

## ВЛИЯНИЕ РАЗНОЗЕРНИСТОСТИ СТРУКТУРЫ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ НАРУЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБ ИЗ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ 20, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

*А.В. Помазова, Т.В. Панова, Г.И. Геринг*

Рассмотрено влияние разнотерности структуры углеродистой стали 20 на скорость электрохимической коррозии, наблюдаемой на наружной поверхности труб поверхностей нагрева демонтированной панели. Морфологический анализ структурных составляющих стали 20 выполнялся с использованием металлографического анализатора фрагментов микроструктуры твердых тел «Ресурс С7». Показано, что при развитии электрохимической коррозии значение фактора разнотерности будет определять скорость утонения толщины стенки, глубину и ширину межкристаллитных коррозионных трещин. Чем выше данный параметр (соответственно, выше однородность зеренной структуры), тем ниже наблюдаемая скорость общей коррозии, меньше глубина и ширина межкристаллитных трещин, развивающихся от наружной поверхности труб. Полученные результаты могут быть использованы для расчета остаточного ресурса труб поверхностей нагрева.

*Ключевые слова: разнотерность микроструктуры, наружная коррозия, межкристаллитная коррозия, ресурс котельных труб.*

### Введение

Наличие противоречивых мнений относительно влияния размера зерна углеродистой стали 20 на скорость коррозии не позволяет выработать общий подход для объяснения особенностей коррозионно-электрохимического поведения стальных труб, применяемых в теплоэнергетике. Существование несогласующихся между собой данных связано прежде всего с тем, что исследования, представленные в работах [1–3], проводились на модельных образцах сплавов, имеющих однородную структуру. Но в котельных углеродистых сталях, получаемых в промышленных объемах, наблюдается значительная неоднородность феррито-перлитной структуры. Основными причинами такой неоднородности являются неравновесные условия кристаллизации металла, присутствие в его составе легирующих и примесных элементов, деформация кристаллической решетки вследствие воздействия на нее в процессе изготовления изделий механических, термических и других факторов [4]. Особенностью коррозии, наблюдаемой на наружной поверхности труб поверхностей нагрева, является увеличение ее скорости за счет уноса продуктов коррозии посредством механического износа, что приводит к постоянному повторению процесса и ускорению коррозии. В статье [5] было показано, что размер зерна не оказывает определяющего влияния на скорость коррозии котельных труб из углеродистой стали 20, применяемых в теплоэнергетике. Можно сделать предположение, что не размер зерна, а одновременное наличие в структуре мелких и крупных зерен (разнотерность) должно приводить к значительному снижению коррозионной стойкости. В связи с вышеизложенным, целью настоящей работы является установление связи между фактором разнотерности

и скоростью коррозии на наружной поверхности котельных труб.

Наиболее распространенным методом оценки величины зерна является ГОСТ 5639–82 [6]. Существенным недостатком методов данного ГОСТа является невозможность оценки разнотерности металла готового изделия, так как анализ сводится к определению средних значений площади сечения зерна и его диаметра. В статье [7] подробно рассмотрено ограничение методов ГОСТ 5639–82 при определении степени разнотерности. Кроме рассмотренного ГОСТа, разработано большее количество методов оценки зеренной структуры металлических материалов [8–10], однако все они обладают рядом недостатков, поэтому разработка более совершенных объективных методов оценки и анализа величины зерна и разнотерности остается важнейшей задачей количественной металлографии, а их связь с прочностными свойствами – основной задачей ресурсосбережения.

### Материалы и методы

В данной работе для морфологического анализа структурных составляющих стали 20 применялся металлографический анализатор фрагментов микроструктуры твердых тел «Ресурс С7». Программный комплекс специально дополнен и доработан для задач настоящей работы специалистами компании ООО «Сиамс». Используемый режим нормализации согласно [11]: температура 920 °С, время выдержки 2 мин/мм<sup>2</sup>. Нормализация проводилась в электропечи камерной СНОЛ-1,4,2,5.1,2/12,5-И1. Химический анализ проводился на оптическом эмиссионном спектрометре ДФС-500. Механические испытания проводились на разрывной машине Р-5. Были использованы образцы, вырезанные из труб поверхностей нагрева левого бокового эк-

рана к/а ст. № 13 СП ТЭЦ-3 Омского филиала ОАО «ТГК-11», которые были полностью демонтированы с отметки (высота от уровня основания котла) 16,0 м до отметки 30,0 м в период капитального ремонта 2011 года. Марка стали: сталь 20. Типоразмер: 60×6,0 мм. Параметры эксплуатации: 340 °С, 155 кгс/см<sup>2</sup>, наработка: 127 055 ч.

Расчет фактора разнородности проводился в программном комплексе в соответствии с [12] по формуле

$$F_Z = \frac{f_{\max} Z_{\max}}{\sum f_i Z_i}, \quad (1)$$

где  $f_i$ , % – доля зерна с определенным баллом;  $f_{\max}$ , % – доля зерна, занимающего максимальную площадь на шлифе,  $Z_i$  – балл зерна,  $Z_{\max}$  – балл зерна, занимающего максимальную площадь на шлифе.

### Результаты и их обсуждение

Две соседние трубы могут иметь значительно различающуюся микроструктуру и, как следствие, разную коррозионную стойкость в идентичных условиях эксплуатации. На рис. 1 представлено состояние наружной поверхности труб № 2 и № 3 левого бокового экрана, вырезанных с отметки 20,0 м. Маркировка труб проводилась условно согласно формуляру, применяемому на ТЭЦ.

На наружной поверхности первого образца наблюдаются мелкие коррозионные язвы незначительной глубины, поверхность второго образца «изъедена» следами протекания глубокой общей коррозии металла. Анализируя химический состав приведенных образцов (табл. 1), видно, что разли-

ца в содержании химических элементов незначительна и находится в пределах погрешности измерений.

Микроструктура образцов приведена на рис. 2. В обоих случаях она состоит из феррита и перлита. В табл. 2 приведены результаты сравнительного анализа измерения стандартных характеристик микроструктуры, а также данные по количеству неметаллических включений, значениям фактора разнородности, измеренных с использованием металлографического анализатора «Ресурс С7». Видно, что для микроструктур, представленных на рис. 2, имеющих идентичный набор стандартных металлографических характеристик, параметр, характеризующий однородность структуры, а также средние площади зерен значительно различаются. На рис. 3 приведены гистограммы распределения размеров зерен, приведенных в долях баллов для труб № 2 и № 3. Видно, что для микроструктуры трубы № 3 характерен больший разброс значений. В обоих случаях балл зерна по наибольшей доле – 7. Оценить структуру трубы № 2 можно двумя номерами (по номерам баллов, занимающим на шлифе площадь более 10 %): G<sub>7</sub>(45 %), G<sub>6</sub>(15 %). Структура трубы № 3 оценивается пятью баллами: G<sub>7</sub>(32 %), G<sub>6</sub>(22 %), G<sub>9</sub>(15 %), G<sub>8</sub>(13 %), G<sub>10</sub>(10 %).

Таким образом, решающую роль в скорости коррозии наружной поверхности котельных труб в данном случае сыграла разнородность микроструктуры. Конечно, необходимо понимать, что любой вид неоднородности (по составу, электропроводности и напряжению отдельных участков, наличию примесей) может приводить к увеличе-

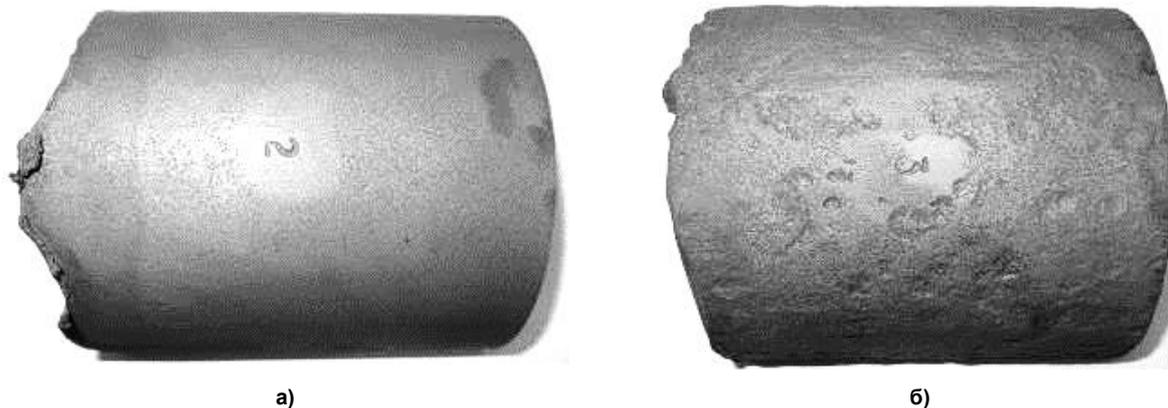


Рис. 1. Состояние наружной поверхности труб № 2 (а) и № 3 (б) левого бокового экрана с отметки 20,0 м

Химический анализ труб № 2 и № 3

Таблица 1

Образец	Содержание элементов, масс. %									
	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Ni	Cu	P	S
Труба № 2	0,210 ± 0,024	0,42 ± 0,03	0,30 ± 0,03	0,078 ± 0,008	0,009 ± 0,004	0,005 ± 0,002	0,041 ± 0,008	0,047 ± 0,008	0,008 ± 0,002	0,004 ± 0,002
Труба № 3	0,204 ± 0,024	0,45 ± 0,03	0,27 ± 0,03	0,081 ± 0,008	0,008 ± 0,004	0,006 ± 0,002	0,033 ± 0,008	0,041 ± 0,008	0,007 ± 0,002	0,004 ± 0,002

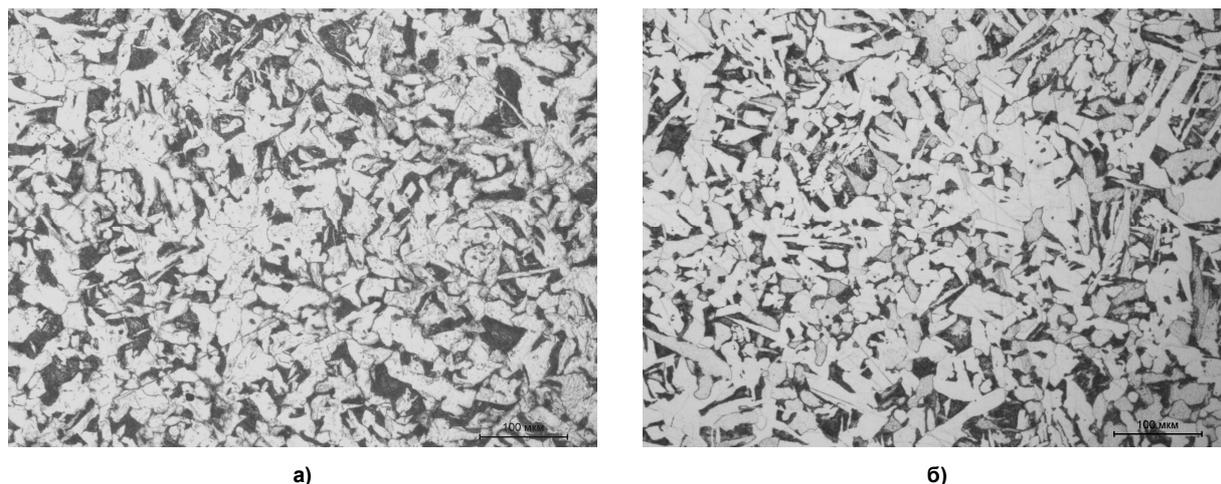


Рис. 2. Микроструктура стали 20 трубы № 2 (а) и трубы № 3 (б) левого бокового экрана

Таблица 2

Сравнительный анализ параметров микроструктур, приведенных на рис. 2

Результаты анализа	а	б
Структурные составляющие	Феррит + перлит	Феррит + перлит
Балл зерна по ГОСТ 5639–82	7	7
Соотношение перлита и феррита по ГОСТ 8233–56	7	7
Содержание неметаллических включений по ГОСТ 1778–70	1	1
Число зерен	827	1111
Средний размер зерна, мкм	13,62	12,08
Средняя площадь зерна, мкм <sup>2</sup>	328,5	260,5
Фактор разнотерности, $F_z$	0,42	0,26

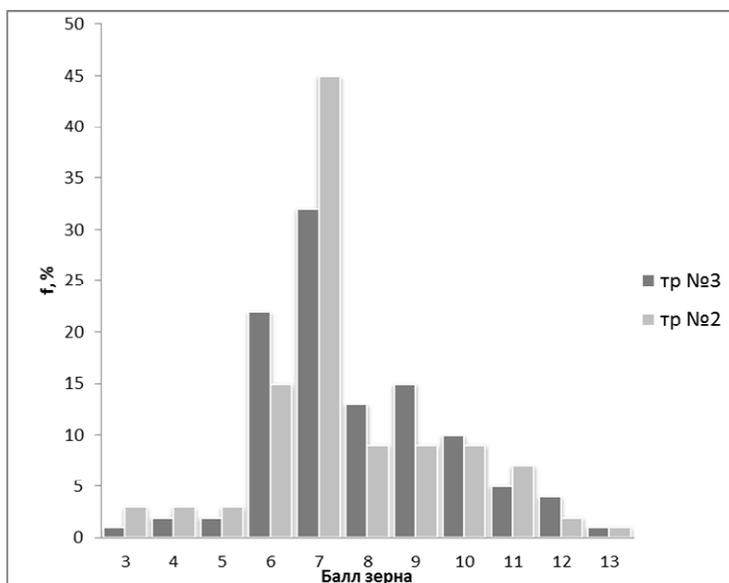
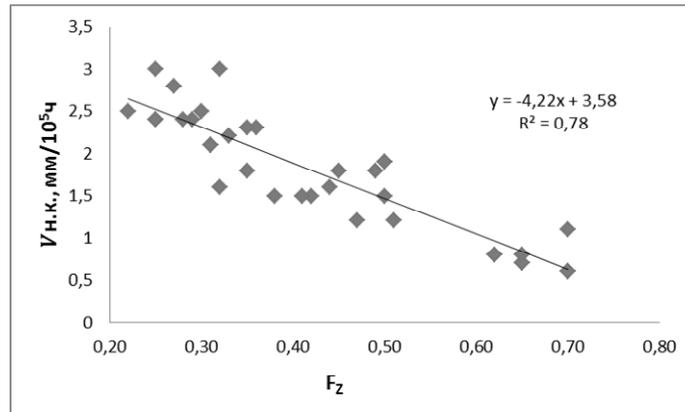


Рис. 3. Распределение долей баллов в микроструктурах  
трубы № 2 и трубы № 3 левого бокового экрана

нию скорости коррозии, однако их влияние как микродефектов значительно более низкое, чем влияние разнотерности, являющейся макродефектом.

Для более подробного изучения высказанного предположения с бывшими в эксплуатации трубами поверхностей нагрева была проведена серия

экспериментов (химический анализ, механические испытания на растяжение, визуально-измерительный контроль и металлографические исследования). Проведенные анализы показали, что химический состав всех исследованных труб поверхностей нагрева находится в пределах требований ГОСТ 1050–88, механические свойства – в преде-



**Рис. 4. Зависимость скорости коррозии от значения фактора разнотерности труб поверхностей нагрева левого бокового экрана**

лах требований ТУ-14-Зр-55-2001, характеристики микроструктуры – в пределах требований, соответствующих нормативно-техническим документам. Скорость наружной коррозии  $V_{н.к}$  (мм за  $10^5$  ч) рассчитывалась в соответствии с [13]. На рис. 4 представлена зависимость скорости коррозии от фактора разнотерности микроструктуры труб поверхностей нагрева левого бокового экрана.

Видно, что с увеличением фактора разнотерности скорость коррозии уменьшается. Зависимость скорости наружной коррозии от фактора разнотерности описывается уравнением

$$y = -4,22x + 3,58. \quad (2)$$

Коэффициент детерминации зависимости скорости коррозии от значения разнотерности равен 0,78, следовательно, между значением разнотерности и скоростью коррозии труб поверхностей нагрева из углеродистой стали 20 существует сильная корреляционная связь [14].

В соответствии с предложенным подходом исследованы поврежденные в результате развития электрохимической коррозии на наружной поверхности две трубы поверхностей нагрева из стали 20 одинакового типоразмера  $\varnothing 60 \times 6$  мм после 125 и 62 тыс. ч эксплуатации при температуре  $340^\circ\text{C}$  и давлении  $155 \text{ кгс/см}^2$ . Результаты механических испытаний, значений скорости наружной коррозии и фактора разнотерности основного металла приведены в табл. 3, микроструктура сталей и вид повреждения приведены на рис. 5 и 6. Несмотря на разное время эксплуатации, анализ морфологии разрушенных зон показал, что разрушение осуществляется по одному и тому же механизму и определяющим фактором является

наружная коррозия, скорость которой различается в 1,5 раза и зависит от состояния микроструктуры, явно различающейся для исследованных образцов труб. В обоих случаях структура состоит из феррита и несфероидизованного зернистого перлита. Но во втором случае процесс кристаллизации зерен перлита не завершен и структура обладает значительной разнотерностью. Значения факторов формы различаются в два раза и составляют 0,41 и 0,19 для труб № 1 и № 9 соответственно. В микроструктуре у наружной поверхности разрушенных труб обнаружены межкристаллитные коррозионные трещины со слабо-развитой траекторией (указаны стрелками) различной глубины. Максимальная глубина межкристаллитных трещин в микроструктуре трубы № 1 составляет 14,1 мкм, ширина 2,2 мкм; в микроструктуре трубы № 9 встречаются трещины глубиной 27,1 мкм, шириной 8,1 мкм. Глубина межкристаллитных трещин двух образцов отличается в 2 раза, их ширина отличается более чем в 3,5 раза. Более интенсивная коррозия, наблюдаемая по границам зерен трубы № 9 по сравнению с трубой № 1, по-видимому, связана с большим насыщением границ зерен примесями за счет меньшей протяженности границ в крупнозернистом материале.

Анализ микроструктуры поврежденных труб (сталь 20), разрушенных после различных сроков эксплуатации, подтвердил высказанные ранее предположения о влиянии фактора разнотерности на скорость наружной коррозии. Величина наблюдаемой скорости коррозии сходится со значением, рассчитанным по уравнению (2).

**Таблица 3**

**Предел прочности ( $\sigma_b$ ), предел текучести ( $\sigma_t$ ), относительное удлинение ( $\delta$ ), относительное сужение ( $\psi$ ), скорость наружной коррозии ( $V_{н.к}$ ), фактор разнотерности ( $F_z$ ) разрушенных образцов**

Образец	$\sigma_b, \text{ кгс/мм}^2$	$\sigma_t, \text{ кгс/мм}^2$	$\delta, \%$	$\psi, \%$	$V_{н.к}, \text{ мм за } 10^5 \text{ ч}$	$F_z$
Основной металл трубы № 1	$49,8 \pm 0,7$	$37,8 \pm 0,5$	$38,7 \pm 0,5$	$62,1 \pm 1,0$	1,7	0,41
Основной металл трубы № 9	$48,2 \pm 0,7$	$35,2 \pm 0,5$	$36,4 \pm 0,5$	$49,2 \pm 0,7$	2,7	0,19
Требования ТУ 14-Зр-55-2001	42,0–56,0	$\geq 22,0$	$\geq 24,0$	$\geq 45,0$	–	

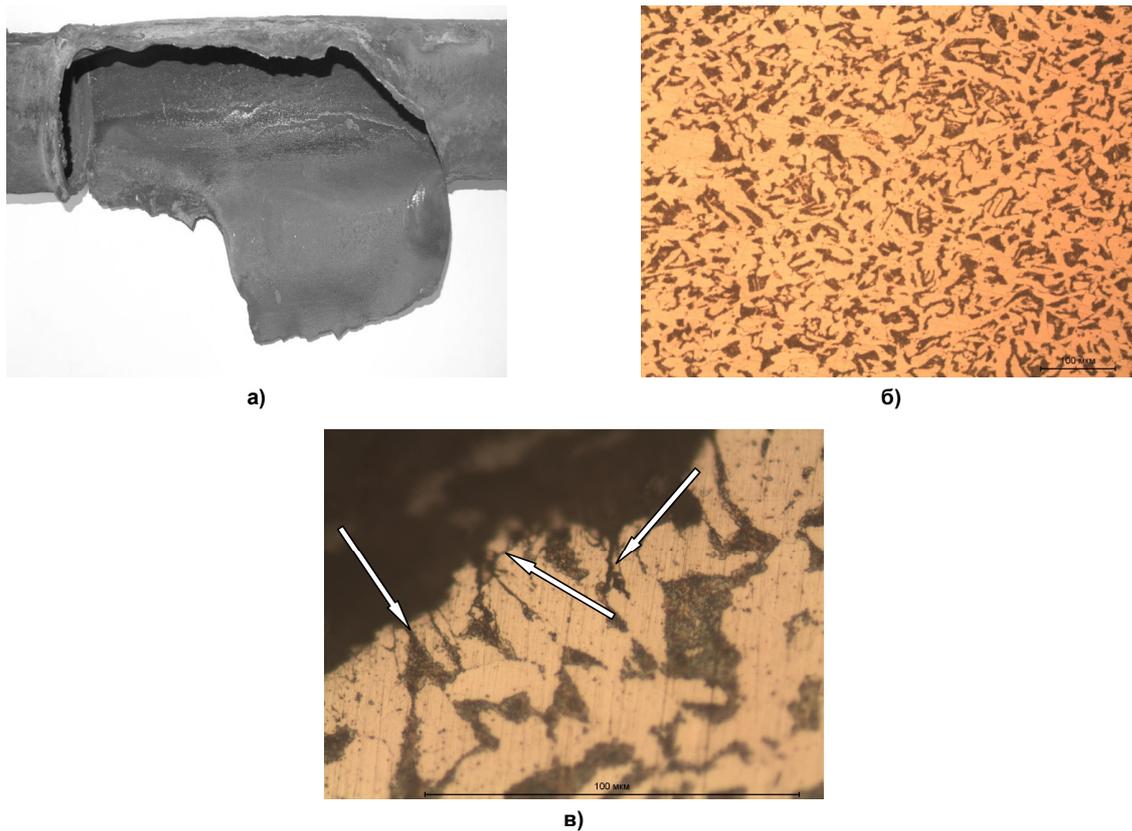


Рис. 5. Внешний вид (а), микроструктура основного металла (б) и микроструктура металла у наружной поверхности (в) поврежденной трубы № 1 (отметка 19,5 м левого бокового экрана)

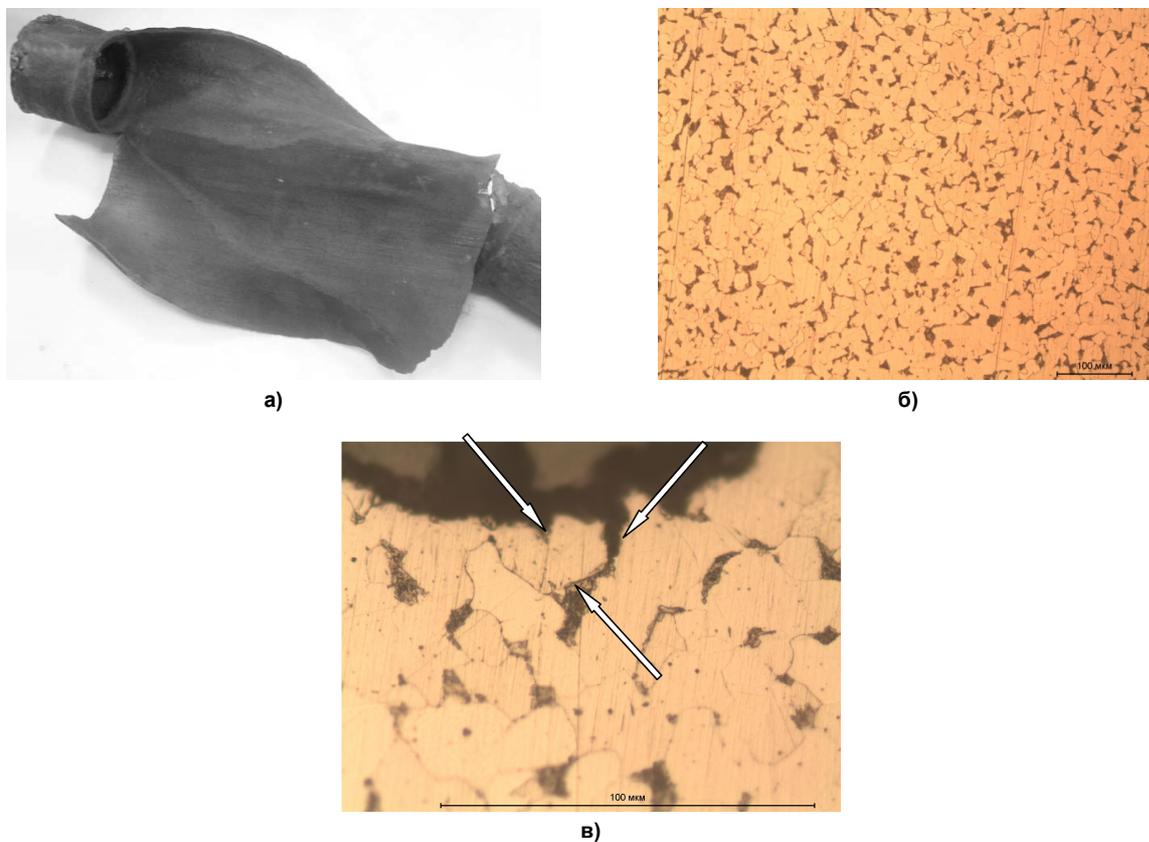


Рис. 6. Внешний вид (а), микроструктура основного металла (б) и микроструктура металла у наружной поверхности (в) поврежденной трубы № 9 (отметка 17,5 м левого бокового экрана)

### Заключение

Установлено, что при равных условиях эксплуатации на скорость коррозии наружной поверхности образцов труб поверхностей нагрева значительное влияние оказывает фактор разнородности, что свидетельствует о качественном различии физических свойств трубной стали при разных структурах. Чем выше данный параметр (соответственно, выше однородность зеренной структуры), тем ниже наблюдаемая скорость коррозии. Зная значение фактора разнородности в исходной микроструктуре, можно прогнозировать скорость коррозии, что позволяет в контролируемых условиях эксплуатации (качество газа, настройка горелок, режимы очистки) определять остаточный ресурс труб поверхностей нагрева.

### Литература

1. Li Y. Grain Size Effect on the Electrochemical Corrosion Behavior of Surface Nanocrystallized Low-Carbon Steel / Y. Li, F.G. Wang, G. Liu // *Corrosion*. 2004. – Vol. 60. – P. 891–896.
2. Влияние структурно-фазового состояния нанокмозитов железо-цементит на процессы локальной активации / А.В. Сюгаев, С.Ф. Ломаева, С.М. Решетников и др. // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. – 2008. – Т. 44, № 4. – С. 395–399.
3. Бахвалов, Г.Т. Защита металлов от коррозии / Г.Т. Бахвалов, А.В. Турковская. – М.: Металлургиздат, 1964. – 290 с.
4. Семенова, И.В. Коррозия и защита от коррозии / И.В. Семенова, Г.М. Флорианович, А.В. Хорошилов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Физматлит, 2010. – 416 с.
5. Помазова, А.В. Роль факторов формы зеренной структуры в электрохимической коррозии котельных труб, изготовленных из углеродистой стали 20 / А.В. Помазова, Т.В. Панова, Г.И. Геринг //

*Практика противокоррозионной защиты*. – 2013. – № 3 (69). – С. 68–71.

6. ГОСТ 5639–82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. Введ. 1983-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 45 с.

7. Лезинская, Е.Я. Методы оценки структурной неоднородности металла труб оболочек ТВЭЛ и чехлов ТВС из коррозионно-стойких сталей и сплавов / Е.Я. Лезинская // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. – 2003. – Вып. 3. – С. 108–112.

8. Горелик, С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов / С.С. Горелик. – М.: Металлургия, 1978. – 568 с.

9. Салтыков, С.А. Стереометрическая металлография / С.А. Салтыков. – М.: Металлургия, 1970. – 376 с.

10. Лезинская, Е.Я. Новый метод оценки разнородности структуры труб из нержавеющей сталей и сплавов / Е.Я. Лезинская, Д.Ю. Ключев, Ю.Н. Николаенко // *Теория и практика металлургии*. – 2012. – Вып. 1. – С. 68–73.

11. ТУ 14-ЗР-55–2001. Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов. Введ. 2001-09-21.

12. Гроховский, В.И. Возможности цифровой микроскопии в металлографии / В.И. Гроховский // *Цифровая микроскопия: Материалы школы-семинара*. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2001. – С. 18–20.

13. СТО 17230282.27.100.005–2008. Основные элементы котлов, турбин и трубопроводов ТЭС. Контроль состояния металла. Нормы и требования. – Введ. 2008-06-30. – М.: РАО «ЕЭС России», 2008.

14. Ивченко, Г.И. Введение в математическую статистику / Г.И. Ивченко, Ю.И. Медведев. – М.: Изд-во ЛКИ, 2010. – 600 с.

**Помазова Анна Викторовна**, аспирант кафедры прикладной и медицинской физики, Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского (г. Омск); pomazova@yandex.ru.

**Панова Татьяна Викторовна**, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры прикладной и медицинской физики, Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского (г. Омск); panova@omsu.ru.

**Геринг Геннадий Иванович**, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной и медицинской физики, Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского (г. Омск); gering@omsu.ru.

*Поступила в редакцию 19 июня 2014 г.*

## EFFECT OF THE INEQUIGRANULAR STRUCTURE ON CORROSION RESISTANCE OF THE EXTERNAL SURFACE OF 0.2 PCT CARBON STEEL PIPES USED IN THERMAL POWER GENERATION

**A.V. Pomazova**, F.M. Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russian Federation,  
pomazova@yandex.ru,

**T.V. Panova**, F.M. Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russian Federation,  
panova@omsu.ru,

**G.I. Gering**, F.M. Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russian Federation,  
gering@omsu.ru

The article considers the effect of the inequigranular structure of carbon steel 20 (0.2 wt. %C) on the electrochemical corrosion rate observed on the pipe outer surface of the dismantled panel heating surface. The morphological analysis of structural components of steel 20 was performed using the "Resource C7" metallographic analyzer of microstructure fragments of solid bodies. It was shown that due to the development of electrochemical corrosion the value of the inequigranular factor will determine the thinning speed of wall thickness, depth and width of inter-crystalline corrosion cracks. The higher is the given parameter (as well as grain structure uniformity), the lower is the general corrosion rate and the less is the depth and the width of inter-crystalline cracks developing from the pipe outer surface. The results obtained can be used to calculate the pipe residual life of heating surfaces.

*Keywords:* inequigranular microstructure, external corrosion, inter-crystalline corrosion, service life of boiler pipers.

### References

1. Li Y., Wang F.G., Liu G. Grain Size Effect on the Electrochemical Corrosion Behavior of Surface Nanocrystallized Low-Carbon Steel. *Corrosion*, 2004, no. 60, pp. 891–896. doi: 10.5006/1.3287822.
2. Syugaev A.V., Lomaeva S.F., Reshetnikov S.M., Shuravin A.S., Sharafeeva E.V., Surnin D.V. The Effect of the Structure-Phase State of Iron-Cementite Nanocomposites on Local Activation Processes. *Protection of Metals*, 2008, vol. 44, no. 4, pp. 367–371. doi: 10.1134/S0033173208040097.
3. Bakhvalov G.T., Turkovskaya A.V. *Zashchita metallov ot korrozii* [Protection of Metals from Corrosion]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1964. 290 p.
4. Semenova I.V., Florianovich G.M., Khoroshilov A.V. *Korroziya i zashchita ot korrozii* [Corrosion and Corrosion Protection]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010. 416 p.
5. Pomazova A.V., Panova T.V., Gering G.I. [Role of Grain Structure Form Factors in Electrochemical Corrosion of Boiler Tubes Made of Carbon Steel 20]. *Praktika protivokorroziionnoy zashchity*, 2013, no. 69, pp. 68–71. (in Russ.)
6. GOST 5639-82. *Stali i splavy. Metody vyyavleniya i opredeleniya velichiny zerna* [State Standard 5639-82. Steels and Alloys. Methods of Detection and Determination of Grain Size]. Moscow, Izdatel'stvo Standartov Publ., 2003. 45 p.
7. Lezinskaya E.Ya. [Methods for Assessing Structural Heterogeneity of Metal Pipe Claddings and Covers of Fuel Elements of Corrosion-Resistant Steels and Alloys]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya «Fizika radiatsionnykh povrezhdeniy i radiatsionnoye materialovedeniye»*, 2003, no. 3, pp. 108–112. (in Russ.)
8. Gorelik S.S. *Rekristallizatsiya metallov i splavov* [Recrystallization of Metals and Alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978. 568 p.
9. Saltykov S.A. *Stereometricheskaya metallografiya* [Stereometric Metallography]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970. 376 p.
10. Lezinskaya E.Ya., Klyuev D.Yu., Nikolaenko Yu.N. [New Method for Assessing the Inequigranular Structure of Pipes of Stainless Steels and Alloys]. *Teoriya i praktika metallurgii*, 2012, no. 1, pp. 68–73. (in Russ.)

---

11. TU 14-3R-55-2001. *Truby stalnyye besshovnyye dlya parovykh kotlov i truboprovodov* [Technical Requirements 14-3R-55-2001. Seamless Steel Pipes for Boilers and Pipelines]. Moscow, 2001.

12. Grokhovskiy V.I. [Possibilities of Digital Microscopy in Metallography]. *Tsifrovaya mikroskopiya. Materialy shkoly-seminara* [Digital Microscopy. School-Seminar Materials]. Yekaterinburg, USTU-UPI Publ., 2001, pp. 18-20. (in Russ.)

13. STO 17230282.27.100.005-2008. *Osnovnyye elementy kotlov, turbin i truboprovodov TES. Kontrol' sostoyaniya metalla. Normy i trebovaniya* [Key Elements of Boilers, Turbines and Pipelines of Thermal Power Plants. Control of the State of Metal. Standards and Requirements]. Moscow, RAO UES of Russia Publ., 2008.

14. Ivchenko G.I., Medvedev Yu.I. *Vvedeniye v matematicheskuyu statistiku* [Introduction to Mathematical Statistics]. Moscow, LKI Publ., 2010. 600 p.

**Received 19 June 2014**