

ВОССТАНОВИТЕЛЬНАЯ ТЕРМООБРАБОТКА ПАРОПРОВОДОВ И ИХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ (Обзор)

В. В. ДМИТРИК¹, Е. С. ГАРАЩЕНКО¹, А. В. ГЛУШКО¹, В. Н. СОКОЛОВА², Т. А. СЫРЕНКО¹

¹НТУ «Харьковский политехнический институт». 61002, г. Харьков, ул. Кирпичева, 2.

²Харьковская Теплоэлектростанция-3. 61036, г. Харьков, ул. Энергетическая, 3. E-mail: svarka126@ukr.net

Рассмотрены состояние и ключевые направления развития технологий восстановительной термообработки сварных соединений труб паропроводов. Представлены технологии термообработки и их достоинства и недостатки. В первой части обзора представлена краткая информация о развитии восстановительной термообработки. Сформулированы и обоснованы наиболее перспективные, по мнению авторов, направления развития восстановительной термообработки сварных соединений для продления ресурса эксплуатации паропроводов. Дано обоснование возможности применения термической обработки длительно эксплуатируемых элементов паропроводов с деградированной структурой и наличием повреждаемости. Обоснована возможность получения металла паропровода со структурным состоянием и свойствами, удовлетворяющими эксплуатационные требования. Библиогр. 23, рис. 3.

Ключевые слова: восстановительная термообработка, паропровод, сварные соединения, структура металла, эксплуатация, повреждаемость

Структурные изменения, которые проходят в металле паропроводов из теплоустойчивых перлитных сталей 15X1M1Ф и 12X1MФ, длительно работающих в условиях ползучести и малоциклового усталости, приводят к снижению его свойств и уменьшению ресурса эксплуатации. Сварные соединения паропроводов характеризуются наличием определенной структурной, химической и механической неоднородности, образующейся в результате сварочного нагрева. Наличие неоднородности обеспечивает большую интенсивность структурных превращений в металле сварных соединений по сравнению с аналогичными превращениями основного металла паропроводов. Соответственно ресурс эксплуатации металла сварных соединений паропроводов лимитируется структурными превращениями, проходящими в их металле.

В процессе длительной наработки паропроводов (более 250 тыс. ч) в условиях ползучести их исходная структура, рекомендуемая нормативной документацией [1–3], превращается в ферритно-карбидную смесь. Одновременно металл повреждается порами ползучести и трещинами усталости. Структурные изменения металла участков зоны термического влияния (ЗТВ) сварных соединений, а также его повреждаемость, происходят с большей интенсивностью, чем аналогичные изменения и повреждаемость металла шва и основного металла. Структурные изменения и повреждаемость в большей мере характерны для определенных участков ЗТВ сварных соединений из сталей 15X1M1Ф и 12X1MФ [4, 5]: неполной перекристаллизации, где новые продукты распа-

да аустенита представляют глобуляризованный перлит (рис. 1); перегрева, где номер аустенитного зерна меньше 5-го (ГОСТ 5639-82); сплавления, где могут образовываться относительно крупные ферритные зерна, сгруппированные в цепочки, расположенные симметрично металлу шва (рис. 2).

В связи с постоянно возрастающим количеством паропроводов, имеющих деградированную структуру, а также определенную степень повреждаемости, для продления ресурса их эксплуатации актуально применять восстановительную термическую обработку (ВТО) [7–13]. Применение ВТО может обеспечить восстановление деградированной структуры и свойств до уровня, близкого к исходному состоянию, а также устранить повреждаемость, образующуюся по механизму ползучести.

Целью работы является уточнение возможности применения ВТО длительно эксплуати-

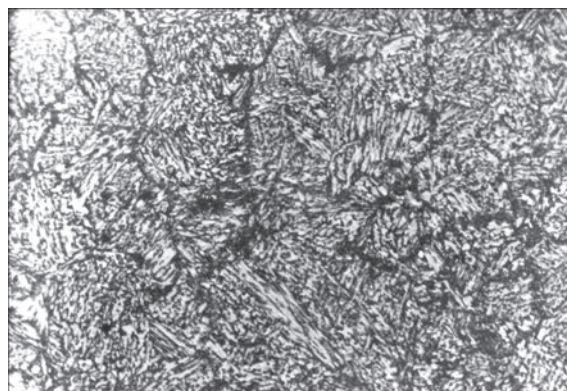


Рис. 1. Микроструктура ($\times 300$) участка неполной перекристаллизации металла ЗТВ сварного соединения из стали 15X1M1Ф [6]

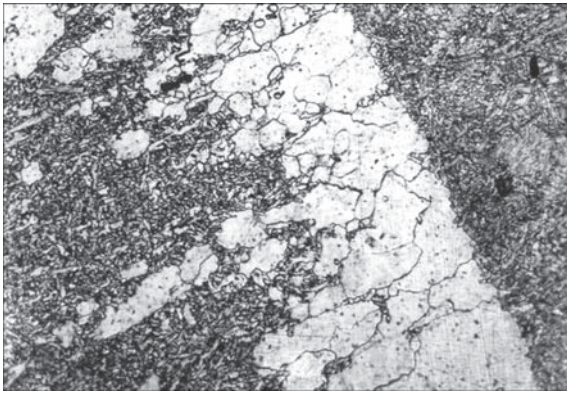


Рис. 2. Микроструктура ($\times 100$) участка сплавления металла ЗТВ сварного соединения из стали 15X1M1Ф [5]

руемых элементов паропроводов, имеющих различную степень деградации структуры и определенный уровень повреждаемости, для получения их структурного состояния и свойств, отвечающих эксплуатационным требованиям.

Замена паропроводов, имеющих деградированную структуру и наличие повреждаемости, на новые, является весьма трудоемкой и дорогостоящей операцией. В ряде случаев такую операцию можно предотвратить путем использования местной ВТО. При выполнении ВТО следует учитывать особенности распределения напряжений, образующихся при раскреплении опорно-подвесной системы [14].

Для оптимизации выполнения ВТО имеет смысл рассмотреть особенности структурных изменений, проходящих в металле паропроводов длительно эксплуатируемых в условиях ползучести. Превращение исходной структуры в ферритно-карбидную смесь обеспечивает физико-химические процессы, проходящие с различной интенсивностью в металле участков ЗТВ сварных соединений и с постоянной (менее интенсивной) в металле шва и в основном металле паропроводов. Физико-химические процессы можно представить по последовательности прохождения их стадий [15–17]: диффузионное перемещение хрома и молибдена из центральных зон кристаллов α -фазы в их приграничные зоны, что приводит к образованию сегрегаций; переход хрома, молибдена и ванадия из кристаллов α -фазы в карбиды, а также образование новых карбидов II группы (Mo_2C и VC); прохождение карбидных реакций $\text{M}_3\text{C} \rightarrow \text{M}_7\text{C}_3 \rightarrow \text{M}_{23}\text{C}_6$; коагуляция карбидных фаз, преимущественно M_{23}C_6 и M_7C_3 ; образование прерывистых цепочек, в основном из карбидов M_{23}C_6 по границам зерен α -фазы; формирование полигональной структуры (участки перегрева и неполной перекристаллизации ЗТВ); локальная ликвидация границ зерен (начальная стадия рекристаллизации); слияние вакансий, зарождение и развитие пор ползучести; отход границ зерен от

карбидов; зарождение и развитие микротрещин усталости.

Эксплуатация энергоблоков в маневренном режиме характеризуется наличием переменных (циклических) напряжений, а также наличием локальных участков их концентраций. Например, у подкладных колец соединений, сваренных встык; в местах контакта паропроводов разных толщин; на участке сплавления ЗТВ (внутренняя поверхность паропровода); в местах непроваров, несплавлений по стенкам зазора и др.

Структурные изменения приводят к уменьшению прочности и ударной вязкости металла паропроводов. В процессе длительной эксплуатации в условиях ползучести происходят деформационные процессы, которые взаимосвязаны со структурными превращениями. Например, образованием субзеренной структуры, увеличением плотности дислокаций возле препятствий и др. Известно, что деформационные процессы связаны с образованием пор ползучести [18], что требует дополнительного уточнения.

В процессе ВТО (обычный режим) поры, имеющие диаметр меньше 2 мм, устраняются (залечиваются) [7–13]. Отмечается, что при наличии накопления повреждаемости свыше 20...25 % состояния разрушения, жаропрочность элементов паропроводов путем ВТО повышается недостаточно. Залечивание пор в результате диффузии элементов замещения и внедрения происходит под влиянием следующих факторов: температуры изотермической выдержки в аустенитном состоянии; длительности выдержки; полиморфных превращений. Целесообразно выявить форму и граничные размеры пор ползучести и трещин усталости, которые могут устраняться путем применения ВТО.

Заслуживает внимания предложенная П. А. Антикайном [19, 20] двойная нормализация: первая — при температуре $T \geq 1050 \dots 1100$ °С, обеспечивающая устранение относительно больших по размерам пор и гомогенизацию γ -фазы; вторая — при температурах, рекомендуемых нормативной документацией и используемых для обработки сталей в исходном состоянии, что позволяет увеличить номер аустенитного зерна.

Требуется уточнение проведения высокотемпературной циклической термической обработки (ВЦТО), предусматривающей многократный циклический нагрев выше температуры полиморфного превращения и последующее охлаждение. Целесообразно также изучить особенности залечивания пор, расположенных по телу и по границам зерен α -фазы, а также уточнить, как залечивание пор связано с сегрегацией хрома и молибдена.

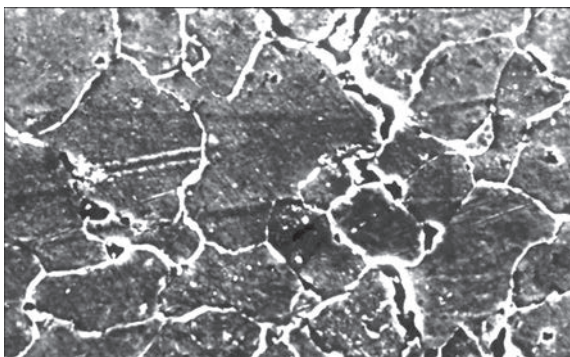


Рис. 3. Микроструктура ($\times 2500$) с порами ползучести в структуре участка неполной перекристаллизации металла ЗТВ сварных соединений из стали 15X1M1Ф [21]

Нагрев и соответствующая выдержка выше критической точки A_{c3} обеспечивает распад карбидов I и частично II групп. Происходит обратный переход легирующих элементов хрома, молибдена и ванадия из карбидов в кристаллы α -фазы.

Целесообразно уточнить: как выдержка при температурах выше A_{c3} связана с величиной аустенитного зерна; влияние продолжительности выдержки на однородность аустенитных зерен, т. е. равномерное распределение в γ -фазе элементов замещения и внедрения; как термообработка обеспечивает устранение пор ползучести, имеющих округлую и разветвленную форму, показанную на рис. 3; воздействие ВТО на трещины усталости.

Значительный практический интерес представляет восстановительная термообработка сварных соединений. Как отмечено выше, структурные превращения и повреждаемость сварных соединений происходят наиболее интенсивно на участках сплавления, перегрева и неполной перекристаллизации их ЗТВ [4, 5].

Металл участка неполной перекристаллизации подвергается сварочному нагреву при изготовлении соединений в области температур $A_{c1} - A_{c3}$. Участок может иметь твердость более низкую, чем другие участки ЗТВ, а также металл шва и основной металл. При длительной эксплуатации сварных соединений твердость участка неполной перекристаллизации уменьшается в большей степени, чем твердость других участков ЗТВ, а также металла шва и основного металла [6, 18, 21]. Структура участка неполной перекристаллизации может представлять глобуляризованный перлит как браковочную составляющую [4, 5]. Двойная ВТО, а также ВЦТО позволяет в более полной мере устранять образующиеся при сварке на участках ЗТВ, а также в металле шва браковочные структуры и повреждаемость [7–15, 22, 23]. Заслуживает внимания при использовании термической обработки двойная нормализация и отпуск [8], что обеспечивает возможность относительно полного устранения структурной, химической и механической неоднородности, а также дисперсное упроч-

нение металла сварных соединений. Актуально установить возможность индукционного нагрева при проведении термической обработки паропроводов, в том числе их сварных соединений без демонтажа самих паропроводов. Усовершенствование термической обработки паропроводов, имеющих деградированную структуру и определенный уровень повреждаемости, позволит получать структурное состояние их металла и свойства, отвечающие эксплуатационным требованиям, что обеспечит увеличение их ресурса.

Выводы

Установили, что для внедрения восстановительной термической обработки металла паропроводов и их сварных соединений, имеющих деградированную структуру, а также определенную повреждаемость, необходимо исследовать:

влияние нагрева на величину аустенитного зерна;

взаимосвязь между нагревом и однородностью аустенитной структуры, а также зависимость от нагрева структурного состояния;

возможность устранения путем термообработки определенных по величине и форме пор ползучести.

Список литературы

1. (2003) *Типовая инструкция по контролю металла и продлению срока службы металла основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций* (РД 10-577-03). Москва, ГУП НТЦ по безопасности промышленности Ростехнадзора России.
2. (2004) *Инструкция о порядке обследования и продления срока службы паропроводов сверх паркового ресурса* (СО 153-34.17.470). Москва, ЦПТИ ОРГРЭС.
3. (2003) *Инструкция по восстановительной термической обработке элементов теплоэнергетического оборудования* (СО 153-34.17.459-2003). Москва, Минэнерго РФ.
4. Дмитрик В. В., Баумер В. Н. (2007) Карбидные фазы и повреждаемость сварных соединений при длительной эксплуатации. *Металлофизика, новейшие технологии*, 29, 7, 937–948.
5. Дмитрик В. В., Браташ С. Н. (2010) К повреждаемости сварных соединений паропроводов по механизму ползучести. *Там же*, 32, 2, 1657–1663.
6. Dmytryk V. V., Syrenko T. A., Bartash S. N., Glushko A. V. (2015) Specification of metal damageability mechanism of long-operated steam line welds. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*, 6(1), 8, 13–18.
7. Гладштейн В. И., Ермолаев В. В., Шкляр А. И. и др. (2007) Восстановительная термическая обработка корпусных деталей при реновации турбин. *Теплоэнергетика*, 4, 8–12.
8. Хромченко Ф. А., Лаппа В. А. (1997) Ресурс сварных соединений паропроводов после восстановительной термической обработки. *Сварочное производство*, 6, 32–35.
9. Швецова Т. А., Крейцер К. К. (2007) Об опыте восстановительной термообработки паропроводов и результатах их последующей эксплуатации. *Энергетик*, 5, 7–9.
10. Лоскутов С. А., Корягин Ю. Д., Букин Ю. А. (2014) Оптимизация структуры и свойств длительно работавшего металла паропроводов из стали 12X1MФ восстановительной термической обработкой. *Вестник ЮУрГУ. Серия Металлургия*, 14, 4, 45–51.

11. Трусов Л. П., Березина Т. Г., Богатырев Ю. М. и др. (1973) Восстановление тонкой структуры и свойств стали 12Х1МФ после длительной эксплуатации. *Проблемы прочности*, **1**, 67–71.
12. Иванова В. С., Антикайн П. А., Сабитова Н. С. (1965) Залечивание повреждений, накопленных при циклических перегрузках стали. *Металловедение и термическая обработка металлов*, **1**, 7–9.
13. Шкляр М. И., Осмаков В. Н., Алексеев С. В. и др. (1995) Продление ресурса деталей энергооборудования с помощью восстановительной термической обработки. *Теплоэнергетика*, **4**, 2–7.
14. Попов А. Б., Чеботарев О. М. (2003) Задачи, возникающие при проведении восстановительной термообработки паропроводов. *Там же*, **3**, 42–45.
15. Должанский П. Р. (2005) Особенности оценки остаточного ресурса паропроводных труб при эксплуатации сверхпаркового ресурса. *Там же*, **8**, 35–39.
16. Дитяшев Б. Д., Попов А. Б. (2007) Комплексный подход к определению остаточного ресурса паропроводов ТЭС. *Там же*, **2**, 21–25.
17. Семенов В. К., Беляев А. А. (2010) Прогнозирование количества повреждений сетевых трубопроводов и паропроводов ТЭС. *Там же*, **1**, 37–39.
18. Дмитрик В. В., Глушко А. В., Сыренко Т. А., Григоренко С. Г. (2018) Особенности разупрочнения сварных соединений эксплуатируемых паропроводов. *Автоматическая сварка*, **5**, 9–14.
19. Антикайн П. А. (1990) *Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов*. Москва, Энергоатомиздат.
20. Антикайн П. А. (1977) Восстановительная термическая обработка сварных соединений паропроводов ТЭС. *Теплоэнергетика*, **0**, 34–38.
21. Glushko A. (2016) Researching of welded steam pipe joints operated for a long time. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, **6**, 1(84), 14–20.
22. Зислин Г. С., Каменская Н. И., Шабаль В. Н. и др. (1995) Восстановительная термическая обработка труб главного паропровода на Череповецкой ГРЭС. *Теплоэнергетика*, **4**, 8–11.
23. Попов А. Б. (2002) Некоторые особенности технического сопровождения операций по восстановительной термической обработке паропроводов. *Там же*, **4**, 15–17.
6. Dmytryk, V.V., Syrenko, T.A., Bartash, S.N., Glushko, A.V. (2015) Specification of metal damageability mechanism of long-operated steam line welds. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*, **6**(1), **8**, 13–18.
7. Gladshitejn, V.I., Ermolaev, V.V., Shklyar, A.I. et al. (2007) Restoration heat treatment of casing parts during turbine renovation. *Teploenergetika*, **4**, 8-12 [in Russian].
8. Khromchenko, F.A., Lappa, V.A. (1997) Life of welded joints of steam pipelines after restoration heat treatment. *Svarochn. Proizvodstvo*, **6**, 32-35 [in Russian].
9. Shvetsova, T.A., Krejtser, K.K. (2007) About experience of restoration heat treatment of steam pipelines and results of their subsequent operation. *Energetik*, **5**, 7-9 [in Russian].
10. Loskutov, S.A., Koryagin, Yu.D., Bukin, Yu.A. (2014) Optimization of structure and properties of long-operated metal of steam pipelines from 12Kh1MF steel by restoration heat treatment. *Vestnik YuUrGU. Seriya Metallurgiya*, **14**(4), 45-51 [in Russian].
11. Trusov, L.P., Berezina, T.G., Bogatyrev, Yu.M. et al. (1973) Restoration of thin structure and properties of 12Kh1MF steel after long-term operation. *Problemy Prochnosti*, **1**, 67-71 [in Russian].
12. Ivanova, V.S., Antikajin, P.A., Sabitova, N.S. (1965) Healing of damages accumulated under cyclic overloads of steel. *Metallovedenie i Termich. Obrab. Metallov*, **1**, 7-9 [in Russian].
13. Shklyarov, M.I., Osmakov, V.N., Alekseev, S.V. et al. (1995) Prolongation of life of power equipment parts using restoration heat treatment. *Teploenergetika*, **4**, 2-7 [in Russian].
14. Popov, A.B., Chebotarev, O.M. (2003) Problems appearing in conducting of restoration heat treatment of steam pipelines. *Ibid.*, **3**, 42-45 [in Russian].
15. Dolzhansky, P.R. (2005) Peculiarities of evaluation of life of steam line pipes under operation extending beyond economic life. *Ibid.*, **8**, 35-39 [in Russian].
16. Dityashchev, B.D., Popov, A.B. (2007) Complex approach to determination of residual life of TPP steam pipelines. *Ibid.*, **2**, 21-25 [in Russian].
17. Semenov, V.K., Belyaev, A.A. (2010) Prediction of amount of damages of pipeline systems and steam pipelines of TPPs. *Ibid.*, **1**, 37-39 [in Russian].
18. Dmytryk, V.V., Glushko, A.V., Syrenko, T.A. (2018) Peculiarities of welded joints weakening in operating steam pipelines. *The Paton Welding J.*, **5**, 7-11.
19. Antikajin, P.A. (1990) *Metals and strength calculation of boilers and pipelines*. Moscow, Energoatomizdat [in Russian].
20. Antikajin, P.A. (1977) Restoration heat treatment of welded joints of TPP steam lines. *Teploenergetika*, **0**, 34-38 [in Russian].
21. Glushko, A. (2016) Researching of welded steam pipe joints operated for a long time. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*, **1**(8), 14-20.
22. Zislin, G.S., Kamenskaya, N.I., Shabal, V.N. et al. (1995) Restoration heat treatment of pipes of steam main at Cherepovetsky hydropower plant. *Teploenergetika*, **4**, 8-11 [in Russian].
23. Popov, A.B. (2002) Some peculiarities of technical support of restoration heat treatment procedures of steam pipelines. *Ibid.*, **4**, 15-17 [in Russian].

References

ВІДНОВЛЮВАЛЬНА ТЕРМООБРОБКА ПАРОПРОВОДІВ ТА ЇХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ (Огляд)

В. В. ДМИТРИК¹, О. С. ГАРАЩЕНКО¹, А. В. ГЛУШКО¹, В. М. СОКОЛОВА², Т. О. СИРЕНКО¹

¹НТУ «Харківський політехнічний інститут». 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

²Харківська Теплоелектроцентраль-3. 61036, м. Харків, вул. Енергетична, 3. E-mail: svarka126@ukr.net

Розглянуто стан і ключові напрямки розвитку технологій відновлювальної термообробки зварних з'єднань труб паропроводів. Представлено технології термообробки та їхні переваги й недоліки. У першій частині огляду представлено

коротку інформацію щодо розвитку відновлювальної термообробки. Сформульовано та обґрунтовано найбільш перспективні, на думку авторів, напрямки розвитку відновлювальної термообробки зварних з'єднань для продовження ресурсу експлуатації паропроводів. Обґрунтовано можливості застосування термічної обробки тривало експлуатованих елементів паропроводів з деградованою структурою та наявністю пошкоджуваності, а також отримання металу паропроводу зі структурним станом і властивостями, що задовольняють експлуатаційні вимоги. Бібліогр. 23, рис. 3.

Ключові слова: відновна термічна обробка, паропровід, зварні з'єднання, структура металу, експлуатація, пошкоджуваність

RESTORATIVE HEAT TREATMENT OF STEAM PIPELINES AND THEIR WELDED JOINTS (Review)

V.V. DMITRIK¹, E.S. GARASHCHENKO¹, A.V. GLUSHKO¹, V.N. SOKOLOVA², T.A. SYRENKO¹

¹NTU «Kharkov Polytechnic Institute», 2 Kirpicheva Str., 61002, Kharkov, Ukraine

²Kharkov Heat and Power Plant-3, 3 Energeticheskaya Str., 61036, Kharkov, Ukraine. E-mail: svarka126@ukr.net

The state and key directions of development of the technology of restorative heat treatment of welded joints of steam pipelines are considered. The technologies of heat treatment and their advantages and disadvantages are presented. The first part of the review presents a summary of the development of restorative heat treatment. The directions of development of restorative heat treatment of welded joints, the most promising for extension of service life of steam pipelines according to the opinion of the authors, were formulated and justified. The justification of the possibility of using heat treatment of long-operating elements of steam pipelines with a degraded structure and presence of damageability is given. The possibility of producing a metal of a steam line with a structural state and properties, satisfying the service requirements is justified. 23 Ref., 3 Fig.

Keywords: restorative heat treatment, steam pipeline, welded joints, metal structure, operation, damageability

Поступила в редакцію 20.10.2018


UzMetalMashExpo

X INTERNATIONAL EXHIBITION
«UzMetalMashExpo-2019»

Metallurgy and metal processing / Machine-tool construction / Welding
27-29 March 2019
Tashkent, Uzbekistan



- Equipment and technology for welding, surfacing and soldering
- Equipment and technology for heat treatment
- Materials for welding, cutting, spraying, surfacing and soldering
- Protection materials and methods
- Quality control of welded joints
- Welding tools and facilities

Tel.: + 998 71 238 57 82
Fax: + 998 71 238 59 82
E-mail: enerqy@ieq.uz
www.ieq.uz