УДК 621.791

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ КЛАССИЧЕСКОЙ И ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ СВАРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ИЗ СТАЛИ Р91

М. Н. ФИЛИППОВ
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Актуальность. Жаропрочная сталь Р91 (9Cr-1Mo-V-Nb) широко применяется для изготовления элементов котлов и паропроводов, работающих под давлением пара до 31 МПа и при температурах до 650 °С. Однако эксплуатационный ресурс сварных конструкций из этой стали значительно снижается из-за повышенной диффузионной ползучести, обусловливающей образование трещин III и IV типов в зоне термического влияния (ЗТВ). Одной из ключевых причин трещинообразования является наличие остаточных растягивающих напряжений, возникающих после сварки. Традиционная технология предполагает нормализацию и двойную нормализацию как до, так и после сварки. Однако такой подход не всегда эффективен для снижения уровня остаточных напряжений. Перспективной альтернативой является применение термоциклической обработки (ТЦО) – многократных нагревов и охлаждений в определённых температурных диапазонах.

Цель работы – сравнительное компьютерное моделирование влияния режимов классической нормализации и термоциклической обработки на формирование и релаксацию остаточных напряжений в сварных соединениях труб 48,5 × 5,08 мм из стали Р91.

Методика моделирования. Моделирование выполняли в программном комплексе ANSYS/LS-DYNA с использованием конечно-элементной модели сварного соединения трубы 48,5 × 5,08 мм из стали Р91. Рассмотрены следующие режимы термической обработки.

1. *Классическая обработка*: нормализация или двойная нормализация в диапазоне 20 °С...1 050 °С с выдержкой при 1 050 °С, предсварочный подогрев до 270 °С, многопроходная TIG-сварка в четыре прохода, затем повторная нормализация или двойная нормализация.

2. *Термоциклическая обработка* (*ТЦО*): высокотемпературная трехкратная или пятикратная ТЦО в диапазоне 700 °С...1 050 °С со скоростью нагрева 100 °С/мин и выдержкой при 1 050 °С, сварка, затем высокотемпературная трёхкратная или пятикратная ТЦО [1].

Результаты моделирования. Сравнительный анализ полученных полей остаточных напряжений показал следующее.

Распределение остаточных напряжений после сварки. Моделирование показало, что эквивалентные остаточные напряжения после сварки без термической обработки концентрируются в зоне сварного шва и ЗТВ, достигая максимальных значений порядка 285 МПа. Напряжения распределены асимметрично относительно оси шва: продольная составляющая (в направлении сварки) имеет большее значение и большую зону влияния по сравнению с поперечной.

Влияние классической термической обработки (*нормализации*). Проведение нормализации и двойной нормализации после сварки позволяет снизить уровень остаточных напряжений: для нормализации – до 50 МПа, для двойной нормализации – до 45 МПа. Нормализация не обеспечивает полного снятия растягивающих напряжений в ЗТВ, что сохраняет риск трещинообразования при эксплуатации.

Влияние термоциклической обработки (*ТЦО*). Применение ТЦО демонстрирует более высокую эффективность в снижении остаточных напряжений. Многократные циклы нагрева–охлаждения способствуют более полной релаксации напряжений за счёт активизации диффузионных процессов и перераспределения микронапряжений при фазовых превращениях. Кроме того, ТЦО выравнивает микротвёрдость по сечению соединения, что косвенно свидетельствует о более однородном напряжённом состоянии; снижение напряжений достигает до 35 МПа.

Выводы. На основе результатов компьютерного моделирования можно выделить следующее.

1. Остаточные напряжения после сварки трубы 48,5 × 5,08 мм из стали Р91 концентрируются в зоне шва и ЗТВ, достигают 285 МПа и требуют обязательной досварочной и послесварочной термической обработки.

2. Классическая нормализация и двойная нормализация снижают уровень остаточных напряжений, однако их эффективность ограничена, и они не гарантируют полного устранения растягивающих напряжений в критических зонах.

3. Термоциклическая обработка – более эффективный метод релаксации остаточных напряжений благодаря многократным термическим циклам, способствующим более полному снятию напряжений и выравниванию свойств по сечению соединения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ 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. 85–94.