

УДК 621.774:620.1

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.241219.57.602

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ПРЕЖДЕВРЕМЕННОГО РАЗРУШЕНИЯ КОТЕЛЬНЫХ ТРУБ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В КОТЛЕ-УТИЛИЗАТОРЕ

СУХОМЛИН Г. Д.<sup>1</sup>, д. т. н., проф.,  
 ДЕРГАЧ Т. А.<sup>2\*</sup>, д. т. н., в. н. с.,  
 ДЕЙНЕКО Л. Н.<sup>3</sup>, д. т. н., проф.

<sup>1</sup> Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. + 38 (050) 657-18-00, e-mail: [g\\_suhomlin@ukr.net](mailto:g_suhomlin@ukr.net), ORCID ID: 0000-0003-0790-6473;

<sup>2\*</sup> Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. + 38 (050) 867-30-97, e-mail: [ta\\_dergach@i.ua](mailto:ta_dergach@i.ua), ORCID ID 0000-0003-0235-5342;

<sup>3</sup> Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 8, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (095) 333-13-25, e-mail: [leonid\\_deyneko@i.ua](mailto:leonid_deyneko@i.ua), ORCID ID 0000-0002-1177-3055

**Аннотация.** *Цель работы* – установление причины преждевременного выхода из строя котельных труб из низколегированной стали, эксплуатирующихся в котле-утилизаторе в цехе синтеза аммиака. *Методики.* Выполнены: химический анализ стали на спектрометре «Spectromax» фирмы «Spectro», Германия; визуальный осмотр и исследование поверхностей труб с помощью растрового электронного микроскопа РЭМ106 И; металлографические исследования структуры стали по сечению полностью разрушенной и неразрушенных труб; испытание механических свойств труб на растяжение. *Результаты.* На основании комплексных исследований установлена неудовлетворительная исходная структура котельных труб, характеризующаяся перлитной полосчатостью балла 4 и относительно мелким зерном № 7–8, а также существенное изменение структуры стали в процессе эксплуатации труб в котле-утилизаторе в среде окислительных печных газов при повышенных температуре и давлении. *Научная новизна.* Научно обосновано, что причиной преждевременного разрушения котельных труб является деградация структуры низколегированной стали, заключающаяся в ее обезуглероживании и внутреннем окислении в результате физико-химических процессов, происходящих в окислительной среде при высоких температуре и давлении. *Практическое значение.* На предприятии химической промышленности предотвращена авария, связанная со взрывом котла-утилизатора, с неблагоприятными экологическими последствиями и возможными человеческими жертвами. Даны рекомендации по повышению эксплуатационной надежности и долговечности котельных труб без капитальных затрат.

*Ключевые слова:* низколегированная сталь; котельные трубы; химический анализ; микроструктура; деградация структуры; механические свойства

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН ПЕРЕДЧАСНОГО РУЙНУВАННЯ КОТЕЛЬНИХ ТРУБ У ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ В КОТЛІ-УТИЛІЗАТОРІ

СУХОМЛИН Г. Д.<sup>1</sup>, д. т. н., проф.,  
 ДЕРГАЧ Т. О.<sup>2\*</sup>, д. т. н., пров. н. с.,  
 ДЕЙНЕКО Л. М.<sup>3</sup>, д. т. н., проф.

<sup>1</sup> Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, Україна, тел. + 38 (050) 657-18-00, e-mail: [g\\_suhomlin@ukr.net](mailto:g_suhomlin@ukr.net), ORCID ID: 0000-0003-0790-6473;

<sup>2\*</sup> Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 867-30-97, e-mail: [ta\\_dergach@i.ua](mailto:ta_dergach@i.ua), ORCID ID 0000-0003-0235-5342

<sup>3</sup> Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 8, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 333-13-25, e-mail: [leonid\\_deyneko@i.ua](mailto:leonid_deyneko@i.ua), ORCID ID 0000-0002-1177-3055

**Анотація.** *Мета дослідження* – встановлення причини передчасного виходу з ладу котельних труб із низьколегованої сталі, які експлуатуються в котлі-утилізаторі в цеху синтезу аміаку. *Методики.* Виконано: хімічний аналіз сталі на спектрометрі «Spectromax» фірми «Spectro», Німеччина; візуальний огляд і дослідження поверхонь труб за допомогою растрового електронного мікроскопа РЕМ 106 И; металографічні дослідження структури сталі по перетину повністю зруйнованої і незруйнованих труб; випробування механічних властивостей труб на розтягнення. *Результати.* На основі

комплексних досліджень встановлено неприйнятну вихідну структуру котельних труб, яка характеризується перлітною смугастістю бала 4 і відносно дрібним зерном № 7–8, а також суттєве зміння структури сталі в процесі експлуатації труб у котлі-утилізаторі в середовищі окиснювальних пічних газів за високих температури і тиску. **Наукова новизна.** Науково обґрунтовано, що причиною передчасного руйнування котельних труб стає деградація структури сталі, яка полягає в її зневугледцюванні й внутрішньому окисненні в результаті фізико-хімічних процесів, що відбуваються в окиснювальному середовищі за високих температур і тиску. **Практична значущість.** На підприємстві хімічної промисловості відвернено аварію, пов'язану з вибухом котла-утилізатора, з несприятливими екологічними наслідками і можливими людськими жертвами. Дано рекомендації щодо підвищення експлуатаційної надійності і довговічності котельних труб без капітальних витрат.

*Ключові слова:* низьколегована сталь; котельні труби; хімічний аналіз; мікроструктура; деградація структури; механічні властивості

## RESEARCH ON THE REASONS FOR PREMATURE DESTRUCTION OF BOILER PIPES WHEN OPERATING IN A BOILER

SUKHOMLYN H.D.<sup>1</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
DERHACH T.O.<sup>2\*</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Leading Researcher*,  
DEINEKO L.M.<sup>3</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

<sup>1</sup> Department of Materials Science, State Higher Educational Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (050) 657-18-00, e-mail: [g\\_suhomlin@ukr.net](mailto:g_suhomlin@ukr.net), ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

<sup>2</sup> Department of Materials Science, State Higher Educational Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. + 38 (050) 867-30-97, e-mail: [ta\\_dergach@i.ua](mailto:ta_dergach@i.ua), ORCID ORG 0000-0003-0235-5342

<sup>3</sup> Material Science Department, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina Av., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. + 38 (095) 333-13-25, e-mail: [leonid\\_deyneko@i.ua](mailto:leonid_deyneko@i.ua), ORCID ID 0000-0002-1177-3055

**Abstract. Purpose** is to establish the reasons for the premature failure of low alloy steel boiler tubes operating in a waste heat boiler in the ammonia synthesis workshop. **Methodologies.** The work performed: chemical analysis of low-alloy pipe steel on a spectrometer "SPECTROMAX" company "SPECTRO", Germany; visual inspection and study of the surfaces of boiler pipes using a scanning electron microscope REM 106 I; metallographic studies of the structure of steel along the cross section of completely destroyed and non-destroyed pipes; tensile testing of pipe mechanical properties. **Results.** Based on comprehensive studies, an unsatisfactory initial structure of boiler pipes was established, characterized by pearlitic banding of score 4 and fine grain No. 7–8, as well as a significant change in the structure of steel during operation of pipes in a waste heat boiler in an oxidizing furnace gas environment at elevated temperature and pressure. Based on comprehensive studies, a significant change in the structure and properties of low-alloy pipe steel was established during the operation of boiler pipes in a waste heat boiler in the environment of furnace gases at elevated temperature and pressure. **Scientific novelty.** It is scientifically substantiated that the cause of the destruction of boiler pipes is the degradation of the structure of low alloy steel, which consists in its decarburization and internal oxidation as a result of physicochemical processes occurring in an oxidizing medium at high temperature and pressure. It is scientifically substantiated that the cause of the destruction of boiler pipes is the degradation of the structure of low alloy steel as a result of physicochemical processes occurring in the environment of furnace gases at high temperature and pressure. **Practical relevance.** An accident associated with the explosion of a waste heat boiler with unfavorable environmental consequences and possible human casualties was prevented at the chemical industry enterprise. Recommendations are given on improving the operational reliability and durability of boiler pipes without capital expenditures.

*Keywords:* low alloy steel, boiler tubes, chemical analysis, microstructure, structural degradation, mechanical properties

### Введение

Котельные трубы, эксплуатирующие в энергетическом оборудовании в различных отраслях промышленности, подвергаются газовой коррозии, которая зависит от химического состава и структуры стали или сплава. Аварии вследствие разрушения котельных труб приводят к экономическим убыткам, неблагоприятным экологическим последствиям и ухудшению условий труда [1; 2]. Поэтому выяснение причин разрушения этих труб с целью предупреждения аварий является актуальной задачей.

Основанием для проведения данной работы явилось преждевременное катастрофическое разрушение (через 6 лет эксплуатации) котельной трубы  $\varnothing 50,8 \times 3$  мм импортного производства из низколегированной стали типа 15 М, эксплуатировавшейся в трубном пучке котла-утилизатора в цехе синтеза аммиака на ПАО «Днепрзот», г. Каменское.

Котлы-утилизаторы представляют собой энергетические установки, предназначенные для выработки пара путем использования теплоты отходящих газов технологических печей и агрегатов [3]. В них отходящие топочные газы

подаются при температуре 350...1 000 °С и давлении до 50 атм на конвективные поверхности нагрева, обычно представляющие собой ряды котельных труб.

Поскольку котельные трубы являются наиболее ответственными деталями котлов-утилизаторов, они должны строго соответствовать жестким требованиям технических условий на них [4].

**Цель работы** – установление причин преждевременного выхода из строя котельных труб из низколегированной стали, эксплуатирующихся в котле-утилизаторе в цехе синтеза аммиака.

#### Материал и методы исследования

Материалом служили котельные трубы  $\varnothing 50 \times 3$  мм из низколегированной стали типа 15 М, эксплуатирующиеся в трубном пучке в котле-утилизаторе на ПАО «Днепрзот».

При выполнении исследований использованы методы: химического анализа трубной стали на спектрометре «Spectromax» фирмы «Spectro», Германия; визуальный осмотр и исследование при различных увеличениях, в том числе с помощью растрового электронного микроскопа РЭМ 106 И, поверхностей котельных труб; металлографические исследования структуры стали по сечению полностью разрушенной трубы и неразрушенных труб; испытание механических свойств труб на растяжение – по ГОСТ 10006.

#### Результаты исследований

Для проведения исследований был вскрыт кожух котла-утилизатора и осмотрен внешний вид полностью разрушенной трубы и труб трубного пучка, находящихся в непосредственной близости от нее (рис. 1, 2).

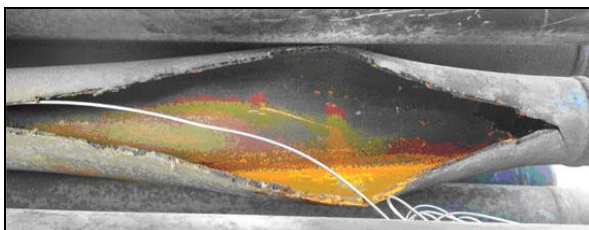


Рис. 1. Вид аварийной трубы  $\varnothing 50 \times 3$  мм внутри котла-утилизатора / Fig. 1. Type of emergency tube  $\varnothing 50 \times 3$  mm inside the recovery boiler

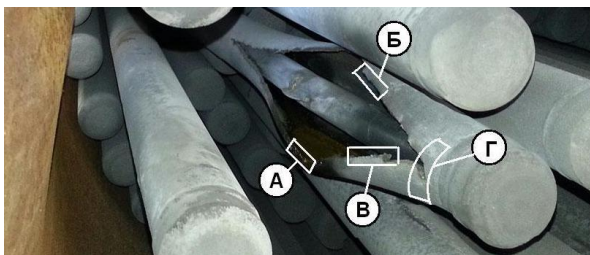


Рис. 2. Схема отбора образцов от разрушенной трубы / Fig. 2. Sampling scheme from a broken tube

Обследование наружных поверхностей разрушенной и неразрушенных труб трубного пучка показало, что на них имеются единичные вспучивания металла куполообразной формы, диаметром 10...25 мм и высотой до 1,5 мм (рис. 3).

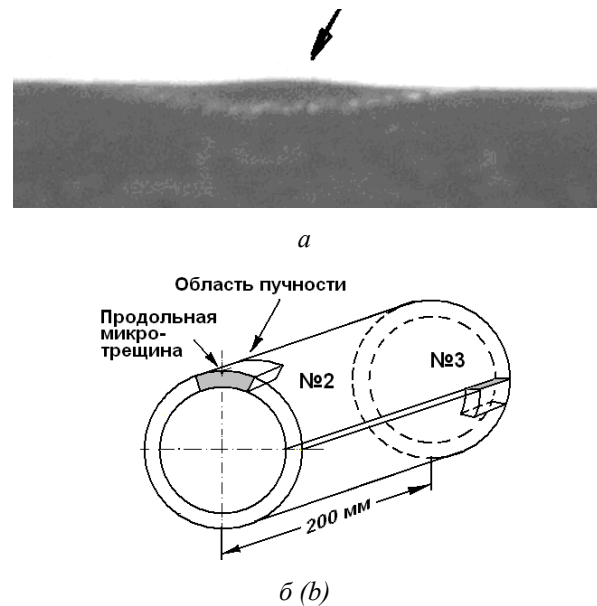


Рис. 3. Вспучивание на наружной поверхности неразрушенной трубы (а) и схема вырезки из нее шлифов (б) / Fig. 3. Swelling on the surface of the unbroken pipe (a) and the scheme for cutting thin sections from it (b)

Постепенное наращивание увеличения микроскопа показало, что вспучивание содержит продольную микротрещину, максимальное раскрытие которой составляет  $\approx 0,01$  мм (рис. 4). Расположение трещины вдоль образующей объясняется действием тангенциальных растягивающих напряжений в трубе под действием высокого внутреннего давления пара.

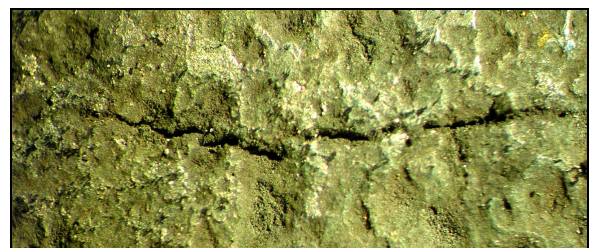


Рис. 4. Трещина в месте локальной деформации (вспучивания) на поверхности трубы,  $\times 20$  / Fig. 4. Crack in the place of local deformation (swelling) on the surface of the pipe,  $\times 20$

Вздутия металла на наружных поверхностях труб характерны для высокопластичного материала и свидетельствуют о том, что процесс разрушения трубы протекал постепенно.

Высокая пластичность металла труб подтверждена результатами механических испытаний на растяжение (табл.). Согласно сертификатным данным, котельные трубы

Ø 50,8 × 3 мм були изготовлені з низколегированої сталі типу 15 М, що містить 0,10 – 0,20 % С і 0,45 – 0,65 % Мо. В отечественних стандартах сталь такого хімічного складу відсутня, а її найближчим аналогом є сталь 12 МХ, що відрізняється від вказаної вище наявністю 0,40 – 0,70 % Ст. Ураховуючи викладене, а також дані про позитивний вплив хрому на жаростійкість, вважаємо хімічний склад досліджуємих котельних труб небагатоприятним.

Таблиця

**Результати випробувань механічних властивостей котельних труб Ø 50,8 × 3 мм / Mechanical Test Results boiler pipes Ø 50,8 × 3 mm**

№ труби (образца)	$\sigma_b$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{0,2}$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\delta_5$ , %
1, 2	434; 464	304; 326	31,5
Согласно сертификату	≥ 380	≥ 200	≥ 30

Мікроструктуру зразків, обраних з різних ділянок розбитої і незбитої труб, досліджували на не травлених і травлених металографічних шліфах.

На рисунку 5 представлено знімок не травленого шліфа, виготовленого з розбитої труби поблизу поверхні руйнування, на якій видно тріщини довжиною в десятки міліметрів. Після травлення шліфів в розчині азотної кислоти в нітанолі виявляється зерниста структура сталі (рис. 6, 7). Видно, що на окремих ділянках структура не містить перлітних колоній і є чисто ферритною. При цьому на продольному шліфі спостерігаються розгалужені тріщини довжиною до 1 мм (рис. 6).

На інших ділянках спостерігали структуру горячекатаної сталі з розвинутою перлітною смугатістю балла 4 за ГОСТ 5640 [8] (рис. 7 а), яка є бракувочною для котельних труб [4–6]. На деяких шліфах перлітна смугатість структури була незначальною, що відповідає баллу 1 (рис. 7 б).

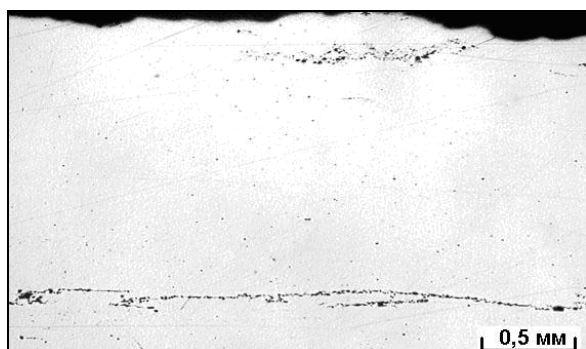


Рис. 5. Продольні тріщини на не травленому шліфі / Fig. 5. Longitudinal cracks on an etched thin section

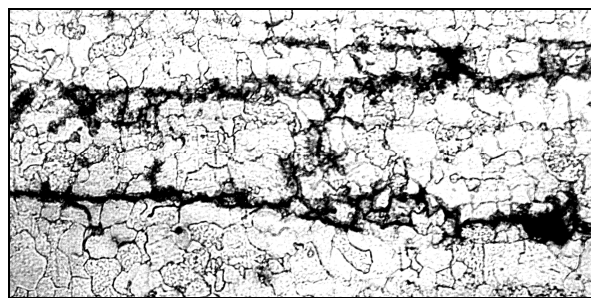
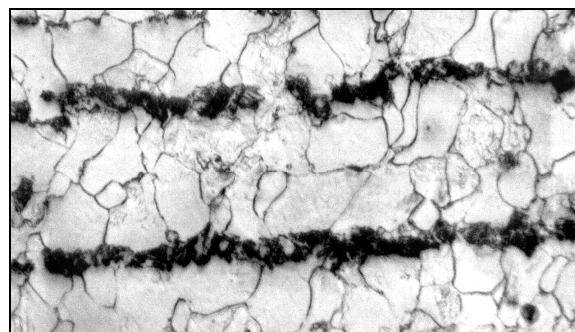
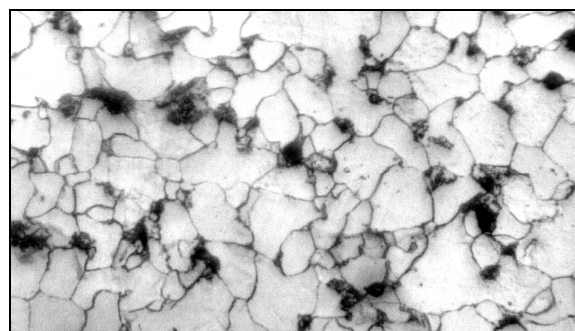


Рис. 6. Травлений продольний шліф з чисто ферритної структури сталі і продольними тріщинами, × 100 / Fig. 6. Etched longitudinal section with pure ferritic steel structure and longitudinal cracks, × 100



а



б (b)

Рис. 7. Мікроструктура труби; смугатість (балл): а – 4; б – 1, × 500 / Fig. 7. The microstructure of tube; banding (point): a – 4; b – 1, × 500

Дослідженням мікроструктури розбитої і незбитої котельних труб встановлено її ядро виражена неоднорідність, що проявляється в наступному:

– вдали від осередку руйнування труби структура сталі ферритно-перлітна, з підвищеною перлітною смугатістю (до балла 4) (рис. 7 а); така структура є бракувочною [4; 5] і свідчить про відсутність термічної обробки труб [8–11];

– по мірі наближення до осередку руйнування ферритно-перлітна структура поступово переходить в практично чисто ферритну (рис. 8); така структура також є бракувочною для ферритно-перлітних сталей;

– под действием высокой температуры и окислительных компонентов топочных газов происходит обезуглероживание стали;

– в очаге разрушения трубы структура стали также практически полностью ферритная (рис. 8).

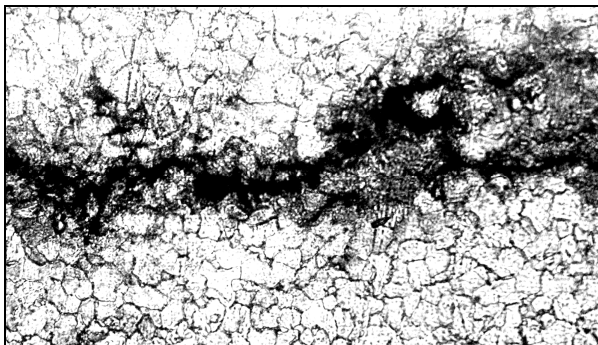


Рис. 8. Обезуглероживание в районе трещинообразования,  $\times 100$  / Fig. 8. Decarburization in the area of crack formation,  $\times 100$

На рисунке 9 видно, что наружная трещина в месте вспучивания поверхности (рис. 4) уходит в стенку трубы на глубину около 1 мм. Ближе к середине стенки трубы перпендикулярно ей проходит вторая, гораздо более обширная полость-трещина. Она и явилась причиной образования вспучивания, которое повлекло за собой образование вышеуказанной радиальной трещины.

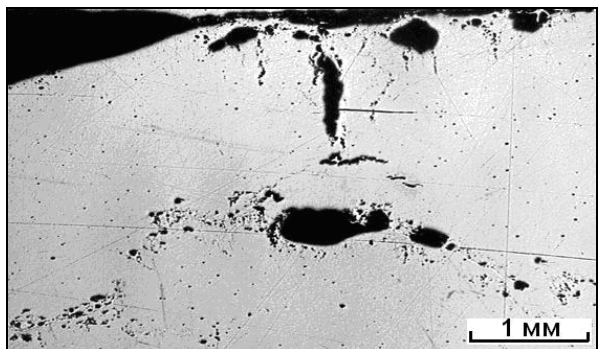


Рис. 9. Обширная полость в середине стенки трубы / Fig. 9. Extensive cavity in the middle of the pipe wall

Металлографическими исследованиями также установлено, что во внутренних полостях и в трещинах образовались характерные слои окислов (рис. 10, 11). Наличие толстого слоя окислов внутри и на стенках трещин, а также грубых окислов в толще стенки трубы (рис. 10, 11), свидетельствует о том, что образование трещины и окисление ее поверхностей происходило постепенно, в течение относительно длительного времени эксплуатации.

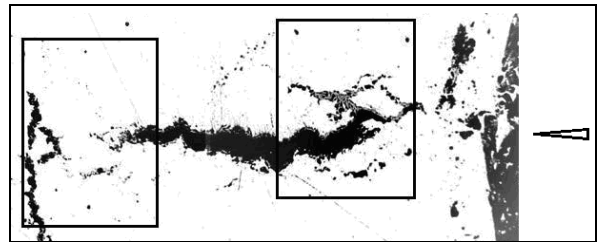


Рис. 10. Характер развития наружной трещины на вершине вспученного образования на неразрушенной трубе. Стрелкой указана наружная поверхность трубы,  $\times 100$  / Fig. 10. The nature of the development of an external crack at the top of the expanded formation on an unbroken pipe.

The arrow indicates the surface of the pipe,  $\times 100$

Особенно хорошо окислы проявляются на протравленных шлифах при больших увеличениях, где тонкие прослойки окалина видны даже на границах зёрен (рис 11).

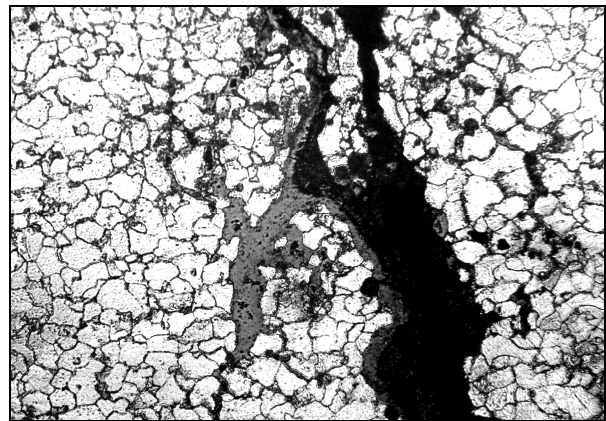


Рис. 11. Увеличенная деталь структуры на участке, отмеченном прямоугольником на рисунке 10,  $\times 500$  / Fig. 11. Enlarged details of the structure in the areas marked with rectangles in Fig. 10,  $\times 500$

Поскольку для исследований были отобраны образцы неразрушенных труб с минимальными вспучиваниями на наружной поверхности, можно с большой долей вероятности утверждать, что аналогичное состояние «предразрушения» в той или иной степени характерно и для других еще не разрушенных котельных труб  $\varnothing 50 \times 3$  мм трубного пучка котла-утилизатора.

Проведенные исследования позволяют воссоздать предполагаемое развитие процессов в котельных трубах, приведших к аварийной ситуации на установке котла-утилизатора цеха синтеза аммиака ПАО «Днепрзот».

Во время эксплуатации произошли существенные изменения в трубах, а именно:

– окисление наружной поверхности в потоке высокотемпературного взаимодействия (при  $\approx 900 \dots 1000^\circ\text{C}$ ) с технологическим газом;

– постепенное неравномерное окисление металла труб, характеризующегося исходной структурной неоднородностью, повышенной перлитной

полосчатостью и относительно мелким зерном, приведшее к образованию в стенке труб пор, грубых оксидов, микротрещин и в конечном итоге к ослаблению стенок труб;

– обезуглероживание стали под действием высокой температуры и окислителей технологического газа (водорода, углекислого газа, азота, паров воды), приведшее к образованию наряду с ферритно-перлитной, также чисто ферритной структуры.

### Выводы

1. Установлены причины преждевременного разрушения котельных труб из низколегированной стали, эксплуатировавшихся в котле-утилизаторе на ПАО «Днепрзот»: неблагоприятный химический состав стали; дефекты исходной структуры; образование в процессе эксплуатации новых дефектов в виде пор, расслоений, хрупких оксидов,

микротрещин; преобразование ферритно-перлитной структуры в ферритную.

2. Характер дефектов структуры доказывает, что их образование происходило в течение длительного времени, о чем свидетельствует наличие в стенке трубы трещин с окисленной поверхностью.

3. В результате проведения данной работы на предприятии химической промышленности предотвращена авария, связанная со взрывом котла-утилизатора, с неблагоприятными экологическими последствиями и возможными человеческими жертвами.

4. Для повышения ресурса работоспособности котельных труб для их изготовления рекомендуем использовать сталь, легированную хромом; трубы подвергать термической обработке (нормализации или закалке с отпуском), а также периодическому неразрушающему контролю (ультразвуковому и вихретоковому) в процессе эксплуатации.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Дергач Т. О. Теоретичні та технологічні основи керування структурою для підвищення корозійної тривкості труб з низьколегованих і високолегованих сталей : автореф. дис. на здоб. вчен. ступ. докт. техн. наук. – Дніпро, 2018. – 36 с.
2. Дергач Т. А. Исследование причин разрушения труб из коррозионностойкой стали в кипятыльнике производства аммиака на ПАО «Днепрзот» / Т. А. Дергач // Металознавство та термічна обробка металів. – Дніпро, 2014. – № 2. – С. 29–33.
3. Бойко Е. А. Котельные установки и парогенераторы : учеб. пособ. / Е. А. Бойко. – Красноярск : КГТУ, 2005. – 292 с.
4. ГОСТ Р 55442-2013 Трубы для котельного и теплообменного оборудования. Технические условия. – Москва, 2013.
5. Oprishko L. V. Structure and service properties of hot-extruded boiler tubes produced from continuously cast billets / L. V. Oprishko // Theory and Practice of Metallurgy. – 2010. – № 5–6. – Pp. 124–126.
6. Oprishko L. V. High-temperature strength of hot-extruded boiler tubes produced from continuously cast billets / L. V. Oprishko, T. V. Golovniak, A. D. Vetlianskaya // Metallurgical and Mining Industry. – 2011. – № 5. – Pp.49–51.
7. ГОСТ 5640. Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры листов и ленты. – Москва, 1988.
8. Большаков В. И. Спосіб поліпшення структури і властивостей труб з низьколегованих сталей / В. И. Большаков, Т. О. Дергач, Г. Д. Сухомлин // Металознавство та термічна обробка металів. – 2019. – № 1. – С. 29–33.
9. Патент № 88711, Україна, МПК C21D 9/08 (2006/01). Спосіб термічної обробки труб нафтового сортаменту з низьколегованих сталей / В. И. Большаков, Т. О. Дергач, Г. Д. Сухомлин. – № u 2013 13046; заявл. 11.11.2013; опубл. 25.03. 2014, бюл. № 6.
10. Патент № 2256705 (RU) МПК 7 C21D1/25, C21D1/56. Способ термической обработки изделий / Л. А. Недоспасов, А. А. Помазан, К. В. Лежнин, А. В. Пуйко, С. А. Немцев, Ю. М. Рязанцев, Л. А. Щавлева, Л. Н. Дейнеко, А. Г. Величко, В. И. Большаков. – № 2004102271/02 от 2004.01.26; опубл. 20.07.2005, бюл. № 8.
11. Rios P.R., Zöllner D. Grain growth – unresolved issues. Materials Science and Technology. – 2018. – Vol. 34, iss. 6. – Pp. 629–638.

### REFERENCES

1. Dergach T.O. *Teoretichni ta tekhnologichni osnovi keruvannya strukturoyu dlya pidvishchennya koroziiynoї trivkosti trub z nizkolegovanikh i visokolegovanikh staley* [Theoretical and technological bases of structure control for increasing corrosion durability of pipes of low alloy and high alloy steels]. Abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences, 2018, 36 p. (in Ukrainian).
2. Dergach T.A. *Issledovaniye prichin razrusheniya trub iz korrozionnostoykoy stali v kipyatilnike proizvodstva ammiaka na PAO «Dneprzot»* [Investigation of the causes of corrosion-resistant steel pipe breakdown in a boiler of ammonia production at PJSC Dneprzot]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. Dnipro, 2014, no. 2, pp. 29–33. (in Ukrainian).
3. Boyko E.A. *Kotelnyye ustanovki i parogeneratory* [Boiler installations and steam generators]. Krasnoyarsk : KSTU, 2005, 292 p. . (in Russian).
4. GOST R 55442-2013. *Truby dlya kotel'nogo i teploobmennogo oborudovaniya. Tekhnicheskiye usloviya* [Pipes for boiler and heat exchange equipment. Specifications]. Moscow, 2013. (in Russian).
5. Oprishko L.V. Structure and service properties of hot-extruded boiler tubes produced from continuously cast billets. Theory and Practice of Metallurgy. 2010, no. 5–6, pp.124–126.
6. Oprishko L.V., Golovniak T.V. and Vetlianskaya A.D. High-temperature strength of hot-extruded boiler tubes produced from continuously cast billets. Metallurgical and Mining Industry. 2011, no. 5, pp.49–51.
7. GOST 5640. Steel. *Metallograficheskiy metod otsenki mikrostruktury listov i lenty* [Metallographic method for assessing the microstructure of sheets and ribbons]. Moscow, 1988. (in Russian).

8. Bolshakov V.I., Dergach T.O. and Sukhomlin G.D. *Sposib polipshennya strukturi i vlastivostey trub z nizkolegovanikh staley* [A method of improving the structure and properties of pipes of low-alloy steels]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv*. [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 2019, no. 1, pp. 29–33. (in Ukrainian).
9. Patent No. 88711, Ukraine, IPC C21D 9/08 (2006/01). *Sposib termichnoi obrobki trub naftovogo sortamentu z nizkolegovanikh staley* [Method for the thermal treatment of low-alloy steels oil pipes]. Bolshakov V.I., Dergach T.O. and Sukhomlyn H.D. No. u 2013 13046; claimed 11/11/2013; publ. 25.03. 2014, Bul. no. 6. (in Ukrainian).
10. Patent No. 2256705 (RU) IPC 7 C21D1 / 25, C21D1 / 56. *Sposob termicheskoy obrabotki izdeliy* [Method of heat treatment of products]. Nedospasov L.A., Anointed A.A., Lezhnin K.V., Puiko A.V., Nemtsev S.A., Ryazantsev Yu.M., Schavleva L.A., Deineko L.N., Velichko A.G., Bolshakov V.I. No. 2004102271/02 of 2004.01.26; publ. 07/20/2005. (in Ukrainian).
11. Rios P.R. and Zöllner D. Grain growth – unresolved issues. *Materials Science and Technology*. 2018, vol. 34, iss. 6, pp. 629–638.

Поступила в редакцію 23.11.2019.