

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СУБСТРУКТУРНО-УПРОЧНЕННЫХ ТРУБ НА ПОВЕРХНОСТЯХ НАГРЕВА БЛОКОВ КОТЛОВ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

А. В. ГРУЗЕВИЧ

Институт магнетизма НАН Украины и МОН Украины.
03142, г. Киев, бульв. Акад. Вернадского, 36, б. E-mail: trip.imag@gmail.com

Представлены результаты исследований механико-термической обработки труб как эффективного метода повышения долговечности и надежности работы энергетического оборудования. Обобщен опыт промышленной эксплуатации труб из механико-термически упрочненной стали 12Х1МФ на поверхностях нагрева котлов сверхкритического давления. Показана возможность и эффективность применения данного метода на примере мощностей Трипольской ТЭС. Библиогр. 11. табл. 7, рис. 7.

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

Повышение надежности работы поверхностей нагрева является одним из основных условий надежной работы всего котлоагрегата.

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

Одной из основных причин аварийных остановов энергоблоков большой единичной мощности является повреждение 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 тыс. ч. работы.

Актуальная задача обеспечения надежности эксплуатации поверхностей нагрева котлов, блоков сверхкритического давления (СКД) рассматривается в работе с точки зрения применения труб из стали 12Х1МФ, упрочненных 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 (Н) и отпуск (О)) на небольшие обжаты выше площадки текучести и

последующего полигонизационного отжига в до-рекристаллизационном интервале температур.

Металлургическая промышленность Украины выпускала упрочненные МТО трубы диаметром 32...42 × 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 надежности работы энергетического оборудования. Показана возможность и эффективность применения данного метода с целью увеличения ресурса работы энергетического оборудования на примере мощностей Трипольской ТЭС.

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 °С 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 решетку стали дополнительного количества дислокаций, а последующий отжиг способствует их перераспределению, частичной аннигиляции и созданию термически устойчивой субструктуры. При этом происходит фрагментация зерен, упорядочение субмикродоменов с образованием дислокационных стенок и формирование полигональной субструктуры, что дает эффект упрочнения [3, 4].

Данные металлографических исследований труб из стали 12Х1МФ, выполненные на микро-

Таблица 1. Механические свойства* металла труб из стали 12Х1МФ после стандартной термообработки (Н и О) и МТО

T, °C	Н и О			МТО				
	$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{т}$, МПа	δ , %	$\sigma_{в}$, МПа	% _{упр.}	$\sigma_{т}$, МПа	% _{упр.}	δ , %
20	500	0	27,8	595	19,0	510	27,5	23,0
	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
0	545	0	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	4	9,1	0	17,1	22,3
570	374	285	25,0	390	4,3	370	29,8	20,0

* В таблице приведены средние величины полученных механических характеристик металла.

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 объеме наследственных зерен. В стали после МТО наблюдается четко выраженная полигонизация структуры с образованием субграниц и дислокационных стенок (рис. 1) [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 после 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 25,5 %. Величина относительного удлинения в исследованном интервале температур составляет 17...23 %.

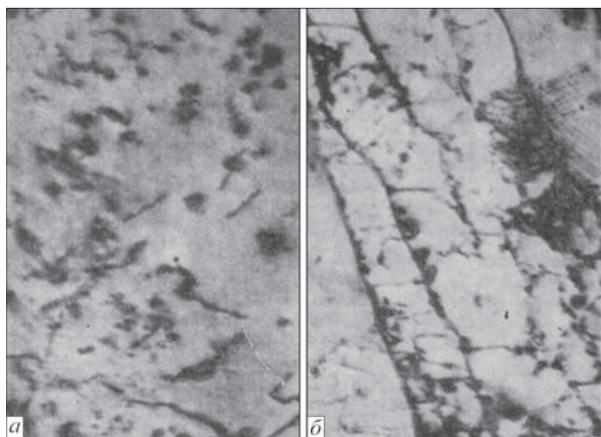


Рис. 1. Тонкая структура (×30000) металла труб из стали 12Х1МФ: а — после нормализации с отпуском; б — после МТО

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

Жаропрочные свойства металла труб из упрочненной 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 после МТО [2] труб (табл. 2) [5]. По данным испытаний оценивалось увеличение времени до разрушения МТО образцов по отношению к стандартным образцам.

Приведенные в табл. 2 данные свидетельствуют о повышенном (в среднем в 5 раз) сопротивлении длительному разрушению упрочненной МТО стали даже при статических напряжениях, в 2...3 раза превышающих номинальные эксплуатационные рабочие напряжения энергооборудования.

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

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

Нагрузка при испытании, МПа	Н и О		МТО		
	$\tau_{разр.}$, Ч	δ , %	$\tau_{разр.}$, Ч	Увеличение $\tau_{разр.}$, Ч (в число раз)	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

В работе приводятся результаты длительной промышленной эксплуатации субструктурно-упрочненных 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.

Длительная промышленная эксплуатация труб МТО на КПП н/д пылеугольных котлов ТПП-210А блока 300 МВт. Опыт применения субструктурно-упрочненных труб из стали 12Х1МФ на поверхностях нагрева энергетических котлов имеет свою предысторию.

Впервые упрочненные 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 32×5,0 мм.

Условия эксперимента намеренно ужесточались. Наряду с опытными вставками номинального типоразмера на КПП в/д были установлены вставки с утоненной стенкой трубы типоразмера 32×4,0 мм.

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

За время эксплуатации опытных вставок проводились 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. 2). При этом происходит некоторое уширение субгранниц металла за счет 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 утоненной трубы.

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

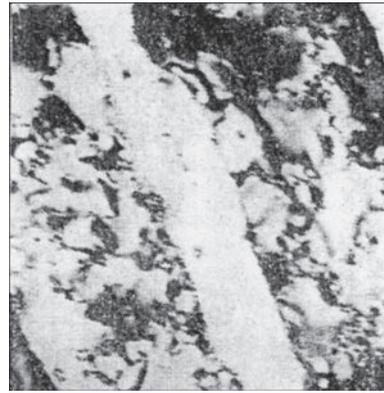


Рис. 2. Тонкая структура ($\times 30000$) металла трубы, упрочненной МТО, после 51382 ч. эксплуатации на КПП в/д

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

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

Как видно из приведенных данных, в первый период эксплуатации до 5000 ч происходит частичный возврат упрочненного 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 все исследованное время эксплуатации практически не превышает 1 %.

При этом пластичность стали во всем исследованном интервале времени остается на сдаточном уровне.

Положительные результаты эксплуатационного опробования упрочненной МТО стали 12Х1МФ на опытных вставках дали основание для промышленного внедрения МТО труб взамен стандартных материалов, на пароперегревателях котлов ВД и СКД.

На двух котлах ТПП-210А блока 300 МВт из труб стали 12Х1МФ диаметром 42×4,0 мм после МТО [4] были смонтированы 3840 змеевиков

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

Время эксплуатации, ч	Температура испытаний 20 °С			Температура испытаний 570 °С		
	$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{т}$, МПа	δ , %	$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{т}$, МПа	δ , %
Исходное состояние	630	542	22,1	396	364	30,2
0	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

(100 %) четырех ниток пароперегревателя КПП н/д II ступени. Рабочие параметры узла: температура пара 545 °С и давление 3,7 МПа.

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

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

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

К настоящему времени трубы после МТО отработали на КПП н/д II ст. котла 65374 и 68095 ч (корпуса котла Б и А, соответственно).

Эксплуатация труб проходит, практически, безаварийно. За время эксплуатации на КПП н/д II ст. произошел один случай повреждения из-за свища в сварном соединении, что составляет 0,03 % числа сварных соединений труб после МТО. 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 % общего числа сварных стыков.

Для сопоставления можно привести данные по повреждениям стандартных труб КПП н/д II ст. 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 проводится систематический мониторинг за состоянием металла упрочненных 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.

На будущее планируется провести контрольные вырезки для исследования структурных изменений и уровня механических свойств, жаростойкости и жаропрочности металла в процессе длительной эксплуатации.

Длительная промышленная эксплуатация труб после МТО на нижней радиационной части (НРЧ) газомазутных котлов ТГМП-314А блоков 300 МВт. Положительные результаты опробования и длительной промышленной эксплуатации МТО труб на пароперегревателях котлов ВД и СКД послужили основанием для расширения эксперимента по использованию субструктурно-упрочненных труб на энергооборудовании.

Безусловный интерес представляло исследование возможности применения упрочнен-

ных 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 счет термоусталостного коррозионного износа или наружной газовой коррозии. Далее утоненные трубы разрушаются вследствие развития ускоренной ползучести в условиях повышенных рабочих напряжений.

На первом этапе эксперимента 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 после МТО из стали 12Х1МФ диаметром 38×6,0 и 32×6,0 мм. Рабочие параметры узла: температура среды 400...389 °С, давление 30 МПа, температура стенки трубы 460 °С.

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

Результаты исследования [6] металла вырезок из трех опытных вставок боковой стенки НРЧ котла ТПП-210А после 21 тыс. ч. эксплуатации показали, что деформация и утонение труб за счет коррозии не наблюдается (рис. 3).

Выявлена начальная стадия развития коррозионно-термической усталости металла со стороны наружной поверхности трубы (рис. 4).

Эксплуатация труб не сказалась на структуре 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 [7] свидетельствует об отсутствии тонких структурных изменений по сечению трубы (рис. 5, в, г). Плот-

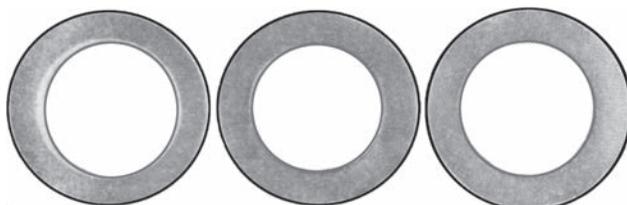


Рис. 3. Поперечное сечение упрочненных МТО труб НРЧ после 21 тыс. ч эксплуатации

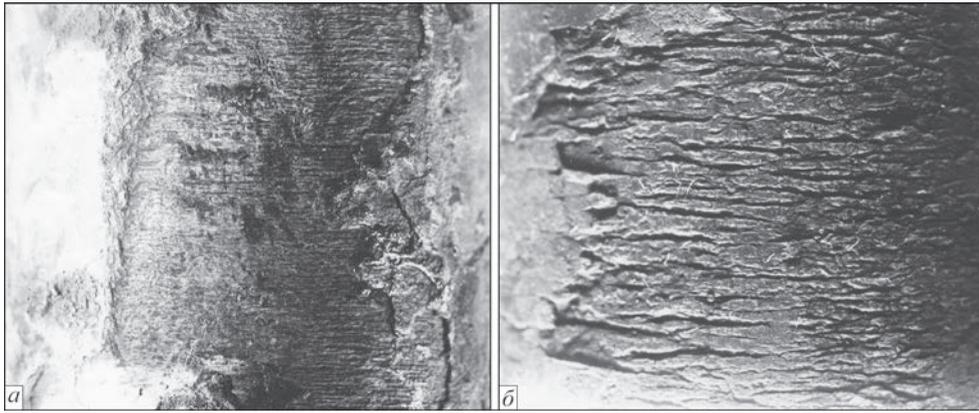


Рис. 4. Наружная поверхность огневой стороны стандартной (а) и упрочненной (б) труб НРЧ после 21 тыс. ч эксплуатации

ность дислокаций, равномерно распределенных в ферритных зернах, составляет $(0,6...0,8) \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-2}$, что соответствует исходному состоянию.

Однородность структурного состояния по сечению труб после МТО согласуется 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 тыс. ч эксплуатации показало стабильность упрочненного состояния при сохранении пластичности стали (табл. 4).

Опыт безаварийной работы вставок МТО 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 упрочненной трубы (1/2 штатной панели НРЧ).

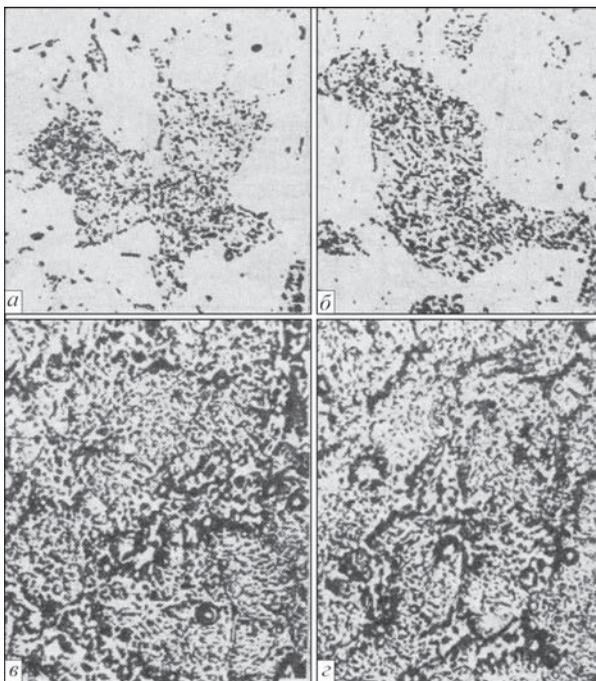


Рис. 5. Микроструктура (а, б) и дислокационная структура (в, г) упрочненной трубы НРЧ после 1 тыс. ч эксплуатации: а, в — огневая, б, г — тыльная сторона трубы ($\times 1000$)

При выполнении технологических операций по гибке упрочненных труб, контактной и ручной электродуговой сварке труб после МТО, а также композитных стыков труб после 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 упрочненного состояния стали на гibaх труб и в сварных соединениях.

Срок эксплуатации опытных деталей экранов НРЧ котлов ТПП-210А и ТГМП-314А составил 28...31 тыс. ч.

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

На двух котлах ТГМП-314А блоков 300 МВт было установлено 46 % панелей из труб, упрочненных МТО (13,5 панелей), на фронтном, заднем и подовом экранах НРЧ. Установленные панели заводского изготовления, в соответствии с требованиями [2]. Общее число установленных на панелях гнутых и прямых элементов труб, упрочненных МТО, составляет 3500 ед.

Срок промышленной эксплуатации труб после МТО на панелях НРЧ котлов ТГМП-314 к настоящему времени составил 96...104 тыс. ч, в том числе опытных вставок, оставленных в работе, 137,6 тыс. ч.

Эксплуатация труб проходит, практически, безаварийно.

За проанализированное время работы оборудования на одном из котлов ТГМП-314А в зоне горелок произошло повреждение трубы, упрочненной МТО, по причине перегрева (менее 0,03 % числа

Таблица 4. Механические свойства металла опытных вставок, упрочненных МТО, боковых экранов НРЧ котла ТПП-210А после 21 тыс. ч эксплуатации

Номер вставки	Место вырезки образцов (сторона трубы)	Температура испытаний 20 °С			Температура испытаний 550 °С		
		$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{т}$, МПа	δ , %	$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{т}$, МПа	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	0	20,0
	Огневая	645	508	22,5	409	378	21,0
3	Тыльная	608	460	24,4	0	374	21,6
	Огневая	606	450	24,2	390	360	21,4

установленных после МТО труб), что было связано с неудовлетворительной работой горелочно-го 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, упрочненной МТО, что составляет 1,5 % числа установленных труб.

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

Далее приводятся данные по исследованию вырезки одной из упрочненных МТО труб диаметром 32×6,0 мм фронтальной панели НРЧ котла ТГМП-314 после 89 тыс. ч эксплуатации.

При исследовании вырезки деформация трубы по диаметру не выявлена.

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

На наружной поверхности лобовой части трубы имеется сетка поперечных (кольцевых) корро-

зионно-усталостных трещин (рис. 6, а). На внутренней поверхности трубы выявлены одиночные коррозионные язвы диаметром до 0,5 мм.

Для определения характера и степени коррозионных повреждений проводилось металлографическое исследование продольного сечения трубы. Показано, что от наружной поверхности в сечение развиваются транскристаллитные тупые трещины, заполненные оксидами, на глубину до 0,22 мм (рис. 6, б). Коррозионные повреждения внутренней поверхности имеют вид язв округлой формы глубиной до 0,1 мм, также заполненных оксидами.

Таким образом, суммарная глубина коррозионно-поврежденного слоя сечения трубы составляет 0,32 мм.

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

Для сопоставления проводился расчет [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 приведенных в табл. 5 данных, развитие коррозии упрочненных труб идет замедленно и глубина коррозии после 89 тыс. ч оказывается в 2 раза ниже предельно допустимой [8]. Общий объем коррозионных потерь металла труб после МТО можно рассматривать как сумму глубины коррозии и глубины коррозионно-поврежденных слоев. Даже и в этом случае, с учетом коррозионно-поврежденных подоксидных слоев сечения, суммарная глубина коррозии трубы МТО ниже допустимой для стандартной трубы из стали 12Х1МФ.

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

Существенных изменений микроструктуры металла вырезки из трубы МТО после 89 тыс. ч эксплуатации не выявлено. Структура состоит из до-

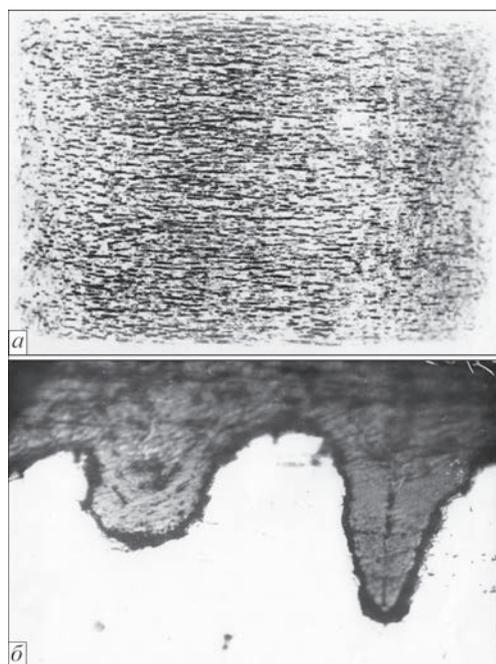


Рис. 6. Коррозионно-усталостные трещины на наружной поверхности (а) и в сечении (б) упрочненной МТО труб в НРЧ после 89 тыс. ч эксплуатации (×100)

Таблица 5. Жаростойкость МТО труб панелей фронтального экрана НРЧ котла ТГМП-314А после длительной эксплуатации (время эксплуатации 89 тыс. ч)

Образец	Глубина коррозии, мм					
	Наружная поверхность трубы		Внутренняя поверхность трубы		Глубина коррозии (общее утонение стенки)	Суммарная глубина коррозии
	Утонение	Подоксидный слой	Утонение	Подоксидный слой		
Труба после МТО	-	0,22	-	0,10	0,40	0,72
Труба после Н и О (расчетные данные)	0,71	-	0,13	-	0,84	0,84

статочны плотных бейнитных участков, феррита и обособленных карбидов, расположенных по границам зерен.

В объеме ферритных зерен встречаются одиночные дисперсные карбиды (рис. 7, а). 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 тыс. ч 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. 7, б), что незначительно выше уровня плотности после 21 тыс. ч эксплуатации. Выявлены участки регулярного построения фигур травления с фрагментированной структурой отдельных зерен (рис. 7, 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), в сравнении с состоянием упрочненных труб после 21 тыс. ч эксплуатации. Отмечается лишь снижение на 3,9 % величины относительного удлинения, однако механические характеристики металла трубы после 89 тыс. ч эксплуатации остаются на уровне требований [2].

Остаточный ресурс металла трубы МТО после 89 тыс. ч эксплуатации был оценен по уровню накопленной микроповрежденности стали, которая

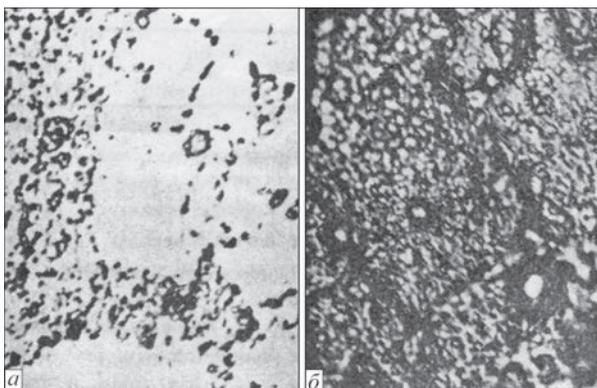


Рис. 7. Микроструктура (а) и дислокационная структура (б) упрочненной труб НРЧ после 89 тыс. ч эксплуатации ($\times 1000$)

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 объемной плотности материала были взяты из лобовой части трубы.

Величина интегральной поврежденности ω определялась как отношение удельного объема пор в стали в момент исследования 89 тыс. ч к объему пор в момент разрушения. Для расчета остаточного ресурса использовалась эмпирическая зависимость относительного времени до разрушения от поврежденности, полученной экспериментально по изменению плотности материала (табл. 7).

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

Таким образом, процесс накопления поврежденности упрочненной МТО стали во времени эксплуатации идет заторможенно, что свидетельствует о стабильности фрагментарной субструктуры упрочненного состояния, в которой полигональные границы препятствуют продвижению дислокаций и образованию новых микродефектов в объеме кристаллической решетки. Фактическая накопленная микроповрежденность металла трубы после МТО минимальна и остаточный ресурс после 89 тыс. ч эксплуатации остается на уровне расчетного, т. е. не менее 100 тыс. ч.

Полученные результаты промышленной эксплуатации труб после МТО из стали 12Х1МФ на НРЧ котлов СКД подтверждают стабильность упрочненного МТО состояния и сохранение экс-

Таблица 6. Механические свойства металла труб после МТО фронтального экрана НРЧ котла ТГМП-314А после эксплуатации (температура испытаний 20 °С)

Время эксплуатации, тыс. ч	σ_v , МПа	σ_T , МПа	δ , %
21 (опытные вставки)	606...645	450...508	22,5...24,6
89	$\frac{623...692}{490...637}$	$\frac{511...557}{\geq 372}$	$\frac{21,1...20,7}{\geq 21}$

В знаменателе значения в соответствии с [4].

Таблица 7. Расчет остаточного ресурса по микроповрежденности металла трубы, упрочненной МТО, фронтного экрана НРЧ котла ТГМП-314А после 89 тыс. ч эксплуатации

Объект исследования	Время эксплуатации, тыс. ч	Плотность, г/см ³	Поврежденность ω	Остаточный ресурс, тыс. ч
Труба после МТО фронтного экрана НРЧ	89	7,831	< 0,1	≥ 100
Сталь 12Х1МФ после Н и О [11, 12]	Исходное состояние	7,835	0	≥ 100

платационной надежности стали в течение длительных сроков службы.

Выводы

1. Систематические периодические наблюдения за состоянием металла труб показали, что в процессе эксплуатации дислокационная полигональная субструктура стали, обеспечивающая эффект упрочнения, остается стабильной. Соответственно не выявлены существенные изменения механических, жаропрочных свойств и жаростойкости стали. Недопустимое утонение стенки труб за счет наружной коррозии не установлено. Сварные соединения труб после МТО, выполненные контактной и ручной сваркой, в удовлетворительном состоянии. Накопление микроповрежденности стали после МТО идет замедленно и остаточный ресурс металла труб после длительной эксплуатации сохраняется на уровне расчетного — не менее 100 тыс. ч.

2. Обобщен опыт промышленной эксплуатации труб из упрочненной МТО стали 12Х1МФ на поверхностях нагрева котлов СКД. Показана стабильность упрочненного после МТО состояния в процессе эксплуатации, длительностью до 104 тыс. ч. Повреждения труб после МТО за указанный срок эксплуатации не превышают 0,1 % общего количества установленных.

3. Положительный опыт длительной промышленной эксплуатации упрочненных МТО труб из стали 12Х1МФ на поверхностях нагрева блоков СКД свидетельствует о технической и экономической целесообразности использования таких труб в энергетике, что обеспечивает увеличение долговечности ответственных узлов энергооборудования более, чем в 5...6 раз и решает актуальную задачу повышения эксплуатационной надежности ответственных узлов оборудования.

Список литературы

1. ГП «НИТИ» (2009) *TU 14-3-460: 2009/TU U 27.2-05757883-207:2009. Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов.*
2. Минчермет СССР (1982) *TU 14-3-1072-82. Трубы стальные бесшовные холоднодеформированные механико-термически обработанные из стали 12Х1МФ для паровых котлов и трубопроводов.*
3. Гордиенко Л. К., Векслер Е. Я., Чайковский В. М. и др. (1981) Опыт эксплуатации упрочненных труб на поверхностях нагрева котлов высокого давления. *Энергетика и электрификация*, 3, 21–24.
4. Векслер Е. Я., Можаренко И. П., Фридман З. Г. и др. (1986) Субструктурное упрочнение котельных труб из стали 12Х1МФ. *Там же*, 2, 9–11.
5. Можаренко И. П., Долинская Л. А., Векслер Е. Я. и др. (1976) Структура и свойства котельных труб из сталей

12Х1МФ после механико-термической обработки. *Металловедение и термическая обработка*, 1, 2–4.

6. Векслер Е. Я., Можаренко И. П., Чайковский В. М. и др. (1980) Эксплуатация упрочненных механико-термической обработкой труб НРЧ из стали 12Х1МФ. *Энергетик*, 5, 22–23.
7. Векслер Е. Я. (1972) Исследование изменений дислокационной структуры стали 12Х1МФ в процессе эксплуатации. *Теплоэнергетика*, 10, 61–65.
8. Минэнергомаш СССР (1977) *Руководящий технический материал РТМ 108.030.122-77. Котлы паровые стационарные сверхкритического давления. Методика расчета коррозионных потерь и температурного режима экранных труб.*
9. Векслер Е. Я., Замекула И. В., Толстов В. Ю., Семешко Е. В. (2009) Оценка остаточного ресурса паропроводов высокого давления тепловых электростанций по уровню микроповрежденности металла. *Энергетика та електрифікація*, 5, 31–40.
10. Векслер Е. Я., Замекула И. В., Толстов В. Ю., Семешко Е. В. (2010) Технология диагностирования и оценка остаточного ресурса паропроводов высокого давления тепловых электростанций по уровню микроповрежденности металла. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 1, 23–31.
11. Желдубовский А. В., Сердитов А. Т., Ключников Ю. В. и др. (2013) Метод оценки остаточной долговечности материала в условиях длительного статистического нагружения. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 3/7 (63), 24.

References

1. GP NITI (2009) *TU 14-3-460:2009/ TU U 27.2-05757883-207:2009: Steel seamless pipes for steam boilers and pipelines* [in Russian].
2. Minchermet SSSR (1982) *TU 14-3-1072-82: 12Kh1MF steel seamless cold-deformed mechanical-thermal-treated tubes for steam boilers and pipelines* [in Russian].
3. Gordienko, L.K., Versler, E.Ya., Chajkovsky, V.M. et al. (1981) Experience of operation of strengthened tubes on heating surface of high-pressure boilers. *Energetika i Elektrifikatsiya*, 3, 21-24 [in Russian].
4. Veksler, E.Ya., Mozhareno, I.P., Fridman, Z.G. et al. (1986) Substructural strengthening of boiler tubes from 12Kh1MF steel. *Ibid.*, 2, 9-11 [in Russian].
5. Mozhareno, I.P., Dolinskaya, L.A., Veksler, E.Ya. et al. (1976) Structure and properties of boiler tubes from 12Kh1MF steels after mechanical-thermal treatment. *Metallvedenie i Termich. Obrabotka*, 1, 2-4 [in Russian].
6. Veksler, E.Ya., Mozhareno, I.P., Chajkovsky, V.M. et al. (1980) Operation of strengthened by mechanical-thermal-treatment of lower radiant section from 12Kh1MF steel. *Energetik*, 5, 22-23 [in Russian].
7. Veksler, E.Ya. (1972) Examination of dislocation structure changes of 12Kh1MF steel during operation. *Teploenergetika*, 10, 61-65 [in Russian].
8. Minenergomash SSSR (1977) *RTM 108.030.122-77. Steam stationary supercritical boilers. Procedure for calculation of corrosion losses and temperature mode of water-wall tubes* [in Russian].
9. Veksler, E.Ya., Zamekula, I.V., Tolstov, V.Yu. et al. (2009) Assessment of residual life of high-pressure steam pipelines of thermal power plants by the level of metal microdamage. *Energetika i Elektrifikatsiya*, 5, 31-40 [in Russian].

10. Veksler, E.Ya., Zamekula, I.V., Tolstov, V.Yu. et al. (2010) Technology of diagnostics and assessment of residual life of high-pressure steam pipelines of thermal power plants by the level of metal microdamage. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 1, 23-31 [in Russian].
11. Zheldubovsky, A.V., Serditov, A.T., Klyuchnikov, Yu.V. et al. (2013) Method of assessment of material residual life under conditions of long-term static loading. *Vostochno-Evrop. Zh. Peredovykh Tekhnologij*, 3/7(63), 24 [in Russian].

А. В. Грузевич

Інститут магнетизму НАН України та МОН України.
03142, м. Київ, бульв. Акад. Вернадського, 36, б.
E-mail: trip.imag@gmail.com

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ
СУБСТРУКТУРНО-ЗМІЦНЕНИХ ТРУБ
НА ПОВЕРХНЯХ НАГРІВАННЯ БЛОКІВ КОТЛІВ
НАДКРИТИЧНОГО ТИСКУ

Представлені результати досліджень механіко-термічної обробки труб як ефективного методу підвищення довговічності і надійності роботи енергетичного обладнання. Узагальнено досвід промислової експлуатації труб з механіко-термічно зміцненої сталі 12X1MF на поверхнях нагріву котлів надкритичного тиску. Показана можливість і ефективність застосування даного методу на прикладі потужностей Трипільської ТЕС. Бібліогр. 11, табл. 7, рис. 7.

Ключові слова: механіко-термічна обробка, зміцнення сталі, ресурс обладнання, субструктура, жароміцність, жаростійкість

A.V. Gruzevich

Institute of Magnetism under NAS and MES of Ukraine.
36-b Acad. Vernadskoho Blvd., 03142, Kiev.
E-mail: trip.imag@gmail.com

EFFICIENCY OF APPLICATION OF TUBES WITH
SUBSTRUCTURE STRENGTHENING ON HEATING
SURFACES OF SUPERCRITICAL BOILER BLOCKS

The results are presented on investigation of mechanical-thermal treatment of the tubes as an effective method to increase the life and operation reliability of power equipment. General experience of commercial application of the tubes of mechanical-thermal strengthened steel 12Kh1MF on the heating surfaces of supercritical boilers is presented. Possibility and efficiency of application of this method is shown by the example of Trypolie HPP capacities. 11 Ref., 7 Tabl., 7 Fig.

Keywords: mechanical-thermal treatment, strengthened steels, equipment life, substructure, high-temperature strength, heat resistance

Поступила в редакцию 07.06.2017

Семинар по новым технологиям ремонта

В Приазовском государственном техническом университете в течение 20 лет разрабатываются и внедряются новые технологии ремонта промышленного оборудования с помощью зарубежных и вновь разработанных отечественных композитных материалов, которые во многих случаях позволяют резко сократить затраты и сроки выполнения ремонтных работ, выполнять ремонт оборудования непосредственно на месте эксплуатации, а также восстанавливать оборудование, не подлежащее ремонту по старым технологиям. Новые технологии ремонтов многократно испытаны и применяются на многих предприятиях Украины.

Накопленный опыт университет передает в рамках недельного семинара, запланированного на 6-10 ноября 2017 г., во время которого будет проведено обучение представителей предприятия новым технологиям ремонта. Кроме практических навыков и теоретических знаний представителям предприятий будут переданы базовые технологии типовых ремонтов оборудования: восстановление направляющих станков, посадочных мест на валах, восстановление гнезд подшипников, дефектного литья, ремонт и защита от износа корпусов насосов, ремонт корпусных деталей с трещинами и т.д.

В результате обучения ваше предприятие будет иметь специалиста, который в критических ремонтных ситуациях сможет предложить и реализовать эффективный метод восстановления работоспособности узлов и машин.

Руководитель семинара д.т.н. **Ищенко А.А.** —
профессор кафедры «Механическое оборудование заводов черной металлургии».
Консультации по проведению семинара по тел.: (0629) 44-65-40, 44-65-29,
факс: (0629) 52-99-24, моб.: (067) 943-45-72, E-mail: kafedramz@gmail.com