

УДК 620.18: 620.19
DOI: 10.18799/24131830/2025/9/5205
Шифр специальности ВАК: 2.4.5
Научная статья

Восстановление металла парогенерирующих труб котлов после их водородного растрескивания

А.В. Нечаева¹✉, В.В. Шалагаев¹, А.С. Заворин²

¹ АО НДЦ НПФ «Русская лаборатория», Россия, г. Санкт-Петербург

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉ pomazova@yandex.ru

Аннотация. Актуальность. Определяется увеличением количества повреждения экранных труб промышленных энергетических котлов вследствие развития водородного охрупчивания. Это явление представляет серьезную проблему при обеспечении безопасной и бесперебойной работы энергетических установок, приводит к преждевременному выходу из строя оборудования и создает потенциально опасные ситуации. **Цель.** Разработка комплексной термической обработки, позволяющей «залечивать» трещины, возникшие в результате водородного охрупчивания, и восстанавливать исходную феррито-перлитную микроструктуру. **Методы.** Оптическая и растровая микроскопия, оптико-эмиссионный спектральный анализ химического состава, метод вакуум-нагрева с использованием масс-спектрометрического анализатора для анализа водорода, масс-спектрометрический анализ газов металла. **Результаты и выводы.** В статье рассматривается эксплуатационное водородное охрупчивание металла парогенерирующих труб котлов (сталь 20) с отсутствующими внешними признаками метановой болезни (вспучивания, вздутия). Трещины, образованные вследствие водородной атаки, зарождались и росли по границам зерен при обезуглероживании микроструктуры, что сопровождалось значительным уменьшением цементита (перлитных зерен) и увеличением количества ферритных зерен без образования метана. Комплексная термическая обработка использовалась для закрытия водородных трещин в трубах поверхностей нагрева, экранирующих топочное пространство котла. Результаты выявили микроструктурные улучшения, такие как срастание условно малых трещин, заполнение материалом вершин больших трещин, восстановление двухфазной феррито-перлитной микроструктуры. Обсужден механизм «залечивания» и границы применимости выявленного режима восстановительной термообработки, уровень улучшения заданных характеристик. Последующие исследования возможностей различных режимов термической обработки должны быть направлены на оценку уровня восстановления механических свойств и эксплуатационных характеристик парогенерирующих труб энергетических котлов. Однако уже сейчас полученные результаты кажутся перспективными в части продления срока службы оборудования.

Ключевые слова: концентрация водорода, водородное охрупчивание, экранные котельные трубы, элементы тепловых станций, восстановительная термообработка

Для цитирования: Нечаева А.В., Шалагаев В.В., Заворин А.С. Восстановление металла парогенерирующих труб котлов после их водородного растрескивания // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 9. – С. 46–54. DOI: 10.18799/24131830/2025/9/5205

UDC 620.18: 620.19
DOI: 10.18799/24131830/2025/9/5205
Scientific paper

Restoration of metal of steam generating boiler tubes after their hydrogen cracking

A.V. Nechaeva¹✉, V.V. Shalagaev¹, A.S. Zavorin²

¹ Russian Laboratory Ltd., Saint Petersburg, Russian Federation

² National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉ pomazova@yandex.ru

Abstract. Relevance. The increase in the number of damages to the screen tubes of industrial power boilers due to the development of hydrogen embrittlement. This phenomenon is a serious problem in ensuring the safe and uninterrupted operation of power plants, leads to premature failure of equipment and creates potentially dangerous situations. **Aim.** To develop a comprehensive heat treatment that allows healing cracks caused by hydrogen embrittlement and restoring the original ferrite-pearlite microstructure. **Methods.** Optical and scanning microscopy, optical emission spectral analysis of chemical composition, vacuum heating method using a mass spectrometric analyzer for hydrogen analysis, mass spectrometric analysis of metal gases. **Results and conclusions.** The article considers operational hydrogen embrittlement of metal of steam-generating boiler tubes (steel 20) with no external signs of methane disease (swelling, bulging). Cracks formed as a result of hydrogen attack originated and grew along grain boundaries during decarburization of the microstructure, which was accompanied by a significant decrease in cementite (pearlite grains) and an increase in the amount of ferrite grains without methane formation. Complex heat treatment was used to close hydrogen cracks in the heating surface tubes screening the boiler combustion space. The results revealed microstructural improvements such as coalescence of relatively small cracks, filling of the tips of large cracks with material, restoration of the two-phase ferrite-pearlite microstructure. The paper discusses healing mechanism and the applicability limits of the identified mode of restorative heat treatment, the level of improvement of the specified characteristics. Subsequent studies of the capabilities of various heat treatment modes should be aimed at assessing the level of restoration of the mechanical properties and performance characteristics of steam-generating tubes of power boilers. However, even now the obtained results seem promising in terms of extending the service life of the equipment.

Keywords: hydrogen concentration, hydrogen embrittlement, waterwall boiler tubes, elements of thermal power plants, restorative heat treatment

For citation: Nechaeva A.V., Shalagaev V.V., Zavorin A.S. Restoration of metal of steam generating boiler tubes after their hydrogen cracking. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 9, pp. 46–54. DOI: 10.18799/24131830/2025/9/5205

Введение

Одной из установленных причин повреждения экранных труб энергетических котлов является развитие водородного охрупчивания (ВО) [1–4]. Для изготовления таких поверхностей нагрева, экранирующих топочное пространство котла, используется сталь 20. Согласно опубликованным научным данным при водородной атаке углеродистых сталей происходит обезуглероживание внутренней структуры и образование множества трещин, что приводит к снижению эксплуатационной прочности и обуславливает выход оборудования из строя [5–9].

До настоящего времени исследование ВО в сталях в основном сосредоточены на процессах образования трещин, однако мало внимания уделяется процессу залечивания этих трещин и восстановлению свойств стального оборудования. Нами обнаружены лишь единичные исследования в этой области. В статье [10] испытатели изучали залечивание трещин, вызванных высокотемпературной водородной атакой в углеродистой стали (Grade 1020). В качестве объектов испытаний брались искусственно насыщенные образцы, а термическая обработка была направлена прежде всего на разложение в стали продукта ВО – метана, с последующей контролируемой диффузией углерода в матрицу и выходом водорода из испытуемого материала. Подобно этому в статье [11] восстановлению подвергались образцы из стали X70 после электрохимического наводороживания. После зарядки образцов водородом на поверхностях образцов формировались пузыри, обусловленные образованием

метана. Залечивание трещин происходило по аналогичному [10] механизму.

Гораздо большее количество работ посвящено эффективности «залечивания» трещин, образованных по усталостному механизму в отсутствие водорода. Образование таких трещин, прежде всего, обусловлено знакопеременной механической нагрузкой. Показано, что при таких механизмах деградации внутреннюю трещину в стали можно успешно залечить с помощью фазовой термической обработки [12–15].

Вероятнее всего, малый интерес исследователей к поиску режимов восстановления материалов объясняется общепринятым мнением, что наблюдаемое в микроструктуре обезуглероживание сталей является одним из основных признаков необратимой водородной хрупкости [16–18]. А деградация материала в процессе ВО называется термином «метановая болезнь».

В статье [19] было высказано предположение, что в процессе длительного эксплуатационного воздействия водорода, обезуглероживание перлитных зерен может быть объяснено скоплением углерода (графита) по границам зерен металла, вследствие этого углерод не покидает металл труб в виде метана. В статье обоснован новый механизм водородного повреждения металла, который не сопровождается образованием метана, а следовательно, не наблюдаются такие признаки метановой болезни, как расслоения, вспучивания и вздутия поверхности оборудования.

Если учесть именно такой эксплуатационный механизм обезуглероживания, то представляется

возможным применение восстановительной термообработки, описанной в РД 153-34.0-17.460-99, осуществляемой с целью устранения графитизации. Термическая обработка, состоящая из гомогенизации и последующей нормализации, приводит к растворению графита в аустените, выравниванию химического состава вследствие диффузии углерода при высокой температуре и формированию однородной феррито-перлитной структуры при охлаждении. Также интерес представляет проверка эффективности режимов термической обработки, полученных на искусственных образцах с метановой болезнью [10].

Материалы и методики исследования

В качестве объектов испытаний выбраны трубы из стали 20 по ТУ 14-3Р-55-2001, типоразмера 60×6 мм, применяемые для изготовления поверхностей нагрева энергетических котлов.

Маркировка «эксплуатационный» присвоена образцам, вырезанным из стенок поврежденных парогенерирующих труб котлов на прямых участках. Срок эксплуатации до разрушения составлял 290 тыс. ч при температуре эксплуатации 400 °С и давлении до 15 МПа. Кромки разрыва рваные, слоистые, без утонения относительно проектного значения.

«Эксплуатационные» образцы подвергались режимам восстановительной термической обработки (далее ВТО), приведенным в табл. 1. Далее таким образцам присваивалась маркировка «восстановленный». Образцы для ВТО брались вблизи края повреждения труб.

Термообработка образцов проводилась в печи муфельной LOIP LF-7/11-G1. В режиме ВТО-3 для удаления из металла диффузионно-подвижного водорода (ДПВ) была проведена предварительная дегазация. ДПВ, по мнению большинства ученых, ответственен за ухудшение механических характеристик (например, [20]). Выбор 400 °С для предва-

рительной дегазации обусловлен отсутствием в исследуемой стали 20 фазовых и структурных перестроек при данной температуре.

Химический анализ состава образцов был осуществлён в соответствии с методикой, установленной в ГОСТ Р 54153-2010, с помощью оптико-эмиссионного анализатора «FOUNDRY-MASTER Smart».

Определение массовой доли водорода проводилось в соответствии с ГОСТ 17745-90 методом вакуум-нагрева с использованием масс-спектрометрического анализатора водорода АВ-1 при двух температурах экстракции 530 и 800 °С.

Масс-спектрометрический анализ газов в исследуемых образцах осуществляли во времяпролетном масс-спектрометре МС-500.

Для выявления структурных составляющих образцов применялся 4 % спиртовой раствор HNO₃. Металлографический анализ проводился с использованием металлографического анализатора фрагментов микроструктуры твердых тел. Для более глубокого изучения структуры металла были получены электронно-микроскопические снимки с использованием прибора Jeol JCM-5700, который оснащён энерго-дисперсионным анализатором jed-2300.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

По результатам металлографического анализа и прямого измерения концентрации водорода исследованные поврежденные «эксплуатационные» образцы были отнесены к водородиндуцированным, т. е. возникшим в результате водородного охрупчивания металла парогенерирующих труб котлов. Так, металлографический анализ показал, что трещины у труб с огневой стороны развиваются по границам зерен по толщине стенки от внутренней поверхности на глубину до 3,4 мм и представляют собой межкристаллитное растрескивание (рис. 1).

Таблица 1. Примененные режимы ВТО

Table 1. Applied regimes of reducing heat treatment (RHT)

Маркировка режима ВТО RHT regime marking	Режим термической обработки Heat treatment mode	Источник Source
ВТО-1/RHT-1	1. Гомогенизация при 1070–1100 °С в течение 25 мин Homogenization at 1070–1100°C for 25 min 2. Нормализация при 890–920 °С в течение 25 мин Normalization at 890–920°C for 25 min	РД 153-34.0-17.460-99 RD 153-34.0-17.460-99
ВТО-2/RHT-2	1. Выдержка при 650 °С в течение 1 ч Holding at 650°C for 1 hour 2. Выдержка при 1000 °С в течение 6 ч. 5 циклов Holding at 1000°C for 6 hours 5 cycles	[10]
ВТО-3/RHT-3	1. Дегазация при 400 °С в течении 3 ч/Degassing at 400°C for 3 hours 2. Гомогенизация при 1100 °С в течение 2 мин. на 1 мм толщины стенки (12 минут) Homogenization at 1100°C for 2 min. per 1 mm of wall thickness (12 minutes) 3. Нормализация при 920 °С в течение 2 минуты на 1 мм толщины стенки (12 минут) Normalization for 920°C for 2 min. per 1 mm of wall thickness (12 minutes)	Авторы настоящей статьи Authors of this article

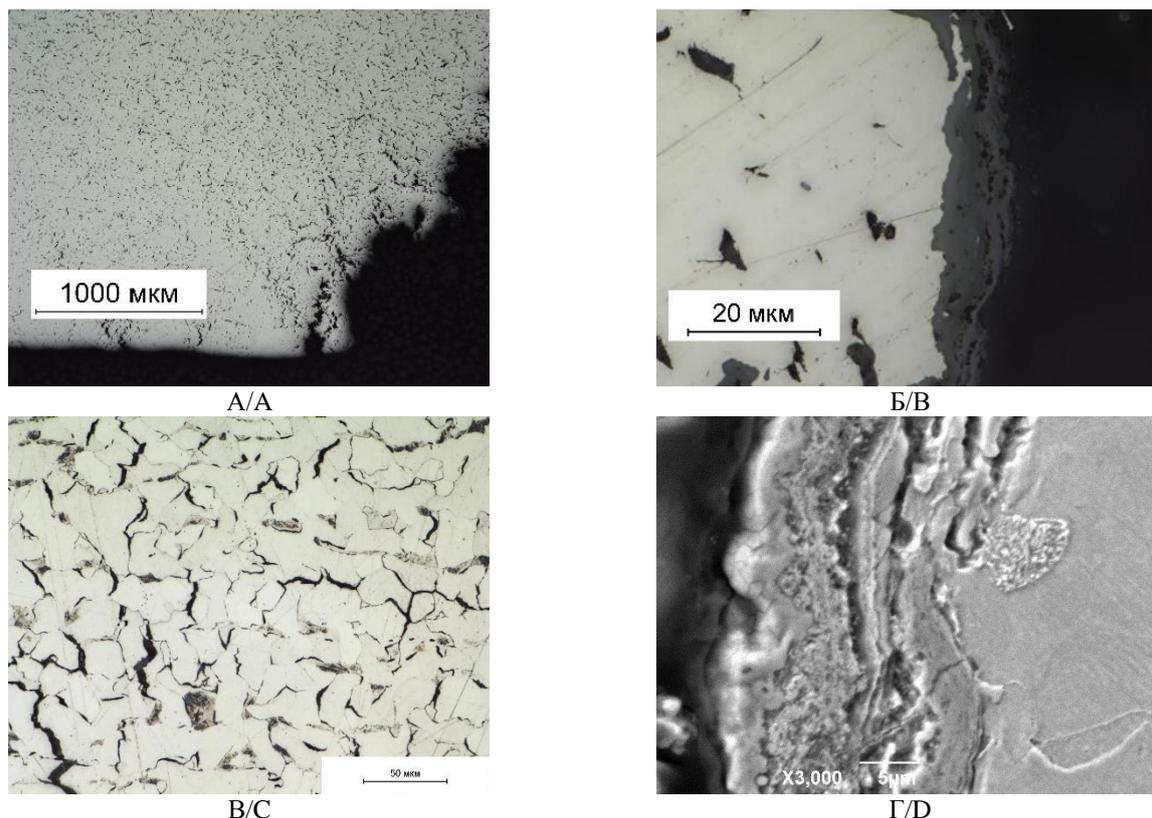


Рис. 1. Вид водородного повреждения в микроструктуре при разном увеличении: А, Б – шлиф без химического травления; В, Г – шлиф после химического травления для выявления микроструктуры. Красными стрелками показан науглероженный слой металла по краю сквозного разрыва трубы

Fig. 1. Type of hydrogen damage in the microstructure at different magnifications: A, B – slot without chemical etching; C, D – slot after chemical etching to reveal the microstructure. The red arrows show a carbonized metal layer along the edge of a through-hole pipe

По краю излома наблюдается науглероженная микроструктура на глубину ≈ 13 мкм (рис. 1, Б, Г). Морфологический анализ микроструктурного строения по толщине стенки с огневой стороны показал, что наблюдается изменение соотношения количества ферритных и перлитных зерен. Отчетливо видно окисление карбидной составляющей стали в границах бывших перлитных зерен, обезуглероживание максимально вблизи сквозного повреждения (рис. 1, А, В). Указанный структурный градиент и описанное микроструктурное строение является индикатором наличия водородного охрупчивания [16, 17].

Результаты экспериментального определения массовой доли водорода методом вакуумного нагрева показали, что суммарная концентрация водорода (диффузионно-подвижного и сильносвязанного) составляет 8,5 ppm вблизи повреждения, 2,4 ppm – на расстоянии 20 мм от края излома, 1,5 ppm – с тыловой стороны трубы, что подтверждает водородный характер повреждения. При этом в поврежденных трубах отсутствовали признаки метановой болезни, такие как вспучивания, вздутия, образование водородных пузырей (сечение труб приведено на рис. 2). Масс-спектрометрический анализ «эксплуатацион-

ных» образцов также подтверждает отсутствие метана. В пробах из поврежденных труб зафиксированы следующие газовые компоненты: H_2 , H_2O , N_2 и CO_2 .

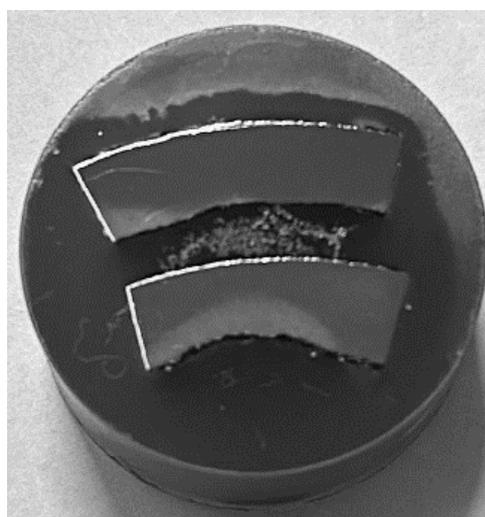


Рис. 2. Сечение стенки «эксплуатационных» образцов
Fig. 2. Wall cross section of "operational" samples

Таблица 2. Химический состав металла в образцах после различных режимов ВТО

Table 2. Chemical composition of metal in samples after different RHT modes

Маркировка образца Sample marking	Массовая доля химических элементов, %/Mass fraction of chemical elements, %							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	S	Cu	P
«Эксплуатационный» "Operational"	0,205±0,016	0,437±0,024	0,27±0,03	0,040±0,006	0,017±0,004	0,0067±0,0024	0,049±0,008	0,0084±0,0024
«Восстановленный» ВТО-1 "Restored" RHT-1	0,200±0,016	0,440±0,024	0,27±0,03	0,041±0,006	0,018±0,004	0,0066±0,0024	0,051±0,012	0,0086±0,0024
«Восстановленный» ВТО-2 "Restored" RHT-2	0,204±0,016	0,437±0,024	0,27±0,03	0,040±0,006	0,017±0,004	0,0069±0,0024	0,050±0,008	0,0083±0,0024
«Восстановленный» ВТО-2 "Restored" RHT-2	0,209±0,016	0,442±0,024	0,27±0,03	0,042±0,006	0,019±0,004	0,0069±0,0024	0,051±0,012	0,0086±0,0024

По результатам оптико-эмиссионного спектрального анализа разницы в содержании углерода вблизи сквозного повреждения (где наблюдается полное обезуглероживание микроструктуры) и на удалении от повреждения (где частичное обезуглероживание микроструктуры) не зафиксировано (табл. 2). Во всех исследованных образцах (в том числе «восстановленных») концентрация углерода находилась на уровне 0,20 %.

По результатам проведенных режимов термической обработки установлено значительное снижение объемной доли графита (оценено по среднему проценту площади, занятой графитом на микрошлифе без химического травления). Количество графита уменьшилось в 2,0, 1,8, 3,2 раза для образцов после ВТО-1, ВТО-2, ВТО-3 соответственно. Результаты приведены на рис. 3 и в табл. 3.

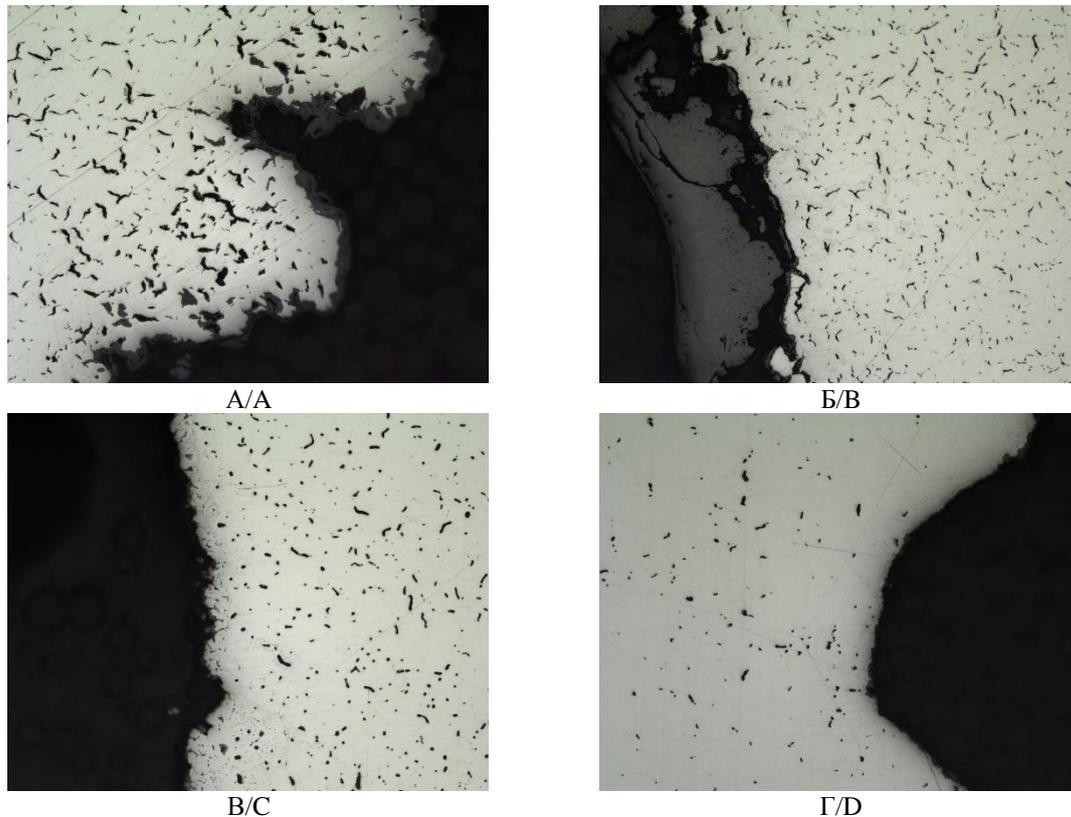


Рис. 3. Вид графита в микроструктуре образцов: А – «эксплуатационный», Б–Г – «восстановленный» после ВТО-1, ВТО-2, ВТО-3 соответственно

Fig. 3. Type of graphite in the microstructure of the samples: А – "operational", В–D – "restored" after RHT-1, RHT-2, RHT-3, respectively

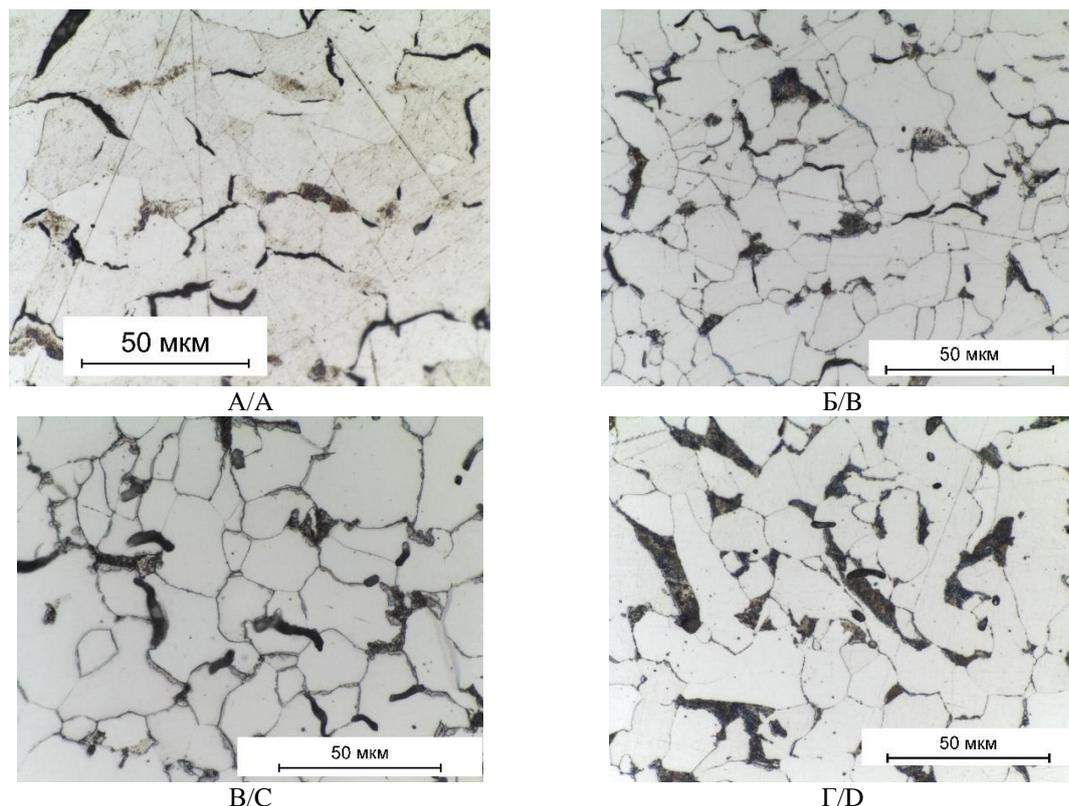


Рис. 4. Микроструктура образцов: А – «эксплуатационный», Б–Г – «восстановленный» после ВТО-1, ВТО-2, ВТО-3 соответственно

Fig. 4. Microstructure of the samples: А – "operational", Б–D – "restored" after RHT-1, RHT-2, RHT-3, respectively

После ВТО произошло восстановление феррито-перлитной микроструктуры с разной степенью эффективности. Произошло образование цементита (компонента перлитной структуры). Количество перлита увеличилось пропорционально уменьшению графита в 1,9, 1,3, 5,4 раза для образцов после ВТО-1, ВТО-2, ВТО-3 соответственно. Результаты приведены на рис. 4 и в табл. 3. После термической обработки наблюдается сокращение и закрытие трещин во всех «восстановленных» образцах (рис. 4). Сопровождая процесс восстановления микроструктуры (диффузия углерода в матрицу и образование цементита), вершины трещины начали закрываться за счет диффузии (в том числе железа).

Скорость «заживления» трещины и критическая длина трещины определялись режимами ВТО. При предварительной дегазации водорода, осуществлённой в режиме ВТО-3, процесс «залечивания» трещин и восстановления микроструктуры был наиболее эффективным (рис. 5): длина трещин сокращалась более чем в 5 раз (с 80 до 15 мкм), ширина более чем в 3 раза (с 8 до 2 мкм), а вершины трещин затуплялись. Также при этом режиме произошел распад науглероженной структуры по кромке разрушения (рис. 5, А, Б), а трещины после ВТО-3 располагаются преимущественно в теле зерен восстановленной микроструктуры.

Таблица 3. Средний процент площади, занятой графитом на микрошлифе, без химического травления в образцах после различных режимов ВТО

Table 3. Average percentage of the area occupied by graphite on a microplate without chemical etching in samples after various RHT modes

Маркировка образца Sample marking	«Эксплуатационный» "Operational"	«Восстановленный» "Restored"		
		ВТО-1 RHT-1	ВТО-2 RHT-2	ВТО-3 RHT-3
%				
Объемная доля графита Graphite volume fraction	5,5	2,7	3,1	1,7
Объемная доля перлита Perlite volume fraction	3,1	6,1	4,1	16,6

Выводы

Экспериментальными данными обосновано проведение восстановительной термической обработки металла парогенерирующих труб котлов, поврежденных в результате водородного охрупчивания. Установлено, что в процессе эксплуатации водородное охрупчивание парогенерирующих труб энергетических котлов не всегда сопровождается проявлением признаков метановой болезни (образованием метана).

Это обстоятельство, с одной стороны, усложняет диагностику таких труб, а с другой стороны, делает возможным применение режимов восстановительной термической обработки такого оборудования.

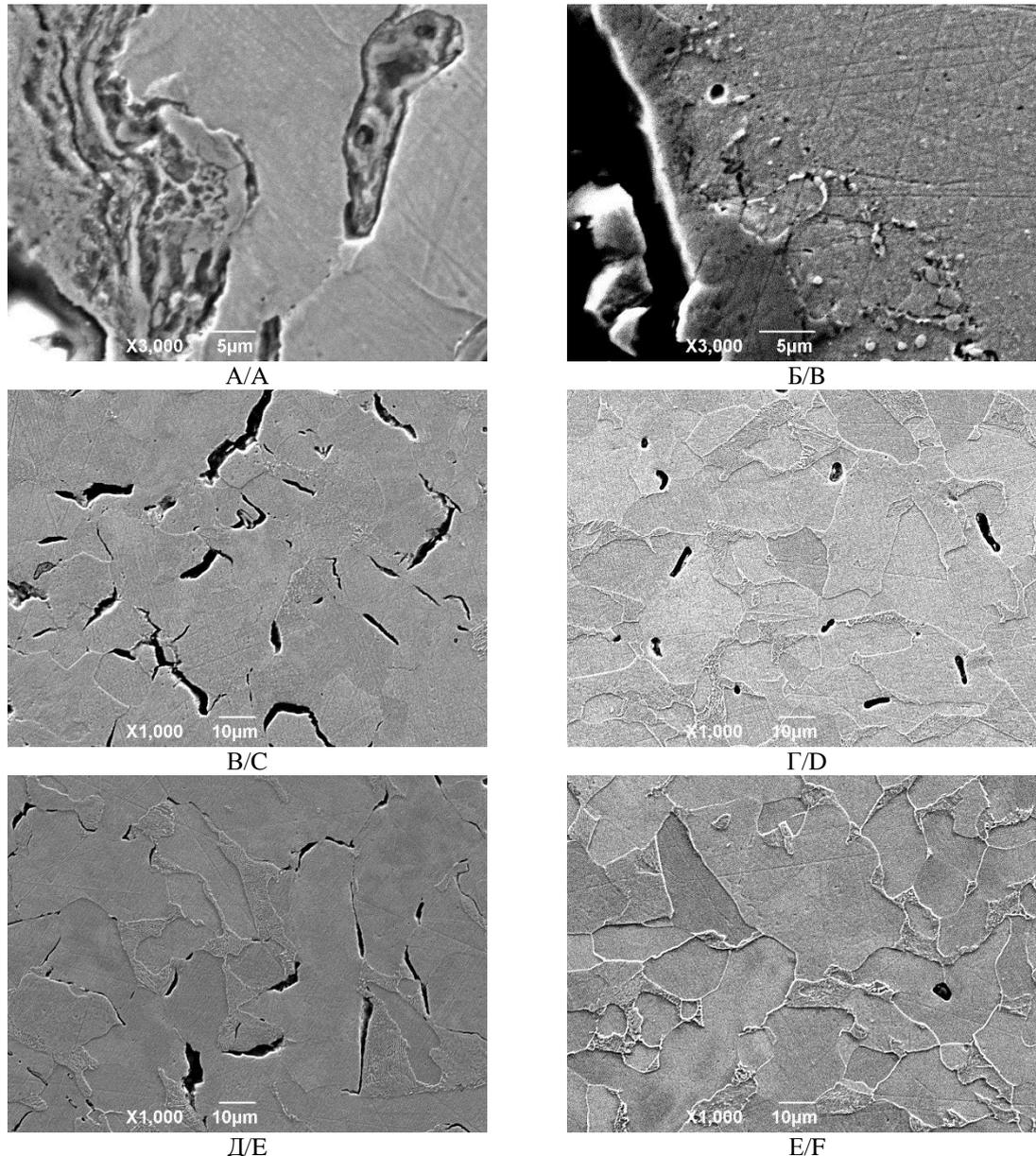


Рис. 5. Микроструктура «эксплуатационного» (А, В, Д) и «восстановленного» по ВТО-3 (Б, Г, Е) образцов. А, Б – кромка сквозного повреждения; В, Г – микроструктура вблизи разрушения; Д, Е – на расстоянии 50 мм от кромки разрушения

Fig. 5. Microstructure of "operational" (A, C, E) and "restored" samples according to RHT-3 (B, D, F). A, B – edge of the through damage; C, D – microstructure near the fracture; E, F – at a distance of 50 mm from the edge of destruction

Установлено, что разработанный авторами данной статьи режим термической обработки, включающий в себя предварительную дегазацию, далее гомогенизацию и нормализацию, приводит к значительному улучшению характеристик микроструктуры: происходит восстановление двухфазной феррито-перлитной микроструктуры, наблюдается сокращение и закрытие трещин (длина трещин сокращалась более чем в 5 раз (с 80 до 15 мкм), ширина – более чем в 3 раза (с 8 до 2 мкм)), а также затупление вершин трещин. Данная термическая обработка приводит к смещению многих границ

зерен, фазовым превращениям в материале и «залечиванию» внутренних трещин.

Последующие исследования возможностей различных режимов термической обработки должны быть направлены на оценку уровня восстановления механических свойств и эксплуатационных характеристик парогенерирующих труб энергетических котлов. Однако уже сейчас полученные результаты являются многообещающими в части продления срока службы оборудования, подвергнутого не только процессам ВО, но и другим механизмам растрескивания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вайнман А.Б., Мелехов Р.К., Смиян О.Д. Водородное охрупчивание элементов котлов высокого давления / отв. ред. И.И. Васильченко. – Киев: Наук. Думка, 1991. – 272 с.
2. Анализ причин хрупкого разрушения труб поверхностей нагрева котлов после длительной эксплуатации / А.В. Нечаева, В.А. Полянский, А.М. Полянский, В.В. Шалагаев, Ю.А. Яковлев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2024. – Т. 90. – № 4. – С. 53–65. DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-4-53-65>
3. Дegrаdация стали 20 при катодной поляризации и при водородном охрупчивании экранных труб парового котла в процессе эксплуатации / В.В. Шалагаев, А.В. Нечаева, В.А. Полянский, А.М. Полянский, Ю.А. Яковлев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2024. – Т. 90. – №10. – С. 46–55. DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-10-46-55>.
4. Ichihara T., Amano Yo., Machida M. Hydrogen damage in a power boiler: a study of damage selectivity and conditions // Engineering Failure Analysis. – 2023. – Vol. 143. – Part A. – № 106842. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106842>
5. On the chemomechanics of bubble growth in hydrogen attack of plain carbon steels / K. Vijayvargia, T. Nguyen, M. Dadfarnia, A. Staykov, P. Sofronis, M. Kubota, M.L. Martin, J.A. Pugh // Corrosion Science. – 2025. – Vol. 253. – № 112999. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2025.112999>.
6. A study of the void surface healing mechanism in 316LN steel / Qin Min, Liu Jiansheng, Li Jingdan, Zhang Xuezhong // High Temperature Materials and Processes. – 2023. – Vol. 42. – № 1. – P. 20220282. DOI: <https://doi.org/10.1515/htmp-2022-0282>
7. Stress-based hydrogen damage model of X80 pipeline steel and its damage risk assessment under cathodic interference / Yu. Xing, Zh. Yang, Q. Zhao, L. Qiao, J. Yang, L. Zhang // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2023. – Vol. 203. – № 104947. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2023.104947>.
8. Coupled chemical-mechanical damage modeling of hydrogen-induced material degradation / B. Tekkaya, J. Wu, M. Dölz, J. Lian, S. Münstermann // Engineering Fracture Mechanics. – 2025. – Vol. 314. – № 110751. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2024.110751>.
9. Hydrogen-induced damage of materials: a review of testing and evaluation methods, and hydrogen mapping techniques / Y.Ch. Malede, A.Yu. Adesina, F. Ashraf, A.A. Sorour // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2025. – Vol. 215. – № 115528. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115528>.
10. Study on crack healing of hydrogen attack in carbon steel by heat treatment / C.F. Dong, X.G. Li, Z.S. Shen et al. // Corrosion. – 2003. – Vol. 59. – № 5. – P. 401–406. DOI: <https://doi.org/10.5006/1.3277571>
11. Hydrogen-induced cracking and healing behaviour of X70 steel / C.F. Dong, X.G. Li, Z.Y. Liu, Y.R. Zhang // Journal of Alloys and Compounds. – 2009. – Vol. 484. – № 1–2. – P. 966–972. DOI: [10.1016/j.jallcom.2009.05.085](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.05.085)
12. A novel crack healing technique in a low carbon steel by cyclic phase transformation heat treatment: the process and mechanism / M. He, Z. Zhentai, F. Shi, D. Guo, J. Yu // Materials Science and Engineering: A. – 2019. – 138712. DOI: [10.1016/j.msea.2019.138712](https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138712)
13. Effect of deformation modes and heat treatment on microstructure and impact property restoration of internal crack healing in SA 508 steel / Y. Qiu, R. Xin, J. Luo, Q. Ma // Materials Science and Engineering: A. – 2020. – 139073. DOI: [10.1016/j.msea.2020.139073](https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139073)
14. Efficiency improvement of fatigue crack healing by multiple high-density pulsed electric currents: Application to austenitic stainless steel / S. Yoon, Sh. Gu, Sh. Li, Ya. Kimura, Yu. Toku, Ya. Ju // Engineering Fracture Mechanics. – 2023. – Vol. 284. – № 109235. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2023.109235>
15. Electric current-induced solid-state crack healing and life extension / S. Telpande, C. Kumar, D. Sharma, P. Kumar // Acta Materialia. – 2025. – Vol. 283. – № 120573. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2024.120573>
16. Колачев Б.А. Водородная хрупкость металлов. Итоги науки и техники. Серия «Металловедение и термическая обработка». – М.: ВИНТИ, 1989. – 221 с.
17. Арчаков Ю.И. Водородная коррозия стали. – М.: Металлургия, 1985. – 192 с.
18. Snoek J.L. On the decarburization of steel and related questions // Physica. – 1941. – Vol. 8. – № 7. – P. 734–744.
19. Redistribution of carbon in steels during long-term operation of equipment in hydrogen-containing environments / A.V. Nechaeva, L.G. Vagina, A.M. Polyansky, V. Polyansky V.V. Shalagaev, Yu.A. Yakovlev // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2025. – Iss. 1. – P. 011–022. DOI: [10.17804/2410-9908.2025.1.011-022](https://doi.org/10.17804/2410-9908.2025.1.011-022).
20. Влияние диффузионно-подвижного и связанного водорода на водородную хрупкость стали / Л.В. Шашкова, Н.А. Манаков, Е.С. Козик, Е.В. Свиденко // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2019. – Т. 85. – № 8. – С. 59–66. DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-8-59-66>

Информация об авторах

Анна Викторовна Нечаева, кандидат технических наук, начальник испытательной лаборатории АО НДЦ НПФ «Русская лаборатория», Россия, 197229, г. Санкт-Петербург, тер. Ольгино, ул. Вокзальная, 2, корп. 3, стр. 1, romanova@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0005-2617-9736>

Владимир Валерьевич Шалагаев, заместитель генерального директора АО НДЦ НПФ «Русская лаборатория», Россия, 197229, г. Санкт-Петербург, тер. Ольгино, ул. Вокзальная, 2, корп. 3, стр. 1, Vladimir.Shalagaev@ruslab.org; <https://orcid.org/0009-0004-9558-9539>

Александр Сергеевич Заворин, доктор технических наук, профессор-консультант НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 3, zavorin@tpu.ru 0; <https://orcid.org/0000-0001-5724-0150>

Поступила в редакцию: 10.06.2025

Поступила после рецензирования: 14.07.2025

Принята к публикации: 04.08.2025

REFERENCES

1. Vainman A.B., Melekhov R.K., Smiyani O.D. *Hydrogen embrittlement of elements of high-pressure boilers*. Kiev, Nauk. Dumka Publ., 1991. 272 p. (In Russ.)
2. Nechaeva A.V., Polyansky V.A., Polyansky A.M., Shalagaev V.V., Yakovlev Yu.A. Analysis of the causes of brittle destruction of pipes of boiler heating surfaces after prolonged operation. *Factory laboratory. Diagnostics of materials*, 2024, vol. 90, no. 4, pp. 53–65. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-4-53-65>
3. Shalagaev V.V., Nechaeva A.V., Polyansky V.A., Polyansky A.M., Yakovlev Yu.A. Degradation of steel 20 during cathodic polarization and hydrogen embrittlement of steam boiler screen pipes during operation. *Factory laboratory. Diagnostics of materials*, 2024, vol. 90, no. 10, pp. 46–55. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-10-46-55>
4. Ichihara T., Amano Yo., Machida M. Hydrogen damage in a power boiler: a study of damage selectivity and conditions. *Engineering Failure Analysis*, 2023, vol. 143, part A, no. 106842. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106842>
5. Vijayvargia K., Nguyen T., Dadfarnia M., Staykov A., Sofronis P., Kubota M., Martin M.L., Pugh J.A. On the chemomechanics of bubble growth in hydrogen attack of plain carbon steels. *Corrosion Science*, 2025, vol. 253, no. 112999. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2025.112999>
6. Qin Min, Liu Jiansheng, Li Jingdan, Zhang Xuezhong. A study of the void surface healing mechanism in 316LN steel. *High Temperature Materials and Processes*, 2023, vol. 42, no. 1, pp. 20220282. DOI: <https://doi.org/10.1515/htmp-2022-0282>
7. Xing Yu., Yang Zh., Zhao Q., Qiao L., Yang J., Zhang L. Stress-based hydrogen damage model of X80 pipeline steel and its damage risk assessment under cathodic interference. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2023, vol. 203, no. 104947. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2023.104947>
8. Tekkaya B., Wu J., Dölz M., Lian J., Münstermann S. Coupled chemical-mechanical damage modeling of hydrogen-induced material degradation. *Engineering Fracture Mechanics*, 2025, vol. 314, no. 110751. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2024.110751>
9. Malede Y.Ch., Adesina A.Yu., Ashraf F., Sorour A.A. Hydrogen-induced damage of materials: A review of testing and evaluation methods, and hydrogen mapping techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025, vol. 215, no. 115528. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115528>
10. Dong C.F., Li X.G., Shen Z.S. Study on crack healing of hydrogen attack in carbon steel by heat treatment. *Corrosion*, 2003, vol. 59, no. 5, pp. 401–406. DOI: <https://doi.org/10.5006/1.3277571>
11. Dong C.F., Li X.G., Liu Z.Y., Zhang Y.R. Hydrogen-induced cracking and healing behaviour of X70 steel. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, vol. 484, no. 1–2, pp. 966–972. DOI: [10.1016/j.jallcom.2009.05.085](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.05.085)
12. He M., Zhentai Z., Shi F., Guo D., Yu J. A novel crack healing technique in a low carbon steel by cyclic phase transformation heat treatment: the process and mechanism. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 138712. DOI: [10.1016/j.msea.2019.138712](https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138712)
13. Qiu Y., Xin R., Luo J., Ma Q. Effect of deformation modes and heat treatment on microstructure and impact property restoration of internal crack healing in SA 508 steel. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 139073. DOI: [10.1016/j.msea.2020.139073](https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139073)
14. Yoon S., Gu Sh., Li Sh., Kimura Ya., Toku Yu., Ju Ya. Efficiency improvement of fatigue crack healing by multiple high-density pulsed electric currents: application to austenitic stainless steel. *Engineering Fracture Mechanics*, 2023, vol. 284, no. 109235. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2023.109235>
15. Telpande S., Kumar C., Sharma D., Kumar P. Electric current-induced solid-state crack healing and life extension. *Acta Materialia*, 2025, vol. 283, no. 120573. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2024.120573>
16. Kolachev B.A. *Hydrogen brittleness of metals. Results of science and technology. The series "Metallurgy and heat treatment"*. Moscow, VINITI Publ., 1989. 221 p. (In Russ.)
17. Archakov Yu.I. *Hydrogen corrosion of steel*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985. 192 p. (In Russ.)
18. Snoek J.L. On the decarburization of steel and related questions. *Physica*, 1941, vol. 8, no. 7, pp. 734–744.
19. Nechaeva A.V., Vagina L.G., Polyansky A.M., Polyansky V., Shalagaev V.V., Yakovlev Yu.A. Redistribution of carbon in steels during long-term operation of equipment in hydrogen-containing environments. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2025, Iss. 1, pp. 011–022. DOI: [10.17804/2410-9908.2025.1.011-022](https://doi.org/10.17804/2410-9908.2025.1.011-022)
20. Shashkova L.V., Manakov N.A., Kozik E.S., Svidenko E.V. The effect of diffusion-mobile and combined hydrogen on hydrogen brittleness of steel. *Factory laboratory. Diagnostics of materials*, 2019, vol. 85, no. 8, pp. 59–66. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-8-59-66>

Information about the authors

Anna V. Nechaeva, Cand. Sc., Head of the Testing Laboratory of Russian Laboratory Ltd, 2, bld. 3, 1, Vokzalnaya street, Olgino territory, St. Petersburg, 197229, Russian Federation. pomazova@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0005-2617-9736>

Vladimir V. Shalagaev, Deputy General Director, Russian Laboratory Ltd, 2, bld. 3, 1, Vokzalnaya street, Olgino territory, St. Petersburg, 197229, Russian Federation, Vladimir.Shalagaev@ruslab.org, <https://orcid.org/0009-0004-9558-9539>

Alexander S. Zavorin, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation, zavorin@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5724-0150>

Received: 10.06.2025

Revised: 14.07.2025

Accepted: 04.08.2025