УДК 621.785.4:79

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ДОСВАРОЧНОЙ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ХРОМСОДЕРЖАЩЕЙ ЖАРОПРОЧНОЙ СТАЛИ

Пантелеенко Ф.И. – главный научный сотрудник,
Миньков А.Л. – научный сотрудник,
Белорусский национальный технический университет,
Беларусь, г. Минск

В настоящее время ядерная энергетика признана зеленой и активно развивается в ряде стран, в том числе России, Китае, Беларуси. При этом одной из актуальнейших с точки зрения безопасности станций является проблема повышения срока службы главных сварных паропроводов атомных станций, изготавливаемых в большинстве случаев из экономнолегированной эффективной стали Р91. Стали этой группы (Р91 – российский аналог 10Х9МФБ, Р92 и некоторые другие), содержащие 9 процентов хрома, за счет небольших добавок V,Nb,N,B значительно улучшили стойкость к ползучести и способны работать длительное время при давлениях пара 31 МПа и температурах до 600°С (стали этой группы эффективны для работы при температурах до 0,5 Т плавления). Однако стойкость их сварных соединений не превышает 80 процентов срока службы основного тела трубы по причине повышенной хрупкости зоны термического влияния. Химический состав стали марки Р91 приведен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав стали марки Р91 в масс%

Элемент	*C*	*Cr*	*Mo*	*Si*	*Mn*	*V*	*Nb*	*N*	*Fe*
масс.%	0,10	9,00	0,92	0,23	0,46	0,18	0,08	0,084	Основа

Термическую обработку стали Р91 проводили с использованием как стандартных электрических печей, так и на эксклюзивной установке индукционного нагрева с обратной связью ФТИ-40/10-50. Исследования проводили с помощью оптической металлографии, сканирующей электронной микроскопии, дюрометрии, рентгеновского фазового анализа, микрорентгеноспектрального анализа, дериватографии, фрактографии, стандартных методов испытания механических свойств.

Выбранные для исследований режимы досварочной термической обработки приведены ниже.

1. Отжиг - 1050 °С выдержки 30 минут и охлаждение с печью

2. Нормализация – нагрев со скоростью 10 °С/мин до 1050 °С, выдержка 30 мин и охлаждение на воздухе инертное.

3. Нормализация двойная – нагрев (10 °С/мин, 1050 °С), выдержка 30 мин и охлаждение на воздухе инертное до 20 °С с повторением по тем же режимам.

4. Высокотемпературное термоциклирование в диапазоне 1050 °С - 700 °С трёхкратное – нагрев со скоростью 100 °С/мин, выдержка при 1050 °С 1 мин и охлаждение инерционное до 700 °С с двукратным повторением.

5. Высокотемпературное термоциклирование в диапазоне 1050 °С - 700 °С пятикратное – нагрев со скоростью 100 °С/мин, выдержка при 1050 °С 1мин и охлаждение инерционное до 700 °С) с четырехкратным повторением.

6. Высокотемпературное термоциклирование (1050 °С - 700 °С) трёхкратное – нагрев со скоростью 200 °С/мин, выдержка при 1050 °С 1 мин и охлаждение инерционное до 700 °С с двукратным повторением.

7. Высокотемпературное термоциклирование (1050 °С - 700 °С) пятикратное –нагрев со скоростью 200 °С/мин, выдержка при 1050 °С 1 мин и охлаждение инерционное до 700 °С с четырехкратным повторением.

8. Среднетемпературное термоциклирование в диапазоне 860 °С - 300 °С трёхкратное – нагрев со скоростью 100 °С/мин, выдержка при 860 °С 1 мин и охлаждение инерционное до 300 °С, выдержка 1 мин при 300 °С с двукратным повторением.

9. Среднетемпературное термоциклирование (860 °С - 300 °С) трёхкратное – нагрев со скоростью 200°С/мин, выдержка при 860 °С 1 мин и охлаждение инерционное до 300 °С, выдержка 1 мин при 300 °С с двукратным повторением.

10. Без термообработки

С точки зрения жаропрочности наиболее благоприятной является структура отпущенного мартенсита (нижний бейнит). Данная структура, выбрана как оптимальная для данной группы жаропрочных сталей. Во-первых, структура отпущенного мартенсита является однофазной с хорошим сочетанием высокой прочности и высокой ударной вязкости. Гомогенная однофазная микроструктура является основной предпосылкой достижения высокого сопротивления ползучести. Во-вторых, в отпущенном мартенсите (нижнем бейните) присутствуют дисперсные частицы. Данные частицы, располагаясь равномерно, как внутри, так и по границам зёрен, представляют собой препятствия для движения дислокаций во время ползучести. Стабильность субзерен обеспечивается закреплением их границ дисперсными частицами. В свою очередь субзерна, границы которых стабилизированы карбидными частицами, снижают скорость ползучести на несколько порядков. Таким образом, для мартенситных сталей реечная структура является основным упрочняющим фактором.

Установлено, что предварительная термообработка - пятикратное термоциклирование 700 - 1050°С, со скоростью нагрева 200°С в минуту дает значения максимальной ударной вязкости 76,7 Дж/см², также данная технология обеспечивает максимальные значения предела прочности 1260МПа и предела текучести 1193 МПа, при показателе относительного удлинения - 15,7%.

В распределении микротвёрдости вдоль образца от оси шва до основного металла сварного соединения обнаружен провал на расстоянии 6-8 мм от оси

шва. Провал на графике распределения микротвёрдости сварного шва соответствует расположению ослабленной зоны, которая характеризуется большим размером зерна и соответствует зоне частичной перекристаллизации. Она характеризуется большим размером зерна, который составляет 105 и 90 мкм при стандартной технологии.

Коэффициент разупрочнения ослабленной зоны при стандартной технологии сварки составляет 19% и 16,2%, а при использовании предлагаемой технологии только – 0,55.

Исследования кривой разрушения, излома и фрактограмм показали, что наивысшую ударную вязкость имеет образец термообработанный по режиму №7 -148,9 Дж/см² со временем разрушения – 2300 микросекунд .Следует отметить также, что для досварочной обработки по режиму №7 характерен оптимальный комплекс механических свойств (при высоких параметрах прочности и пластичности имеет место минимум разницы твердости зоны сплавления, зоны термического влияния и основного тела трубы). Кривая разрушения и излом этого образца показывают, что разрушение идёт через череду возникновения, роста и торможения трещин при самом большом прогибе образца. Излом практически весь состоит из вязкой составляющей. Увеличение скорости нагрева от 100 до 200 °С/мин и количества циклов от трёх до пяти существенно повышают ударную вязкость

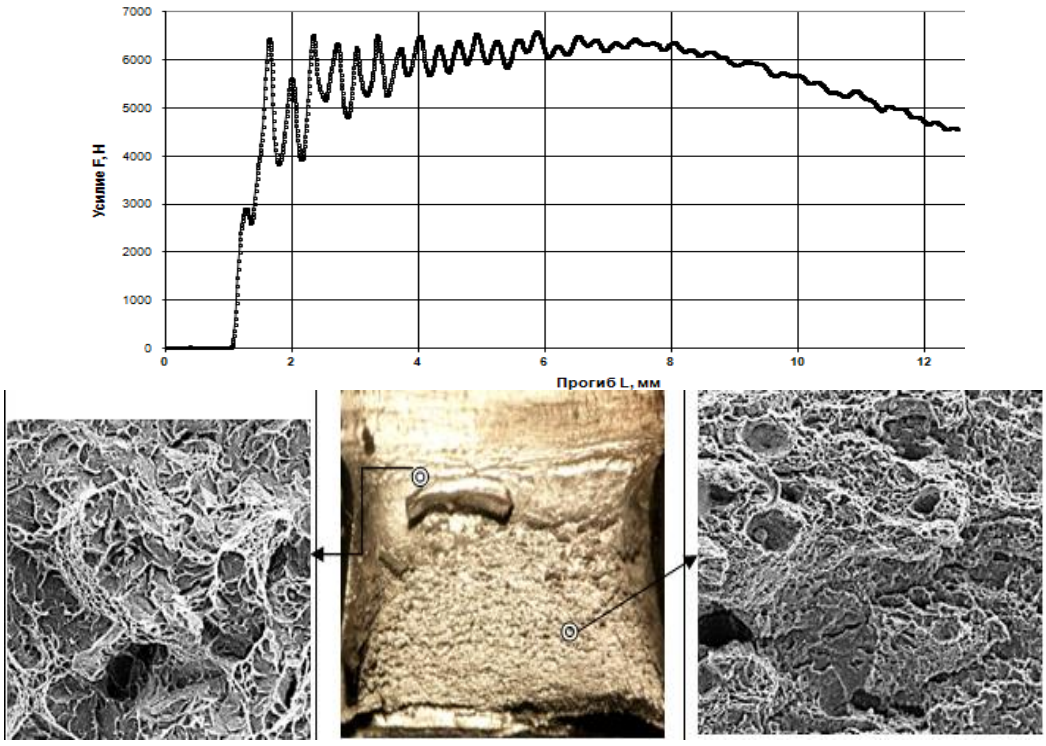

Рис.1. Кривая разрушения и излом при испытании на ударный изгиб образца стали Р91 после термической обработки по варианту №7.

Основные результаты

1) нормализация не устраняет исходную структуру ферритной строчечности, а среднетемпературное и высокотемпературное термоциклирование полностью нивелирует исходную структуру ферритной строчечности;

2) термоциклирование трёх- или пятикратное обеспечивает получение фрагментированной структуры отпущенного мартенсита (нижнего бейнита) с мелкозернистыми карбидными включениями $M_{23}C_6$ и M_3C равномерно распределёнными по телу зерна, а измельчённое зерно способствует образованию полигональной субструктуры слабо чувствительной к перегреву при сварке;

3) скорость нагрева оказывает значительное влияние на температуру начала отпуска мартенсита, а также на интервалы температур образования карбидов $(Fe,Cr)_3C$ и $Me_{23}C_6$, которые зависят от скорости нагрева. При нагреве карбид $Me_{23}C_6$ образуется с экзотермическим эффектом и чем выше скорость нагрева, тем больше этот эффект. При нагреве окончание формирования карбида $Me_{23}C_6$ лежит выше 1100°С. Изменяя скорость нагрева и охлаждения можно влиять на структуру и свойства стали Р91;

4) размеры карбидов $(Fe,Cr)_{23}C_6$ и $Fe(Cr)_3C$ зависят от количества циклов нагрев – охлаждение и скорости нагрева. Наиболее мелкие карбиды округлой формы образуются при скорости нагрева 200°С в минуту и количестве циклов 700 - 1050°С пять;

5) пятикратное термоциклирование 700–1050 °С со скоростью нагрева 200°С в минуту, приводит к максимальному размытию и уширению рефлексов линий рентгенограмм, что в свою очередь характеризует увеличение дисперсности структурных составляющих;

6) фрактографические исследования и элементный анализ состава изломов показали наличие областей с высоким содержанием углерода и азота. Данные области сосредоточены у краёв округлых ямок разной глубины, либо вокруг вершин рассредоточенных мелкодисперсных фаз. Данные области – карбиды или карбонитриды выделяемые при термоциклировании по границам сильно фрагментированных зёрен нижнего бейнита;

7) термоциклирование в диапазоне температур 700–1050°С позволяет повысить прочностные свойства стали Р91 в два раза;

8) оптимальным сочетанием пластических и прочностных свойств обладает сталь Р91 после пятикратного термоциклирования в диапазоне температур 700–1050°С со скоростью нагрева 200°С/мин;

9) увеличение скорости нагрева со 100 до 200°С/мин при увеличении количества циклов термоциклирования до пяти приводит к измельчению зерна мартенсита и дроблению блоков с образованием субблочной структуры;

10) увеличение количества циклов термоциклирования больше пяти нецелесообразно, так как при монотонном росте прочностных свойств снижаются пластические свойства.

Список литературы:

1. Пантелеенко, Ф. И. Исследование механизма разрушения стали Р91 на ударный изгиб после предварительной термообработки до сварки / Ф. И. Пантелеенко, В. А. Зеленин, А. Л. Миньков // Литье и металлургия. 2024. № 4. С. 88–97. https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-4-88-97.

2. Enhanced creep lifetime in P91 steel weldments via stabilizing tempered martensite structure / Zhengman Gu, Ming Zhong, Artem Minkov, Fedor Panteleyenko, Cong Wang. - International Journal of Pressure Vessels and Piping. - Volume 212, Part B, December 2024, 105361 DOI: 10.1016/j.ijpvp.2024.105361

3. Liu, H., Zhong, M., Panteleyenko, F. et al. Cooling Rate Dependency of Retained δ-Ferrite in the Coarse-Grained Heat-Affected Zone of P92 Heat-Resistant Steel. Metall Mater Trans A 55, 3214–3219 (2024). https://doi.org/10.1007/s11661-024-07519-0

Работа выполнена в 2022-2024 гг. в рамках белорусско-китайского договора БРФФИ и НФЕНК №22КИТГ-031 от 5.12.2022г.