

УДК 621.178

О ПРОБЛЕМЕ НАДЕЖНОСТИ И ПРОФИЛАКТИКИ ТРЕЩИНО-ОБРАЗОВАНИЯ ТРУБ ИЗ СТАЛИ 15Х5М ПЕЧНЫХ ЗМЕЕВИКОВ

Пантелесенко Ф. И., Котов В. Е., Соколова Н. В. Слободчиков М. В.*

УО «Полоцкий государственный университет», г. Новополоцк, РБ
*Департамент Проматомнадзора МЧС Республика Беларусь, г. Минск, РБ

Для предприятий нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности актуальной является проблема продления срока службы змеевиков трубчатых печей из жаростойких сталей, в том числе, из стали мартенситного класса 15Х5М, и разработки методик оценки технического состояния и ресурса труб.

Методика исследований

Исследованию подвергали трубы $\varnothing 152 \times 8$ мм из стали 15Х5М змеевика трубчатой печи установки «Фенольная очистка масел №1» ОАО «Нафтан», вышедших из строя по причине образования сквозных поперечных трещин после 240000 часов эксплуатации. Рабочие параметры: $P_{раб} - 1,6$ МПа; $T_{раб} - 280^{\circ}$ С.

Программа исследований включала:

- визуально-измерительный контроль;
- дефектоскопию наружной поверхности трубы цветным и магнитопорошковым методами, а также методом магнитной памяти металла индикатором концентрации напряжений ИКН-1-4М;
- спектральный анализ химического состава металла трубы на эмиссионном спектрометре ЭМАС-2000Д.
- измерение твердости труб переносным динамическим твердомером «Константа 5Д» и измерение твердости образцов трубы на стационарном твердомере по шкале HRB;
- испытание механических свойств металла трубы на растяжение на продольных плоских образцах типа 11 по ГОСТ 1497-73 размером $200 \times 20 \times 5,5$ мм и ударную вязкость на образцах «Менаже» типа 3 по ГОСТ 9454-78 размером $55 \times 10 \times 5$ мм.
- металлографические исследования на продольных и поперечных шлифах на металлографическом микроскопе «Neofot-21» при увеличениях $\times 100$, $\times 500$, $\times 1000$.

Результаты исследований

При внешнем осмотре по верхней образующей трубы обнаружен поперечный трещиноподобный дефект (свищ) (рис. 1).

На наружной поверхности по верхней образующей имеется слой окалины толщиной до 0,3 мм. Окалина на дефектном участке имеет более темный цвет, что говорит о более интенсивном термическом воздействии на этот участок. На внутренней поверхности трубы со стороны верхней образующей наблюдается слой коксовых отложений толщиной до 1,5 мм.

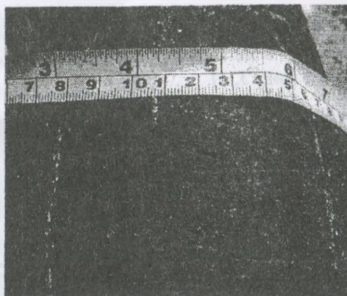


Рис. 1. Сквозная трещина на наружной поверхности трубы.

После зачистки шлифмашинкой до металлического блеска на наружной и внутренней поверхности в районе верхней образующей отчетливо видны множественные трещины, причем на внутренней поверхности трубы они более многочисленные и глубокие (рис. 2).

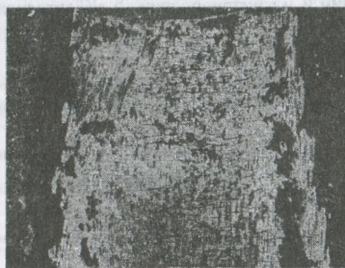


Рис. 2. Внутренняя поверхность трубы после зачистки.

Наружный диаметр трубы в месте пропуса составил $\varnothing 153,1$ мм при номинальном диаметре $\varnothing 152 \pm 1,2$ мм для труб повышенной точности [1]. Отбраковочное значение по наружному диаметру $\varnothing 157$ мм [2].

Толщина стенки различных участков трубы составила 7,6-8,3 мм. Коррозионный износ не выводит толщину стенки трубы за пределы минусового допуска для новых труб $8 \pm 1,0$ мм [1]. Отбраковочная толщина стенки для печных труб установки «Фенольная» составляет 3,5 мм [2].

Таким образом, толщина стенки и наружный диаметр трубы не выходят за допуск для новых труб, остаточная пластическая деформация отсутствует. Это указывает на то, что процесс ползучести металла (крипп) не может быть основной причиной трещинообразования в трубах, как это принято считать [3].

Для выбора эффективных и производительных методов контроля труб печных змеевиков в условиях эксплуатации был проведен дефектоскопический контроль наружной поверхности труб различными методами.

При контроле наружной поверхности дефектного участка трубы без удаления окалины методами цветной и магнитопорошковой дефектоскопии уверенно выявляются только сквозные дефекты (рис. 3, 4).

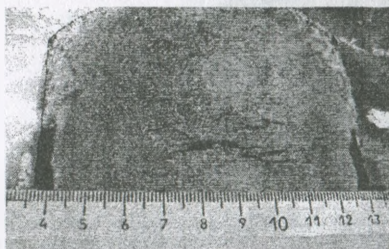


Рис. 3. Цветная дефектоскопия наружной поверхности трубы.



Рис. 4. Магнитопорошковая дефектоскопия наружной поверхности трубы.

Контроль зачищенной до металлического блеска поверхности трубы с помощью цветной дефектоскопии и магнитопорошковой дефектоскопии не даст дополнительной информации к визуальному контролю. Развившиеся окисленные трещины отчетливо видны на блестящей поверхности трубы.

Ультразвуковой дефектоскопией на участках трубы, имеющих поверхностные поперечные трещины, также выявлены многочисленные трещины на внутренней поверхности.

При контроле методом магнитной памяти металл по неподготовленной поверхности трубы уверенно выявляются сквозные трещины (рис. 5).

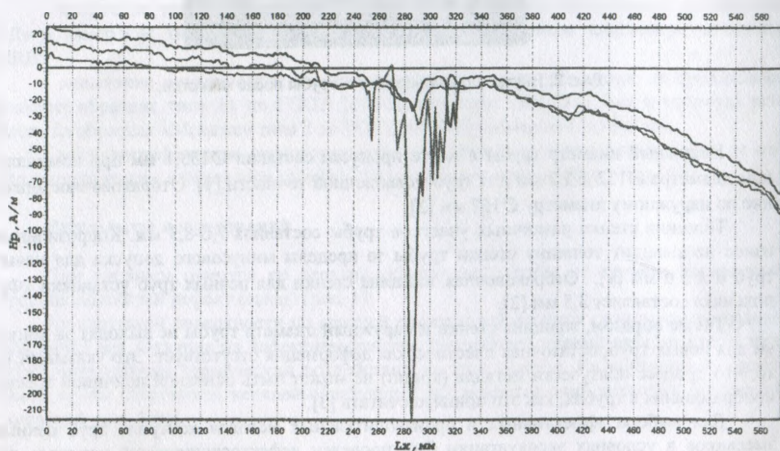


Рис. 5. Магнитограмма продольного сканирования по верхней образующей дефектного участка трубы

По результатам спектрального анализа (табл. 1) химический состав металла трубы соответствует ГОСТ 20072-74 [4]:

Таблица 1. Химический состав металла трубы.

	Содержание элементов, %							
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	S	P
Труба Ø152x8 мм	0,1	0,23	0,36	5,60	0,59	0,18	<0,0008	0,082
Сталь 15X5M ГОСТ 20072	≤ 0,15	≤ 0,50	≤ 0,50	4,50- 6,00	0,45-0,60	≤ 0,60	≤ 0,025	≤ 0,030

Испытания механических свойств проводили на продольных образцах, вырезанных из бездефектного, подвергнутого минимальному тепловому воздействию, участка трубы в районе нижней образующей напротив сквозной трещины. Механические свойства (табл. 2) соответствуют требованиям стандарта на трубы из стали 15X5M [5].

Таблица 2. Механические свойства металла трубы.

	σв, МПа	σт, МПа	δ, %	ψ, %	KCU, Дж/см ²
Металл трубы	540	-	33	69	282
Требования ГОСТ 550-75	≥392	216	22	50	118

Внешний вид испытанных образцов представлен на рис. 6.

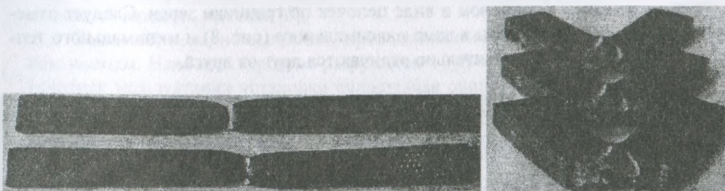


Рис. 6. Внешний вид образцов после испытаний.

Поверхность излома ударных образцов имеет 100 % вязкой составляющей.

Измерения твердости проводились переносным твердомером по наружной поверхности труб, а также стационарным твердомером на образцах, вырезанных для металлографических исследований.

При измерении твердости на стационарном твердомере образцов из дефектного и бездефектного участков трубы получены следующие значения:

- верхняя образующая (дефектный участок) – 129 НВ;
- нижняя образующая – 137 НВ.

При измерении твердости на трубах переносным динамическим твердомером из-за недостаточной их жесткости значения твердости получаются заниженными на ≈ 20 НВ.

Твердость бывших в эксплуатации труб из стали 15X5М печных змеевиков должна быть не менее 140 НВ [1]. Однако, как видно из результатов испытаний механических свойств, подпадающий под отбраковку по твердости участок трубы с неогневой стороны (нижняя образующая) имеет превосходные механические свойства.

Для проведения исследований микроструктуры приготавливались микрошлифы на участке, непосредственно прилегающем к сквозной трещине – зона максимального теплового воздействия и на участке нижней образующей – зона минимального теплового воздействия. Исследования проводились на продольных и поперечных шлифах, травление реактивом Ржешотарского.

При исследовании продольного макрошлифа (рис. 7) выявлены многочисленные поперечные трещины в районе верхней образующей трубы. Трещины развиваются в основном со стороны внутренней поверхности.

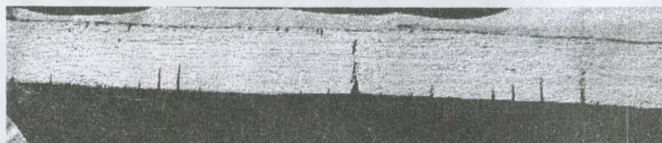


Рис. 7. Поперечный макрошлиф верхней образующей.

Металлографические исследования показали, что в результате длительного термического воздействия металл трубы деградировал. Произошел процесс сфероидизации и коагуляции карбидной составляющей, в результате которого структура металла стала представлять собой ферритную матрицу с глобулярными карбидными включениями, расположенными в основном в виде цепочек по границам зерен. Следует отметить, что структуры металла трубы в зоне максимального (рис. 8) и минимального теплового воздействия (рис. 9) незначительно отличаются друг от друга.

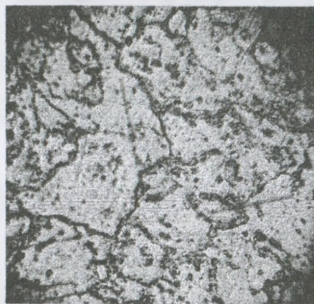


Рис. 8. Микроструктура металла трубы, поперечное сечение верхней образующей, $\times 400$.

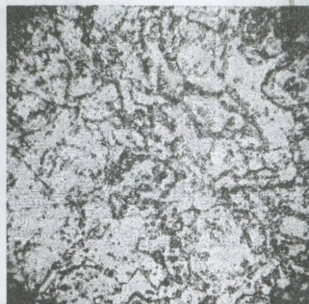


Рис. 9. Микроструктура металла трубы, поперечное сечение нижней образующей, $\times 400$.

В структуре металла трубы не выявлены характерные для ползучести микроповреждения (поры). Характер распространения трещин – транскристаллитный (рис. 9), строго перпендикулярно образующей трубы; берега трещины окислены. Морфология трещин свидетельствует том, что они развиваются под действием осевых напряжений.

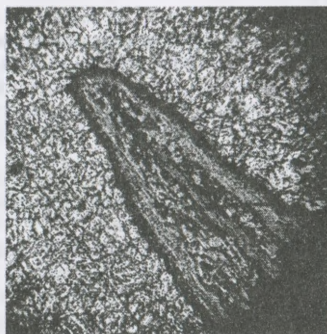


Рис. 9. Поперечное сечение трещины, $\times 100$.

Так как трубы печных змеевиков установок «Фенольная очистка масел» эксплуатируются при относительно низких для трубчатых печей температурах рабочей среды 280°C , это позволяет сделать вывод, что развитие и распространение трещин происходит не в результате ползучести металла (криппа) [2], а, в основном, по механизму термической усталости. Из-за разности температур по толщине стенки при нагреве наружные слои оказываются сжатыми, а внутренние – растянутыми. При охлаждении характер напряжений меняется в обратном порядке. Интенсивный рост трещин с внутренней стороны трубы обусловлен тем, что внутренние растянутые слои трубы работают при температурах синеломкости $300\text{--}350^{\circ}\text{C}$, при которых повышается прочность и снижается вязкость металла [6].

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы. Наиболее вероятно разрушение труб из стали 15Х5М печных змеевиков в условиях эксплуатации установки «Фенольная очистка масел» происходит по механизму термической усталости, причем процесс деградации свойств металла интенсивно протекает только со стороны огневого обогрева (не более $\frac{1}{4}$ поперечного сечения трубы).

Проведенные исследования показали, что по критериям действующих нормативных документов (твердость, остаточная деформация при ползучести) нельзя достоверно оценить техническое состояние труб: при отбраковочной твердости трубы могут иметь механические свойства, соответствующие стандарту, после длительной наработки геометрические параметры труб остаются в пределах допусков на прокат. Оценка технического состояния труб по критериям микроструктуры металла также не дает однозначных результатов.

Необходимо проведение дальнейших исследований, направленных на поиск методов неразрушающего контроля технического состояния и оценки ресурса змеевиков трубчатых печей. В этой связи представляются перспективными дальнейшие исследования трещиностойкости металла труб на микрообразцах (срубках, сколах).

При мониторинге состояния труб неразрушающими методами и достоверных критериях оценки технического состояния ресурс печных змеевиков может быть значи-

тельно повышен путем перемонтажа секций змеевиков: когда металл труб со стороны огневого обогрева достигает состояния, близкого к предельному, целые секции змеевиков или их участки переворачиваются на 180 градусов.

Список литературы

1. ГОСТ 8732-78-78 Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Сортамент.
2. Инструкция по техническому надзору, методам ревизии и отбраковки трубчатых печей, резервуаров, сосудов и аппаратов нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств. ИТН-93. ВНИКТИнефтехимоборудование, Волгоград, 1993 -188 с.
3. Ентус Н.Р., Шахрин В.В. Трубчатые печи в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. М.: Химия, 1987. 301 с.
4. ГОСТ 20072-74 Сталь теплоустойчивая. Технические условия.
5. ГОСТ 550-75 Трубы стальные бесшовные для нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. Технические условия.
6. Антикайн П.А. Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов. М.: Энергия, 1980. 423 с.

УДК 534.8

ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗОНАНСНЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Клубович В. В., Рубаник В. В., Бегунов М. А., Рубаник В. В. (мл.),
Борозенцева Ю. Б.

Институт технической акустики, Витебск, Беларусь
ita@vitebsk.by

Возбуждение акустических колебаний ультразвукового низкочастотного диапазона (УЗК) в материале приводит к рассеянию части звуковой энергии, которая необратимо переходит в тепло. Ультразвуковой разогрев может быть неравномерным по длине образца и довольно значительным, вплоть до температур плавления. Вследствие этого возникает необходимость учитывать тепловую составляющую ультразвукового воздействия на материалы и, где необходимо, сводить ее к минимуму.

Максимальный отбор акустической энергии от преобразователя реализуется, если собственная частота элементов колебательной системы совпадает с частотой возбуждаемых колебаний, т.е. в резонансном режиме. Этот режим характеризуется распределением акустических параметров по длине волновода. В случае полуволнового стержня со свободным концом ($l = \lambda/2$) в его середине наблюдается узел механических смещений и пучность напряжений (напряжения достигают максимума), а на торце волновода – пучность смещений и узел напряжений. При этом распределение амплитуд смещений, деформаций и напряжений в случае однородного стержня постоянного сечения соответственно равны:

$$\xi_m = \xi_{m0} \cos kx, \quad \varepsilon_m = k\xi_{m0} \sin kx, \quad \sigma_m = Ek\xi_{m0} \sin kx, \quad (1)$$