

УДК 622.791.316.35

В. В. ДМИТРИК, д-р техн. наук

А. В. ГЛУШКО, студент

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,  
г. Харьков

С. Н. БАРТАШ

Украинская инженерно-педагогическая академия (УИПА), г. Харьков

## К УЛУЧШЕНИЮ КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУРЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПАРОПРОВОДОВ

*Представлены результаты изучения структуры и механических свойств сварных соединений паропроводов из теплоустойчивых перлитных сталей и указаны пути их улучшения.*

*Представлені результати вивчення структури і механічних властивостей зварних з'єднань паропроводів з теплостійких перлитових сталей і вказані дороги їх поліпшення.*

### Введение

Повышение эксплуатационных характеристик сварных соединений из Cr-Mo-V теплоустойчивых перлитных сталей элементов паропроводных систем тепловых электрических станций является актуальной задачей для энергетики.

Ресурс эксплуатации сварных соединений паропроводов составляет 0,6-0,8 ресурса их основного металла, что в значительной степени определяется их структурной, химической и механической неоднородностью, а также наличием дефектности.

Увеличение ресурса эксплуатации энергоблоков. Ориентированных на маневренный режим работы, представляется возможным при использовании в их составе сварных соединений, характеризующихся меньшей степенью повреждаемости. Целесообразно улучшить качественные характеристики исходной структуры сварных соединений, а также снизить уровень их химической и механической неоднородности, что позволяет уменьшить интенсивность повреждаемости сварных соединений и увеличить их ресурс до 300000 – 350000 ч.

### Основная часть

Как основные в тепловой энергетике используются стали 15X1M1Ф, 12X1МФ, 15ХМ, 12МХ. Из сталей марок 15X1M1Ф и 12X1МФ изготавливают сварные соединения паропроводов свежего пара энергоблоков 100-300 МВт, работающих при температуре 5450С и давлении 3,25 – 10 МПа. Из стали 12X1МФ также изготавливают сварные соединения паропроводов горячего промежуточного прогрева блоков 150–200 МВт, работающих при температуре 545 0С и давлении 3,25–3,9 МПа. Из сталей 15ХМ и 12МХ изготавливают сварные соединения паропроводов с поперечными связями, работающие при температурах 310–510 0С и давлении  $\leq 10$  МПа. Стали 15ХМ и 12МХ для паропроводов и их сварных соединений в настоящее время вытесняются сталями 15X1M1Ф и 12X1МФ. В стадии освоения в тепловой энергетике находятся теплоустойчивые мартенситно-ферритные стали 10X9МФБ и 12X11В2МФ как, более жаропрочные, чем 12X1МФ и 15X1M1Ф. Например, их длительная прочность при 560–580 0С на расчетной базе 105 на 20–30 % выше, чем у сталей 12X1МФ и 15X1M1Ф.

Сварные соединения паропроводов из стали 12X1МФ эксплуатируются с 1955 г., а из стали 15X1M1Ф – с 1965 г. Данные сварные соединения входят в состав энергоблоков всех ТЭС Украины и стран СНГ.

Теплоустойчивые перлитные стали, используемые для проводов ТЭС, преимущественно сваривают ручной дуговой сваркой (РДС), реже механизированной сваркой под слоем флюса и в смеси заинитных газов CO<sub>2</sub> + Ar. Процесс сварки выполняют на средних режимах. Обеспечивают достаточное проплавление кромок

основного металла и металла предыдущих валиков. Режимы сварки толстостенных и тонкостенных соединений паропроводов заметно отличаются.

При сварке трубопроводов диаметром  $> 100$  мм и толщине стенки  $> 10$  мм основными положениями технологии являются [1–4]:

- сварка стыков с подогревом до температуры  $300 - 350$  °С;
- одновременная сварка одного стыка паропровода двумя сварщиками;
- использование обратно-ступенчатого способа сварки;
- строгое выполнение процесса сварки на заданных параметрах режима (сварочный ток, напряжение дуги, длина дуги и др.);
- проведение сразу после выполнения процесса сварки высокотемпературного отпуска.

Корневые швы рекомендуется выполнять аргонодуговой сваркой. Стенки трубных заготовок собираются и свариваются на цилиндрических подкладных кольцах, изготовленных из аналогичной теплоустойчивой стали. Выполнение корневого шва стыка, расположенного на подкладном кольце, осуществляется электродами диаметром 3–4 мм на токе, соответственно, 90–130 А. Аргонодуговая сварка корневого шва без подкладного кольца производится вольфрамовым электродом диаметром 2,5–3,0 мм без присадки на постоянном токе прямой полярности.

Предварительный и сопутствующий подогрев заготовок для сварки должен быть равномерным и составлять 300–350 °С по всей окружности стыка на расстоянии 50–100 мм от разделки кромок. Подогрев в основном производят с помощью индукторов. Сварку элементов паропроводов выполняют электродами Э-09Х1МФ и Э-09Х1М (марки ТМЛ – ЗУ, ЦЛ-45, ЦЛ-39, ЦЛ-20, ТМЛ-1У, ЦУ-2ХМ, ЦЛ-38 и др.). Для заварки стыков используют многослойный способ последовательной укладки валиков заданных сечений. Непосредственно после выполнения сварки сварное соединение подвергается высокому отпуску при температурах 730–750 °С, в течение 3–5 ч.

Штатная технология изготовления сварных соединений паропроводов из Cr-Mo-V теплоустойчивых перлитных сталей обеспечивает получение их качественной исходной структуры, а также соответствующих механических свойств, отвечающих эксплуатационным требованиям при наработке соединений до 200000–250000 ч [5–8]. Однако при увеличении их срока эксплуатации в условиях ползучести и малоциклового усталости (маневренные режимы работы)  $> 250000$  ч металл сварных соединений в значительной степени деградирует, что обеспечивается проходящими в металле физико-химическими процессами и последующими структурными изменениями [9–13]. Целесообразно выявить зависимость повреждаемости металла сварных соединений от структурных изменений и дефектов для снижения ее интенсивности. Эффект структурных изменений следует затормозить, что представляется возможным при получении исходной структуры сварных соединений с улучшенными качественными характеристиками [14–16]. Для их получения необходимо усовершенствовать сварочную технологию изготовления сварных соединений.

Длительная прочность сварных соединений паропроводов (наработка около 250000 ч) в маневренных режимах работы снижается на 25–30 % по сравнению с длительной прочностью аналогичных соединений, эксплуатируемых в стационарных режимах [1]. При наработке сварных соединений примерно 300000 ч в маневренных режимах их длительная прочность дополнительно снижается на 15–20 %.

Микроструктура сварных соединений состоит из трех характерных областей (рис. 1), металла шва – 1, металла участков зоны термического влияния – 2 и основного металла – 3.

В многослойных швах паропроводов, (рис. 1), крупные кристаллы сочетаются с мелкими. По их величине и форме можно оценить сварочный нагрев изготавливаемых соединений. Мелкие кристаллиты образуются вследствие частичной перекристаллизации прослойки металла предыдущего слоя путем его нагрева при укладке последующего валика. Перекристаллизация обеспечивает образование рельефа в макроструктуре металла шва.

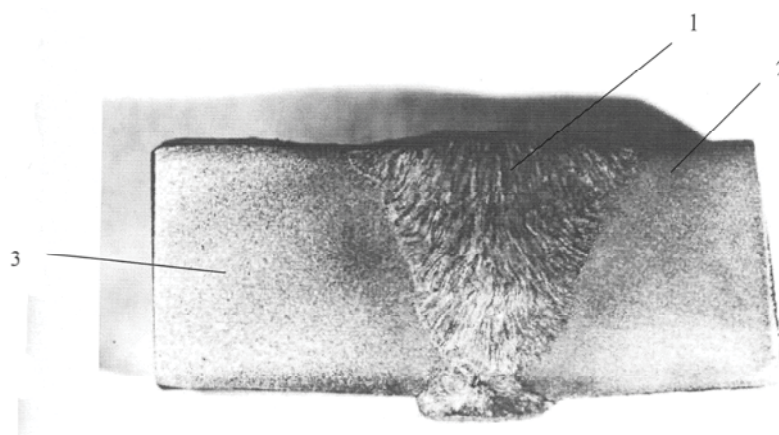


Рис.1. Макроструктура сварного соединения, х1,1. Основной металл – сталь 12X1МФ: 1 – металл шва; 2– металл участков зоны термического влияния; 3 – основной металл. Полуавтоматическая сварка в среде  $\text{CO}_2\text{Ar}$

Отмечается также различный уровень легирования металла шва при отличающемся долевом участии в нем основного металла (примерно от 5 до 40 %), присадочный металл – остальное.

По структуре, химсоставу и свойствам металл шва отличается от основного металла, что и обуславливает необходимость его отдельного рассмотрения. В условиях значительных скоростей кристаллизации и протекающих одновременно пластических деформаций в структуре металла шва формируется тонкая полигональная структура зерен  $\alpha$  – фазы. Для металла шва характерна специфическая химическая неоднородность. Наличие дисперсных карбидных фаз, повышенное содержание неметаллических включений и соответствующая форма кристаллов  $\alpha$  – фазы, рис. 2. В зависимости от температурного режима процесса сварки структура металла шва и его свойства могут заметно меняться. Сдаточной является структура при наличии номера зерна 6–8 (ГОСТ 5639-82) [2–4].

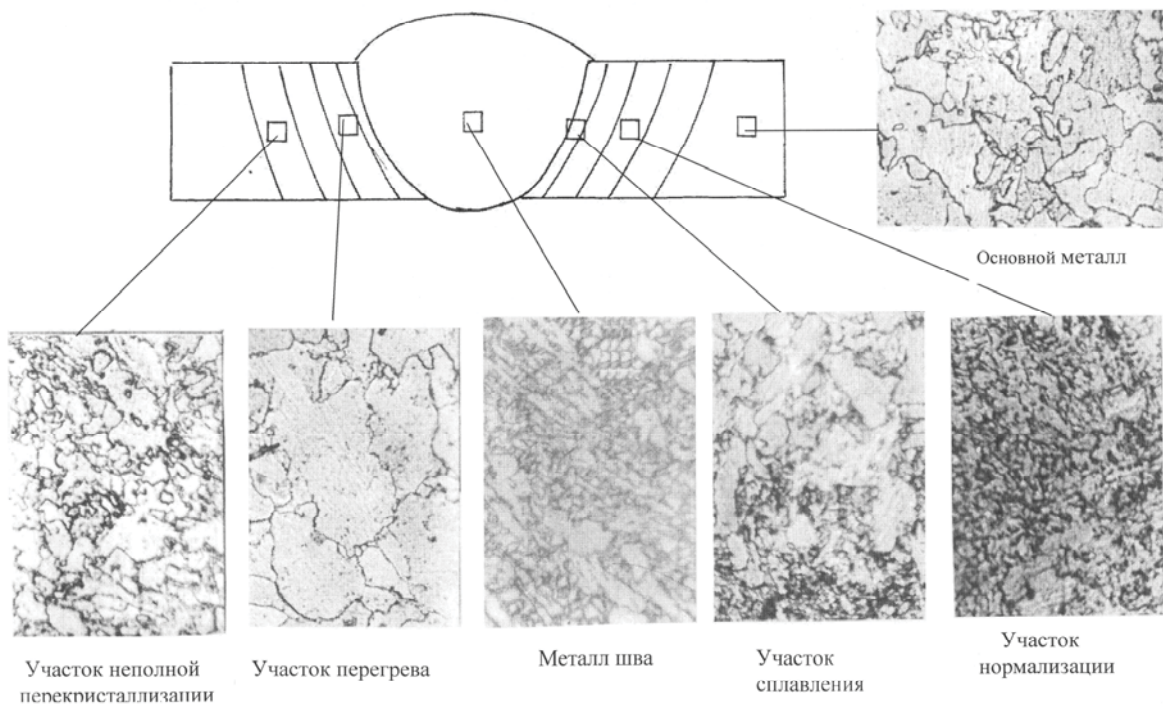


Рис. 2. Микроструктура сварного соединения из стали 12X1МФ. х30.  
Ручная дуговая сварка



Послесварочный высокий отпуск на структуру  $\alpha$  – фазы заметного влияния не оказывает, однако вызывает выделение дисперсных карбидных фаз VC и Mo<sub>2</sub>C. Отпуск увеличивает сегрегацию элементов Mn, Cr и Mo в металле участка неполной перекристаллизации ЗТВ, что способствует последующему увеличению скорости карбидных реакций  $M_3C \rightarrow M_7C_3 \rightarrow M_{23}C_6$  [14]. Отпуск также вызывает снижение внутренних напряжений. Способствует увеличению пластичности металла шва и обеспечивает повышение механических свойств [2–4].

Зона термического влияния (ЗТВ) состоит из участков основного металла, структура и свойства которых изменилась вследствие сварочного нагрева изготавливаемых соединений, (рис. 2). Ширина ЗТВ при стыковой сварке паропроводов толщиной стенки 30–60 мм составляет 5–8 мм и существенно зависит от тепловложения в основной металл. На микрошлифах ЗТВ отмечается в виде рельефной полосы, расположенной симметрично наплавленному металлу, см. рис. 1.

Участок сплавления ЗТВ имеет ширину примерно 0,1–0,2 мм и непосредственно контактирует с металлом шва. Металл данного участка нагревается в области температур TL – TS. Здесь, в зависимости от термического цикла, могут формироваться мягкие ферритные прослойки [12–13]. В металле участка интенсивно происходят диффузионные процессы, обусловленные градиентом химических потенциалов элементов металла основного и наплавленного. Отмечается относительно высокая степень повреждаемости металла порами ползучести и трещинами усталости при наработке сварных соединений свыше 250000 ч. Повреждаемость участка сплавления порами ползучести выше, чем основного металла, однако ниже, чем участка неполной перекристаллизации. Наиболее интенсивно. По сравнению с другими участками ЗТВ, а также металлом шва и основным металлом, участок сплавления поражается усталостными трещинами, рис. 3, чему способствует (в первую очередь) его химическая неоднородность.

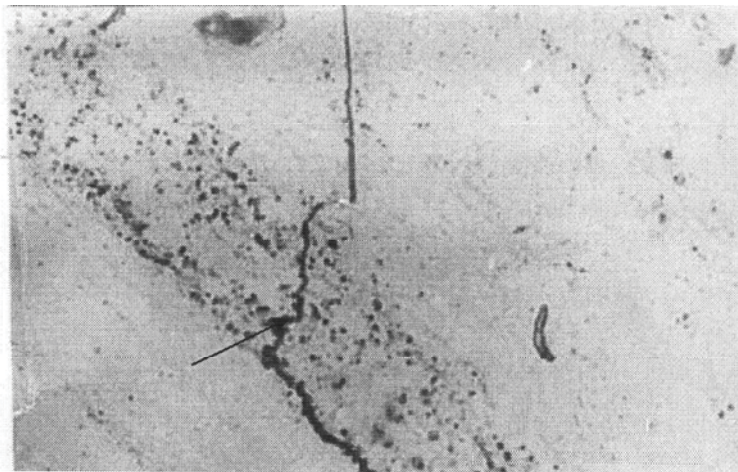


Рис. 3. Усталостная микротрещина, образовавшаяся на участке сплавления ЗТВ (стрелка) сварного соединения паропровода острого пара из стали 12Х1МФ. х8000. Ресурс 200000 ч

Зарождение и развитие усталостных трещин здесь существенно обеспечивается коррозионными процессами. Повреждаемость усталостными трещинами происходит на внутренней поверхности сварных соединений паропроводов. Имеет смысл для уменьшения повреждаемости участка сплавления предотвратить образование на нем браковочных структур и структур близких к браковочным. Необходимо изучить особенности повреждаемости металла этого участка. А также связь его структуры с повреждаемостью для уменьшения ее интенсивности.

Участок перегрева ЗТВ имеет ширину примерно 2,0–2,7 мм. Металл этого участка нагревается в области температур, близких к TL – 1150 °С. При определении

свойств участка перегрева целесообразно выявлять величину зерен сформировавшейся структуры. Здесь может образовываться браковочная структура – видманштеттов феррит. Могут также образовываться укрупненные зерна перлита или феррита. Также структуры, в зависимости от бала зерна могут быть браковочными или близкими к браковочным. Их расположение в толстостенных сварных соединениях преимущественно является локальным и зависит от термических условий сварочного нагрева изготавливаемых соединений.

Участок нормализации имеет ширину примерно 0,6–1,1 мм. Металл участка подвергается сварочному нагреву в область температур около 1150 °С – Ас3. Структура данного участка является мелкозернистой, а его металл при длительной эксплуатации повреждается с интенсивностью близкой к повреждаемости основного металла [14].

Участок неполной фазовой перекристаллизации подвергается сварочному нагреву в область, ограниченную критическими точками Ас1- Ас3, что соответствует нагреву при неполном отжиге. Ширина участка около 1,7–2,1 мм. Образующиеся новые продукты распада аустенита здесь могут, в зависимости от термического цикла. Представлять широкую гамму структур: от перлитных структур до мартенсита. Оптимальными, в меньшей степени повреждающимися в процессе эксплуатации структурами. Являются бейнит, троостит или сорбит [7, 8, 12].

Повреждаемость парами ползучести участка неполной перекристаллизации выше, чем других участков ЗТВ, а также областей металла шва и основного металла, чему способствует его существенная структурная неоднородность. Полностью предотвратить такую неоднородность не представляется возможным, однако предотвратить образование новых продуктов распада аустенита в виде перлита или мартенсита (браковочные структуры) можно путем оптимизации сварного нагрева.

Результаты замеров микротвердости (рис. 4) подтверждают структурные составляющие сварного соединения, см. рис. 1–2.

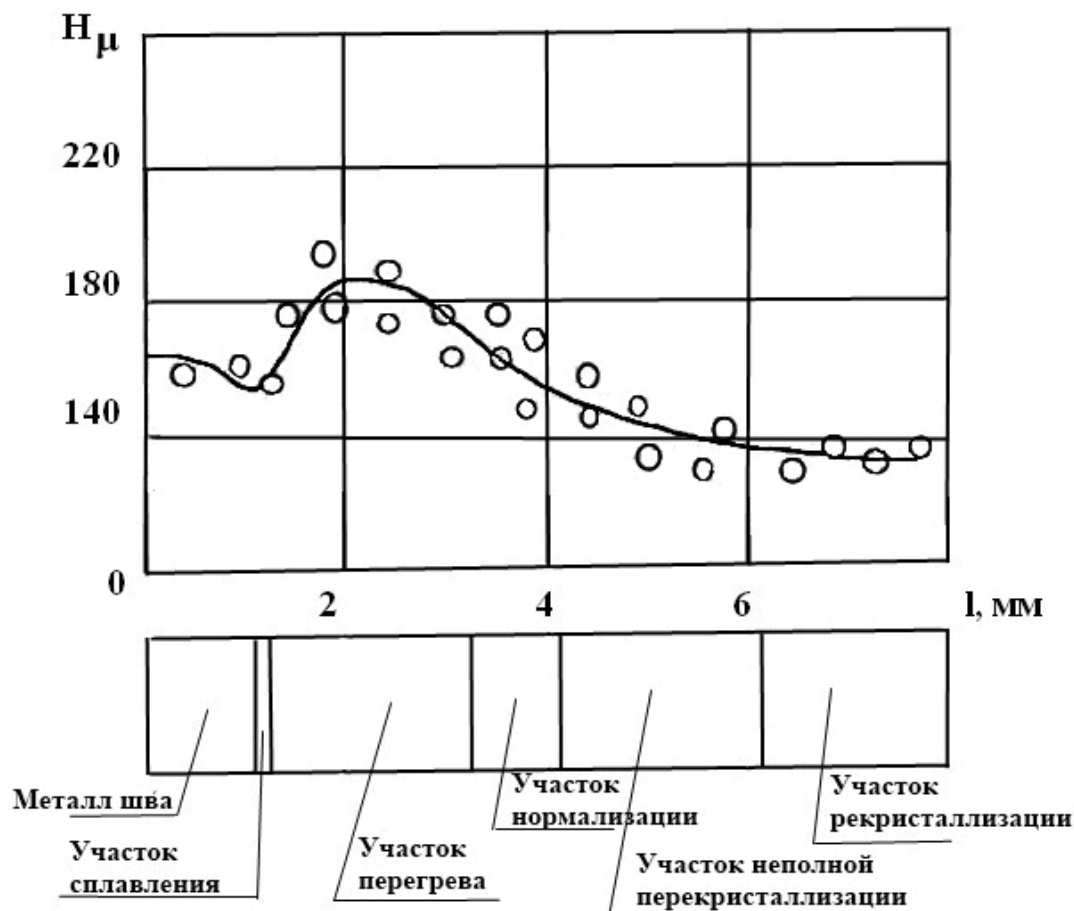


Рис. 4. Микротвердость сварного соединения, см. рис.1.

### Выводы

Выявление браковочных структур, расположенных в локальных объемах металла сварных соединений неразрушающими методами контроля весьма трудоемкая и не всегда выполнимая операция. Однако предупреждение их формирования позволяет увеличить ресурс эксплуатации сварных соединений паропроводов на 15–20 %.

### Список литературы

1. Хромченко Ф. А. Ресурс сварных соединений паропроводов. – М : Машиностроение, 2002. – 351 с.
2. РД 10-262-98. РД 153-34.1-17.421.-98. Типовая инструкция по контролю металла и продлению срока службы основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций. М.: СПО ОРГРЭС, 1999.
3. МУ 34-70-161-87. Методические указания по металлографическому анализу при оценке качества и исследования причин повреждений сварных соединений паропроводов из сталей 12Х1МФ и 15Х1М1Ф тепловых электростанций. – М.: ВТИ им. Ф. Э. Дзержинского, 1987. – 190 с.
4. РД 34.17.421-92. Типовая инструкция по контролю и продлению службы металла основных элементов котлов. Турбин и трубопроводов тепловых электростанций. – М.: Служба передового опыта ОРГРЭС. 1992. – 94 с.
5. Куманин В. И., Ковалева Л. А., Алексеев С. В. Длговечность металла в условиях ползучести. – М.: Металлургия. 1988. – 222 с.
6. Березина Т. Г., Бугай Н. В., Трунин И. И. Диагностирование и прогнозирование долговечности металла теплоэнергетических установок. – К.: Техніка, 1991. – 118 с.
7. Дмитрик В. В., Барташ С. Н., Шелепов И. Г. К особенностям повреждаемости паропроводов в условиях ползучести // Энергосбережение • Энергетика • Энергоаудит. – 2007. – № 3. – С. 78–84.
8. Влияние тепловых условий сварки на трещеностойкость сварных соединений стали 15Х1М1Ф в условиях малоциклового ползучести / Ф. А. Хромченко, В. А. Лаппа, М. М. Маламед и др. // Сварочное произ-во. – 1991. – № 2. – С. 33–35.
9. Дмитрик В. В., Сыренко Т. А. К механизму диффузии хрома и молибдена в металле сварных соединений паропроводов.

### TOWARDS IMPROVEMENT OF QUALITY CHARACTERISTICS OF STEAMPIPE WELDED JOINTS

*V. V. DMSTRIK, Doctor of Engineering*  
*A. V. GLUSHKO, students, N. BARTASH*

*The paper presents the results of study of the structure and mechanical properties of steampipe welded joints of heat-resistant perlitic steels and shows the ways for their improvement.*

Поступила в редакцию 18.07 2013 г.