloy cladding in hoop direction // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2009. – Vol. 46 (6). – P. 545–552. –DOI: 10.3327/jnst.46.545.

23. Изменение физико-механических свойств оболочек твэлов из сталей ЭК164 и ЧС68 после эксплуатации в реакторе БН-600 в течение четырех микрокомпаний / А. М. Мосин, М. В. Евсеев, И. А. Портных, Е. Н. Щербаков, В. С. Шихалев, Н. М. Митрофанова, А. В. Козлов // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2011. – № 1. – С. 224–230.

24. Experimental strain measurements on ring tensile specimens made of S235JRH steel pipe / M. Travica, N. Mitrović, A. Petrović, M. Milošević // Procedia Structural Integrity. – 2023. – Vol. 48 (7). – P. 280–287. – DOI: 10.1016/j.prostr.2023.07.131.

25. Port R. D., Herro H. M. The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis. – McGraw-Hill, 1991 – 293 p.

26. Dayal R. K., Parvathavarthini N. Hydrogen embrittlement in power plant steels // Sadhana. – 2003. – Vol. 28. – P. 431–451. – DOI: 10.1007/BF02706442.

27. Ahmad J., Purbolaksono J. Hydrogen damage in a rear riser water wall tube of a power plant // Engineering Failure Analysis. – 2010. – Vol. 17 (5). – P. 1239–1245. – DOI: 10.1016/j.engfailanal.2010.01.005.

28. Saha A. Chapter 3 – Boiler tube failures: some case studies // Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Chemicals, Concrete and Power Industries. – Butterworth-Heinemann, 2016. – P. 49–68. DOI: 10.1016/B978-0-08-100116-5.00003-X.

29. Hydrogen embrittlement of a boiler water wall tube in a district heating system / Y. S Kim., W. C. Kim, J. Jain, E.-W. Huang, S. Y. Lee // Metals. – 2022. – Vol. 12. – P. 1276. – DOI: 10.3390/met12081276.