

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

УДК 669.14.018.44

Чечель Л.А., [Кузнецов Е.В.], Орлов А.С., Школьников Б.Э.

ЖАРОСТОЙКАЯ, ЖАРОПРОЧНАЯ ХРОМОМАНГАНЦЕВАЯ АУСТЕНИТНАЯ СТАЛЬ ДИ59

В 1970-х годах в топливной политике нашей страны произошли существенные изменения, в результате которых доля использования в теплоэнергетике мазутного топлива резко возросла. Это в значительной степени повлияло на работоспособность конвективных пароперегревателей, в качестве материала которых использовалась аустенитная хромоникелевая сталь 12X18H12T.

Следует отметить, что в условиях работы на «чистых» углях, не содержащих соединений серы, трубы из стали 12X18H12T обеспечивали надежную работу КПП в.д. на полный ресурс работы котла – 100 тысяч часов при температуре пара 600°C, рабочая температура металла 650°C. При работе на мазутном топливе срок эксплуатации труб из хромоникелевой стали значительно уменьшается.

Кроме того, за последнее время ухудшилось качество применяемых мазутов. Это несомненно сказывается на работоспособности материалов. Многочисленными исследованиями установлено, что причиной интенсификации процесса коррозии является появление на поверхности металлов жидких составляющих. Для хромоникелевых сталей это легкоплавкие никелевые сульфидные соединения и эвтектики, в частности сульфидная эвтектика Ni–Ni₃S₂ с температурой плавления 625–644°C, которая приводит к интенсивному утонению стенки трубы пароперегревателей. Работами с ОАО НПО «ЦНИИТМАШ» однозначно показано, что для этих условий целесообразно применение труб из хромомарганцевых аустенитных сталей, температура плавления сульфидов и сульфидных эвтектик которых значительно больше рабочих температур пароперегревателя – выше 1000°C. Кроме того, марганец, имея большее сродство к сере, чем никель, в первую очередь образует сульфиды.

Этим и объясняется значительно более высокая жаростойкость хромомарганцевых сталей в сравнении с хромоникелевыми в серосодержащих топливах. При температуре 650°C, продолжительностью 10000 ч, в условиях, имитирующих продукты сгорания мазутного топлива, жаростойкость стали ДИ59 в 3 раза выше, чем у применяемой хромоникелевой стали 12X18H12T, а в условиях, имитирующих продукты сгорания экибастузских углей, – в 8 раз.

Хромомарганцевая сталь ДИ59 прошла полный цикл технологического исследования и производст-

венного освоения изготовления трубной заготовки, труб и элементов пароперегревателей котлов энергоблоков, в том числе сварку и термообработку гибов.

Одной из важнейших задач внедрения котельной стали в промышленное производство является получение качественных сварных соединений, стойких против горячих трещин в металле шва и околошовной зоне. О деформационной способности стали можно судить по величине относительного сужения образца. По протяженности температурного интервала хрупкости (ГИХ) и деформационной способности металла в этом интервале сталь ДИ59 можно отнести к материалам, стойким против образования горячих трещин в околошовной зоне.

Основное количество стыковых соединений труб поверхностей нагрева котлоагрегатов выполняется при заводском изготовлении методом контактной стыковой сварки оплавлением. Ручная комбинированная сварка таких соединений (корень шва – аргодуговой сваркой неплавящимся электродом с присадочной проволокой и далее – сварка покрытыми электродами) может использоваться главным образом на монтаже и в отдельных случаях в заводских условиях применительно к комбинациям марок основного металла труб ДИ59+ДИ59 и ДИ59+08X18H12T (12X18H12T).

Результаты сварки – контактной и комбинированной исследовались на стыках труб ДИ59 и композитных: ДИ59 + 12X18H12T и ДИ59+12X1МФ. Для сварки были применены электроды ЦТ-15. Образцы, вырезанные из сварных стыков, подвергались механическим испытаниям на растяжение, сплющивание, загиб и металлографическому исследованию.

Значения временного сопротивления разрыву оказались несколько выше норм по ПК № 03ЦС-66 для сварных соединений стали 12X18H12T. Разрушение при испытании на растяжение, как правило, происходило вне зоны сварки. Результаты испытания на сплющивание и загиб удовлетворительные.

Характер микроструктуры стыков, выполненных как контактной, так и комбинированной сваркой, типичен для сварных соединений сталей аустенитного класса.

Испытания на длительную прочность и кратковременный разрыв проводились на 8 плавках труб стали ДИ59. Математическая обработка результатов испытаний показала, что по уровню жаропрочности сталь ДИ59 близка к заменяемой стали 12X18H12T. Результаты испытаний оформлены в таблицах стандартных

справочных данных ГСССД 116-88 «Коррозионно-стойкая сталь 0X13Г12С2Н2Д2Б (ДИ59). Условный предел длительной прочности при температурах 500–650°С».

Результаты испытаний на длительную прочность крутозагнутых гибов, проводимые под внутренним давлением, и сварных соединений, как под внутренним давлением, так и под внутренним давлением с приложением изгибающего момента, нанесенные на полосу разброса (средние значения –20%) по ГСССД 116-88, показали, что значения длительной прочности находятся на высоком уровне и отвечают требованиям технических условий ТУ 14-3Р-55-2001, а также данным ГСССД 116-88.

Проведенные в лабораторных условиях испытания показали, что сталь ДИ59 по жаростойкости при температуре 650°С в продуктах сгорания высокосернистого мазута превосходит сталь 12Х18Н12Т в 2–3 раза, в условиях имитирующих продукты сгорания экибастузского угля, – в 8 раз (при 700°С – в 18 раз). Незначительное изменение скорости окисления с повышением температуры в интервале 580–700°С обеспечивает этой стали малую чувствительность к перегревам, что повышает надежность работы материала в данных условиях. Проводились также испытания стали ДИ59 в продуктах сгорания эстонских сланцев. В среде воздуха за 2500 ч при 800°С привес стали ДИ59 составляет 2 мг/см², а при 900°С – 10 мг/см².

Трубы из хромомарганцевой жаростойкой, жаропрочной стали ДИ59 работают в условиях конвективных пароперегревателей высокого давления (КПП в.д.) котлов энергоблоков теплоэлектростанций (ТЭС) на различных видах энергетических топлив. Максимальная наработка блоков пароперегревателей составляет около 160 тыс. часов.

Контроль за эксплуатацией осуществляется сотрудниками Всероссийского теплотехнического института (ОАО «ВТИ») и ОАО НПО «ЦНИИТМАШ». Проведены исследования вырезок труб из стали ДИ59 в сравнении с вырезками труб стали 12Х18Н12Т после различной продолжительности эксплуатации в условиях разных станций.

Установлено, что при работе на мазутном топливе коррозионные потери через 10000–15000 ч работы труб из стали ДИ59 в 1,5–2 раза меньше, чем труб из стали 12Х18Н12Т. Следует отметить, что в данном случае разница определяется лишь количеством и продолжительностью температурных забросов. Преимущество стали ДИ59 было бы более существенным, если бы температура эксплуатации была выше 620°С. С увеличением продолжительности эксплуатации до 30000 ч эта тенденция сохраняется.

В ВТИ была сделана оценка параметра длительной прочности труб из стали ДИ59 после 31031 и 46676 ч эксплуатации в условиях Литовской ГРЭС. Эквивалентная температура эксплуатации составляла 615–620°С. Значение параметра по сравнению с исходным состоянием практически не изменяется: при напряжении 80 МПа – 16,7 и 16,63, а при 60 МПа – 17,25 и 17,08 соответственно. При этом в 2,5 раза возрастает длительная пластичность.

Средняя глубина коррозии труб из стали ДИ59 за 46676 ч эксплуатации составляла от 0,19 до 0,25 мм, а из стали 12Х18Н12Т – от 0,36 до 0,55 мм. Последние исследования вырезок труб после эксплуатации на Сырдарьинской ГРЭС продолжительностью более 76000 ч показали, что разница в коррозионной стойкости сталей ДИ59 и 12Х18Н12Т заметно возрастает.

Механические свойства сварных соединений после 38000 ч эксплуатации на Сырдарьинской ГРЭС составили соответственно: $\sigma_b=653$ МПа; $\sigma_T=371$ МПа; $\delta=34,0\%$; $\varphi=73,4\%$ (усредненные значения по четырем образцам).

Металл сварного шва плотный, без трещин и пор. Сравнение основного металла и зоны термического влияния (ЗТВ) стали ДИ59 показало, что во всех случаях характерно сохранение аустенитной структуры с весьма малым количеством α -фазы – от 2 до 9%. Исследование параметров кристаллической решетки хромомарганцевого аустенита и микронапряжений, характерных для металла ЗТВ после сварки и эксплуатации, показало, что длительные эксплуатационные испытания выравнивают параметры тонкой структуры металла ЗТВ на различном удалении от линии сплавления.

В последние годы участились случаи локального коррозионного разрушения труб из стали 12Х18Н12Т с внутренней стороны – со стороны пара (в местах повреждения защитной оксидной пленки) уже через 20000–40000 ч эксплуатации. Исследования вырезок труб из стали ДИ59, проведенные ВТИ, показали, что на внутренней поверхности этих труб, даже при самом неблагоприятном водно-химическом режиме (нейтрально-окислительном), образуется плотная, имеющая хорошую адгезию с металлом, оксидная пленка с хорошо развитым подокисным слоем. Пленка состоит из мелкодисперсной смеси оксидов двух фаз – гематита и магнетита, примерно в равных количествах. Кристаллы магнетита расположены в порах гематитовой губки, что обуславливает малое количество пор. При этом трещин, доходящих до поверхности металла, не образуется даже при деформации более 6%. И, как следствие, нет случаев хрупкого разрушения труб из стали ДИ59 даже после 150000 ч эксплуатации. Пленка, образующаяся на трубах из стали 12Х18Н12Т, работающих в таких же условиях, имеет четко выраженное двухслойное строение: внешний слой состоит преимущественно из гематита, а внутренний – из магнетита. Такая пленка имеет много пор, большую толщину и легко отслаивается. Деформационная способность такой пленки очень низкая ($E_{\text{пр}}=1,1–1,25\%$).

Практика показала, что значительное влияние на свойства стали имеют способ производства трубной заготовки и труб (метод выплавки, способ передела, прокатка, ковка и т.д.) и качество самого металла в изделии.

Первое промышленное освоение производилось на двух заводах:

- выплавка и изготовление трубной заготовки на заводе «Днепроспецсталь» (г. Запорожье);
- производство котельных труб на Никопольском трубном заводе.

Выплавка проводилась в 30-тонных дуговых электропечах с разливкой в слитки массой в 1 тонну и последующей ковкой из них трубной заготовки $\varnothing 95–105$ мм.

На трубных заводах Никопольском (г. Никополь), Новотрубном (ПНТЗ, г. Первоуральск) и Синарском (СинТЗ, г. Каменск-Уральский) заготовка подвергалась сначала горячей прокатке в гильзу, а затем тепловой прокатке на станах ХПТ в пароперегревательные трубы предготового и готового размера.

При такой технологии трубная заготовка имела большое количество дефектов – неметаллические включения (иногда выше 5 балла), полученные на их основе трещины, расслоение металла и др., что приводило к высокому расходу коэффициента при производстве труб. Качество металла труб, полученных по указанной технологии, весьма низкое.

Для получения высококачественных труб были полностью изменены способы производства трубной заготовки и труб по всему циклу, в частности:

- отработана технология выплавки стали ДИ59 в газокислородных конвекторах большой мощности (60 т), последующая внепечная обработка в установках печь – ковша с продувкой аргоном;
- разливка в большие слитки до 3,4–4,3 т и прокатка на обжимно-заготовочном стане 1050/950 с получением катаной трубной заготовки Ø 180 мм.

В трубном производстве в условиях завода ЗАО «Сентравис продакшн Юкрейн» (г. Никополь) вместо горячей прокатки трубной заготовки в гильзу используется горячее прессование трубы на предготовый размер, что благодаря большим нагрузкам «заживляет» несплошности в металле. Трубы готового размера изготавливаются последующим волочением в 2 прохода на станах ХПТ-75 и ХПТ-55.

Таким образом, освоена высокоэффективная технология изготовления качественных труб из стали ДИ59 на заводе «Сентравис продакшн Юкрейн» (г. Никополь) из трубной заготовки производства завода ОАО «Днепроспецсталь» (г. Запорожье).

Во Всероссийском теплотехническом научно-исследовательском институте было проведено исследование кинетики развития деформации ползучести металла труб.

Испытания на ползучесть проведены в диапазоне температур 650–730°C при напряжениях 60–140 МПа на 19 трубчатых образцах с длиной рабочей части 65–70 мм. Максимальная длительность испытаний составила 3396 ч.

Характерным для первичных кривых ползучести при всех режимах испытания является слабо выраженный участок ускоренной ползучести.

Выявление зависимости между деформацией ползучести (ε_n , %) и истощением ресурса (τ_i/τ_p , %) кривые ползучести обработаны в координатах $\log \varepsilon_n - \tau_i/\tau_p$, где τ_i – текущее время испытаний; τ_p – время до разрушения, показало, что одинаковому значению истощения ресурса соответствуют одинаковые в пределах разброса значения деформации. Накопление деформации происходит по экспоненциальному закону. Это значит, что в исследованном металле протекают структурные изменения, т.е. во время испытания происходит непрерывное выделение и коагуляция упрочняющих фаз. Интенсивное развитие деформации начинается после истощения 90% ресурса, при $\varepsilon_n=4\%$. Эта величина является

критической для металла данной плавки.

Исследование структуры проведено на металле образцов при деформации 30, 50, 70 и 90% истощения ресурса.

На металле каждого образца исследовали состояние границ зерен, количество и состав σ -фазы, количество частиц карбидов $Me_{23}C_6$ и NbC в теле зерен и микротвердость.

Травление шлифов для определения содержания σ -фазы проведено электролитически в реактиве состава 2г КОН + 2г $KMnO_4$ + 50 cm^2 H_2O . Количество σ -фазы определялось методом сетки на 50 полях при увеличении 1000. Точность оценки среднего значения $\pm 0,3\%$. Для оценки состояния границ зерен и подсчета числа частиц карбидов шлифы травили в 10%-ном растворе щавелевой кислоты. Подсчет частиц карбидов $Me_{23}C_6$ проводился по микрофотографиям, снятым при увеличении 1000 и увеличенным в 2 раза при печати. Точность оценки среднего значения плотности карбидов равна $\pm 0,2 \cdot 10^{-2}$ $1/mm^2$.

Для оценки состава σ -фазы и количества частиц карбидов ниобия NbC использовали сканирующий электронный микроскоп САМЕВАХ MBX-1 с локальным рентгеноспектральным анализатором. Число частиц подсчитывали при увеличении от 1000 до 8000. Точность оценки среднего значения плотности карбидов $\pm 0,7 \cdot 10^{-4}$ $1/mm^2$.

Для выявления степени упрочнения тела зерна проводили измерение микротвердости при нагрузке 20 гр. Среднее значение подсчитывали на базе 50 измерений. Точность оценки среднего равна ± 4 кгс/ mm^2 .

В исходном состоянии структура металла состоит из зерен аустенита и первичных карбидов ниобия. После 30% истощения ресурса в структуре металла произошло растворение хромистых карбидов $Me_{23}C_6$ по границам зерен, появление светлой оторочки, обусловленное повышением содержания хрома в местах растворения этих карбидов, выделение σ -фазы по границам и небольшого количества частиц карбидов $Me_{23}C_6$ в теле зерна.

После 50% истощения ресурса наблюдается частичное рассасывание светлой оторочки вследствие диффузии хрома, наличие σ -фазы по границам зерен и продолжающееся выделение карбидов $Me_{23}C_6$ в теле зерна.

После 70% истощения ресурса светлая оторочка полностью исчезает, однако границы между зёрнами различимы, структура состоит из зерен аустенита, σ -фазы по границам зерен и карбидов $Me_{23}C_6$ в теле зерна.

После 90% истощения ресурса границы зерен неразличимы, количество карбидов $Me_{23}C_6$ в теле зерна уменьшилось, частицы σ -фазы укрупнились.

Установлено, что в исследуемой стали содержание σ -фазы за весь период, соответствующий 30–90% истощения ресурса, меняется незначительно, с 1,8 до 2,5%. Обнаружено, что содержание марганца, хрома и железа в σ -фазе практически не меняется вплоть до 90% истощения ресурса и находится в диапазоне: 11–13, 17–21 и 62–68% соответственно. В связи с этим количество σ -фазы не может быть критерием для оценки ис-

черпания ресурса металла. Установлено, что в первой половине «жизни» металла до истощения 50% ресурса основным структурным процессом является выделение карбидов NbC и Me₂₃C₆ в теле зерна и карбидов ниобия по границам зерен.

Микротвердость в этот период увеличивается. После 50% истощения ресурса начинается коагуляция карбидов NbC и Me₂₃C₆ в теле зерна. В период от 70 до 90% истощения ресурса наблюдается частичное растворение карбидов Me₂₃C₆. Вследствие этих процессов микротвердость тела зерна уменьшается.

Проведенные исследования труб стали ДИ59, изготовленных по новой усовершенствованной технологии изготовления трубной заготовки и пароперегревательных труб, показали, что значительно улучшилось качество металла: неметаллические включения располагаются равномерно по телу трубной заготовки и составляют по сульфидам – 0,5 балла, по оксидам и силикатам – 0,5–1,4 балла. Количество феррита не превышает 1,5 балла.

Все это положительно сказалось на служебных свойствах, в частности на значительном увеличении длительной пластичности металла труб стали ДИ59.

Изменение механических свойств и структуры стали ДИ59 при различных температурах после старения, подтвержденные эксплуатационными испытаниями, показало, что сталь ДИ59 нечувствительна к колебаниям температур до 700°С, что, несомненно, является исключительной особенностью и преимуществом данной стали. По заключению ВТИ, скорость наружной коррозии металла труб из стали ДИ59 при эквивалентных температурах 620–630°С не превышает 0,3 мм за 100000 ч эксплуатации. При этом ресурс работы труб конвективных пароперегревателей высокого давления (КПП в.д.) из труб стали ДИ59 составляет 300000 ч. При замене труб из стали 12Х18Н12Т на трубы из стали ДИ59 реальный ресурс работы увеличивается в 4–5 раз вследствие предотвращения хрупких разрушений с внутренней стороны трубы.

УДК 539.4

Старченко Е.Г., Казанцев А.Г., Ходаков В.Д., Силаев А.А., Зубченко А.С.

О ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ ДОПУСТИМОГО ВРЕМЕНИ СУММАРНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛИ 10ГН2МФА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РЕМОНТНЫХ РАБОТ

При изготовлении, монтаже и ремонте после эксплуатации сварные соединения оборудования и трубопроводов АЭС из стали 10ГН2МФА подвергаются нескольким термообработкам при температуре 620–660°С.

Допустимое суммарное время термообработки, базирующееся на результатах проведенных аттестационных испытаний, составляет 45 ч [1–4].

В связи с гипотетической возможностью проведения на энергоблоках, срок эксплуатации которых приближается к 30 годам, крупных ремонтных работ, таких как замена парогенераторов, ремонт шва приварки коллектора теплоносителя к корпусу парогенератора (шов №111), возникла необходимость оценки влияния суммарной продолжительности отпуска, превышающей 45 ч.

В данной работе исследовалось влияние суммарной продолжительности отпуска до 75 ч при температуре 620–660°С на эксплуатационные свойства основного металла и сварных соединений стали 10ГН2МФА.

Исследования проводились прежде всего применительно к сварным соединениям трубопроводов Ду850 ГЦТ (замена парогенераторов) и шву приварки коллектора к корпусу парогенератора (шов № 111). Эти сварные соединения при изготовлении выполнялись по отличающимся друг от друга технологиям с использованием различных сварочных материалов.

Исследованные типы материалов и сварных соединений приведены в табл. 1.

Из термообработанных сварных соединений вырезались образцы для определения механических свойств, сопротивления малоциклового усталости и

хрупкой прочности.

В табл. 2 приведены результаты испытаний, а в табл. 3 – гарантированные механические свойства основного металла стали 10ГН2МФА и металла шва, выполненного ручной электродуговой сваркой электродами УОНИИ-13/55 и ПТ-30, а также автоматической сваркой электродной проволокой Св-10ГН1МА под флюсом ФЦ-16.

Из табл. 2 и 3 видно, что после проведения термообработки 75 ч при температуре 620–660°С не происходит снижение механических свойств ниже гарантированных как у основного металла, так и всех исследованных вариантов металла шва.

Все механические свойства ($R_{p0,2}$, R_m , A , Z) существенно превышают гарантированные значения. При этом металл шва, выполненный электродами ПТ-30 и сварочной проволокой Св-10ГН1МА под флюсом ФЦ-16,

Таблица 1

Исследованные типы материалов и сварных соединений

Сварное соединение	Способ сварки и сварочные материалы
Сварной шов приварки коллектора к корпусу парогенератора	Ручная электродуговая сварка электродами УОНИИ-13/55
Сварной шов приварки днища к корпусу парогенератора	Автоматическая сварка под флюсом (Св-10ГН1МА + ФЦ-16)
Сварной шов сварки трубопроводов Ду850 между собой	Ручная электродуговая сварка электродами ПТ-30