

УДК 621.791.72:621.791.052:620.17

В. В. ДМИТРИК, д-р техн. наук, профессор

Т. А. СЫРЕНКО

Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков

ОСОБЕННОСТИ ОТПУСКНОЙ ХРУПКОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПАРОПРОВОДОВ

Изучены особенности отпускной хрупкости металла сварных соединений паропроводов ТЭС, состоящих из теплоустойчивых перлитных сталей 15Х1М1Ф и 12Х1МФ, длительно эксплуатирующиеся в условиях ползучести. Установлено, что отпускную хрупкость обеспечивает неравновесная зернограницная сегрегация легирующих и примесных элементов

Вивчені особливості відпускну хрупкості металу зварних з'єднань паропроводів ТЕС, які складаються з теплостійких перлітних сталей 15Х1М1Ф та 12Х1МФ, які довготривало експлуатуються в умовах повзучості. Встановлено, що відпускну хрупкість забезпечує нерівновісна зернограницна сегрегація легиуючих та примісних елементів.

Введение

В изломах длительно эксплуатируемых сварных соединений паропроводов из теплоустойчивых перлитных сталей отмечается увеличение доли межзеренной разрушаемости в хрупкой составляющей. Такой механизм разрушения характеризуется снижением прочности межзеренных связей, что обеспечивается условиями длительной эксплуатации сварных соединений: температурой 510–585 °С; нагружением 10–25 МПа; увеличивающимся количеством циклов (пусков-остановов). Ускоренное развитие разрушаемости сварных соединений паропроводов после наработки >250000 ч обусловлено особенностями их отпускной хрупкости, выявление которой представляется целесообразным.

Основная часть

Сварные соединения паропроводов, изготавливаемые из сталей 15Х1М1Ф и 12Х1МФ, в соответствии с требованиями нормативной документации, подвергаются нормализации и высокому отпуску, что стабилизирует их структуру и свойства.

В условиях длительной эксплуатации, при наработке свыше 200000 ч, структура сварных соединений претерпевает определенное изменение: 1) исходная структура участков зоны термического влияния (ЗТВ), а также металла наплавленного и основного превращается в отличающиеся по строению ферритокарбидные смеси; 2) происходит фрагментация (полигонизация) зерен -фазы; 3) имеет место коагуляция выделений (преимущественно $M_{23}C_6$) по границам зерен -фазы; 4) исчезают участки границ зерен; 5) отмечается отход границ зерен от коагулирующих выделений. Одновременно увеличивается отпускная (тепловая) хрупкость металла сварных соединений, характеризуемая следующими признаками: 1) увеличением травимости границ зерен; 2) увеличением составляющей межзеренного разрушения в хрупком механизме излома; 3) снижением (до 10–15%) кратковременных механических свойств, в т. ч. ударной вязкости (до 30%); 4) увеличением склонности стали к хрупкому разрушению; 5) частичной возможностью устранения отпускной хрупкости путем термической обработки.

Тепловое охрупчивание, вызывающее в сварных соединениях отпускную хрупкость обусловлено длительностью теплового воздействия и нагружения на эксплуатируемые сварные соединения. Сформировавшаяся отпускная хрупкость металла сварных соединений преимущественно является необратимой, т.к. не устраняется термической обработкой. Необратимость придают коагулирующие выделения $M_{23}C_6$, которые в виде прерывистой сетки распределяются по границам зерен -фазы (рис. 1).

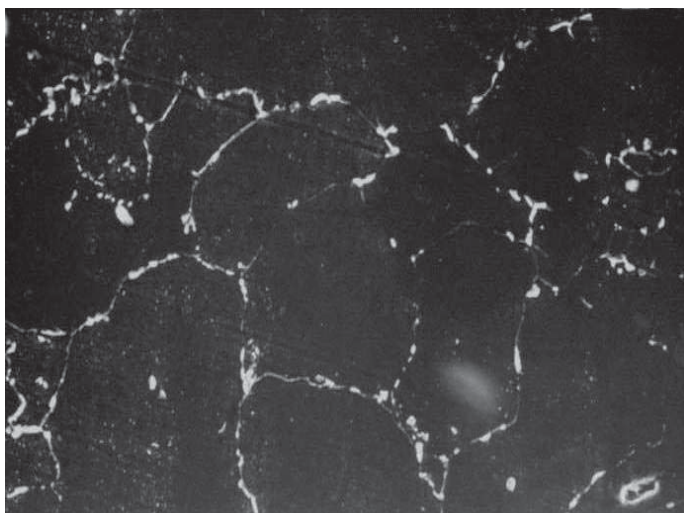


Рис.1. Распределение карбидов $M_{23}C_6$ по границам зерен α -фазы. Сварные соединения острого пара из стали 12X1МФ. Ресурс 275637ч. х 2000

Кинетика охрупчивания изучаемых сварных соединений обусловлена проявлением определенных закономерностей развития хрупкости, зависящих от стабильности структуры и свойств, химического состава, а также условий эксплуатации. Отпускная хрупкость является необратимой и поэтому для увеличения ресурса эксплуатации сварных соединений ее развитие целесообразно затормозить.

По мере развития отпускной хрупкости, хрупкое разрушение становится в возрастающей степени межзеренным. Особенности разрушения по границам бывших аустенитных зерен длительно эксплуатируемых сварных соединений требуют уточнения. Охрупченные образцы разрушаются по границам зерен α -фазы, (рис. 2), и здесь имеет смысл выяснить, сохраняются ли границы бывших аустенитных зерен.

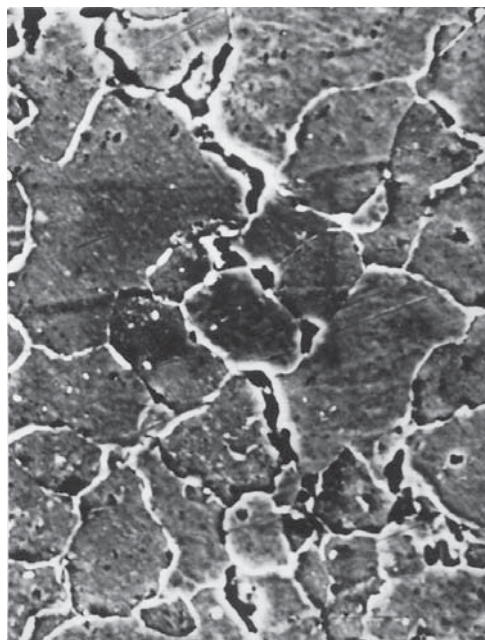


Рис. 2. Повреждаемость металла шва по границам зерен α -фазы обусловленная наличием карбидных выделений и неметаллических включений, сосредоточенных на границах зерен. х 2500. Сварное соединение паропровода горячего промперегрева из стали 12X1МФ

Наличие коагулирующих выделений $M_{23}C_6$ на межзеренных границах, в сочетании с изменившимся составом зерен α -фазы в их приграничных зонах, путем снижения сопротивления отрыву на границах зерен, увеличивает отпускную хрупкость. Выявлено, что

на поверхности межзеренного излома наблюдаются расколотые карбидные частицы $M_{23}C_6$, (рис. 3).

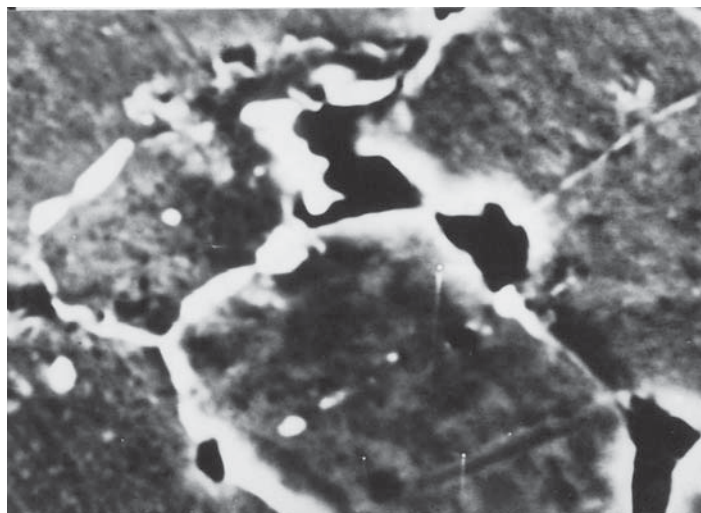


Рис. 3. Расколотые карбиды $M_{23}C_6$ по границам зерен α -фазы. $\times 12000$

Другие карбидные частицы I-й и II-й групп распределились примерно равномерно: с одной стороны разрушившегося образца определенное количество частиц, с другой – соответствующее ему количество ямок (рис. 2). Таким образом, интеркристаллитная трещина развивается в условиях дополнительного снижения межзеренных связей на границах зерен α -фазы. Исследования морфологии межзеренных изломов, длительно эксплуатируемых сварных соединений показывает, что развитие в их металле необратимой отпускной хрупкости связано с появлением специфических выделений $M_{23}C_6$. Подтверждается прямая связь между уровнем охрупчивания и состоянием отпускной хрупкости металла сварных соединений. Для определения критического размера трещины при развитии необратимой отпускной хрупкости сварных соединений оценивали вязкость разрушения K_{Ic} . Установили, что K_{Ic} – критический коэффициент интенсивности напряжений при плоской деформации, является константой материала, которая не зависит от геометрии сварных соединений. Именно определение K_{Ic} является одной из наиболее важных характеристик склонности металла сварных соединений к отпускной хрупкости.

Вторая возможная причина снижения степени межзеренных связей по границам зерен α -фазы состоит в изменении состава твердого раствора в приграничных зонах зерен.

Количественные данные, характеризующие параметры зернограничной сегрегации примесных и легирующих элементов, глубину обогащенной зоны и концентрационный профиль выявляют путем использования методов Оже-спектроскопии, рентгеновской, фотоэлектронной и ионной спектроскопии, внутреннего трения, микрорентгеноспектрального анализа и др. [1]. С учетом положений [1] определяли кинетику обогащения приграничных зон легирующими и примесными элементами в течение длительной эксплуатации сварных соединений, а также изучили энергию их связи с границами зерен α -фазы.

Установили, что зернограничная сегрегация примесей вызывает охрупчивание металла сварных соединений, а ее отсутствие придает им неохрупченное состояние. Кинетика обогащения границ зерен в условиях длительной эксплуатации сварных соединений является монотонной и необратимой, т.к. одновременно на границах зерен α -фазы образуется прерывистая сетка из удлиненных карбидных выделений, преимущественно $M_{23}C_6$ (см. рис. 1).

При температурах области γ -фазы обогащения границ зерен практически не происходит, что подтверждается данными концентрации примесей на границах зерен участков сплавления, перегрева и нормализации ЗТВ при изготовлении сварных соединений.

В результате сварочного нагрева в область температур $A_{c1} - A_{c3}$ (участок неполной перекристаллизации) обогащаются не только границы бывших аустенитных зерен, но и границы между зернами α -фазы и новыми продуктами распада аустенита, (рис. 4).

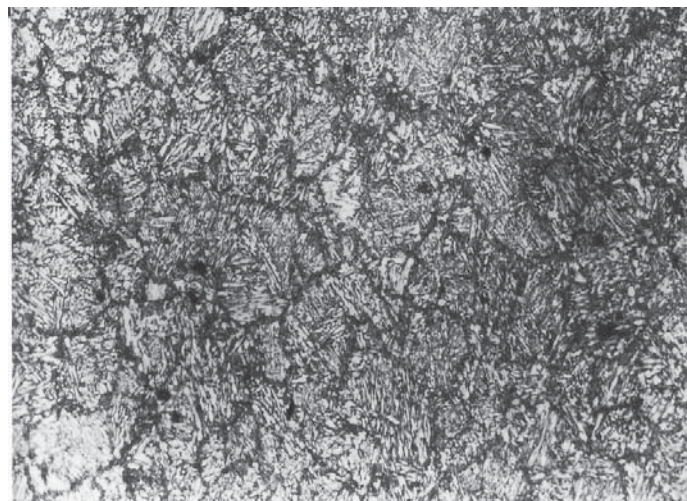


Рис. 4. Микроструктура участка неполной перекристаллизации ЗТВ сварного соединения из стали 15X1M1Ф. x100

Обогащение примесными и легирующими элементами приграничных зон зерен α -фазы, а также их границ, происходит и при высоком отпуске сварных соединений.

Установили, что в сварных соединениях имеет место обогащение границ обоих типов: бывших аустенитных зерен и зерен α -фазы. В наибольшей мере обогащение обоих типов характерно для участков сплавления и перегрева ЗТВ. Наиболее обогащаются примесями зерна α -фазы на участке неполной перекристаллизации ЗТВ, (рис. 5–6)

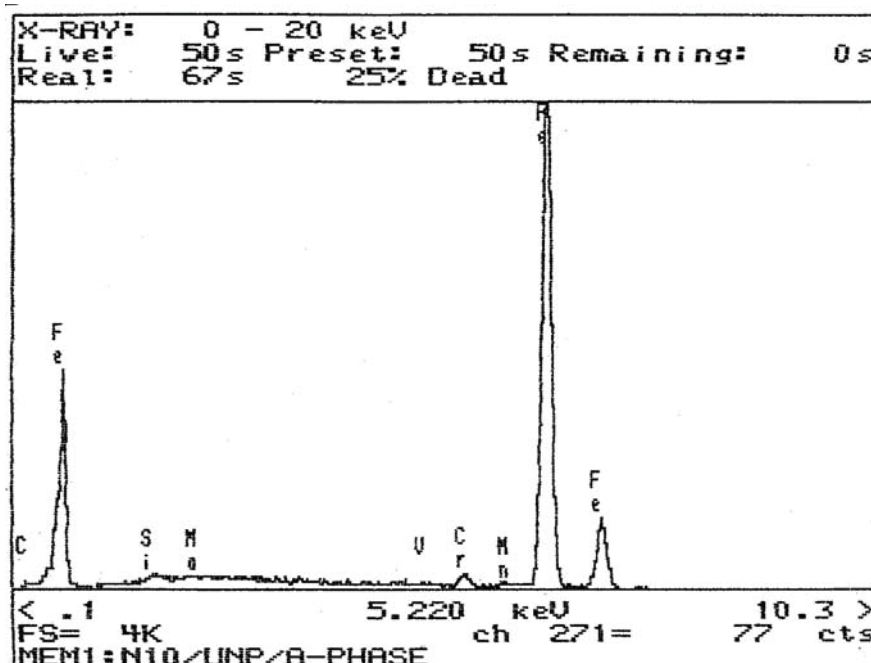


Рис. 5. Спектр зерен α -фазы участка неполной перекристаллизации ЗТВ сварных соединений из стали 12X1MФ. Исходное состояние

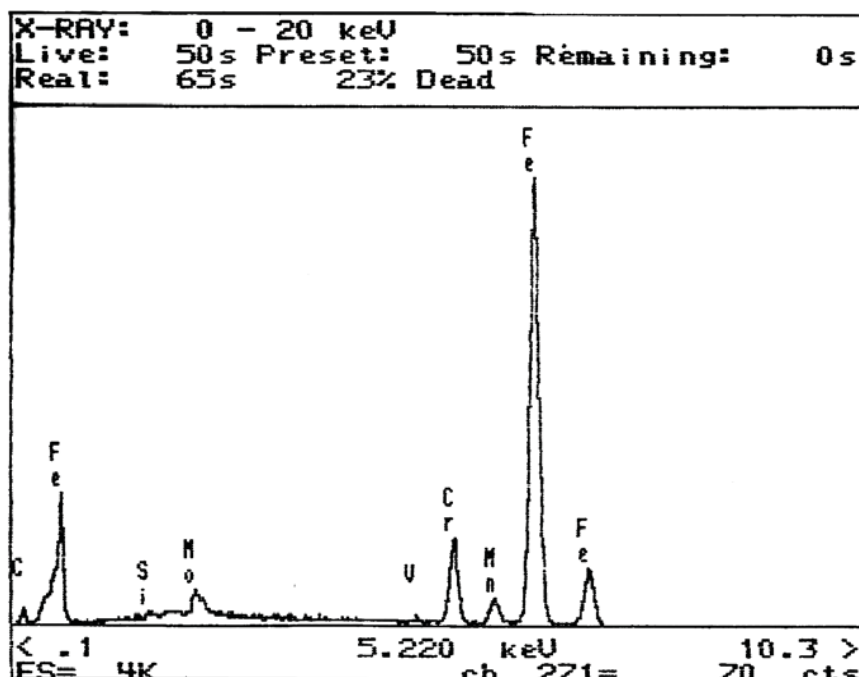


Рис. 6. Спектр зерен α -фазы участка неполной перекристаллизации ЗТВ сварных соединений из стали 12Х1МФ. Ресурс 190000ч

Обогащение приграничных зон зерен α -фазы и их границ прямо связано с наличием повреждаемости по границам зерен (см. рис. 2), что наиболее характерно для участков неполной перекристаллизации и сплавления ЗТВ сварных соединений.

Путем использования методов Оже-спектроскопии и поверхностного микрозондового анализа определили концентрационный профиль сегрегации приграничных зон зерен α -фазы. Установили, что наибольшее обогащение границ зерен легирующими и примесными атомами отмечается на поверхности межзеренного излома, (рис. 7).

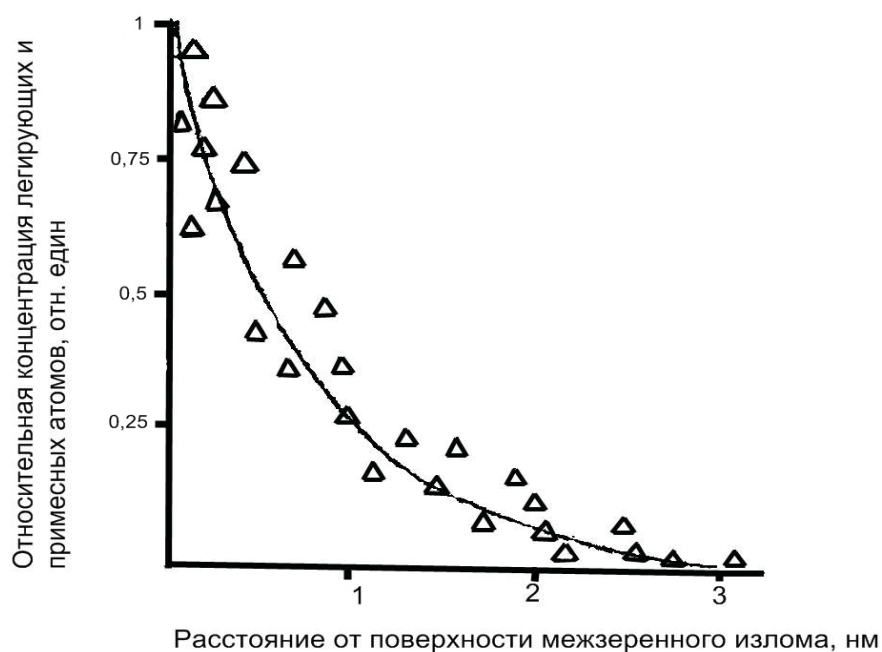


Рис. 7. Концентрационный профиль зернограничной сегрегации Cr, Mo, Mn, Si и P в металле участка неполной перекристаллизации ЗТВ сварного соединения из стали 12Х1МФ. Рис. 2. Ресурс 275637 ч

Обогащение быстро уменьшается при удалении от зоны, примыкающей к границам зерен и на глубине до 9–10 атомных слоев концентрация примеси уменьшается до значения, соответствующего концентрации в теле зерна. Установили, что наибольшая концентрация примесных и легирующих атомов сосредоточена в прилегающих к поверхности излома 2–4 атомных слоях.

Распределение примесных атомов в обогащенной приграничной зоне α -фазы свидетельствует о конкурирующих неравновесной и равновесной сегрегациях. Причем равновесный характер сегрегации имеет адсорбционную природу. Равновесной сегрегацией на внутренних поверхностях раздела принято считать такую сегрегацию, при которой химический потенциал поверхностно-активных легирующих и примесных атомов одинаков как в приграничной зоне, так и на определенном удалении от нее. Установившаяся сегрегация в условиях рабочих температур ($T_{\text{э}} = 500\text{--}585\text{ }^{\circ}\text{C}$) будет сохраняться практически на всей протяженности эксплуатации сварных соединений. Такое равновесие устанавливается в результате соответствующих условий при длительной эксплуатации. Однако коагуляция карбидных фаз, преимущественно M_{23}C_6 , сопровождающаяся адсорбцией атомов Cr и Mo из приграничных зон зерен α -фазы для достройки их решеток, вызывает нарушение равенства химических потенциалов. Имеют место переходные процессы Cr и Mo, а также C из α -фазы в фазы выделений. Переходные процессы, с различной интенсивностью, происходят на всем протяжении эксплуатации сварных соединений. Однако, наибольшая их интенсивность характерна для периода наработки сварных соединений 200000–250000 ч. Именно в этот период отмечается наибольшая скорость реакции $\text{M}_7\text{C}_3 \rightarrow \text{M}_{23}\text{C}_6$. Интенсивность перемещения атомов Cr и Mo из α -фазы в фазы выделений обусловлены подвижностью этих атомов в процессах объемной и зернограничной диффузий.

Неравновесная сегрегация, взаимосвязанная с особенностями карбидных реакций $\text{M}_3\text{C} \rightarrow \text{M}_7\text{C}_3 \rightarrow \text{M}_{23}\text{C}_6 \rightarrow \text{M}_6\text{C}$, локализуется в приграничных зонах, размеры которых составляют 0,1–0,4 мкм, что сопоставимо с размерами карбидных выделений. Различие обогащения приграничной зоны примесями на расстоянии около 1,0–1,2 мкм от границы, вызвано отличающейся подвижностью атомов Cr и Mo легирующих α -фазу. Установили, что подвижность таких атомов в значительной мере зависит от исходной структуры сварных соединений, а также от уровня исходной сегрегации.

Степень обогащения границ зерен сначала возрастает, затем снижается при достижении уровня концентрации легирующих и примесных атомов на границах зерен соответствующих неравновесной сегрегации выше аналогичного уровня равновесной.

В условиях длительной эксплуатации зернограничная сегрегация примесных и легирующих элементов образуется при наличии градиента химического потенциала и под влиянием адсорбционного снижения энергии границ зерен. Заметную роль при контролирующем влиянии приведенных факторов играют физико-химические процессы включающие диффузионное перемещение легирующих и примесных атомов, обеспечивающие структурную релаксацию. Снижение интенсивности физико-химических процессов позволит уменьшить уровень сегрегации в приграничных зонах зерен α -фазы и на их границах, что вызовет увеличение стабильности структуры и снижение уровня повреждаемости сварных соединений, а также увеличение их ресурса.

Выводы

1. Установили, что в процессе длительной эксплуатации сварных соединений из теплоустойчивых сталей в приграничных зонах зерен α -фазы формируется как не равновесная так и равновесная сегрегация, что вызывает увеличение уровня отпускной хрупкости сварных соединений.

2. Для уменьшения степени сегрегации целесообразно снизить интенсивность физико-химических процессов, которые происходят в металле сварных соединений длительно эксплуатируемых в условиях ползучести и малоциклового усталости.

Список литературы

1. Л. М. Утевский, Е. Э. Гликман, Г. С. Карк. Обратимая отпускная хрупкость стали и сплавов железа. – М.: Металлургия, 1987. – 220 с.
2. Дмитрик В. В. Сыренко Т. А. к развитию способов изготовления сварных соединений из теплоустойчивых перлитных сталей // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2004. – № 2 (8). – С. 7–9.
- 3 В. В. Дмитрик, В. Н. Баумер. Карбидные фазы и повреждаемость сварных соединений при длительной эксплуатации // Металлофизика, новейшие технологии. – 2007. – № 7. – С. 937–948.

THE PECULIARITIES OF THE DOWNHOLE SHORTNESS OF THE STEAMPIPE'S WELDED JOINSNGS

V. V. DMITRIK, Dr. Sci. Tech., Pf., T. A. SIRENKO

Some peculiarties of the metal tempering brittleness in the weld joints of the thermal power plent's steam conduits consisting of heat resistant pearlitic steels 15X1M1Φ and 12X1MΦ prolonged running under creep conditions have been studied. It has been determined found that the tempering brittleness was provided by the disbalanced grain boundary segregation of the alloying and a dmix-turing elements.

Поступила в редакцию 11.02 2010 р.