

УДК 62-462.3; 621.9.016; 620.16-18

**А.В. Грузевич\***, \*\* аспирант, зав. лаборатории, e-mail: trip.imag@gmail.com

**Д.О. Дереча\*\***, \*\*\* канд. физ.-мат. наук, зав. лаборатории

\*Трипольская ТЭС, Украинка

\*\*Институт магнетизма НАН Украины и МОН Украины, Киев

\*\*\*Национальный технический университет Украины «КПИ им. Игоря Сикорского», Киев

### ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА МЕХАНИКО-ТЕРМИЧЕСКИ ОБРАБОТАННЫХ ТРУБ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ПОВЕРХНОСТЯХ НАГРЕВА БЛОКОВ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

*В работе приводятся результаты исследования структуры и свойств металла труб, упрочненных механико-термической обработкой. Обобщены и проанализированы результаты исследования кинетики изменения микроструктуры и механических свойств конструкционных элементов в процессе их эксплуатации. Показана стабильность структуры и свойств металла.*

**Ключевые слова:** механико-термическая обработка, жаропрочная сталь, ресурс эксплуатации, структура, механические свойства.

*У роботі приведено результати дослідження структури та властивостей металу механіко-термічно зміцнених труб. Узагальнено та проаналізовано результати дослідження кінетики зміни микроструктури та механічних властивостей конструкційних елементів в процесі їх експлуатації. Показано стабільність структури і властивостей металу труб.*

**Ключові слова:** механіко-термічна обробка, жаростійка сталь, ресурс експлуатації, структура, механічні властивості.

*The investigation results of the metal pipes reinforced by mechanical and thermal treatment on their structure and properties are represented. The investigation results of the changing kinetics of the microstructure and the mechanical properties of the structural elements in the process of their operation are generalized and analyzed. The stability of the structure and properties of pipe metal also shown.*

**Keywords:** mechanical-thermal treatment, heat-resistant steel, operation resource, structure, mechanical properties.

#### Введение

Эксплуатационная надежность металла труб поверхностей нагрева является важным условием безаварийной работы мощных котлоагрегатов. С повышением единичной мощности котлоагрегатов увеличивается вероятность появления

в них тепловых и гидравлических неравномерностей, а также уменьшается стабильность температурного режима металла труб. В настоящее время отмечается, что весьма значительная часть повреждений происходит на поверхностях нагрева. Одним из эффективных способов повышения долговечности труб является метод механико-термической обработки (МТО).

Упрочнение методом МТО рассматривается с точки зрения применения труб из жаропрочной низколегированной стали перлитного класса 12Х1МФ по техническим условиям ТУ 14-3-1072 [1].

Сущность МТО заключается в деформировании трубы на небольшую степень обжатия при нормальной или повышенной температурах и последующем полигонизационном отжиге при температуре, не превышающей температуру начала рекристаллизации (рис. 1).

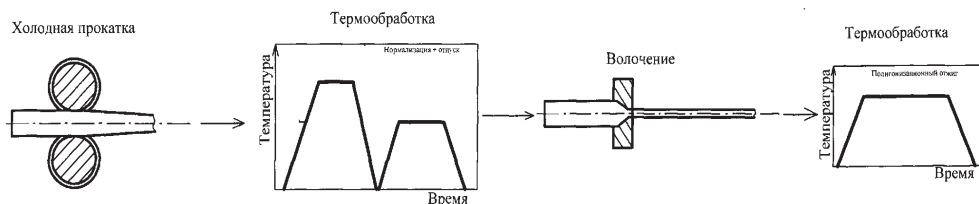


Рис. 1. Технология механико-термической обработки труб из стали 12Х1МФ

Для упрочнения труб используется способ деформирования – холодное волочение.

Полигональная структура характеризуется наличием субзерен, образованных в результате выстраивания дислокаций одного знака в вертикальные ряды, образуя сетку и создавая ячеистую структуру.

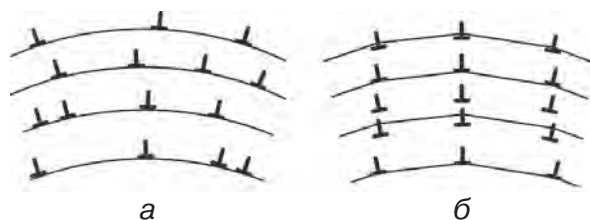


Рис. 2. Схема механизма полигонизации структуры стали в результате МТО: а – состояние после Н и О; б – состояние после МТО (условное обозначение дислокации)

Схематически [2] процесс перестройки и упорядочения дислокационной структуры стали в результате МТО представлен на рис. 2.

При этом происходит уменьшение энергии в кристаллах, то есть металл переводится в энергетически более стабильное состояние, в связи с чем затрудняются процессы, развивающиеся при более высоких температурах.

Задачей данной статьи является изучение изменений структуры и свойств, которые происходят в металле после МТО и в процессе длительной эксплуатации.

Во время эксплуатации периодически делались вырезки, на которых проводились следующие испытания:

- металлографические;
- определение механических свойств при нормальной и повышенной температурах;
- исследование жаропрочных свойств;
- определение фазового и химического состав карбидных частиц до и после упрочнения.

### *Влияние механико-термической обработки на структуру, механические и жаропрочные свойства труб*

#### *Структура труб, подвергнутых МТО*

Структура сталей и сплавов является одним из основных факторов, влияющих на свойства металла. Механические и жаропрочные характеристики стали 12Х1МФ определяются соотношением таких структурных составляющих, как феррит, бейнит,

и карбидных частиц, количество которых зависит от химического состава стали, способа выплавки и последующего передела, режима термической обработки. Выявляли микроструктуры стали в исходном состоянии (после нормализации с отпуском) и после МТО химическим травлением электрополированных образцов в 2 %-ном спиртовом растворе азотной кислоты.

Микроструктура исходного металла представляет собой феррито-бейнитную смесь и соответствует второму баллу шкалы микроструктур ТУ 14-3-460: 2009 [3] (ТУ). Деформация на 10–15 % волочением является весьма незначительной, чтобы вызвать измельчение зерна, и структура металла после МТО также соответствует второму баллу (рис. 3). Однако следует отметить, что после деформации и отжига даже при обычном травлении в отдельных ферритных зернах выявляется субструктура.

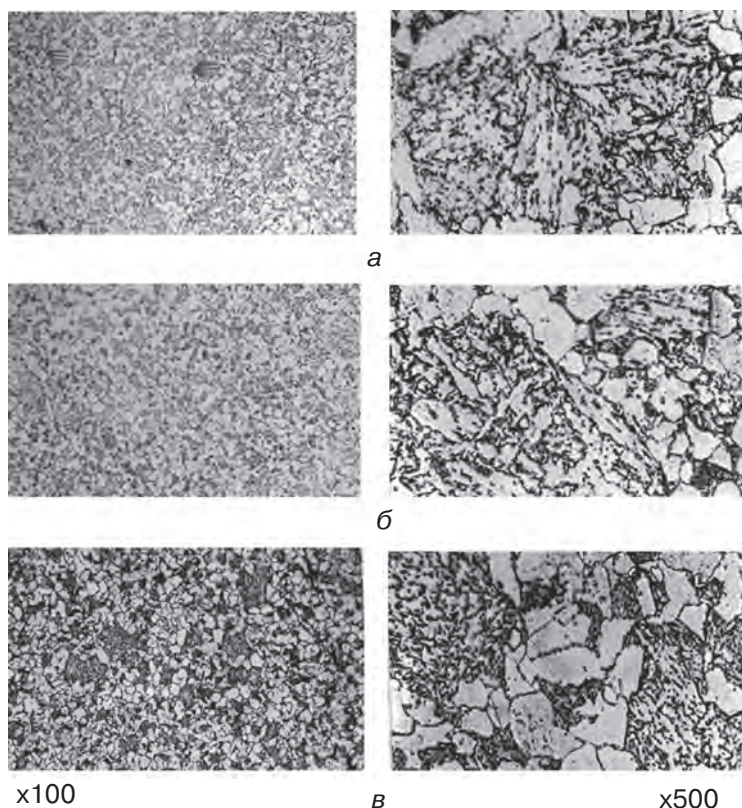


Рис. 3. Микроструктура металла труб из стали 12Х1МФ: а – в исходном состоянии; б – после деформации; в – после полигонизационного отжига

На рис. 4 показана микроструктура и дислокационная структура стали в состоянии после стандартной термообработки нормализации и отпуска (Н и О) и дополнительной механико-термической обработки (МТО). Микроструктура стали после МТО практически не меняется. В то же время при электронно-микроскопическом анализе выявлены существенные изменения субструктуры материала. Так, для исходного состояния стали после Н и О характерно бессистемное распределение дислокаций в объеме наследственных зерен (рис. 4, а). В стали после МТО наблюдается четко выраженная полигонизация структуры с образованием субграниц и дислокационных стенок (рис. 4, б) [4].

Электронно-микроскопические исследования дислокационной структуры показали, что после нормализации с отпуском в зернах феррита плотность дислокаций низкая (не более  $10^9 \text{ см}^{-2}$ ). После МТО в феррите наблюдается повышенная плотность дислокаций ( $5\text{--}8 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ ), причем основная их масса сосредоточена в субзеренных границах.

Рентгеноструктурный фазовый и химический карбидный анализ образцов труб

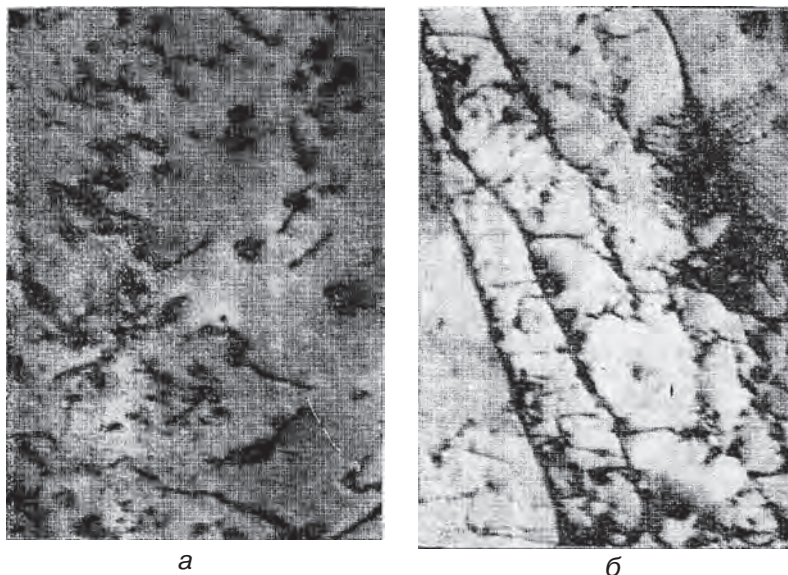


Рис. 4. Тонкая структура стали 12X1MФ после Н и О (а) и МТО; (б);  $\times 30000$

в исходном состоянии и после МТО практически не выявил различия фазового состава стали (табл. 1).

Таблица 1

**Фазовый и химический карбидный состав металла труб до и после МТО**

| Состояние металла | Фазовый состав                   | Содержание в карбидной фазе, % |       |      | Процент перехода в карбидную фазу |    |      |
|-------------------|----------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------------------------|----|------|
|                   |                                  | Cr                             | Mo    | V    | Cr                                | Mo | V    |
| После Н и О       | $M_3C + VC + M_{23}C_6 + M_7C_3$ | 0,18                           | 0,039 | 0,13 | 15                                | 16 | 68,5 |
| После МТО         | $M_3C + VC + M_{23}C_6 + M_7C_3$ | 0,11                           | 0,051 | 0,13 | 10                                | 21 | 65   |

Фазовый состав стали 12X1MФ представляет собой карбиды цементитного типа ( $M_3C$ ), карбиды ванадия (VC) и следы карбидов  $M_{23}C_6$  и  $M_7C_3$ . Процентное содержание ванадия в карбидной фазе после МТО осталось неизменным (0,13 V) сравнительно с исходным состоянием, несколько понизилось содержание хрома и повысилось содержание молибдена. Определение процента перехода хрома, молибдена и ванадия в карбидную фазу дало практически одинаковые результаты, так как имеющиеся различия укладываются в пределы точности анализа.

*Механические свойства металла при нормальной и повышенной температурах*

Эффект упрочнения стали определяется путем сравнения ее свойств после обычной термической обработки (Н и О) и после МТО (табл. 2).

Деформация металла способствует повышению плотности дислокаций, обеспечивая тем самым возрастание прочностных характеристик  $\sigma_b$  на 16, а  $\sigma_T$  на 30 %, в то же время пластические характеристики находятся ниже требований ТУ. Последующий полигонизационный отжиг способствует частичной аннигиляции дислокаций и перегруппировке оставшихся с образованием субструктуры. При этом прочностные характеристики понижаются, а пластические возрастают до соответствия требованиям ТУ. Прочностные характеристики тянутого металла после полигонизационного отжига выше, чем у металла в исходном состоянии:  $\sigma_b$  на 9,  $\sigma_T$  на 10 % соответственно.

Наиболее достоверное представление об уровне длительной прочности стали дают кратковременные механические свойства при повышенных температурах.



Таблица 2

**Механические свойства металла труб до и после МТО**

| Состояние металла    | Механические свойства           |                                 |              |               |
|----------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------|---------------|
|                      | $\sigma_b$ , кг/мм <sup>2</sup> | $\sigma_r$ , кг/мм <sup>2</sup> | $\delta$ , % | $\varphi$ , % |
| Исходный (Н+О)       | 58,9                            | 48                              | 25,9         | 77,7          |
| После волочения      | 70,1                            | 67,8                            | 10,2         | 74            |
| После МТО волочением | 64,8                            | 53,3                            | 21           | 77,2          |

Чем больше предел текучести металла [5] при температуре эксплуатации, тем больше время до разрушения. Механические свойства при  $T = 540\text{ }^\circ\text{C}$  (табл. 3) показывают, что уровень прочностных характеристик, особенно по пределу текучести металла, после МТО превышает уровень таких же характеристик исходного металла на 10–12 кг/мм<sup>2</sup>. Более высокая степень упрочнения МТО стали по пределу текучести обеспечивает стабильность созданного упрочненного состояния в процессе длительной эксплуатации труб при напряжениях, ниже площадки текучести, то есть при номинальных рабочих напряжениях.

Таблица 3

**Механические свойства металла труб до и после МТО при  $T = 540\text{ }^\circ\text{C}$**

| Состояние металла    | Механические свойства           |                                 |              |               |
|----------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------|---------------|
|                      | $\sigma_b$ , кг/мм <sup>2</sup> | $\sigma_r$ , кг/мм <sup>2</sup> | $\delta$ , % | $\varphi$ , % |
| После (Н+О)          | 44,2                            | 36,5                            | 16,8         | 81,6          |
| После МТО волочением | 48,8                            | 47,9                            | 11,3         | 78,3          |

*Длительная промышленная эксплуатация труб МТО на котлах блоков 300 МВт  
Структура труб, подвергнутых МТО в процессе эксплуатации*

Положительные результаты опробования МТО труб послужили основанием для использования субструктурно упрочненных труб на пароперегревателях котлов высокого и сверхкритического давления.

Опытные прямые вставки упрочненных труб были установлены на панелях боковых экранов нижней радиационной части (НРЧ) котла ТПП–210А и панелях заднего и фронтального экранов НРЧ котла ТГМП–314А блоков 300 МВт, работающих, соответственно, на пылеугольной смеси и газомазутном топливе. Для эксплуатационного опробования были использованы прямые участки труб МТО из стали 12Х1МФ  $\varnothing 38 \times 6,0$  и  $32 \times 6,0$  мм.

Рабочие параметры узла: температура среды 400–389  $^\circ\text{C}$ , давление 30 МПа. Температура стенки трубы – 460  $^\circ\text{C}$ .

Эксплуатация труб не сказалась на общей и тонкой дислокационной структуре стали даже в наиболее напряженной части сечения – на огневой стороне трубы. Состояние микроструктуры упрочненной трубы по всему сечению однородно, со слабыми признаками дифференциации (рис. 5, а, б). Исследование дислокационной структуры [6] свидетельствует об отсутствии тонких структурных изменений по сечению трубы (рис. 5, в, г). Плотность дислокаций, равномерно распределенных в ферритных зернах, составляет  $(0,6\text{--}0,8) \times 10^{-8}\text{ см}^{-2}$ , что соответствует исходному состоянию.

Однородность структурного состояния по сечению труб МТО согласуется с уровнем прочностных и пластических свойств стали, которые практически одинаковы на огневой и тыльной частях труб.

Упрочненные МТО вставки из стали 12Х1МФ отработали на пароперегревателе 51382 часа.

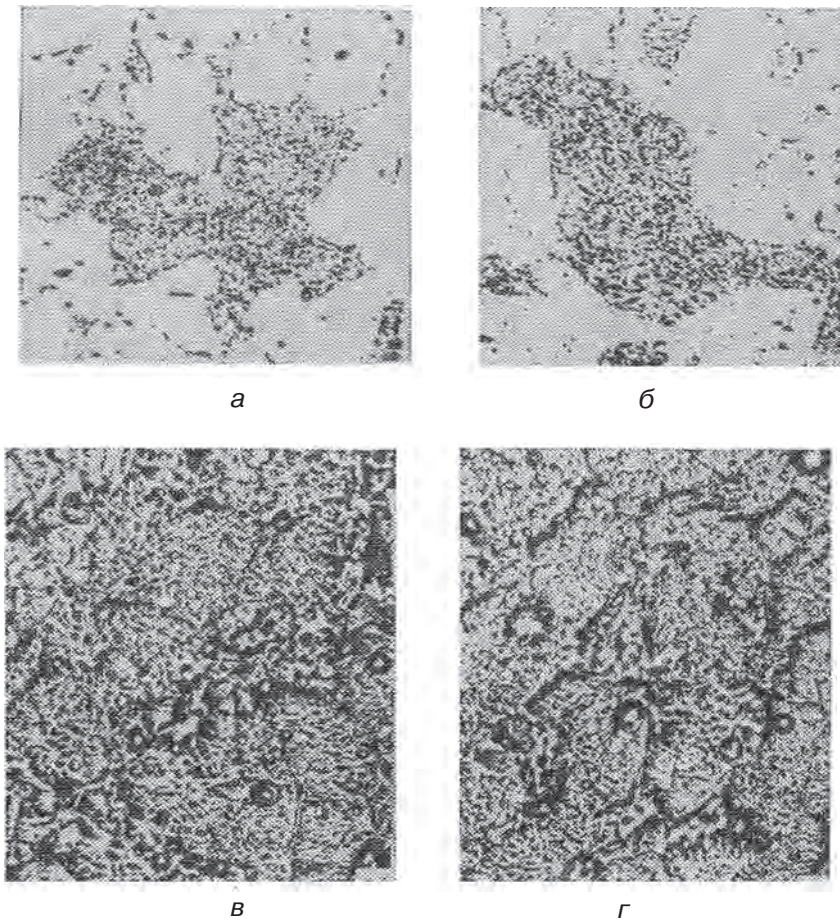


Рис. 5. Микроструктура (а, б) и дислокационная структура (в, г) упрочненной трубы НРЧ после 1 тыс. часов эксплуатации: а, в – огневая сторона трубы; б, г – тыльная сторона трубы;  $\times 1000$

За время эксплуатации опытных вставок производились систематические наблюдения за состоянием труб МТО. Периодические осмотры, измерительный контроль и результаты исследований контрольных вырезов показали хорошее состояние металла.

Исследование стабильности созданного упрочненного состояния в процессе длительной эксплуатации опытных вставок выявило, что дислокационные субграницы, стенки дислокаций и фрагментация структуры сохраняются (рис. 6) [4]. При этом происходит некоторое уширение субграниц металла за счет притока дислокаций и выделений по границам дисперсных частиц карбидной фазы.

Одновременно наблюдается закономерный процесс дифференциации бейнитной и феррито-перлитной микроструктуры стали за счет старения с образованием участков феррито-карбидной смеси, выделением обособленных карбидов и их коагуляцией. Однако сохранение фрагментированной субструктуры обеспечивает стабильность свойств и торможение скорости ползучести стали.

Максимальная зафиксированная после 51 тыс. часов эксплуатации остаточная деформация труб МТО вставок не превышала 0,63 %.

### *Механические свойства металла труб МТО в процессе эксплуатации*

Определение механических характеристик металла при нормальной и высокой температурах после 21 тыс. и 89 тыс. часов эксплуатации показало стабильность упрочненного состояния при сохранении пластичности стали (табл. 4, 5).

### Жаропрочные свойства МТО труб

Как указывалось, МТО способствует увеличению прочностных характеристик стали на 10–17%, что привело к повышению сопротивлению материала длительному разрушению. Жаропрочные свойства металла труб из упрочненной стали 12Х1МФ определялись по результатам испытаний на длительную прочность, по сопротивлению длительному разрушению при 540 °С и напряжению в интервале 160–240 МПа. В равных условиях испытывались образцы стандартных [3] и МТО [1] труб (табл. 6) [7].

Увеличение времени до разрушения металла, подвергнутому МТО, может быть объяснено не только развитой субструктурой, но и увеличением количества мелкодисперсных карбидных частиц, так как величина и распределение карбидных частиц является одним из основных структурных факторов, влияющих на надежность металла.

Для определения характера и степени коррозионных повреждений производилось металлографическое исследование продольного сечения трубы. Показано, что от наружной поверхности в сечении развиваются транскристаллитные тупые трещины, заполненные окислами, на глубину до 0,22 мм. Коррозионные повреждения внутренней поверхности имеют вид язвин округлой формы глубиной до 0,1 мм, также заполненные окислами.

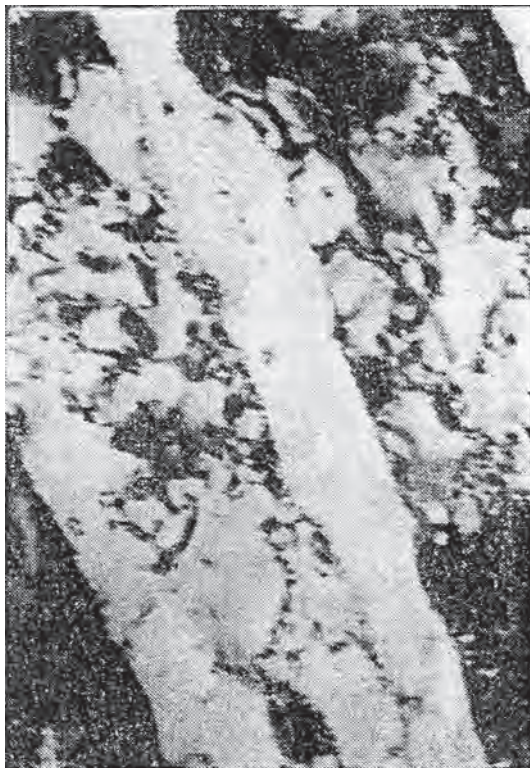


Рис. 6. Тонкая структура металла трубы МТО после 51382 часов эксплуатации,  $\times 30000$

**Таблица 4**

### Механические свойства металла опытных вставок МТО боковых экранов НРЧ котла ТПП-210А после 21 тыс. часов эксплуатации

| Номер вставки | Место вырезки образцов (сторона трубы) | Температура испытаний 20 °С       |                                   |                                      | Температура испытаний 550 °С      |                                   |                                      |
|---------------|--|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
|               |  | предел прочности $\sigma_v$ , МПа | предел текучести $\sigma_t$ , МПа | относительное удлинение $\delta$ , % | предел прочности $\sigma_v$ , МПа | предел текучести $\sigma_t$ , МПа | относительное удлинение $\delta$ , % |
| 1             | Тыльная                                | 632                               | 488                               | 24,6                                 | 401                               | 379                               | 22,4                                 |
|               | Огневая                                | 633                               | 506                               | 22,5                                 | 401                               | 368                               | 22,3                                 |
| 2             | Тыльная                                | 645                               | 507                               | 22,5                                 | 419                               | 400                               | 20,0                                 |
|               | Огневая                                | 645                               | 508                               | 22,5                                 | 409                               | 378                               | 21,0                                 |

Жаростойкость МТО труб панелей фронтального экрана НРЧ котла ТГМП-314А после длительной эксплуатации приведена в табл. 7.

Как видно из приведенных в табл. 7 данных, развитие коррозии упрочненных труб идет замедленно и глубина коррозии после 89 тыс. часов оказывается в 2 раза ниже предельно допустимой [8]. Приведенные данные свидетельствуют о повышенной жаростойкости стали 12Х1МФ после МТО в условиях длительной промышленной эксплуатации.



**Таблица 5**  
**Механические свойства металла МТО труб фронтального экрана НРЧ котла ТГМП-314А после 89 тыс. часов эксплуатации**

| Время эксплуатации, тыс.ч | Температура испытаний, °С | Предел прочности $\sigma_{в}$ , МПа | Предел текучести $\sigma_{т}$ , МПа | Относит. Удлинение, $\delta$ % |
|---------------------------|---------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| 21<br>(Опытные вставки)   | 20                        | 606–645                             | 450–508                             | 22,5–24,6                      |
| 89                        | 20                        | 623–692                             | 511–557                             | 21,1–20,7                      |
| Требования [2]            | 20                        | 490–637                             | не менее 372                        | не менее 21                    |

**Таблица 6**  
**Жаропрочные свойства металла труб из стали 12Х1МФ при  $T=540$  °С после стандартной термообработки (Н и О) и МТО**

| Нагрузка при испытаниях, МПа | Н и О                  |                                      | МТО                    |   |                                      |
|------------------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------|---|--------------------------------------|
|                              | время до разрушения, ч | относительное удлинение $\delta$ , % | время до разрушения, ч | увеличение времени до разрушения, х число раз | относительное удлинение $\delta$ , % |
| 160                          | 2003                   | 12,0                                 | 8352                   | 4,2   | 13,7                                 |
| 180                          | 950                    | 25,0                                 | 2727                   | 2,9   | 9,0                                  |
| 200                          | 425                    | 38,0                                 | 1643                   | 3,9   | 13,0                                 |
| 220                          | 109                    | 22,5                                 | 913                    | 8,4   | 10,0                                 |
| 240                          | 51                     | 23,5                                 | 270                    | 5,3   | 13,0                                 |

**Таблица 7**  
**Жаростойкость МТО труб панелей фронтального экрана НРЧ котла ТГМП-314А после длительной эксплуатации**

| Название образца             | Время эксплуатации, тыс.ч | Глубина коррозии, мм       |                 |                              |                 |  |                            |
|------------------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------|--|----------------------------|
|                              |                           | наружная поверхность трубы |                 | внутренняя поверхность трубы |                 | глубина коррозии (общее утонение стенки) | суммарная глубина коррозии |
|                              |                           | утонение                   | подокисный слой | утонение                     | подокисный слой |  |                            |
| Труба МТО                    | 89                        | –                          | 0,22            | –                            | 0,10            | 0,40                                     | 0,72                       |
| Труба НиО (расчетные данные) | 89                        | 0,71                       | –               | 0,13                         | –               | 0,84                                     | 0,84                       |

**Выводы**

• Исследованная дислокационная структура свидетельствует об отсутствии изменений в тонкой структуре. Стабильность структуры в процессе эксплуатации связана с развитием во времени системы труднопреодолимых препятствий для движущихся дислокаций в кристаллографической решетке стареющего твердого раствора.

• Показана стабильность упрочненного после МТО состояния в процессе эксплуатации при сохранении пластичности длительностью до 104 тыс. часов.

• Систематические периодические наблюдения за состоянием металла труб по-



казали, что в процессе эксплуатации дислокационная полигональная субструктура стали, обеспечивающая эффект упрочнения, остается стабильной.



### Список литературы

1. ТУ 14-3-1072-82. Трубы бесшовные холодно- и теплodeформированные из коррозионно-стойкой стали. – М: Министерство черной металлургии СССР, 1983. – 23 с.
2. Иванова В. С. Новые пути повышения прочности металлов / Иванова В. С., Гордиенко Л. К. – М.: Наука, 1964. – 118 с.
3. ТУ 14-3-460: 2009 / ТУ У 27.2-05757883-207:2009. Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов. – Днепр: ГП «НИТИ», 2009. – 49 с.
4. Векслер Е. Я. Субструктурное упрочнение котельных труб из стали 12Х1МФ / Е. Я. Векслер, И. П. Можаренко, З. Г. Фридман, В. А. Кочеткова, В. М. Чайковский, Г. Г. Пронина // Энергетика и электрификация. – 1986. – № 2. – С. 9–11.
5. Трусов Л. Г. Изменение свойств металла пароперегревательных труб из стали 12Х1МФ в процессе длительной эксплуатации / Трусов Л. Г., Миркина И. Л., Горошин М. Н. // Теплоэнергетика. – 1972. – № 6. – С. 8–14.
6. Gruzevich A. V. Efficiency of application of substructure strengthened tubes on heating surfaces of supercritical boiler blocks / Gruzevich A. V. // The Paton welding journal. – 2017. – № 10. – pp. 34–43.
7. Можаренко И. П. Структура и свойства котельных труб из сталей 12Х1МФ после механико-термической обработки. / Можаренко И. П., Долинская Л. А., Векслер Е. Я., Легавец Г. А., Гордиенко Л. К., Фридман З. Г. // Металловедение и термическая обработка. – 1976. – № 1. – С. 2–4.
8. РТМ 108.030.122-77. Котлы паровые стационарные сверхкритического давления. Методика расчета коррозионных потерь и температурного режима экранных труб. – С.-Пб.: Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И. И. Ползунова. – 1977 г. – 27 с.



### References

1. ТУ 14-3-1072-82 (1983) Truby besshovnyye kholodno- y teplodeformirovannyye iz korrozyon-nostoikoi staly [Seamless cold- and thermally deformed pipes from corrosion-resistant steel]. Moscow: Ministry of Ferrous Metallurgy [in Russian].
2. Ivanova, V. S. (1964) Novyye puti povysheniya prochnosti metallov [New ways to increase the strength of metals]. Moscow: Nauka. [in Russian].
3. ТУ 14-3-460: 2009 / ТУ У 27.2-05757883-207:2009 (2009) Truby stalnyye besshovnyye dlya parovykh kotlov i truboprovodov [Steel pipes Seamless for steam boilers and pipelines]. Dnepr: GP «NITI» [in Russian].
4. Veksler, E. Ya. (1986) Substrukturnoe uprochnenie kotelnykh trub iz stali 12H1MF [Substructural hardening of boiler pipes from 12H1MF steel]. Energetika i elektrifikatsiya, Vol. 2, pp. 9–11 [in Russian].
5. Trusov, L. G., Mirkina, I. L., Goroshin, M. N. (1972) Izmeneniye svoystv metalla paroperegrevatelnykh trub iz stali 12H1MF v protsesse dlitelnoy ekspluatatsii. [Changes in the properties of the metal of superheat pipes from 12H1MF steel in the course of prolonged operation]. Teploenergetika, Vol. 6, pp. 8–14 [in Russian].

6. *Gruzevich, A. V. (2017) Efficiency of application of substructure strengthened tubes on heating surfaces of supercritical boiler blocks. The Paton welding journal, Vol. 10, pp. 34–43 [in English].*
7. *Mozharenko, I. P., Dolinskaya, L. A., Veksler, E. Ya., Legavets, G. A., Gordienko, L. K., Fridman, Z. G. (1976) Struktura i svoystva kotelnykh trub iz staley 12H1MF posle mehaniko-termicheskoy obrabotki [The structure and properties of boiler pipes from 12H1MF steels after mechanical-thermal treatment]. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka, Vol. 1, pp. 2-4 [in Russian].*
8. *RTM 108.030.122-77 (1977) Kotly parovye stacionarnye sverhkriticheskogo davleniya. Metodika rascheta korrozionnykh poter i temperaturного rezhima ekrannykh trub [Steam boilers stationary supercritical pressure. Method of calculation of corrosion losses and temperature regime of screen tubes]. St. Petersburg: Scientific and Production Association for the Research and Design of Energy Equipment to them. I. I. Polzunova [in Russian].*

Поступила 14.03.2018

### **Вниманию авторов!**

Статьи, поступающие в редакцию, должны иметь название статьи, ФИО авторов, аннотации, ключевые слова на русском, украинском и английском языках, а также список литературы на английском языке, согласно международным требованиям. Объем статьи — не более **10 стр.**, рисунков — не более **5**.

Статьи подаются как на бумажном, так и электронном носителях. Для текстовых материалов желательно использовать формат **doc**. Для графических материалов — формат **jpeg**. Графические материалы необходимо сохранять в отдельных файлах. Фотографии, рисунки, графики и чертежи должны быть черно-белыми, четкими и контрастными.