

**Е. С. ГАРАЩЕНКО****ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ПАРОПРОВОДОВ И ЭЛЕМЕНТОВ ИХ СИСТЕМ**

Представлены особенности использования теплоустойчивых сталей 12X1MФ, 15X1M1Ф, 12X2MФСР и др. для изготовления элементов паропроводов тепловых электростанций, выработавших свой паркочный ресурс, что в настоящее время является актуальной задачей. В работе выявлены причины возникновения повреждаемости и снижения эксплуатационных характеристик металла сварных соединений труб и паропроводов, представлены результаты изучения структуры и механических свойств сварных соединений паропроводов, а также выявлены причины возникновения локальной концентрации напряжений в металле.

**Ключевые слова:** теплоустойчивые стали, сварные соединения, повреждаемость, термообработка, зона термического влияния.

**О. С. ГАРАЩЕНКО****ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОСТІЙКИХ СТАЛЕЙ ПАРОПРОВОДІВ І ЕЛЕМЕНТІВ ЇХ СИСТЕМ**

Представлені особливості використання теплостійких сталей 12X1MФ, 15X1M1Ф, 12X2MФСР та інші для виготовлення елементів паропроводів теплових електростанцій, які виробили свій паркочний ресурс, що в даний час є актуальною задачею. У роботі виявлені причини виникнення пошкоджуваності та зниження експлуатаційних характеристик металу зварних з'єднань труб паропроводів і представлені результати вивчення структури і механічних властивостей зварних з'єднань паропроводів, а також виявлено причини виникнення локальної концентрації напруг в металі.

**Ключові слова:** теплостійкі сталі, зварні з'єднання, пошкоджуваність, термообробка, зона термічного впливу.

**О. HARASHCHENKO****PECULIARITIES OF THE USE OF HEAT-RESISTANT STEELS FOR STEAM PIPELINES AND THE ELEMENTS OF THEIR SYSTEMS**

Power generating units of heat and power plants equipped with steam boilers that have supercritical and high steam parameters and the system of steam pipelines produce the major portion of electric power in Ukraine. This scientific paper describes the peculiarities of the use of heat-resistant pearlitic steels of 12X1MF, 15X1M1F, 12X2MFSR grades and others. These steels are used to manufacture the elements for the steam pipelines of thermal power plants whose service life has already run out and it is a vital problem at the moment. This scientific paper looks into the reasons for the appearance of damages and degraded operating performances of the welded pipe junctions of steam pipelines. The research data obtained during the studies of the structure and mechanical properties of the welded junctions of steam pipelines have been given. Consideration was given to the factors that affect welded junctions during their long-term operation. It was established that the welded junctions made of heat-resistant pearlitic steels degrade during their long-term operation following the creep crack formation mechanism. It was established that the welded junctions of steam pipelines with the accrued operating time of 270.000 hours and an increased number of the start-stop cycles of power generating units are characterized by an increased probability of faults following the fatigue mechanism. It depends to a great extent on the local concentration of stresses in the structures of welded junctions and their structural state.

**Key words:** heat-resistant steels, welded junctions, fault probability, thermal treatment and the heat-affected zone.

**Введение**

Энергоблоки ТЭС с паровыми котлами сверхкритических и высоких параметров пара и системой паропроводов вырабатывают в Украине большую часть электроэнергии. В настоящее время большинство ТЭС выработали свой паркочный ресурс. Представляется актуальным поддержание их оборудования и особенно паропроводов в состоянии высокой надежности, а также продление ресурса его эксплуатации.

**Цель работы**

Целью работы является выявление особенностей использования теплоустойчивых сталей для элементов паропроводов, длительно эксплуатируемых в условиях ползучести.

**Изложение основного материала**

Для изготовления паропроводов и элементов их систем (энергоблоки ТЭС и АЭС), длительно работающих в условиях ползучести, применяют преимущественно теплоустойчивые стали 12X1MФ, 15X1M1Ф, 12X2MФСР, 12X11B2MФ, 10X18H12T. Для получения исходной структуры, обеспечивающей металлу труб необходимые эксплуатационные характеристики, трубы из приведенных сталей, в соответствии с ТУ 14-3-460:2009, подвергают соответствующей термической обработке, табл. 1.

Для изготовления элементов паропроводного тракта в энергоблоках ТЭС, длительно (свыше 200000 ч) работающих в условиях ползучести ( $T_3 = 545-585$  °С,  $P = 25,5$  МПа), применяются преимущественно теплоустойчивые стали перлитного класса 12X1MФ и 15X1M1Ф. Химический состав сталей 12X1MФ и 15X1M1Ф (ГОСТ 5520-79) представлен в табл. 2 и табл. 3.

Таблица 1 – Режимы термической обработки стальных труб

Марка стали	Режим термообработки	Примечания
1	2	3
12X1МФ	Нормализация при 950–1030 °С, отпуск при 700–730 °С, выдержка 1–3 ч	Разрешается повышать температуру нормализации до 990 °С для холоднодеформированных труб из стали мартеновской выплавки
15X1М1Ф	Нормализация при 970–1070 °С, отпуск при 730–750 °С, выдержка не менее 10 ч	Разрешается индивидуальное охлаждение для тонких труб (толщина стенки 15 мм) и выдержка при отпуске не менее 5 ч
12X2МФСР	Нормализация при 970–1000 °С; отпуск при 750–780 °С, выдержка не менее 2 ч	Охлаждение на воздухе
12X11В2МФ	Нормализация при 1020–1050 °С; отпуск при 750–780 °С, выдержка не менее 3 ч	Охлаждение на воздухе
10X9МФБ	Нормализация при 1030–1050 °С; отпуск при 740–780 °С, выдержка 3–10 ч	Охлаждение на воздухе при толщине стенки трубы 20–25 мм
12X18Н12Т 10X18Н12Т	Аустенизация при 1100–1200 °С	Охлаждение на воздухе или в воде

Таблица 2 – Химический состав стали 12X1МФ, % масс

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	V	Cu
0,1–0,15	0,17–0,37	0,4–0,7	< 0,3	< 0,025	< 0,03	0,9–1,2	0,25–0,35	0,15–0,3	< 0,2

Таблица 3 – Химический состав стали 15X1М1Ф, % масс

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	V	Cu
0,1–0,15	0,17–0,37	0,4–0,7	≤ 0,25	≤ 0,025	≤ 0,025	1,1–1,4	0,9–1,1	0,2–0,35	≤ 0,025

Эксплуатируемые сварные соединения из указанных сталей работают в стационарном и переменном режимах (пуски-остановы). За последние 5 лет количество пусков-остановок увеличи-

лось, что соответственно обеспечило увеличение уровня повреждаемости сварных соединений по механизму усталости.

Эксплуатационные причины повреждаемости сварных соединений обусловлены проявлением ряда факторов и их возможной взаимосвязанностью. Снижение эксплуатационных характеристик металла сварных соединений обеспечивается уменьшением их циклической прочности, значения которой становятся более низкими, чем требования нормативной документации [1–2]. Отмечаются случаи, когда причиной повреждаемости являются условия эксплуатации. Например, наличие изгибающих напряжений, которые вызывают нагрузки на паропровод, образующиеся от несправной системы крепления трубной трассы и недостаточной самокомпенсации тепловых удлинений отдельных участков паропроводов. В основном наиболее изгибающие переменные напряжения проявляются в местах расположения неподвижных опор.

В процессе длительной наработки исходная структура паропроводов превращается в ферритокарбидную смесь. Уровень превращения структуры в металле сварных соединений является большим, чем в основном металле, чему способствует наличие определенной исходной структурной и химической неоднородности [4].

В процессе длительной эксплуатации паропроводов в условиях ползучести имеет место пластическое деформирование паропроводов. Массовая деформация паропроводов, в соответствии с требованиями нормативной документации [1–2], не должна превышать 1 %.

Сварные соединения паропроводов и гибы повреждаются значительно интенсивнее, чем основной металл паропроводов, что лимитирует их ресурс. Повреждаемость гибов требует отдельного рассмотрения. Известно, что сварные соединения характеризуются наличием определенной структурной и химической неоднородности, что и определяет ускоренный процесс их повреждаемости. Например, при стыковой сварке паропроводов (толщина стенки 60 мм) на участке перегрева ЗТВ, который нагревается при сварке в область температур, примерно  $T_s = 1150$  °С, зерна аустенита могут иметь 3–4 номер (ГОСТ 5639–82).

Сварочный нагрев здесь может обеспечивать формирование структуры, состоящей из феррита, сорбита и перлита которую можно отнести к браковочной или к близкой к браковочной, что зависит от наличия в структуре перлитной составляющей. Наличие приведенных структур способствует ускоренному превращению исходной структуры в ферритокарбидную смесь, т.е. ее деградацию.

Повреждаемость сварных соединений в процессе их длительной эксплуатации зависит от ряда факторов. Рассмотрим основные факторы, обеспечивающие повреждаемость и их связь со структу-

рой сварных соединений. В процессе наработки сварных соединений от 200000 ч и более имеют место случаи повреждаемости сварных соединений с конструктивными концентраторами напряжений. Появление локально сконцентрированных напряжений, существенно превышающих номинальное напряжение, приводит к зарождению и последующему развитию трещин, рис. 1.

При наработке сварных соединений свыше 250000 ч образование трещин рис. 2, зависящих от концентраторов напряжений, при наличии значительного уровня деградации структуры сварных соединений, проявляется с определенным ускорением.

Установили, что в отличие от схемы Ф. А. Хромченко [3], при наработке сварных соединений 270000 ч, образование трещин ползучести преимущественно происходит по участкам сплавления и перегрева их зоны термического влияния (ЗТВ).

Локальная концентрация напряжений, значительно превышающая среднее распределение напряжений в металле сварных соединений, проявляется: при нарушении сплошности металла; наличии неметаллических включений; отличии формы шва от рекомендуемой нормативной документацией [1–2]; структурной неоднородности; неравномерном распределении напряжений. Локальная концентрация упругих напряжений оценивается коэффициентом концентрации напряжений ( $K_\sigma$ ), зависящим от формы и соотношения элементов изделия в зоне концентрации напряжений, а также от вида усилий в сечениях [3]. Коэффициент концентрации напряжений представляет отношение напряжения в зоне концентрации ( $\sigma_{\max}$ ) к номинальному напряжению ( $\sigma_n$ ). Величина  $K_\sigma$  зависит от ряда конструктивных и технологических факторов. Например, от диаметра и толщины трубы и их соотношения и составляет от 1,1 до 8 [1–3]. Установлено, что наибольшие значения  $K_\sigma$  отмечаются при наличии подкладных колец, см. рис. 2, или непроваров корня шва, подрезов и недопустимых усиления шва. Применительно к наработке сварных соединений в условиях ползучести около 250000 ч  $K_\sigma$  достигает 1,3–1,45 [3].

Заметим, что значение  $K_\sigma$ , применительно к длительной наработке сварных соединений, возрастает, что обеспечивается деградацией их металла и требует уточнения.

Деградацию металла сварных соединений следует рассматривать как совместное проявление изменения их исходного структурного состояния и образование повреждаемости сварных соединений, что приводит к снижению их эксплуатационных характеристик, в т.ч. механических свойств [5]. Изменение структурного состояния обуславливает заметное снижение механических свойств. Например значение твердости металла шва (10X1MФ) при наработке сварных соединений из стали

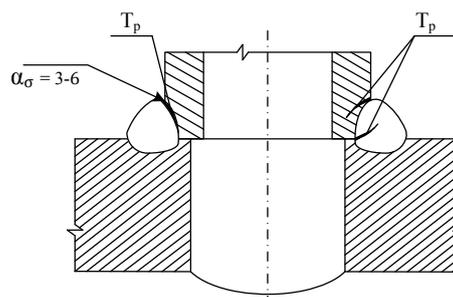


Рис. 1 – Повреждаемость в зонах локальной концентрации напряжений в швах приварки штуцеров

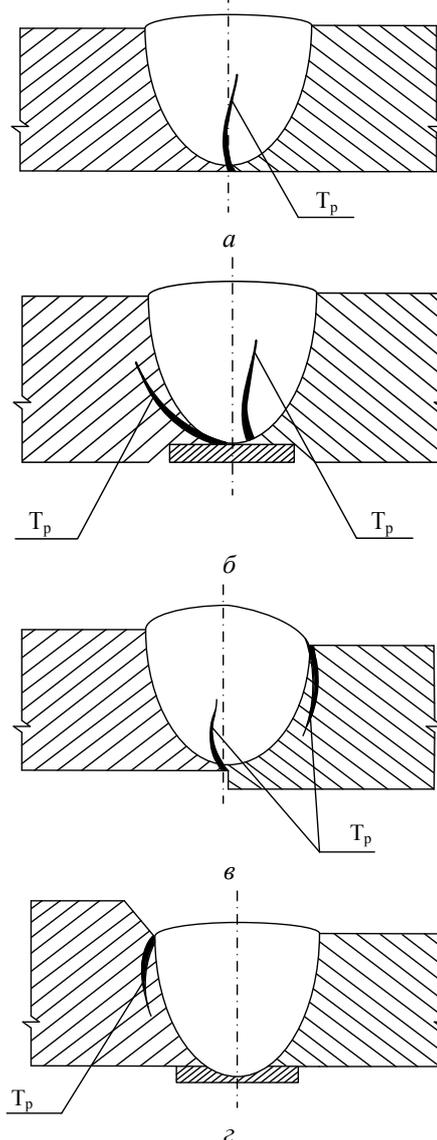


Рис. 2 – Типовая повреждаемость сварных соединений труб в зонах локальной концентрации напряжений:

- а – при наличии непровара шва;
- б – на участке приварки подкладного кольца;
- в – при наличии смещения стенок трубопровода;
- г – при сварке труб разной толщины

15X1M1Ф 270000 ч, при 565 °С, может снизиться до 190–230 HV, а твердость участка неполной перекристаллизации – до 155–170 HV. После замеров твердости (HV) следует производить замеры микротвердости. Установили, что наибольший уровень снижения твердости отмечается на участках сплавления, перегрева и в большей мере неполной перекристаллизации ЗТВ сварных соединений. Замерять микротвердость следует на участках ЗТВ сварных соединений, в области металла шва, а также в их основном металле. Полученные значения микротвердости позволяют косвенно оценить структурное состояние сварных соединений, что является целесообразным для последующего металлографического анализа и уточнения эксплуатационных характеристик сварных соединений.

### Выводы

Установили, что в процессе длительной эксплуатации в условиях ползучести сварных соединений из теплоустойчивых перлитных сталей их повреждаемость происходит по механизму образования трещин ползучести и по механизму образования трещин усталости.

Выявили, что сварные соединения паропроводов при их наработке свыше 270000 ч и увеличении количества пусков-остановов энергоблоков характеризуется увеличением уровня повреждаемости по механизму усталости, что существенно зависит от локальной концентрации напряжений  $K_{\sigma}$  в конструкциях сварных соединений, и их структурного состояния.

### Список литературы

1. РД 10-262-98. РД 153-34.1-17.421-98. Типовая инструкция по контролю металла и продлению срока службы элемен-

тов котлов, турбин и паропроводов тепловых электростанций. Москва: СПО ОРГРЭС, 1999. 140 с.

2. РД 153-34.1-17.467. Экспрессивный метод оценки остаточного ресурса сварных соединений коллекторов, котлов и паропроводов по структурному фактору. 2001. 123 с.
3. Хромченко Ф. А. Ресурс сварных соединений паропроводов. Москва: Машиностроение, 2002. 351 с.
4. Дмитрик В. В., Барташ С. Н. Особенности деградации металла сварных соединений паропроводов ТЭС. *Автоматическая сварка*. 2014. № 6–7. С. 32–33. ISSN 0005-111X.
5. Дмитрик В. В., Барташ С. Н., Шелепов И. Г. К особенностям повреждаемости паропроводов в условиях ползучести. *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2007. № 3. С. 78–84. ISSN 2218-1849.

### References (transliterated)

1. (1999), RD 10-262-98. RD 153-34.1-17.421-98 *Tipovaja instrukcija po kontrolju metalla i prodlenju sroka sluzhby jelementov kotlov, turbin i paroprovodov teplovyh jelektrostantsij* [Standard instructions for the control of metal and extension of the service life of boilers elements, turbines and steam pipelines of thermal power plants], SPO ORGRJeS, Moscow, Russia, 140 p.
2. (2001), *Jekspressivnyj metod ocenki ostatocnogo resursa svarynyh soedinenij kollektorov, kotlov i paroprovodov po strukturnomu faktorju RD 153-34.1-17.467* [An expressive method for estimating the residual life of welded joints of collectors, boilers and steam pipelines according to the structural factor RD 153-34.1-17.467.], 123 p.
3. Hromchenko F. A. (2002), *Resurs svarynyh soedinenij paroprovodov* [Resource of welds steam lines.], Mashinostroenie, Moscow, Russia, 351 p.
4. Dmitrik V. V., Bartash S. N. (2014), "Osobennosti degradacii metalla svarynyh soedinenij paroprovodov TJeS [Features of metal degradation of welded joints of thermal power plant steam lines]", *Avtomaticheskaja svarka* [automatic welding], no. 6–7, pp. 32–33, ISSN 0005-111X.
5. Dmitrik V. V., Bartash S. N., Shelepov I. G. (2007), "K osobennostjam povrezhdaemosti paroprovodov v uslovijah polzuchesti [To the peculiarities of damage to steam pipelines under creep conditions]", *Jenergoberezenie. Jenergetika. Jenergoaudit* [Energy saving. Energy. Energy audit], no. 3, pp. 78–84, ISSN 2218-1849.

Поступила (received) 18.01.2019

### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Гаращенко Олена Сергіївна (Гаращенко Елена Сергеевна, Harashchenko Helena)** – аспірант кафедри сварки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: garashchenko.helena@gmail.com, ORCID 0000-0002-9572-6095.