

PACSnumbers: 06.20.fb, 44.90.+c, 61.66.Dk, 61.72.Ff, 61.72.Lk, 61.72.Mm, 81.40.Vw

Повышение эксплуатационной надёжности поверхностей нагрева блоков сверхкритического давления за счёт применения субструктурно упрочнённых труб

А. В. Грузевич^{*,**}

**Трипольская ТЭС,
Киевская область, Обуховский р-н,
08720 Украинка, Украина*

***Институт магнетизма НАН Украины и МОН Украины,
бульв. Акад. Вернадского, 36^б,
03142 Киев, Украина*

Представлены результаты исследований механико-термической обработки труб как эффективного метода повышения долговечности и надёжности работы энергетического оборудования. Обобщён опыт промышленной эксплуатации труб из механико-термически упрочнённой стали 12Х1МФ на поверхностях нагрева котлов сверхкритического давления. Показана возможность и эффективность применения данного метода на примере мощностей Трипольской ТЭС.

Ключевые слова: механико-термическая обработка, упрочнение стали, ресурс оборудования, субструктура, жаропрочность, жаростойкость.

Представлено результати досліджень механіко-термічного оброблення труб як ефективної методи підвищення довговічності та надійності роботи енергетичного обладнання. Узагальнено досвід промислової експлуатації труб з механіко-термічно зміцненої сталі 12Х1МФ на поверхнях на-

Corresponding author: Andriy Valeriyovych Gruzevych
E-mail: trip.imag@gmail.com

**TPS of Trypillia,
UA-08720 Ukrainka, Obukhov District, Kyiv Region, Ukraine*

***Institute of Magnetism under N.A.S. and M.E.S. of Ukraine,
36^b Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

Please cite this article as: A. V. Gruzevych, Increase of Operational Reliability of Heating Surfaces of Blocks of the Supercritical Pressure Due to Application of the Substructurally Hardened Pipes, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 39, No. 7: 929–947 (2017) (in Russian), DOI: 10.15407/mfint.39.07.0929.

гріву котлів надкритичного тиску. Показано можливість і ефективність застосування даної методи на прикладі потужностей Трипільської ТЕС.

Ключові слова: механіко-термічне оброблення, зміцнення сталі, ресурс обладнання, субструктура, жароміцність, жаротривкість.

The results of investigation of mechanical-thermal treatment of pipes as an effective method for the increase of durability and reliability of power equipment are presented. The experience of commercial operation of pipes manufactured from the mechanically and heat-hardened steel 12Kh1MF (DIN: 1.7715; WNr: 14 MoV6-3; BS: 1503-660-440) on the heating surfaces of the supercritical pressure boilers is generalized. Possibility and effectiveness of this method are shown on the example of capacities of Trypillia TPS.

Key words: mechanical-thermal treatment, steel hardening, durability, substructure, heat resistance.

(Получено 10 марта 2017 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Повышение надёжности работы поверхностей нагрева является одним из основных условий надёжной работы всего котлоагрегата.

Условия эксплуатации поверхностей нагрева в котлах мощных энергоблоков отличаются высокой коррозионной активностью среды при рабочих температурах, действием продуктов сгорания и других вредных факторов на поверхность труб, что влечёт ускоренный износ. Всё это определяет возросшие требования к надёжности и долговечности работы оборудования.

Одной из основных причин аварийных остановов энергоблоков большой единичной мощности являются повреждения труб поверхностей нагрева котлов. Так, выход из строя труб пароперегревателей, связанный с перегревами металла и ускоренным развитием ползучести, или типичные повреждения экранной системы, связанные с развитием коррозионно-термической усталости и газовой коррозии, происходят уже после 10–15 тысяч часов работы.

Актуальная задача обеспечения надёжности эксплуатации поверхностей нагрева котлов, блоков сверхкритического давления (СКД) рассматривается в работе с точки зрения применения труб из стали 12Х1МФ, упрочнённых методом механико-термической обработки (МТО).

Метод МТО является одним из наиболее эффективных современных способов субструктурного упрочнения сталей перлитного класса. Сущность метода заключается в деформировании металла после стандартной [1] термической обработки (нормализация и отпуск — Н и О) на небольшие обжатия выше площадки текучести и последующего полигонизационного отжига в дорекристаллизационном

интервале температур.

В настоящее время металлургическая промышленность Украины выпускает упрочнённые МТО трубы размером $\varnothing(32-42) \times (4-6)$ мм из стали 12Х1МФ по техническим условиям ТУ 14-3-1072 [2].

В данной работе рассмотрены результаты исследований МТО труб как метода для повышения долговечности и надёжности работы энергетического оборудования. Показана возможность и эффективность применения данного метода с целью увеличения ресурса работы энергетического оборудования на примере мощностей Трипольской ТЭС.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

В соответствии с принятой технологией, трубы предготового размера по [1] в состоянии после Н и О проходят деформирование на 10–15% и последующий отжиг при температуре 700–720°C с выдержкой 1,5 ч.

Дополнительная обработка не вносит изменений в соотношение основных структурных составляющих (бейнита, феррита, карбидной фазы), но приводит к изменению тонкой дислокационной структуры стали. Деформация обеспечивает введение в решётку стали дополнительного количества дислокаций, а последующий отжиг способствует их перераспределению, частичной аннигиляции и созданию термически устойчивой субструктуры. При этом происходит фрагментация зёрен, упорядочение субмикродфектов с образованием дислокационных стенок и формирование полигональной субструктуры, что даёт эффект упрочнения [3, 4].

Данные металлографических исследований труб из стали 12Х1МФ, выполненные на микро и субструктурном уровне, подтверждают эти представления [4].

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 объёме наследственных зёрен. В стали после МТО наблюдается чётко выраженная полигонизация структуры с образованием субграниц и дислокационных стенок [4].

Сравнение кратковременных механических характеристик стали после стандартной термообработки (Н и О) и МТО при нормальной и повышенных температурах в интервале 300–570°C показало устойчивое упрочнение металла труб МТО при достаточном уровне пластичности (табл. 1) [3, 4]. Так, при нормальной температуре упрочнение по пределу прочности составляет 19% и по пределу текучести — 27,5%. При повышенных температурах упрочнение по пределу прочности, в среднем, составляет 8,4% и по пределу текучести —

ТАБЛИЦА 1. Механические свойства металла труб из стали 12Х1МФ после стандартной термообработки (Н и О) и МТО. Приведены средние величины полученных механических характеристик металла.

TABLE 1. Mechanical properties of metal pipes manufactured from 12Х1МФ steel after standard heat treatment (normalizing and tempering—N and T) and mechanical-thermal treatment (МТТ). The average values of the obtained mechanical characteristics of the metal are shown.

T, °C	Н и О			МТО				
	Предел прочности σ_b , МПа	Предел текучести σ_t , МПа	Относительное удлинение δ , %	Предел прочности σ_b , МПа	Упрочнение, %	Предел текучести σ_t , МПа	Упрочнение, %	Относительное удлинение δ , %
	500	400	27,8	595	19,0	510	27,5	23,0
20	Требования ТУ 14-3-460 [3] не менее			Требования ТУ 14-3-1072 [4] не менее				
	450–650	280	21	490–637		372		21
300	510	410	19,0	570	12,0	500	22,0	17,0
400	545	440	21,0	590	8,3	520	18,2	17,0
450	490	360	26,0	530	8,2	450	29,0	20,0
540	420	310	28,0	455	8,3	424	36,8	19,0
550	407	345	26,3	444	9,1	404	17,1	22,3
570	374	285	25,0	390	4,3	370	29,8	20,0

25,5%. Величина относительного удлинения в исследованном интервале температур составляет 17–23%.

Важно отметить более высокую степень упрочнения МТО стали по пределу текучести, что обеспечивает стабильность созданного упрочнённого состояния в процессе длительной эксплуатации труб при напряжениях, ниже площадки текучести, т.е. при номинальных рабочих напряжениях.

Жаропрочные свойства металла труб из упрочнённой стали 12Х1МФ определялись по результатам испытаний на длительную прочность, по сопротивлению длительному разрушению при 540°C и напряжениях в интервале 160–240 МПа. В равных условиях испытывались образцы стандартных [3] и МТО [2] труб (табл. 2) [5]. По данным испытаний оценивалось увеличение времени до разрушения МТО образцов по отношению к стандартным образцам.

Приведённые в таблице 2 данные свидетельствуют о повышенном (в среднем в 5 раз) сопротивлении длительному разрушению упрочнённой МТО стали даже при статических напряжениях, в 2–3 раза превышающих номинальные эксплуатационные рабочие напряже-

ТАБЛИЦА 2. Жаропрочные свойства металла труб из стали 12Х1МФ при 540°С после стандартной термообработки (Н и О) и МТО [5].

TABLE 2. Heat-resistant properties of metal pipes from 12Х1МФ steel at 540°С after standard heat treatment (N and T) and mechanical-thermal treatment [5].

Нагрузка при испытании, МПа	Н и О		МТО		
	Время до разрушения, ч	Относительное удлинение δ , %	Время до разрушения, ч	Увеличение времени до разрушения, число раз	Относительное удлинение δ , %
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

ния энергооборудования.

Таким образом, комплексное обследование структуры, субструктуры, кратковременных и длительных механических свойств упрочнённой МТО теплоустойчивой трубной стали 12Х1МФ показало перспективность применения этого метода упрочнения для повышения надёжности труб поверхностей нагрева котлов высокого и сверхвысокого давления.

В работе приводятся результаты длительной промышленной эксплуатации субструктурно-упрочнённых труб из стали 12Х1МФ на конвективном пароперегревателе низкого давления (КПП н/д) котла ТПП-210А и панелях нижней радиационной части (НРЧ) котлов ТГМП-314А блоков 300 МВт.

2.1. Длительная промышленная эксплуатация труб МТО на пароперегревателе КПП н/д пылеугольных котлов ТПП-210А блока 300 МВт

Опыт применения субструктурно-упрочнённых труб из стали 12Х1МФ на поверхностях нагрева энергетических котлов имеет свою предысторию.

Впервые упрочнённые МТО трубы в виде прямых опытных вставок были установлены на выходной ступени пароперегревателя высокого давления КПП в/д котла БКЗ 210-140 ПТ с рабочими параметрами пара: температурой 550°С и давлением 14,0 МПа [3]. В соответствии с проектом КПП в/д котла был изготовлен из аустенитной стали 12Х18Н12Т с типоразмером трубы $\varnothing 32 \times 5,0$ мм.

Условия эксперимента намеренно ужесточались. Наряду с опытными вставками номинального типоразмера на КПП в/д были установлены вставки с утонённой стенкой трубы типоразмера $\varnothing 32 \times 4,0$ мм.

Упрочнённые МТО вставки из стали 12Х1МФ отработали на пароперегревателе 51382 часов без повреждений и были демонтированы при ремонтных операциях и реконструкции оборудования.

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

Исследование стабильности созданного упрочнённого состояния в процессе длительной эксплуатации опытных вставок выявило, что дислокационные субграницы, стенки дислокаций и фрагментация структуры сохраняются (рис. 1). При этом происходит некоторое уширение субграниц металла за счёт притока дислокаций и выделений по границам дисперсных частиц карбидной фазы. Следует отметить, что уменьшение толщины стенки до 4 мм не активизирует эти процессы, что можно объяснить меньшими градиентами температуры по сечению утонённой трубы.

Одновременно наблюдается закономерный процесс дифференциации бейнитной и феррито-перлитной микроструктуры стали за счёт 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 тысячи часов эксплуатации остаточная деформация труб МТО вставок не превышала 0,63%.

Для подтверждения стабильности прочностных характеристик и пластичности МТО труб из стали 12Х1МФ приводятся данные кратковременных механических испытаний вырезов из опытных вставок $\varnothing 32 \times 4,0$ мм КПП в/д котла ПК-41 после различных сроков эксплуатации (табл. 3).

Как видно из приведённых данных, в первый период эксплуатации до 5000 часов происходит частичный возврат упрочнённого состояния стали на 5–4% по пределу прочности, а далее снижение прочности замедляется и составляет 3,6–2,7%.

Разупрочнение стали по пределу текучести незначительно и за всё исследованное время эксплуатации практически не превышает 1%. При этом пластичность стали во всём исследованном интервале времени остаётся на сдаточном уровне.

Положительные результаты эксплуатационного опробования упрочнённой МТО стали 12Х1МФ на опытных вставках дали основание для промышленного внедрения МТО труб вместо стандарт-



Рис. 1. Тонкая структура металла МТО трубы после 51382 часов эксплуатации на КПП в/д. Увеличение $\times 30000$.

Fig. 1. Fine structure of mechanical-thermal processed metal pipes after 51382 hours operation at the high-pressure convective superheater. Magnification— $\times 30000$.

ных материалов на пароперегревателях котлов ВД и СКД.

На двух котлах ТПП-210А блока 300 МВт из МТО труб стали 12Х1МФ $\varnothing 42 \times 4,0$ мм [4] были смонтированы 100% (384 змеевиков) 4-х ниток пароперегревателя КПП н/д II ступени. Рабочие параметры узла: температура пара 545°C и давление 3,7 МПа.

Ранее на пароперегревателе котла, в соответствии с проектом, были установлены трубы из стали 12Х2МФСР [1], что не обеспечивало надёжной эксплуатации узла.

Общее число прямых и гнутых элементов из труб МТО, установленных на пароперегревателе, составляет 3840.

При изготовлении змеевиков пароперегревателя на заводе затруднений с гибкой и сваркой труб не наблюдалось.

К настоящему времени трубы МТО отработали на КПП н/д II ступени котла 65374 и 68095 часов (корпуса котла Б и А соответственно). Эксплуатация труб проходит, практически, безаварийно. За время эксплуатации на КПП н/д II ступени произошёл 1 случай повреждения из-за свища в сварном соединении, что составляет

ТАБЛИЦА 3. Механические свойства металла опытных вставок из МТО стали 12Х1МФ после различных сроков эксплуатации на КПП в/д.

TABLE 3. The mechanical properties of the metal of experimental inserts from mechanical-thermal treated 12Х1МФ steel after various periods of operation at the high-pressure convective superheater.

Время эксплуатации, ч	Температура испытаний 20°С			Температура испытаний 570°С		
	Предел прочности σ_b , МПа	Предел текучести σ_t , МПа	Относительное удлинение δ , %	Предел прочности σ_b , МПа	Предел текучести σ_t , МПа	Относительное удлинение δ , %
Исходное состояние	630	542	22,1	396	364	30,2
4000	600	476	29,5	379	347	31,0
7000	585	455	28,5	355	314	29,5
15000	582	451	29,5	344	303	29,0
23000	565	459	31,0	294	286	29,4

0,03% от числа сварных соединений МТО труб. При гидравлических опрессовках котла после плановых ремонтов было отбраковано 9 труб на различных нитках пароперегревателя также по причине свищей в ремонтных сварных соединениях, что составляет 2,8% от общего числа сварных стыков.

Для сопоставления можно привести данные по повреждениям стандартных труб КПП н/д II ступени котла из стали 12Х2МФСР за такой же предыдущий период эксплуатации. За это время аварийно и по результатам осмотров было отбраковано 38 труб, что составляет 10%.

В процессе эксплуатации производится систематический мониторинг состояния металла упрочнённых труб в периоды штатных остановов на текущие и капитальные остановки котла, включающий осмотры, измерения остаточной деформации ползучести, определения толщины стенки и коррозионного износа металла труб.

В будущем планируется произвести контрольные вырезки для исследования структурных изменений и уровня механических свойств, жаростойкости и жаропрочности металла в процессе длительной эксплуатации.

2.2. Длительная промышленная эксплуатация труб МТО на нижней радиационной части газомазутных котлов ТГМП-314А блоков 300 МВт

Положительные результаты опробования и длительной промыш-

ленной эксплуатации МТО труб на пароперегревателях котлов ВД и СКД послужили основанием для расширения эксперимента по использованию субструктурно упрочнённых труб на энергооборудовании.

Безусловный интерес представляло исследование возможности применения упрочнённых труб в зонах наибольшего техногенного риска на котлах СКД, которыми являются экраны нижней радиационной части топки. Как показал опыт эксплуатации стандартных [1] труб из стали 12Х1МФ, массовые повреждения экранов наблюдаются уже в первый период эксплуатации. Характер повреждений, практически, однотипен для пылеугольных и газомазутных блоков. Вначале происходит утонение стенки лобовой части трубы за счёт термоусталостного коррозионного износа или наружной газовой коррозии. Далее, утонённые трубы разрушаются вследствие развития ускоренной ползучести в условиях повышенных рабочих напряжений.

На первом этапе эксперимента опытные прямые вставки упрочнённых труб были установлены на панелях боковых экранов 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 МТО труб из стали 12Х1МФ $\varnothing 38 \times 6,0$ мм и $\varnothing 32 \times 6,0$ мм.

Рабочие параметры узла: температура среды 400–389°C, давление 30 МПа. Температура стенки трубы — 460°C.

Следует отметить, что на котлах ТПП-210А опытные упрочнённые вставки были установлены без ошиповки и, таким образом, эксплуатировались в условиях более тяжёлых, чем стандартные ошипованные трубы НРЧ [3].

Результаты исследования [6] металла вырезок из трёх опытных вставок боковой стенки НРЧ котла ТПП-210А после 21 тысячи часов эксплуатации показали, что деформация и утонение труб за счёт коррозии не наблюдается (рис. 2). Выявлена начальная стадия развития коррозионно-термической усталости металла со стороны наружной поверхности трубы (рис. 3).

Эксплуатация труб не сказалась на структуре и тонкой дислокационной структуре стали даже в наиболее напряжённой части сечения — на огневой стороне трубы. Состояние микроструктуры упрочнённой трубы по всему сечению однородно, со слабыми признаками дифференциации (рис. 4, а, б). Исследование дислокационной структуры [7] свидетельствует об отсутствии тонких структурных изменений по сечению трубы (рис. 4, в, г). Плотность дислокаций, равномерно распределённых в ферритных зёрнах, составляет $(0,6-0,8) \cdot 10^{-8}$ см⁻², что соответствует исходному состоянию.

Однородность структурного состояния по сечению МТО труб со-

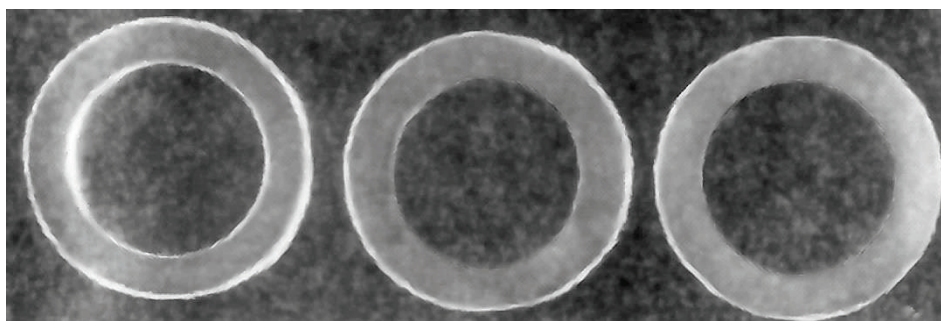


Рис. 2. Поперечное сечение упрочнённых МТО труб НРЧ после 21 тысячи часов эксплуатации.

Fig. 2. Cross-section of hardened mechanical-thermal treated tubes of lower radiant section after 21 thousand hours operation.

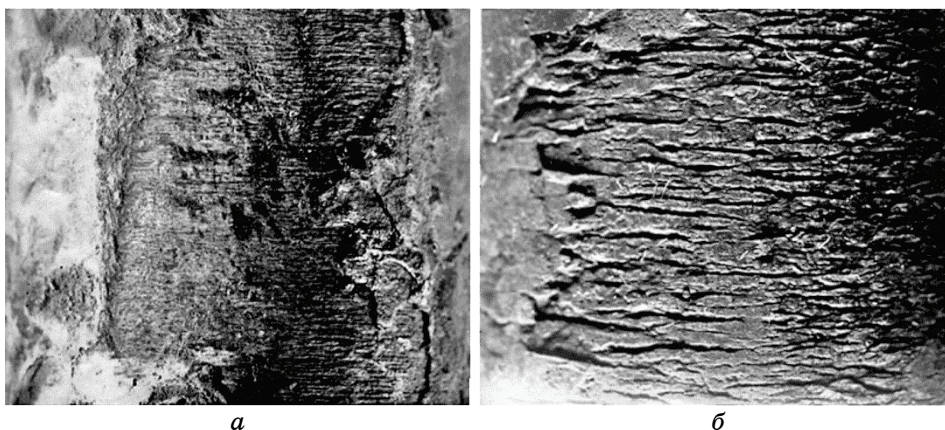


Рис. 3. Наружная поверхность огневой стороны стандартной (а) и упрочнённой (б) труб НРЧ после 21 тысячи часов эксплуатации.

Fig. 3. Exterior surface of the burning side of the standard (a) and hardened (b) pipes of lower radiant section after 21 thousand hours operation.

гласуется с уровнем прочностных и пластических свойств стали, которые практически одинаковы на огневой и тыльной части труб. Определение механических характеристик металла при нормальной и высоких температурах после 21 тысяч часов эксплуатации показало стабильность упрочнённого состояния при сохранении пластичности стали (табл. 4).

Опыт безаварийной работы МТО вставок на НРЧ котлов позволил перейти от эксплуатационного опробования отдельных труб к опробованию блок-панели на заднем экране НРЧ котла ТГМП-314А,

полностью изготовленной в заводских условиях из 41 упрочнённой трубы (1/2 штатной панели НРЧ).

При выполнении технологических операций по гибке упрочнённых труб, контактной и ручной электродуговой сварке труб МТО, а также композитных стыков труб МТО со стандартными трубами, трудностей не возникало.

Эксплуатация опытной блок-панели проходит безаварийно. Периодическое техническое диагностирование панели в процессе эксплуатации показало хорошее состояние металла. Не обнаружено следов интенсивной наружной коррозии и утонения труб, недопустимая остаточная деформация труб отсутствует. Гнутые участки труб и сварные стыки также в удовлетворительном состоянии, что свидетельствует о наследовании упрочнённого состояния стали на

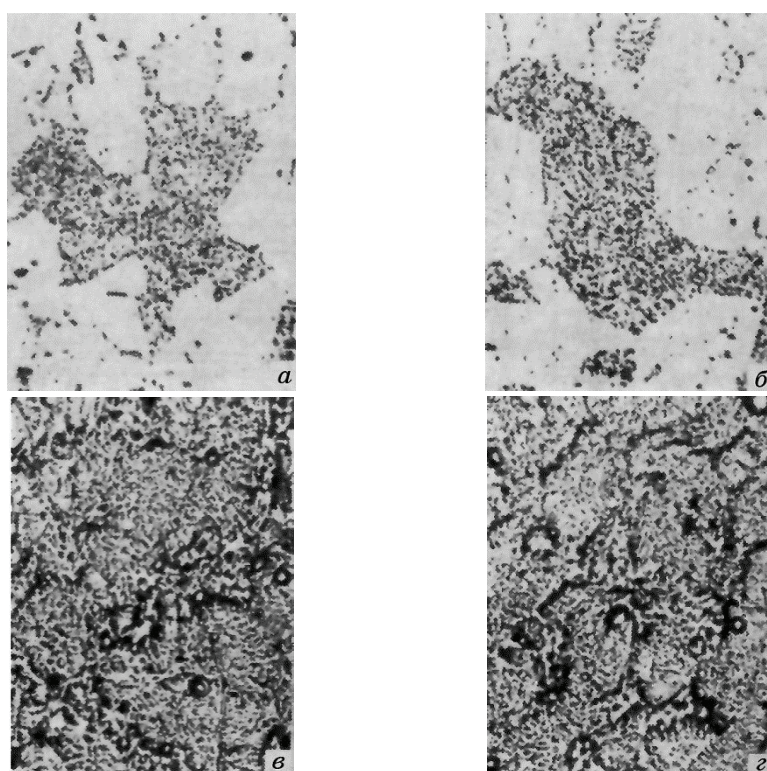


Рис. 4. Микроструктура (а, б) и дислокационная структура (в, г) упрочнённой трубы НРЧ после 1 тысячи часов эксплуатации: огневая сторона трубы (а, в), тыльная сторона трубы (б, г). Увеличение $\times 1000$.

Fig. 4. Microstructure (а, б) and dislocation structure (в, г) of the hardened pipes of lower radiant section after 1 thousand hours operation: burning side of pipe (а, в), rear side of pipe (б, г). Magnification— $\times 1000$.

гибах труб и в сварных соединениях.

Срок эксплуатации опытных деталей экранов НРЧ котлов ТПП-210А и ТГМП-314А составил 28–31 тысяч часов.

Анализ результатов проведенного эксплуатационного опробования подтвердил стабильность упрочнённого состояния МТО труб и стал достаточным основанием для их промышленного внедрения на НРЧ котлов блоков СКД вместо стандартных материалов.

На двух котлах ТГМП-314А блоков 300 МВт было установлено 46% панелей из МТО труб (13,5 панелей) на фронтном, заднем и подовом экранах НРЧ.

Установленные панели являлись панелями заводского изготовления, соответствующими требованиям [2]. Общее число установленных на панелях гнутых и прямых элементов труб МТО составляет 3500 единиц.

Срок промышленной эксплуатации труб МТО на панелях НРЧ котлов ТГМП-314 к настоящему времени составил 96–104 тысячи часов, в том числе, опытных вставок, оставленных в работе — 137,6 тысяч часов.

Эксплуатация труб проходит практически безаварийно.

За проанализированное время работы оборудования на одном из котлов ТГМП-314А в зоне горелок произошло повреждение трубы МТО по причине перегрева (менее 0,03% от числа установленных МТО труб), что было связано с неудовлетворительной работой горе-

ТАБЛИЦА 4. Механические свойства металла опытных МТО вставок боковых экранов НРЧ котла ТПП-210А после 21 тысячи часов эксплуатации.

TABLE 4. Mechanical properties of the metal of the experimental mechanical-thermal treated inserts of the side shields of the ТПП-210А lower radiant section after 21 thousand hours operation.

№ вставки	Место вырезки образцов (сторона трубы)	Температура испытаний 20°C			Температура испытаний 550°C		
		Предел прочности σ_b , МПа	Предел текучести σ_t , МПа	Относительное удлинение δ , %	Предел прочности σ_b , МПа	Предел текучести σ_t , МПа	Относительное удлинение δ , %
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
3	Тыльная	608	460	24,4	404	374	21,6
	Огневая	606	450	24,2	390	360	21,4

лочного аппарата котла и потребовало замены и реконструкции аппарата. При плановых осмотрах, по внешнему виду (наружная коррозия, деформация трубы и т.п.) было отбраковано 54 трубы МТО, что составляет 1,5% от числа установленных труб.

В процессе эксплуатации производились систематические периодические наблюдения за состоянием металла труб по месту и на контрольных вырезках.

Далее приводятся данные по исследованию вырезки одной из упрочнённых МТО труб $\varnothing 32 \times 6,0$ мм фронтальной панели НРЧ котла ТГМП-314 после 89 тысяч часов эксплуатации.

При исследовании вырезки деформация трубы по диаметру не выявлена.

Состояние наружной и внутренней поверхности трубы изучалось после отмывки от отложений и специального теплового травления.

На наружной поверхности лобовой части трубы имеется сетка поперечных (кольцевых) коррозионно-усталостных трещин (рис. 5, а). На внутренней поверхности трубы выявлены одиночные коррозионные язвы диаметром до 0,5 мм.

Для определения характера и степени коррозионных повреждений производилось металлографическое исследование продольного сечения трубы. Показано, что от наружной поверхности в сечение развиваются транскристаллитные тупые трещины, заполненные окислами, на глубину до 0,22 мм (рис. 5, б). Коррозионные повреждения внутренней поверхности имеют вид язв округлой формы глубиной до 0,1 мм, также заполненных окислами.

Таким образом, суммарная глубина коррозионно-повреждённого

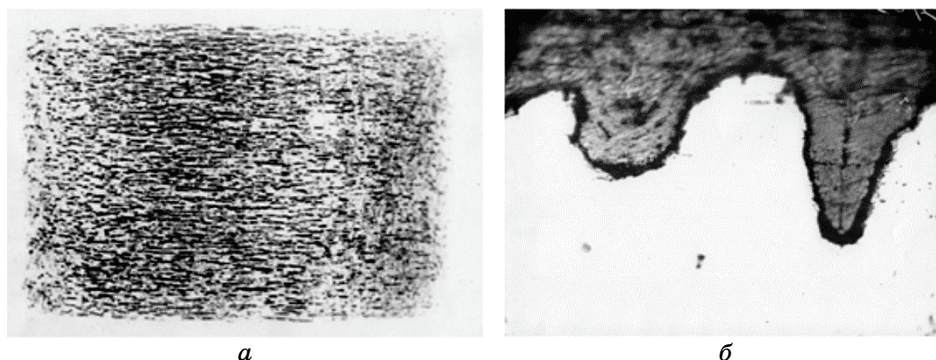


Рис. 5. Коррозионно-усталостные трещины на наружной поверхности (а) и в сечении (б) упрочнённой трубы НРЧ после 89 тысяч часов эксплуатации. Увеличение $\times 100$.

Fig. 5. Corrosion fatigue cracks on the outer surface (a) and in the cross-section (b) of lower radiant section after 89 thousand hours operation. Magnification— $\times 100$.

слоя сечения трубы составляет 0,32 мм.

Глубина коррозии МТО трубы оценивалась по суммарному износу наружной и внутренней поверхности, выраженному максимальной величиной утонения стенки, которая составила 6,7% или 0,4 мм.

Для сопоставления производился расчёт [8] допустимой глубины коррозии за тот же срок службы стандартной трубы, как суммарной величины износа внутренней поверхности в среде СКД и наружной поверхности в среде продуктов сгорания сернистых мазутов.

Как видно из приведённых в табл. 5 данных, развитие коррозии упрочнённых труб идёт замедленно и глубина коррозии после 89 тысяч часов оказывается в 2 раза меньше предельно допустимой [8]. Общий объём коррозионных потерь металла МТО труб можно рассматривать как сумму глубины коррозии и глубины коррозионно-повреждённых слоёв. Даже и в этом случае, с учётом коррозионно-повреждённых подокисных слоёв сечения, суммарная глубина коррозии трубы МТО ниже допустимой для стандартной трубы из стали 12Х1МФ.

Приведённые данные свидетельствуют о повышенной жаростойкости стали 12Х1МФ после МТО в условиях длительной промышленной эксплуатации.

Существенных изменений микроструктуры металла вырезки из трубы МТО после 89 тысяч часов эксплуатации не выявлено. Структура состоит из достаточно плотных бейнитных участков,

ТАБЛИЦА 5. Жаростойкость МТО труб панелей фронтального экрана НРЧ котла ТГМП-314А после длительной эксплуатации.

TABLE 5. Heat resistance of mechanical-thermal treated pipes of panels of the front screen of the ТГМП-314А lower radiant section after a long operation.

Тип образца	Время эксплуатации, тыс. часов	Глубина коррозии, мм					Суммарная глубина коррозии
		Наружная поверхность трубы		Внутренняя поверхность трубы		Глубина коррозии (общее утонение стенки)	
		Утонение	Подокисный слой	Утонение	Подокисный слой		
Труба после МТО	89		0,22		0,10	0,40	0,72
Труба после Н и О (расчётные данные)	89	0,71		0,13		0,84	0,84

феррита и обособленных карбидов, расположенных по границам зёрен.

В объёме ферритных зёрен встречаются одиночные дисперсные карбиды (рис. 6, *a*). Подобная структура может быть отнесена к «сдаточной» по шкале [1] для стали 12Х1МФ после Н и О.

Сравнение состояния исследованной трубы с микроструктурой труб опытных вставок НРЧ после 21 тысячи часов эксплуатации показывает их полную идентичность.

Исследование дислокационной структуры стали показало равномерное распределение фигур травления в поле феррита с плотностью $(0,8-0,9) \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-2}$ (рис. 6, *б*), что незначительно выше уровня плотности после 21 тысячи часов эксплуатации. Выявлены участки регулярного построения фигур травления с фрагментированной структурой отдельных зёрен (рис. 6, *б*), что свидетельствует о стабильности полигональной структуры МТО труб в процессе длительной эксплуатации.

Соответственно не произошло существенных изменений кратковременных механических свойств металла трубы (табл. 6) по срав-

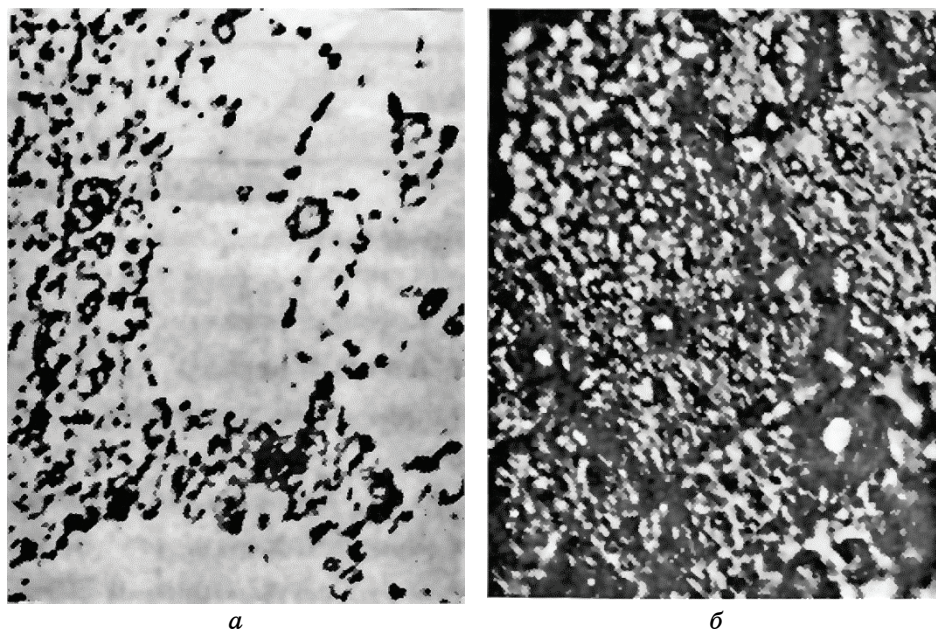


Рис. 6. Микроструктура (*a*) и дислокационная структура (*б*) упрочнённой трубы НРЧ после 89 тысяч часов эксплуатации. Увеличение $\times 1000$.

Fig. 6. Microstructure (*a*) and dislocation structure (*b*) of the hardened pipes of lower radiant section after 89 thousand hours operation. Magnification— $\times 1000$.

ТАБЛИЦА 6. Механические свойства металла МТО труб фронтového экрана НРЧ котла ТГМП-314А после 89 тысяч часов эксплуатации.

TABLE 6. Mechanical properties of mechanical-thermal treated pipes of the front screen of the ТГМП-314А lower radiant section after 89 thousand hours operation.

Время эксплуатации, тыс. часов	Температура испытаний, °С	Предел прочности σ_b , МПа	Предел текучести σ_s , МПа	Относительное удлинение δ , %
21 (опытные вставки)	20	606–645	450–508	22,5–24,6
89	20	623–692	511–557	21,1–20,7
Требования [4]	20	490–637	не менее 372	не менее 21

нению с состоянием упрочнённых труб после 21 тысячи часов эксплуатации. Отмечается лишь снижение на 3,9% величины относительного удлинения, однако механические характеристики металла трубы после 89 тысяч часов эксплуатации остаются на уровне требований [2].

Остаточный ресурс металла МТО трубы после 89 тысяч часов эксплуатации был оценён по уровню накопленной микроповреждённости стали, которая связана с процессами зарождения и роста пор и микротрещин [9, 10]. Интегральной оценкой изменений, являющихся результатом этих процессов, служит величина накопленной поврежденности ω [11]. Образцы для определения объёмной плотности материала были взяты из лобовой части трубы.

Величина интегральной поврежденности ω определялась как отношение удельного объёма пор в стали в момент исследования (89 тысяч часов) к объёму пор в момент разрушения. Для расчёта остаточного ресурса использовалась эмпирическая зависимость относительного времени до разрушения от поврежденности, полученной экспериментально по плотности (табл. 7).

Как видно из таблицы, плотность металла МТО трубы после 89 тысяч часов эксплуатации оказалась близкой к эталонной плотности стандартной стали в исходном состоянии.

Таким образом, процесс накопления поврежденности МТО стали во времени эксплуатации идёт заторможено, что свидетельствует о стабильности фрагментарной субструктуры упрочнённого состояния, в которой полигональные границы препятствуют продвижению дислокаций и образованию новых микродефектов в объёме кристаллической решётки. Фактическая накопленная микроповрежденность металла МТО трубы минимальна и остаточный ресурс после 89 тысяч часов эксплуатации остаётся на уровне расчётного, т.е. не менее 100 тысяч часов.

ТАБЛИЦА 7. Расчёт остаточного ресурса по микроповреждённости металла трубы МТО фронтного экрана НРЧ котла ТГМП-314А после 89 тысяч часов эксплуатации.

TABLE 7. Calculation of the residual life using the microdamage of the metal of the mechanical-thermal treated pipe from the front screen of the ТГМП-314А lower radiant section after 89 thousand hours of operation.

Объект исследования	Время эксплуатации, тыс. часов	Плотность, г/см ³	Повреждённость, ω	Остаточный ресурс, тыс. часов
МТО труба фронтного экрана НРЧ	89	7,831	до 0,1	не менее 100
Сталь 12Х1МФ после Н и О [11, 12].	Исходное состояние	7,835	0	не менее 100

Полученные результаты промышленной эксплуатации МТО труб из стали 12Х1МФ на НРЧ котлов СКД подтверждают стабильность упрочнённого после МТО состояния и сохранение эксплуатационной надёжности стали в течение длительных сроков службы.

3. ВЫВОДЫ

1. Систематические периодические наблюдения за состоянием металла труб показали, что в процессе эксплуатации дислокационная полигональная субструктура стали, обеспечивающая эффект упрочнения, остаётся стабильной. Соответственно не выявлены существенные изменения механических, жаропрочности и жаростойкости стали. Недопустимое утонение стенки труб за счёт наружной коррозии не установлено. Сварные соединения труб МТО, выполненные контактной и ручной сваркой, в удовлетворительном состоянии. Накопление микроповреждённости МТО стали идёт замедленно и остаточный ресурс металла труб после длительной эксплуатации сохраняется на уровне расчётного — не менее 100000 часов.

2. Обобщён опыт промышленной эксплуатации труб из упрочнённой МТО стали 12Х1МФ на поверхностях нагрева котлов СКД. Показана стабильность упрочнённого после МТО состояния в процессе эксплуатации, длительностью до 104 тысяч часов. Повреждения МТО труб за указанный срок эксплуатации не превышают 0,1% от общего количества установленных.

3. Положительный опыт длительной промышленной эксплуатации упрочнённых МТО труб из стали 12Х1МФ на поверхностях нагрева блоков СКД свидетельствует о технической и экономической целе-

сообразности использования таких труб в энергетике, что обеспечивает увеличение долговечности ответственных узлов энергооборудования более чем в 5–6 раз и решает актуальную задачу повышения их эксплуатационной надёжности.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Технические условия ТУ 14-3-460: 2009/ТУ У 27.2-05757883-207:2009. *Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов.*
2. Технические условия ТУ 14-3-1072 -82. *Трубы стальные бесшовные холоднодеформированные механико-термически обработанные из стали 12Х1МФ для паровых котлов и трубопроводов.*
3. Л. К. Гордиенко, Е. Я. Векслер, В. М. Чайковский, И. П. Можаренко, А. Л. Горбачев, В. С. Дворниченко, *Энергетика и электрификация*, № 3: 21 (1981).
4. Е. Я. Векслер, И. П. Можаренко, З. Г. Фридман, В. А. Кочеткова, В. М. Чайковский, Г. Г. Пронина, *Энергетика и электрификация*, № 2: 9 (1986).
5. И. П. Можаренко, Л. А. Долинская, Е. Я. Векслер, Г. А. Легавец, Л. К. Гордиенко, З. Г. Фридман, *Металловедение и термическая обработка металлов*, № 1: 2 (1976).
6. Е. Я. Векслер, И. П. Можаренко, В. М. Чайковский, А. Л. Горбачев, Л. Л. Гриценко, *Энергетик*, № 5: 22 (1980).
7. Е. Я. Векслер, *Теплоэнергетика*, № 10: 61 (1972).
8. *Руководящий технический материал РТМ 108.030.122-77. Котлы паровые стационарные сверхкритического давления. Методика расчёта коррозионных потерь и температурного режима экранных труб* (Минэнергомаш: 1977).
9. Е. Я. Векслер, И. В. Замекула, В. Ю. Толстов, Е. В. Семешко, *Энергетика та електрифікація*, № 5: 31 (2009).
10. Е. Я. Векслер, И. В. Замекула, В. Ю. Толстов, Е. В. Семешко, *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, № 1: 23 (2010).
11. А. В. Желдубовский, А. Т. Сердитов, Ю. В. Ключников, П. В. Кондрашев, Д. А. Дурницкий, *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 63, № 3/7: 24 (2013).

REFERENCES

1. Tekhnicheskie Usloviya TU 14-3-460: 2009/TU U 27.2-05757883-207:2009. *Truby Stal'nye Besshovnye dlya Parovykh Kotlov i Truboprovodov* [Technical Specifications TU 14-3-460: 2009/TU U 27.2-05757883-207:2009. Seamless Steel Pipes for Steam Boilers and Pipelines] (in Russian).
2. Tekhnicheskie Usloviya TU 14-3-1072 -82. *Truby Stal'nye Besshovnye Kholodnodeformirovannye Mekhaniko-Termicheski Obrabotannye iz Stali 12Kh1MF dlya Parovykh Kotlov i Truboprovodov* [Technical Specifications TU 14-3-1072 -82. Seamless Steel Pipes from Cold-Deformed Mechanically-Thermally Treated 12Kh1MF Steel for Steam Boilers and Pipelines] (in Russian).

3. L. K. Gordienko, E. Ya. Veksler, V. M. Chaykovskiy, I. P. Mozhareno, A. L. Gorbachev, and V. S. Dvornichenko, *Energetika i Elektrifikatsiya*, No. 3: 21 (1981) (in Russian).
4. E. Ya. Veksler, I. P. Mozhareno, Z. G. Fridman, V. A. Kochetkova, V. M. Chaykovskiy, and G. G. Pronina, *Energetika i Elektrifikatsiya*, No. 2: 9 (1986) (in Russian).
5. I. P. Mozhareno, L. A. Dolinskaya, E. Ya. Veksler, G. A. Legavets, L. K. Gordienko, and Z. G. Fridman, *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov*, No. 1: 2 (1976) (in Russian).
6. E. Ya. Veksler, I. P. Mozhareno, V. M. Chaykovskiy, A. L. Gorbachev, and L. L. Gritsenko, *Energetik*, No. 5: 22 (1980) (in Russian).
7. E. Ya. Veksler, *Teploenergetika*, No. 10: 61 (1972) (in Russian).
8. *Rukovodyashchiy Tekhnicheskiy Material RTM 108.030.122-77. Kotly Parovye Statsionarnye Sverkhkriticheskogo Davleniya. Metodika Rascheta Korrozionnykh Poter' i Temperaturnogo Rezhima Ekrannykh Trub* [Guidance Material RTM 108.030.122-77. Steam Stationary Supercritical Pressure Boilers. Method for Calculation of Corrosion Losses and Temperature Conditions of Screen Tubes] (Minenergomash: 1977) (in Russian).
9. E. Ya. Veksler, I. V. Zamekula, V. Yu. Tolstov, and E. V. Semeshko, *Energetika ta Elektrifikatsiya*, No. 5: 31 (2009) (in Ukrainian).
10. E. Ya. Veksler, I. V. Zamekula, V. Yu. Tolstov, and E. V. Semeshko, *Tekhnicheskaya Diagnostika i Nerazrushayushchiy Kontrol'*, No. 1: 23 (2010) (in Russian).
11. A. V. Zheldubovskiy, A. T. Serditov, Yu. V. Klyuchnikov, P. V. Kondrashev, and D. A. Durnitskiy, *Vostochno-Evropeyskiy Zhurnal Peredovykh Tekhnologiy*, **63**, Nos. 3/7: 24 (2013) (in Russian).