

УДК 620.186.5:621.181.2

## РОЛЬ СТРУКТУРНЫХ ФАКТОРОВ В ПОВЫШЕНИИ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ТРУБНОЙ СТАЛИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ТЕРМООБРАБОТКЕ

**Помазова Анна Викторовна,**

аспирант кафедры «ПиМФ» ФГБОУ ВПО «Омский Государственный Университет им. Ф.М. Достоевского», Россия, 644077, г. Омск, пр. Мира, 55а. E-mail: pomazova@yandex.ru

**Панова Татьяна Викторовна,**

канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «ПиМФ» ФГБОУ ВПО «Омский Государственный Университет им. Ф.М. Достоевского», Россия, 644077, г. Омск, пр. Мира, 55а. E-mail: panova@omsu.ru

**Геринг Геннадий Иванович,**

д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой «ПиМФ» ФГБОУ ВПО «Омский Государственный Университет им. Ф.М. Достоевского», Россия, 644077, г. Омск, пр. Мира, 55а. E-mail: gering@omsu.ru

*Рассмотрены возможности применения многократной структурной перекристаллизации для улучшения эксплуатационных характеристик стали 20, используемой для изготовления труб поверхностей нагрева. Актуальность работы обусловлена непрерывным увеличением числа коррозионных повреждений элементов котельных агрегатов. Проведена оценка влияния параметров микроструктуры (разнозернистости) на коррозионную стойкость, и предложен способ термической обработки, повышающий эксплуатационную надежность труб. Установлена существенная зависимость коррозионных характеристик от размерных параметров зерен. Наиболее эффективными режимами, уменьшающими разнозернистость микроструктуры, являются режим двукратной нормализации при температуре 920, 930 °С и однократный режим при 940 °С. Максимального значения 0,49 фактор разнозернистости достигает при двукратной нормализации при температуре 920 °С. При указанном режиме значение средней площади зерен феррита уменьшается на 42 %, значение фактора разнозернистости увеличивается в 3,3 раза по сравнению с исходным состоянием. Этот режим термообработки обеспечивает минимальную скорость коррозии, при этом механические свойства находятся в пределах требований соответствующих нормативных документов. Обнаружено уменьшение глубины межкристаллитных трещин в 1,5 раза (с 31,7 до 21,1 мкм) по сравнению с трещинами, образовавшимися на образцах, прошедших рекомендуемую ТУ-14-3Р-55-2001 термообработку. Применение режима двукратной нормализации при 920 °С для термообработки углеродистой стали 20, применяемой в теплоэнергетике для изготовления труб поверхностей нагрева, позволит увеличить срок эксплуатации тепловоспринимающих элементов котла за счет значительного снижения скорости наружной коррозии.*

### **Ключевые слова:**

*Разнозернистость микроструктуры, наружная коррозия, межкристаллитная коррозия, ресурс котельных труб.*

### **Введение**

Возможные пути повышения срока эксплуатации теплоэнергетического оборудования, в частности тепловоспринимающих элементов котлов, предусматривают мероприятия, которые направлены на совершенствование водно-химических режимов [1, 2], на контроль металла [3, 4], на использование коррозионно-стойких сталей и сплавов [5], на анализ наличия примесей и химической неоднородности [6–8]. Перспективным и простым направлением повышения надежности теплоэнергетического оборудования является изменение свойств углеродистых сталей с точки зрения совершенствования характеристик микроструктуры. Часть работ в этом направлении посвящена изучению эволюции структурно-фазового состояния при эксплуатации и связанному с этим неизменному снижению прочностных свойств теплоэнергетического оборудования [9–12]. В работах [13–15] исследуются возможности управления структурой металлических материалов, обладающей необходимыми механическими свойствами. Следует отметить, что дан-

ных по улучшению коррозионной стойкости изделий, изготовленных из малоуглеродистых сталей, недостаточно для выработки единых требований к структурным характеристикам углеродистых сталей, используемых для изготовления труб поверхностей нагрева [16, 17]. В частности, современные подходы к решению проблемы повреждаемости труб поверхностей нагрева энергетических котлов, предложенные авторами [18, 19], основаны на анализе внутренних структурных напряжений первого и второго рода. При этом разработанные ими режимы паровоздушной термической обработки образцов из стали 20, эффективно замедляющие структурную коррозию, не обеспечивают необходимой коррозионной стойкости при развитии равномерной коррозии на наружной поверхности труб, эксплуатируемых при достаточно низких параметрах:  $T < 350$  °С,  $P < 15,5$  МПа. Поэтому целью исследования является создание способа термической обработки с минимальным количеством технологически простых операций, обеспечивающего повышение коррозионной стойкости малоуглеро-

дистой стали 20 при сохранении требуемых по ТУ 14–ЗР-55–2001 механических свойств и стоимостных показателей, с возможностью его реализации в промышленном производстве на широко распространенном промышленном оборудовании простым и экономичным способом.

В практике термической обработки стали 20 рекомендуемый температурный интервал нормализации для труб поверхностей нагрева составляет 900...950 °С [20, 21]. При этом для стали решающее значение в формировании микроструктуры имеет количество циклов и температура фазовой перекристаллизации [22]. В настоящее время в теплоэнергетике используются введенные с 01.03.2004 г. технические условия (ТУ 14–ЗР-55–2001) [23], согласно которым котельные трубы из углеродистой стали 20 поставляют в термообработанном состоянии, подвергая однократному режиму нормализации в температурном интервале 920...950 °С. В данной работе проведены исследования при расширенных температурных параметрах и циклах нормализации с целью выравнивания размеров зерен феррита в стали 20 и повышения коррозионной стойкости труб поверхностей нагрева.

#### Материалы и методики эксперимента

Для морфологического анализа структурных составляющих стали 20 (состав, мас. %: углерод 0,175±0,016; кремний 0,27±0,03; марганец 0,45±0,03; хром 0,081±0,008; никель 0,033±0,008; медь 0,041±0,008; сера 0,004±0,002; фосфор 0,007±0,002; остальное железо) применялся металлографический анализатор фрагментов микроструктуры твердых тел «Ресурс С7», программный комплекс которого специально дополнен и доработан для задач настоящей работы специалистами компании ООО «Сиамс». Нормализация проводилась в печи муфельной МИМП-10У. Механические испытания проводились на разрывной машине Р-5. Образцы стали 20, вырезанные из трубной заготовки с типоразмером 32,0×4,0 мм, подвергались циклической нормализации, количество циклов варьировалось от одного до пяти. Расчет фактора разности зеренности проводился в программном комплексе в соответствии с [24] по формуле:

$$F_z = \frac{f_{\max} \cdot Z_{\max}}{\sum f_i \cdot Z_i},$$

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.

Скорость коррозии рассчитывалась по потере массы образца за время испытания:

$$V = \frac{m_0 - m}{t},$$

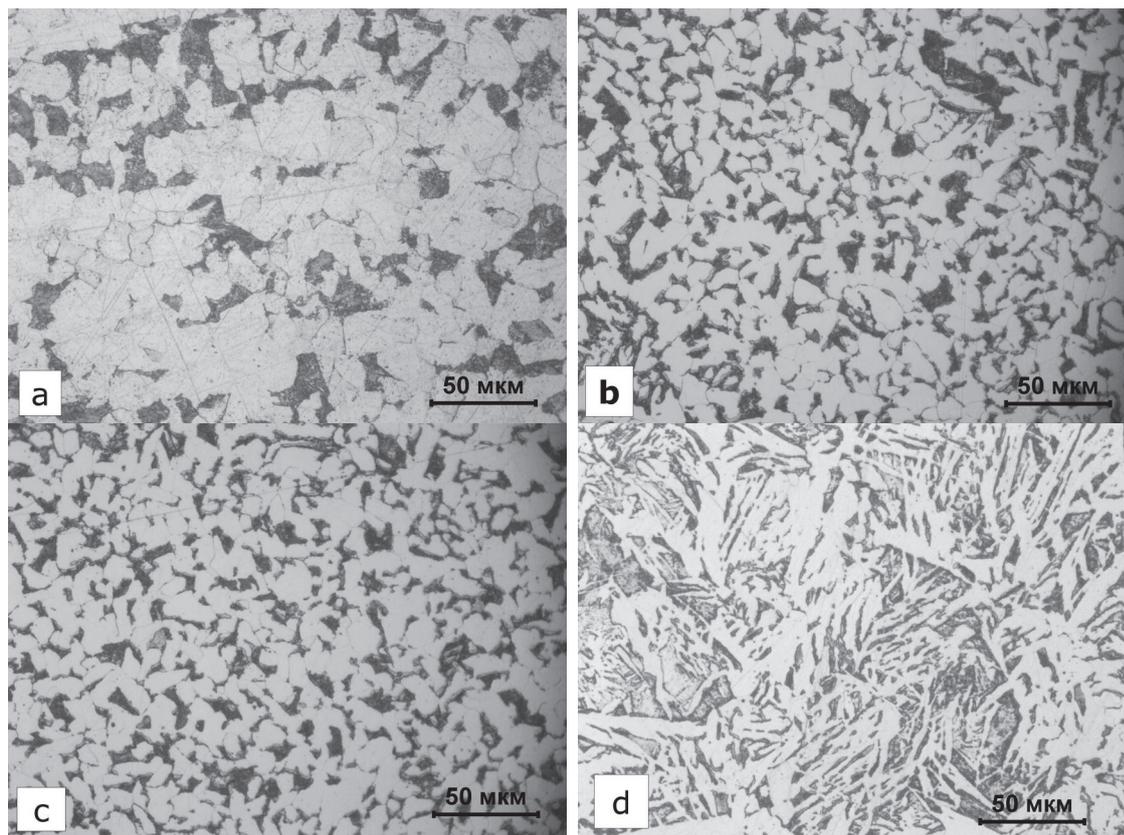
где  $m_0$  – исходная масса образцов;  $m$  – масса образца после испытания;  $t$  – время испытания. Время испытания составило 24 ( $t_1$ ) и 168 ( $t_2$ ) часов.

#### Результаты и их обсуждение

Исследования показали, что в исходном состоянии структура стали 20 состоит из крупнозернистого феррита и перлита. Средняя площадь зерна феррита составляет 84,7 мкм<sup>2</sup>. Неравномерность образования перлита по границам зерен феррита указывает на незавершенность процесса кристаллизации и неравновесное состояние стали 20 (рис. 1, а).

Партии образцов, изготовленные из стали 20, были подвергнуты многократной нормализации при температурах 900, 910, 920, 930, 940, 950 °С. Установлено, что два цикла фазовой перекристаллизации при 900 °С приводят микроструктуру в равновесное состояние, выравнивая и измельчая размеры зерен и более равномерно распределяя перлит между ферритом (рис. 1, б). Средние площади зерен феррита уменьшаются до 55,1 мкм<sup>2</sup>. После двукратного цикла нормализации фактор разности зеренности достигает максимального значения. Последующие циклы фазовой перекристаллизации не оказывают значительного влияния на средний размер зерен феррита и дисперсность перлита. После третьего цикла нагрева-охлаждения наблюдается минимальное значение фактора разности зеренности, четвертый и пятый циклы нормализации повышают однородность зеренной структуры. Аналогичные исследования при температурах 900, 910, 920, 930, 940, 950 °С представлены на рис. 2. Видно, что режим двукратной нормализации при температуре 920 °С формирует более мелкозернистую равноосную феррито-перлитную структуру с низкой разности зеренности. Значение средней площади зерна феррита уменьшается на 42 % (с 84,7 до 49,3 мкм<sup>2</sup>). Значение фактора разности зеренности после двукратного цикла нормализации увеличивается в 3,3 раза (с 0,15 до 0,49) по сравнению с исходным состоянием. При этом установлено, что при пятикратной нормализации при 910 °С, четырех-пятикратной при 920 °С, трех-пятикратной при 930 и 940 °С, двух-пятикратной при 950 °С (рис. 1, д) наблюдается ярко выраженная грубая видманштеттовая структура с массивными иглами и ферритной сеткой по границам зерен, что соответствует 4–5 баллам ГОСТ 5640 [25]. Наличие видманштеттовой структуры выше 3-го балла в микроструктуре труб поверхностей нагрева не допускается [23].

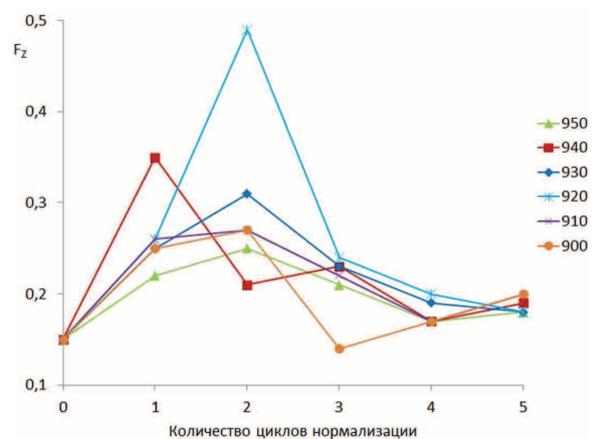
Для установления зависимости изменения механических свойств от фактора разности зеренности были проведены испытания на статическое растяжение при комнатной температуре. Обнаружено, что по мере увеличения температуры термообработки и количества циклов механические свойства ухудшаются, однако они находятся в пределах требований ТУ 14–ЗР-55–2001. В образцах, в микроструктуре которых наблюдается видманштетт, пределы прочности и текучести заметно выше, а пластичность ниже, чем в образцах с однородной зеренной структурой. Браковочные уровни меха-



**Рис. 1.** Микроструктура трубной заготовки из стали 20 в исходном состоянии (а), после двукратной нормализации при б) 900; с) 920; д) 950 °С

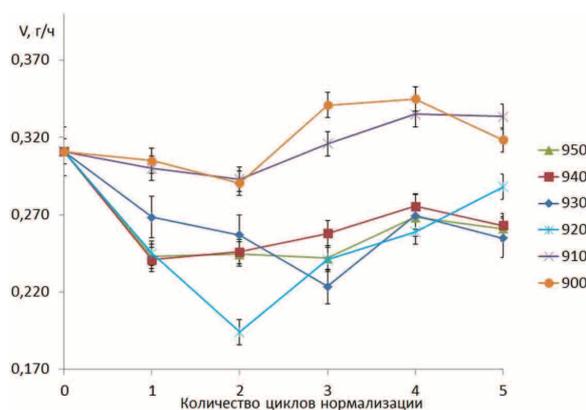
**Fig. 1.** Microstructure of a pipe shell of steel 20 in initial condition (a), after double normalization at б) 900; с) 920; д) 950 °С

нических свойств образцов полностью соответствуют тем режимам нормализации, при которых происходит образование грубой видманштеттовой структуры. Исключение составляет образец, подвергнутый двукратной нормализации при температуре 940 °С, механические свойства которого немного ниже требуемых по ТУ 14-ЗР-55-2001.



**Рис. 2.** Зависимость фактора разноразности от количества циклов нормализации

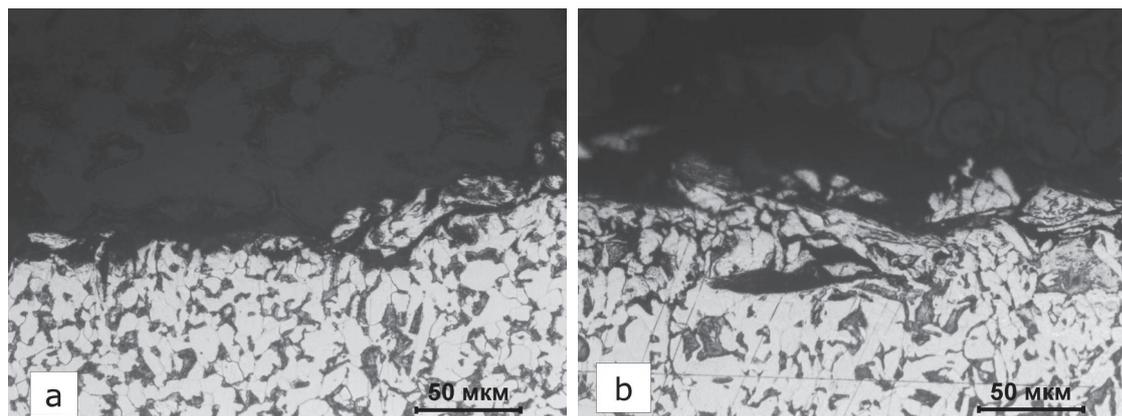
**Fig. 2.** Dependence of inequigranular factor on the amount of normalization cycles



**Рис. 3.** Зависимость скорости коррозии от количества циклов при различных температурах структурной перекристаллизации ( $t_1=24$  часа)

**Fig. 3.** Dependence of corrosion rate on the amount of cycles at different temperatures of structural recrystallization ( $t_1=24$  h)

Поскольку одной из основных причин повреждения труб поверхностей нагрева за отопительный сезон является наружная коррозия [26], были проведены испытания на коррозионную стойкость в условиях, имитирующих агрессивную среду топочных газов. Анализы отложений на наружной



**Рис. 4.** Поверхности трубной заготовки из стали 20, подвергнутые а) двукратной нормализации при 920 °С; б) трехкратной нормализации при 900 °С

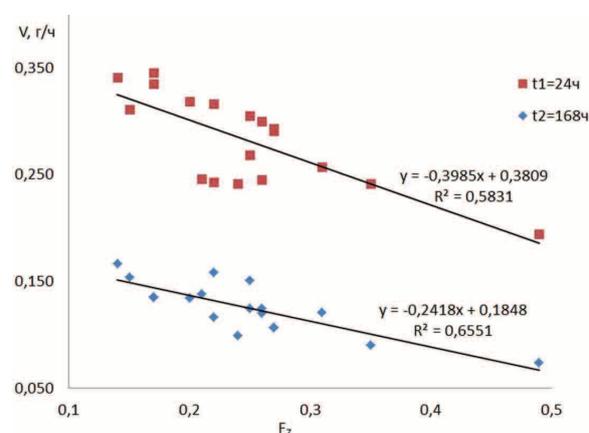
**Fig. 4.** Surfaces of pipe shell of steel 20 subjected to a) double normalization at 920 °C; b) triple normalization at 900 °C

поверхности и протоколы выбросов показали, что основными продуктами коррозии являются FeS и Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Образование FeS обусловлено наличием соединений серы в мазуте. Коррозионные испытания заключались в выдержке в течение определенного времени испытуемых образцов в агрессивной среде, содержащей сероводород. Изменение скорости коррозии по мере увеличения циклов и температуры нормализации иллюстрирует рис. 3.

Видно, что заметное снижение скорости коррозии наблюдается у образцов, подвергнутых нормализации при температуре 920 °С и выше. Аналогичные результаты получаются и при увеличении времени коррозионных испытаний. Наименьшая скорость коррозии наблюдается при двукратной нормализации при 920 °С. Установлено, что при режиме двукратной нормализации при  $t_1$  снижение этой величины составляет 38 % от исходного значения, при увеличении времени испытания до  $t_2$  скорость коррозии уменьшается на 51 %. После третьего цикла нормализации эта величина уменьшается на 23 и 35 %, после четвертого – на 16 и 29 %, после пятого – на 7 и 20 % для времени испытания  $t_1$  и  $t_2$  соответственно. Большая эффективность двукратной нормализации при увеличении времени испытания указывает на хорошую адгезионную связь продуктов коррозии с поверхностью испытуемого металла. Снижение скорости коррозии при этом объясняется пассивирующими свойствами образовавшихся продуктов коррозии, более равномерно распределенных на сформировавшейся однородной зеренной структуре. Металлографический анализ показал, что после первого цикла нормализации при 920 °С глубина межкристаллитных трещин сокращается в 1,5 раза (с 47,3 до 31,7 мкм), при двукратной нормализации при 920 °С – в 2,2 раза (с 47,3 до 21,1 мкм) при малом времени испытания по сравнению с трещинами, образовавшимися на образцах, не подвергнутых термообработке.

Поверхности образцов, на которых наблюдалась минимальная (режим термообработки – двукратная нормализация при 920 °С) и максимальная (режим термообработки – трехкратная нормализация при 900 °С) скорости коррозии при длительных испытаниях, приведены на рис. 4. Глубина межкристаллитных трещин составила 36,5 и 104,0 мкм соответственно.

На рис. 5 представлена зависимость скорости коррозии от фактора разнородности микроструктуры образцов, показавших удовлетворительные результаты по механическим и микроструктурным характеристикам.



**Рис. 5.** Зависимость скорости коррозии от фактора разнородности

**Fig. 5.** Dependence of corrosion rate on inequigranular factor

Из графика видно, что скорость коррозии уменьшается с увеличением степени однородности зеренной структуры. Любой вид неоднородности (по составу, электропроводности и напряжению отдельных участков, наличию примесей и т. п.) может приводить к увеличению скорости коррозии, однако их вклад в коррозионную стойкость незначительный по сравнению с фактором разнородности.

стости. Полученные данные свидетельствуют о существенной зависимости коррозионных характеристик от размерных параметров зерен.

#### Заключение

Проведенные исследования показали, что режим двукратной нормализации при 920 °С повышает однородность микроструктуры и увеличивает коррозионную стойкость углеродистой стали 20, применяемой в теплоэнергетике для изготовления труб поверхностей нагрева, на 38...51 % при

варьировании времени испытания от 24 до 168 часов. Трехкратное увеличение фактора разноразмерности позволило при этом режиме термообработке сократить глубину межкристаллитных трещин в 1,5 раза (с 31,7 до 21,1 мкм) по сравнению с трещинами, образовавшимися на образцах, прошедших рекомендуемую по ТУ-14-ЗР-55-2001 термообработку. Использование разработанного режима термообработки позволит существенно увеличить срок эксплуатации тепловоспринимающих элементов котлов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jones D.R.H. Corrosion of Central Heating Systems // Engineering Failure Analysis. – 1997. – № 4. – С. 179–194.
2. Гуревич В.З. Трубопроводы тепловых и атомных электростанций. – М.: НИИ Энергомаш, 1981. – 525 с.
3. Штромберг Ю.Ю. Контроль металла на тепловых электростанциях // Теплоэнергетика. – 1996. – № 12. – С. 17–20.
4. Tamehiro H., Yamada N., Matsuda H. Effect of the Thermo-Mechanical Control Process on the Properties of High-strength Low Alloy Steel // Transactions ISIJ. – 1985. – № 25. – С. 54–61.
5. Басин А.С., Чапаев Д.Б., Кореньков А.И. Задачи повышения долговечности металла труб тепловых сетей // Известия вузов. Черная металлургия. – 2001. – № 6. – С. 41–43.
6. Морозова Т.В. Влияние технологии производства стали на однородность структуры и загрязненность неметаллическими включениями с целью повышения надежности магистральных трубопроводов: дис.... канд. техн. наук. – М., 2012. – 129 с.
7. Терентьев В.Ф., Колмаков А.Г., Курганова Ю.А. Теория и практика повышения надежности и работоспособности конструкционных металлических материалов. – Ульяновск: УлГТУ, 2010. – 286 с.
8. Performance of Welded High-Strength Low-Alloy Steels in Sour Environments / G.M. Omweg, G.S. Frankel, W.A. Bruce, J.E. Ramirez, G. Koch // Corrosion. – 2003. – № 59. – P. 640–653.
9. Овчинников В.П., Кирсанов Ю.Я. Критерии предельного состояния и ресурс эксплуатации гибов паропроводов // Оценка надежности и методы контроля металла и сварки энергооборудования, отработавшего расчетный срок. – Кемерово: Кемеровское изд-во, 1982. – С. 27–35.
10. Пискаленко В.В. Эволюция структурно-фазового состояния и механических свойств котельных сталей: дис.... канд. техн. наук. – Новокузнецк, 2002. – 169 с.
11. Сизова О.В., Подборонников С.Ф., Громов В.Е., Данилов В.И. Об изменении механических свойств и структуры котельной стали в процессе эксплуатации // Вестник горно-металлургической секции академии естественных наук. Отделение металлургии. – 1994. – № 1. – С. 108–113.
12. Urtsev V.N., Morozov A.A., Kapsan A.V. The Features of Austenite to Ferrite Transformation for Carbon Steel // International Congress on Metallurgy and Materials Technology, Physical Metallurgy. – Sao Paulo, 1994. – № 1. – P. 251–259.
13. Тушинский Л.И. Новые пути создания оптимальных структур сплавов // Новые методы упрочнения и обработки металлов: межвуз. сб. науч. тр. – Новосибирск: НЭТИ, 1980. – С. 3–32.
14. Батаев В.А. Управление структурой сталей на различных масштабных уровнях в процессах комбинированного упрочнения: дис.... д-ра техн. наук. – Новосибирск, 2002. – 430 с.
15. Солоненко О.П., Алхимов А.П., Марусин В.В. Высокоэнергетические процессы обработки материалов. – Новосибирск: Наука, 2000. – 425 с.
16. Климов П.В. Исследование и разработка методов торможения стресс-коррозии на магистральных газопроводах: дис.... д-ра техн. наук. – Уфа, 2012. – 337 с.
17. Погорелова И.Г. Исследование структурных особенностей и разработка способа повышения прочности и коррозионной стойкости трубной стали при комбинированной термообработке: дис.... канд. техн. наук. – Ростов-на-Дону, 2008. – 229 с.
18. Анализ внутренних структурных напряжений I и II рода как основа повышения надежности поверхности нагрева котлов / А.А. Макеев, Л.Л. Любимова, А.С. Загорин, Р.Н. Фисенко, А.А. Ташлыков // Вестник науки Сибири. – 2013. – № 4 (10). – С. 19–26. URL: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/807/565> (дата обращения: 15.09.2014).
19. Артамонцев А.И. Коррозионные проявления микроструктурных повреждений в трубах тепловоспринимающих элементов и трубопроводных систем: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2007. – 120 с.
20. Биронт В.С. Теория термической обработки металлов. – Красноярск: ИЦМиЗ, 2007. – 434 с.
21. Зубченко А.С., Колосков М.М., Каширский Ю.В. Марочник сталей и сплавов. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
22. Дьяченко С.С. Образование аустенита в железоуглеродистых сплавах. – М.: Металлургия, 1982. – 128 с.
23. ТУ 14-ЗР-55-2001. Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов. – М.: РНИИТП, 2001. – 84 с.
24. Гроховский В.И. Возможности цифровой микроскопии в металлографии // Цифровая микроскопия. Материалы школы-семинара. – 2001. – № 1. – С. 18–20.
25. ГОСТ 5640-68. Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры листов и ленты. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 8 с.
26. Березина Т.Г. Коррозия металла деталей теплоэнергетического оборудования. – Челябинск: ЧФ ПЭИПК, 2000. – 58 с.

Поступила 08.02.2015 г.

UDC 620.186.5:621.181.2

## ROLE OF STRUCTURAL FACTORS IN IMPROVING CORROSION RESISTANCE OF PIPE STEEL UNDER CYCLIC HEAT TREATMENT

**Anna V. Pomazova,**

Omsk F.M. Dostoevsky State University, 55a, Mira Avenue, Omsk, 644077, Russia. E-mail: pomazova@yandex.ru

**Tatyana V. Panova,**

Omsk F.M. Dostoevsky State University, 55a, Mira Avenue, Omsk, 644077, Russia. E-mail: panova@omsu.ru

**Gennadiy I. Gering,**

Omsk F.M. Dostoevsky State University, 55a, Mira Avenue, Omsk, 644077, Russia. E-mail: gering@omsu.ru

The paper discusses the possibility of using multiple structural recrystallization to improve the performance of the 20 steel used for manufacturing heating surface tubes. Relevance of the work is caused by the continuous increase in number of corrosion damage elements of boilers. The authors have evaluated the influence of microstructure parameters (inequigranular) on the corrosion resistance and proposed the method of heat treatment which increases the operational reliability of the pipes. The essential dependence of corrosion characteristics of dimensional parameters of the grains was determined. The most effective mode that reduces inequigranular microstructure is double normalization mode at 920 °C and a single mode at 940 °C. The maximum value of 0,49 the inequigranular factor reaches at double normalization at 920 °C. In this mode the value of the average area of ferrite grains decreases by 42 %, the value of the inequigranular factor increases in 3,3 times in comparison with the baseline. This heat treating mode ensures minimal corrosion rate, while the mechanical properties are within the requirements of the relevant regulations. There is a decrease in depth of intergranular cracks in 1,5 times (from 31,7 to 21,1 microns) in comparison with the cracks formed on the samples held on the recommended TU 14–3r-55–2001 heat treatment. Application of the double normalization mode at 920 °C for heat treatment of carbon steel 20 used in heat power engineering for manufacturing heating surface tubes, will increase the life of heat exchanger elements of a boiler due to significant decrease in the rate of external corrosion.

### Key words:

Inequigranular of microstructure, external corrosion, intercrystalline corrosion, resource of boiler tubes.

### REFERENCES

1. Jones D.R.H. Corrosion of Central Heating Systems. *Engineering Failure Analysis*, 1997, no. 4, pp. 179–194.
2. Gurevich V.Z. *Truboprovody teplovykh i atomnykh elektrostantsii* [Piping of Thermal and Nuclear Power Plants]. Moscow, NII Energomash Publ., 1981. 525 p.
3. Shtromberg Yu.Yu. Kontrol metalla na teplovykh elektrostantsiyakh [Control of Metal in Thermal Power Plants]. *Thermal Engineering*, 1996, no. 12, pp. 17–20.
4. Tamehiro H., Yamada N., Matsuda H. Effect of the Thermo-Mechanical Control Process on the Properties of High-strength Low Alloy Steel. *Transactions ISIJ*, 1985, no. 25, pp. 54–61.
5. Basin A.S., Chapaev D.B., Korenkov A.I. Zadachi povysheniya dolgovechnosti metalla trub teplovykh setey [The Problem of Increasing the Durability of Pipe Metal in Heating Networks]. *Steel in Translation*, 2001, no. 6, pp. 41–43.
6. Morozova T.V. *Vliyaniye tekhnologii proizvodstva stali na odnorodnost struktury i zagryaznennost nemetallicheskimy vklucheniyaми s tselyu povysheniya nadezhnosti magistralnykh truboprovodov*. Dis. Kand. nauk [The Impact of Steel Production Technology on Structural Homogeneity and Contamination with Non-Metallic Inclusions to Improve the Reliability of the Main Pipelines. Cand. Diss.]. Moscow, 2012. 129 p.
7. Terentev V.F., Kolmakov A.G., Kurganova Yu.A. *Teoriya i praktika povysheniya nadezhnosti i rabotosposobnosti konstruktivnykh metallicheskikh materialov* [Theory and Practice of Increasing the Reliability and Efficiency of Structural Metallic Materials]. Ulyanovsk, UIGTU Publ., 2010. 286 p.
8. Omweg G.M., Frankel G.S., Bruce W.A., Ramirez J.E., Koch G. Performance of Welded High-Strength Low-Alloy Steels in Sour Environments. *Corrosion*, 2003, no. 59, pp. 640–653.
9. Ovchinnikov V.P., Kirsanov Yu.Ya. Kriterii predelnogo sostoyaniya i resurs ekspluatatsii gibov paroprovodov [Limit State Criteria and Exploitation Resource of Steam Pipelines Bends]. *Otsenka nadezhnosti i metody kontrolya metalla i svarki energoborudovaniya, otrabotavshogo raschetnyy srok* [Evaluation of reliability and methods of control of power metal and welding spent design life]. Kemerovo, Kemerovskoe izdatelstvo, 1982. pp. 27–35.
10. Piskalenko V.V. *Evolyutsiya strukturno-fazovogo sostoyaniya i mekhanicheskikh svoystv kotelnykh staley*. Dis. Kand. nauk [Evolution of Structural and Phase State and Mechanical Properties of Steel Boiler. Cand. Diss.]. Novokuznetsk, 2002. 169 p.
11. Sizova O.V., Podboronnikov S.F., Gromov V.E., Danilov V.I. Ob izmenenii mekhanicheskikh svoystv i struktury kotelnoy stali v protsesse ekspluatatsii [On the Change of Mechanical Properties and Structure of Steel Boiler in Operation]. *Vestnik gorno-metallurgicheskoy sektsii akademii estestvennykh nauk. Otdelenie metallurgii*, 1994, no. 1, pp. 108–113.
12. Urtsev V.N., Morozov A.A., Kapsan A.V. The Features Of Austenite to Ferrite Transformation for Carbon Steel. *International Congress on Metallurgy and Materials Technology, Physical Metallurgy*, 1994, no. 1, pp. 251–259.
13. Tushinskii L.I. Noveye puti sozdaniya optimalnykh struktur splavov [New Ways of Creating the Optimal Structure of the Alloy]. *Noveye metody uprochneniya i obrabotki metallor: Mezhdvuz. sb.nauch.tr.* [New methods of hardening and processing of metals: Interuniversity collection of scientific labors]. Novosibirsk, NETI Publ., 1980. pp. 3–32.
14. Bataev V.A. *Upravlenie strukturoy staley na razlichnykh masshtabnykh urovnyakh v protsessakh kombinirovannogo uprochneniya*. Dis. Kand. nauk [Control over Steel Structure at Different Scale Levels During Combined Hardening. Cand. Diss.]. Novosibirsk, 2002. 430 p.

15. Solonenko O.P., Alkhimov A.P., Marusin V.V. *Vysokoenergeticheskie protsessy obrabotki materialov* [High Energy Processes of Processing Materials]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2000. 425 p.
16. Klimov P.V. *Issledovanie i razrabotka metodov tormozheniya stress-korrozii na magistralnykh gazoprovodakh*. Dis. Dokt. nauk [Research and Development of Methods for Stress Corrosion Inhibition on Gas Pipelines. Dr. Diss.]. Ufa, 2012. 337 p.
17. Pogorelova I.G. *Issledovanie strukturnykh osobennostey i razrabotka sposoba povysheniya prochnosti i korrozionnoy stoykosti trubnoy stali pri kombinirovannoy termoobrabotke*. Dis. Kand. nauk [Research of structural features and development of the method for increasing strength and corrosion resistance of pipe steel at complex heat treatment. Cand. Diss.]. Rostov-on-Don, 2008. 229 p.
18. Makeev A.A., Lyubimova L.L., Zavorin A.S., Fisenko R.N., Tashlykov A.A. *Analiz vnutrennikh strukturnykh napryazhenii I i II roda kak osnova povysheniya nadezhnosti poverkhnosti nagraeva kotlov* [Analysis of Internal Structural Stress of the I and the II type as a Basis for Improving the Reliability of Boiler Heating Surface]. *Sibirian Journal of Science*, 2013, no. 4 (10), pp. 19–26. Available at: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/807/565> (accessed 15.09.2014).
19. Artamontsev A.I. *Korrozionnye proyavleniya mikrostrukturnykh povrezhdeniy v trubakh teploosprinyimayushchikh elementov i truboprovodnykh system*. Dis. Kand. nauk [Corrosive manifestations of microstructural damages in the pipes of heat exchanger elements and piping systems. Cand. Diss.]. Tomsk, 2007. 120 p.
20. Biront V.S. *Teoriya termicheskoy obrabotki metallov* [Theory of Heat Treatment of Metals]. Krasnoyarsk, ITsMiZ Publ., 2007. 434 p.
21. Zubchenko A.S., Koloskov M.M., Kashirskiy Yu.V. *Marochnik staley i splavov* [Database of Steel and Alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 784 p.
22. Dyachenko S.S. *Obrazovanie austenita v zhelezouglerodistykh splavakh* [Formation of Austenite in the Iron-Carbon Alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1982. 128 p.
23. *TU 14–3R-55–2001. Truby stalnye besshovnye dlya parovykh kotlov i truboprovodov* [Specifications 14–3R-55–2001. Seamless steel tubes for boilers and pipelines]. Moscow, RNIITP Publ., 2001. 84 p.
24. Grokhovskiy V.I. *Vozможности tsifrovoy mikroskopii v metallografii* [Possibilities of Digital Microscopy in Metallography]. *Tsifrovaya mikroskopiya. Materialy shkoly-seminara*, 2001, no. 1, pp. 18–20.
25. *GOST 5640–68. Stal. Metallograficheskiy metod otsenki mikrostrukturnykh listov i lent* [State Standard 5640–68. Steel. Metallographic method for assessing the microstructure of sheets and strips]. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1988. 8 p.
26. Berezina T.G. *Korroziya metalla detaley teploenergeticheskogo oborudovaniya* [Corrosion of Metal of Heat and Power Equipment Parts]. Chelyabinsk, CHF PEIPK, 2000. 58 p.

Received: 08 February 2015.