

ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНЫХ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА РАСКРЫТИЕ ТРЕЩИН В ТРУБОПРОВОДЕ ДУ350 ИЗ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ

Казанцев А.Г., Петров О.М.
АО «НПО «ЦНИИТМАШ», г. Москва, Россия

Использование концепции «течь перед разрушением» (ТПР) при проведении расчетов на прочность позволяет повысить эксплуатационную безопасность АЭС путем обоснования отсутствия опасности внезапного разрыва трубопроводов, исключить из рассмотрения последствия локальных динамических воздействий на опоры и окружающие строительные конструкции, оборудование и трубопроводы, а также отказаться от защитных систем, предназначенных для противодействия последствиям разрывов.

При обосновании применимости концепции ТПР в соответствии с руководством [1] определяется раскрытие сквозных трещин, по которому оценивается площадь канала и утечка теплоносителя, а также возможность ее фиксации системами контроля течей.

В [1] отсутствует методика учета влияния на раскрытие трещины остаточных сварочных напряжений (ОН). Для оценки этого влияния были проведены расчеты с моделированием процесса сварки и оценкой остаточных сварных напряжений и перемещений. Расчеты выполнены применительно к кольцевому монтажному шву соединительного трубопровода ДУ350 с толщиной стенки 40мм (сталь 08X18H10T), рис.1.

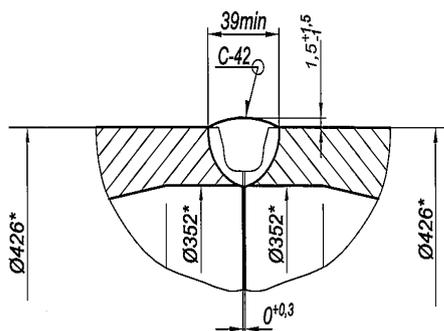


Рисунок 1 – Схема сварного соединения трубопровода

Для определения уровня и характера распределения остаточных сварочных напряжений было проведено МКЭ моделирование (с использованием программы Ansys) процесса многопроходной сварки [2]. На языке APDL был написан скрипт, при выполнении которого происходит цикл последовательного заполнения сварочной ванны. Изначально элементы сварочной ванны были удалены из модели (с помощью команды EKILL). Затем в соответствии с заданным числом проходов происходило восстановление элементов одного слоя за другим (с помощью команды EALIVE). В силу симметрии конструкции и условий нагружения рассматривалась 1/4 часть участка трубы.

Температура элементов сварочной ванны задавалась с учетом температурного цикла электродуговой сварки. После решения температурной задачи выполнялся упругопластический расчет механических напряжений и деформаций с учетом зависимости механических и теплофизических свойств основного металла (сталь 08X18H10T) и металла сварного шва (проволока СВ – 04X19H11M3, электрод ЭА400/10Т) [3].

Полученное распределение остаточных напряжений по толщине стенки трубы в

центре шва показано на рис.2а. Поскольку трубы подвергаются гидроиспытаниям внутренним давлением, была выполнена оценка изменения остаточных напряжений после проведения гидроиспытаний. Как видно из рис.2б, после воздействия внутреннего давления величиной 25 МПа происходит снижение максимальных остаточных напряжений в шве – тангенциальных до 2 раз, осевых почти в 1.5 раза.

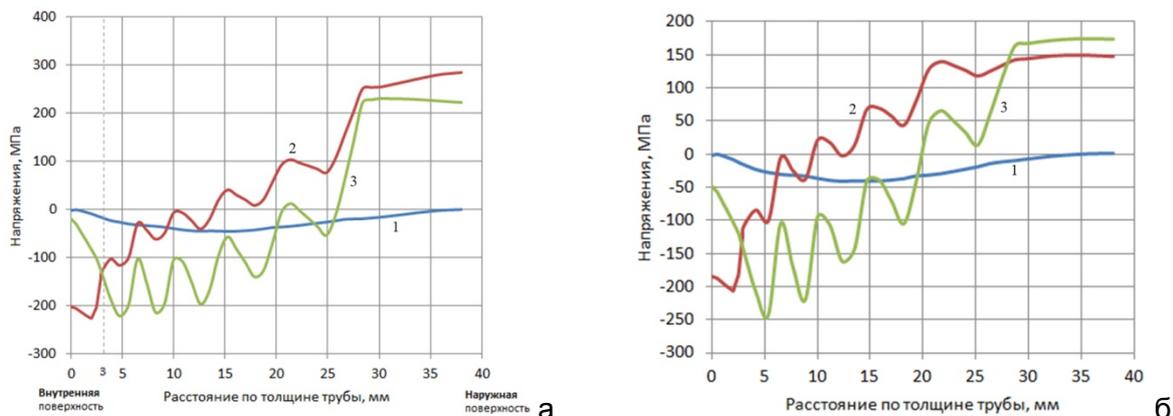


Рисунок 2 - Распределения компонент напряжений по толщине трубы в середине сварного шва до (а) и после ГИ давлением 25 МПа (б). 1 – радиальные, 2 – тангенциальные, 3 – осевые

Расчеты раскрытия трещины были выполнены для трубы с прямой сквозной трещиной в случае действия только внутреннего рабочего давления и изгибающего момента. Длина трещины составляла 250 мм.

Для моделирования контактного взаимодействия берегов трещины использовалась специальная недеформируемая поверхность, препятствующая прониканию узлов трубы за плоскость симметрии (имитирующая противоположный берег трещины).

Из представленных на рис.3а данных видно, что в результате действия остаточных сварочных напряжений изменяется форма канала истечения - увеличивают раскрытие трещины на наружной поверхности и уменьшается на внутренней. Увеличение раскрытия в центре трещины за счет действия остаточных напряжений, составляет на наружной поверхности примерно 0.2 мм, уменьшение на внутренней – 0.08 мм.

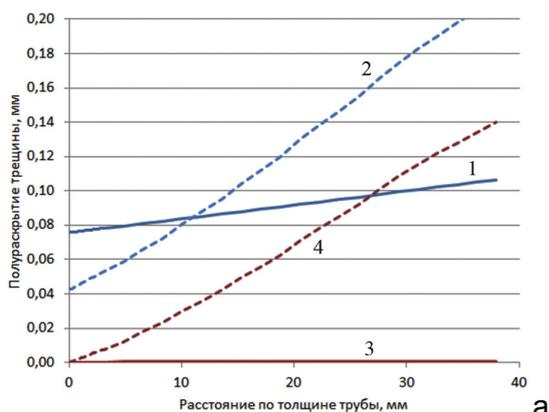


Рисунок 3а – Полуоткрытие прямой трещины по толщине стенки трубы.

1 - без ОН, $p = 15$ МПа; 2 – с ОН, $p = 15$ МПа.
3 - без ОН, $p = 0$; 4 – с ОН, $p = 0$

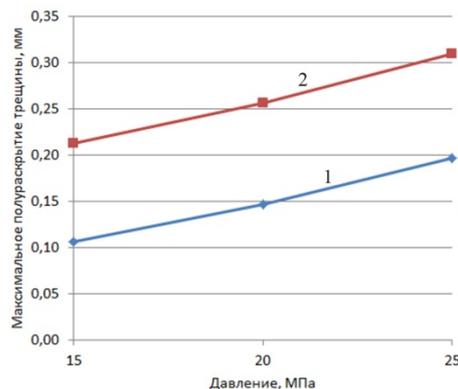


Рисунок 3б – Зависимость максимального полуоткрытия прямой трещины от величины внутреннего давления.

1- без ОН; 2 – с ОН

С увеличением давления величина раскрытия увеличивается практически пропорционально, рис.3б. В рассмотренном диапазоне давлений эффект от действия остаточных напряжений не зависит от величины давления.

Моделирование нагружения трубы изгибающим моментом осуществлялось по

схеме 3-х точечного изгиба воздействием недеформируемой контактной поверхностью на верхнюю часть трубы по середине ее длины между опорами. Задавалась постоянная скорость вертикального перемещения этой поверхности (перемещение как граничное условие прикладывалось к так называемому «пилотному узлу»). Расстояние между опорами, на которых лежала труба, составляло 1400 мм. Максимальному изгибающему моменту $M_{изг}=642$ кН·м соответствует поперечное усилие 1836 кН.

Кривые полуоткрытия по середине длины трещины, соответствующие расчетам без учета остаточных напряжений и с остаточными напряжениями, показаны на рис.4. Отсчет расстояния по толщине трубы – от внутренней поверхности к наружной. За счет действия остаточных напряжений величина полуоткрытия увеличилась на внутренней поверхности трубы на 0.13, на наружной - на 0.2мм.

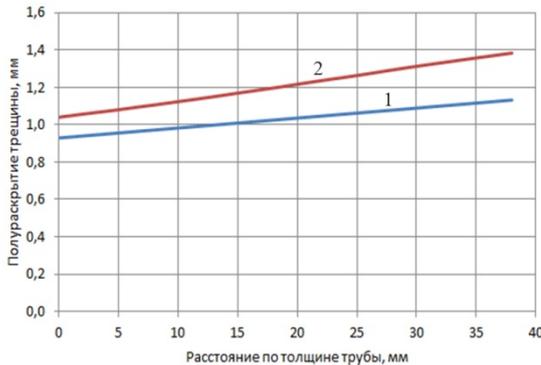


Рисунок 4а – Изменение полуоткрытия трещины по толщине стенки трубы. 1- без ОН, 2 – с ОН. $M_{изг}=642$ кН·м, $p = 16.2$ МПа

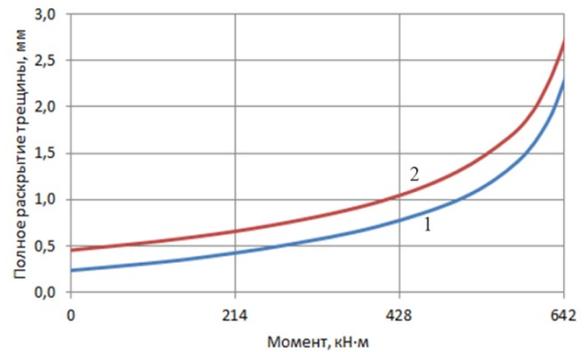


Рисунок 4б – Изменение раскрытия трещины в зависимости от величины $M_{изг}$. 1- без ОН, 2 – с ОН. $p = 16.2$ МПа

Зависимости полного раскрытия трещины (на наружной поверхности, где раскрытие максимально) в зависимости от изгибающего момента приведены на рис.4б.

Полученные результаты показывают, что остаточные сварочные напряжения в кольцевом шве увеличивают раскрытие трещины и, соответственно, расход теплоносителя через течь. Раскрытие трещины, как следует из рис.3б и рис.4б, можно приближенно представить в виде суммы раскрытий от остаточных напряжений и от действия внешних нагрузок:

$$\delta = \delta_p + \delta_M + \delta_{он} , \quad (1)$$

где $\delta_p, \delta_M, \delta_{он}$ - раскрытия трещины соответственно от действия внутреннего давления, изгибающего момента и остаточных напряжений. Наилучшее соответствие соотношения (1) результатам расчета наблюдается в случае действия только внутреннего давления (рис.3б) или давления и изгибающего момента примерно до 300 кН·м (рис.4б), когда величина раскрытия определяется преимущественно упругими деформациями.

Литература

1. Руководство по применению концепции безопасности «Течь перед разрушением» для действующих АЭУ. РД ЭО 1.1.2.05.0939-2013, ОАО «Концерн Росэнергоатом», 2016.
2. Ходаков В.Д., Казанцев А.Г., Ходаков Д.В., Петров О.М., Соков Л.М. Исследование остаточных напряжений в разнородных сварных соединениях трубопроводов АЭС на основе численного моделирования. Тяжелое машиностроение - 2015. -№7-8. - С.13-18.
3. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергоустановок ПНАЭ Г-7-002-86. Москва, Энергоатомиздат, 1989.