

ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ НА ПРОЧНОСТЬ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ НАГРУЗКАХ

У статті на основі метода скінчених елементів та механіки деформованого твердого тіла визначені залишкові температурні напруження, концентрація напружень в зоні зварного з'єднання за рахунок геометричної форми шва, визначено сумарний пружно-деформівний стан зварного шва під одночасною дією залишкових напружень та експлуатаційного навантаження. Проаналізовано вплив залишкових напружень на міцність зварної конструкції в цілому. В якості зварного шва розглядалось стикове зварне з'єднання трубопровідної системи, виконане згідно ГОСТ 5264-80.

In the article on the bases of the finite element method and deformed solid body mechanics was discussed the problem of residual stress with caused by thermo plastic deformation and stress concentration caused by geometrical shape in a welding joint. Was defined stress-strain state under combined loading by residual stress and inner pressure in the pipe. Was analyzed influence of residual thermo stress in the durability of welded construction. It was taken as object of study the welding join according GOST 5264-80.

Введение.

Сварные соединения нашли широкое распространение среди конструкций в машиностроении, строительстве, энергетике, транспорте и т.п. Однако вопрос влияния остаточных напряжений и деформаций на прочность конструкции остается до конца не изученным в связи со сложностью поставленной задачи (изменение и анизотропия свойств материала, пластическая деформация, перегрев, изменение геометрических размеров и т.п.).

Исторически понятие о напряженно-деформируемом состоянии при сварке формировались под влиянием инженерных расчетных методов для геометрически простых соединений или одномерных сварных конструкций и экспериментальных данных.

Согласно [1] для стыковых сварных соединений существует три источника концентрации напряжений: концентрация напряжений в результате остаточных деформаций и напряжений при сварке, концентрация напряжений, определяемая очертаниями шва, концентрация напряжений вследствие смещения соединяемых деталей. В работе рассматривается влияние на НДС (напряженно-деформированное состояние) первых двух факторов, предполагается, что смещение соединяемых деталей незначительны.

В последнее время широкое распространение в технике получил метод конечных элементов. Программный вычислительный комплекс Abaqus является одним из ведущих пакетов конечно-элементного анализа, позволяющий решать различные задачи механики твердого деформируемого тела и отображать полученные результаты в простой и понятной форме.

Целью работы является изучение с помощью метода конечных элементов (в пакете Abaqus) суперпозиции остаточных напряжений с напряжениями от эксплуатационных нагрузок и их влияние на прочность конструкции.

Описание расчетной модели.

В качестве объекта исследования использовался стыковой сварной шов трубы с внешним диаметром 280 мм

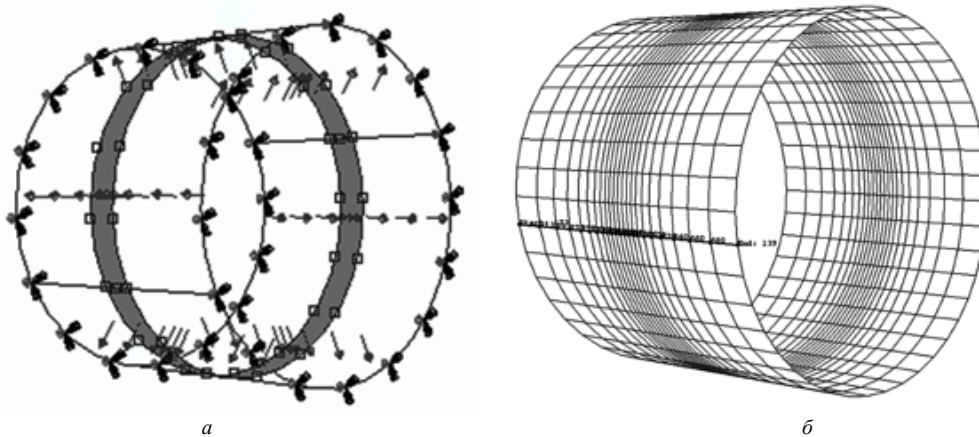


Рис. 1. Геометрическая (а) и конечно-элементная (б) модель трубы

и толщиной стенки 20 мм. Ширина сварного шва принималась равной 26 мм. Геометрическая модель трубы представлена на рис. 1а. К центральной части трубы приложена температурная нагрузка (на рис. 1а - серое кольцо), труба нагружена внутренним давлением, на краях трубы приложены граничные условия симметрии (нулевые перемещения вдоль оси трубы). Конечно-элементная сетка показана на рис.1.б., где жирная линия - траектория, вдоль которой определялись эквивалентные напряжения (по Мизесу). Расчет проводился с помощью студенческой версии ABAQUS Student Edition 6.8, на линейных четырехузловых оболочечных конечных элементах, количество узлов в расчетной модели составляло 966. Программа нагружения показана на рис. 2а.

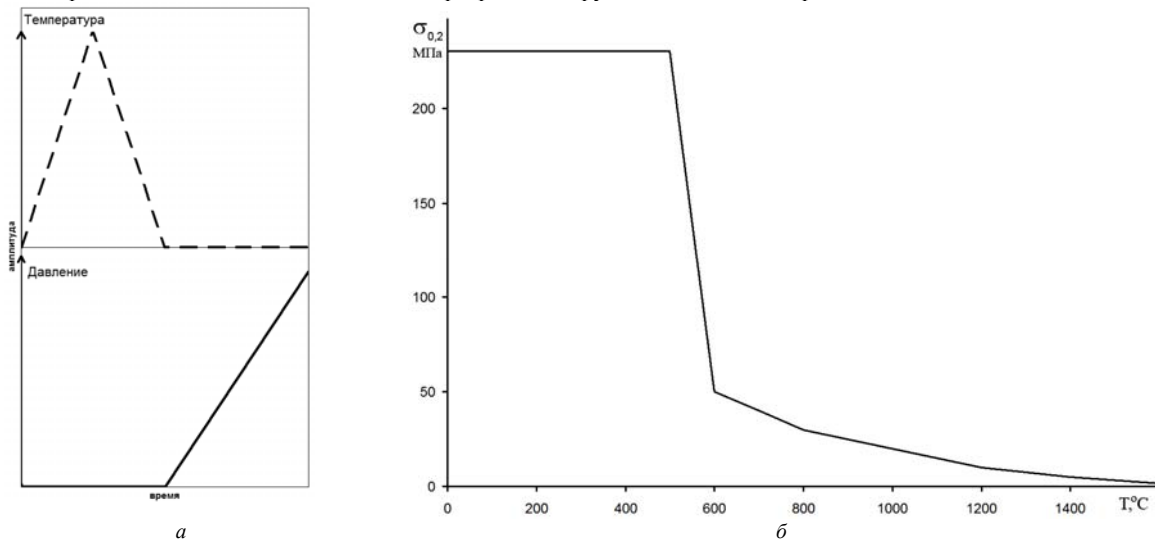


Рис. 2. Зависимость предела текучести (а) от температуры и программа нагружения (б)

В расчете использовался материал со следующими свойствами: модуль Юнга $E=2 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона $\mu=0,3$ относительное остаточное удлинение $\delta=0,25$, коэффициент температурного расширения $\alpha=1,2 \cdot 10^{-5}$ $1/^\circ\text{C}$. Предел текучести $\sigma_{0,2}$ принимался как функция температуры в виде, приведенном на рис.2б. Предел прочности в диапазоне температур от 0 до 500 °С принимался равным $\sigma_b=420 \cdot \text{МПа}$, при температуре выше 500 °С считалось, что материал идеально пластичный.

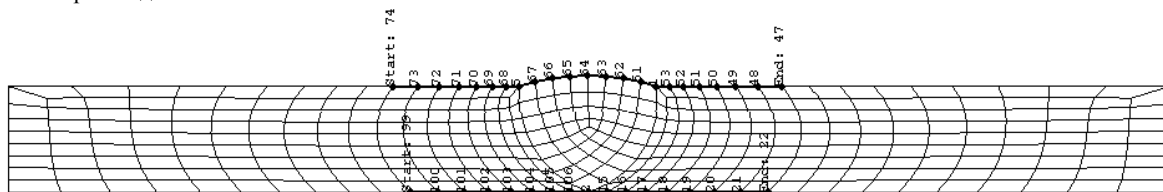


Рис. 3. Конечно-элементная осесимметричная модель

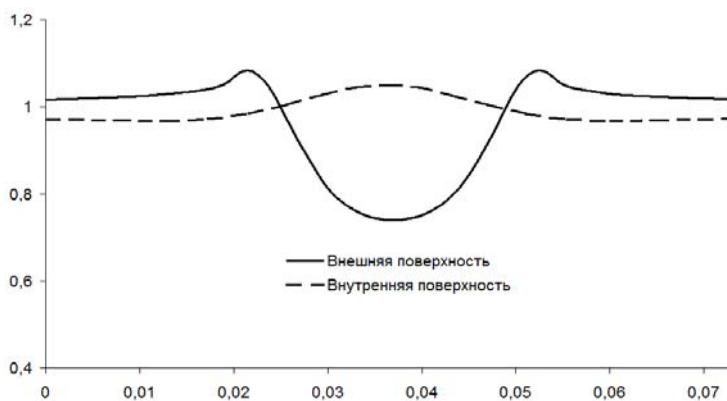


Рис. 4. Концентрация напряжений, обусловленная формой сварного шва: вертикальная ось - отношение текущего напряжения в точке на поверхности к растягивающему напряжению σ_0 , горизонтальная ось - расстояние вдоль оси трубы (М)

На всем диапазоне температур для материала применялось условие текучести Мизеса. При температуре ниже 500 °С материал имел линейное изотропное упрочнение.

Для исследования концентрации напряжений в зависимости от формы сварного шва была построена осесимметричная расчетная модели, сетка конечных элементов которой представлена на рис.3. Жирными линиями показаны траектории, вдоль которых определялись эквивалентные напряжения от действия внешних нагрузок. Геометрические размеры сварного шва были выбраны согласно ГОСТ 5264-80. При построении модели использовались плоские четырехузловые конечные элементы.

Число узлов модели - 415. На осесимметричной модели проводилось два отдельных расчета - от действия температуры и от действия растягивающего напряжения, возникающего в трубе под действием внутреннего давления.

Результаты расчета.

Осесимметричная модель вначале нагружалась растягивающим напряжением σ_0 , возникающим в трубе под действием внутреннего давления, в упругой области в результате были получены графики изменения напряжений вдоль образующей трубы в зоне сварного шва (рис.4), которые позволяют оценить геометрическую концентрацию напряжений. После чего осесимметричная модель в области сварного шва была нагрета до 1400°C и охлаждена до 0°C. В результате было получено распределение температурных остаточных напряжений по сечению сварного шва (рис.5).

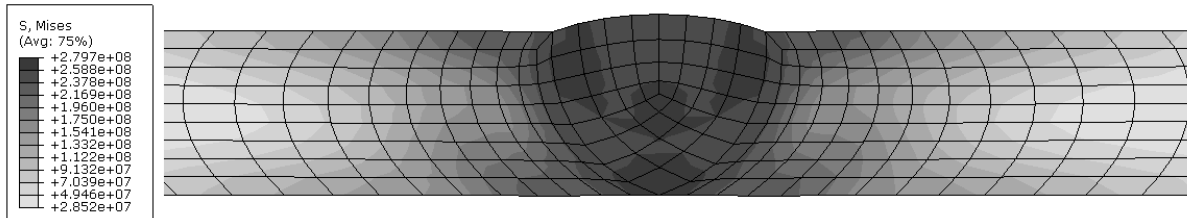


Рис. 5. Распределение остаточных температурных напряжений в зоне сварного шва

Нагружение оболочечной модели (рис.1) проходило согласно программе нагружения, показанной на рис.2а, т.е. вначале были получены остаточные температурные напряжения, а потом приложено внутреннее давление с максимальными значениями 1, 5, 10, 20, 30, 35 и 40 МПа. Эпюры напряжений (по Мизесу) вдоль траектории, показанной на рис. 1б, представлены на рис.6.

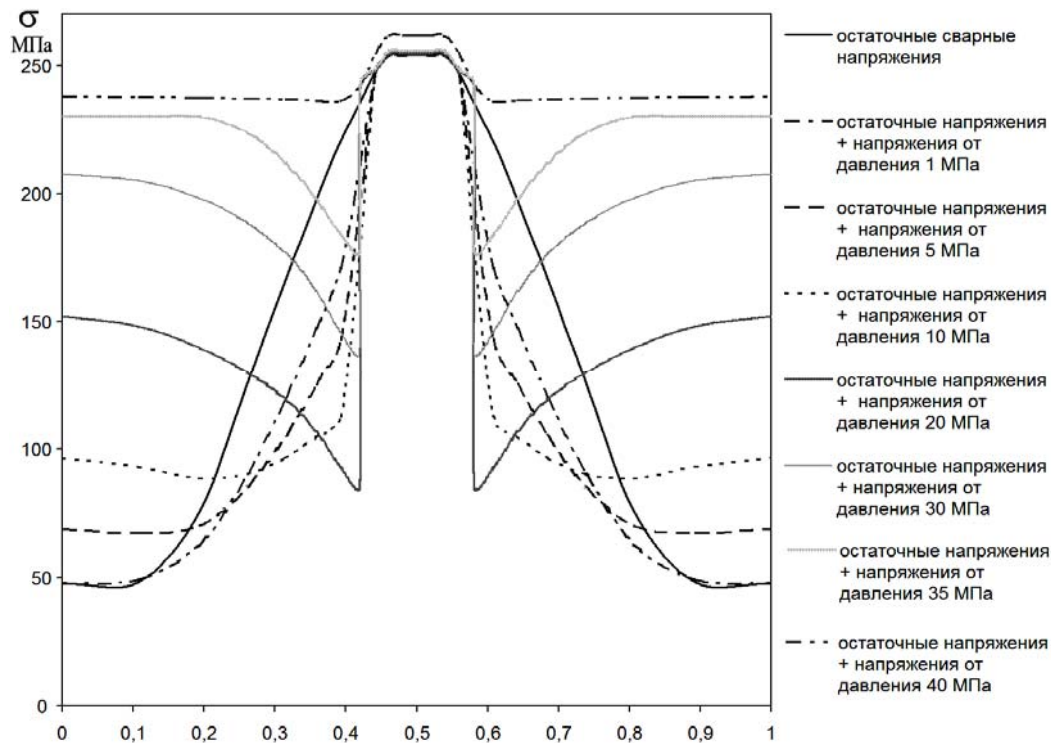


Рис. 6. Распределение напряжений в зоне сварного шва (горизонтальная ось - расстояние вдоль оси трубы)

Рост напряжений на краю трубы и по центру сварного шва в зависимости от интенсивности приложенного внутреннего давления показано на рис.7а. При этом для удобства отображения результатов было введено два новых обозначения:

$$a = \frac{\sigma_c}{\sigma_k},$$

где σ_c - напряжение по центру сварного шва, σ_k - напряжение на краю трубы;

$$b = \frac{\sigma_k}{\sigma_{0.2}}$$

где $\sigma_{0.2}$ - предел текучести.

Графическая связь этих двух величин представлена на рис.7б.

На рис. 8 показано изменение пластической деформации по центру сварного шва в зависимости от интенсивности внутреннего давления в трубе.

Оценка полученных результатов.

Анализируя рис. 4 можно сказать следующее: при исполнении профиля шва согласно ГОСТ 5264-80 на внешней стороне трубы наблюдается увеличение напряжений в местах присоединения материала сварного шва с основным металлом, хотя по середине сварного шва наблюдается разгрузка. На внутренней поверхности трубы, в области провара также наблюдается концентрация напряжений. Однако следует заметить, что величина концентрации напряжений за счет геометрической формы шва не превышает 10 %, что существенно не может

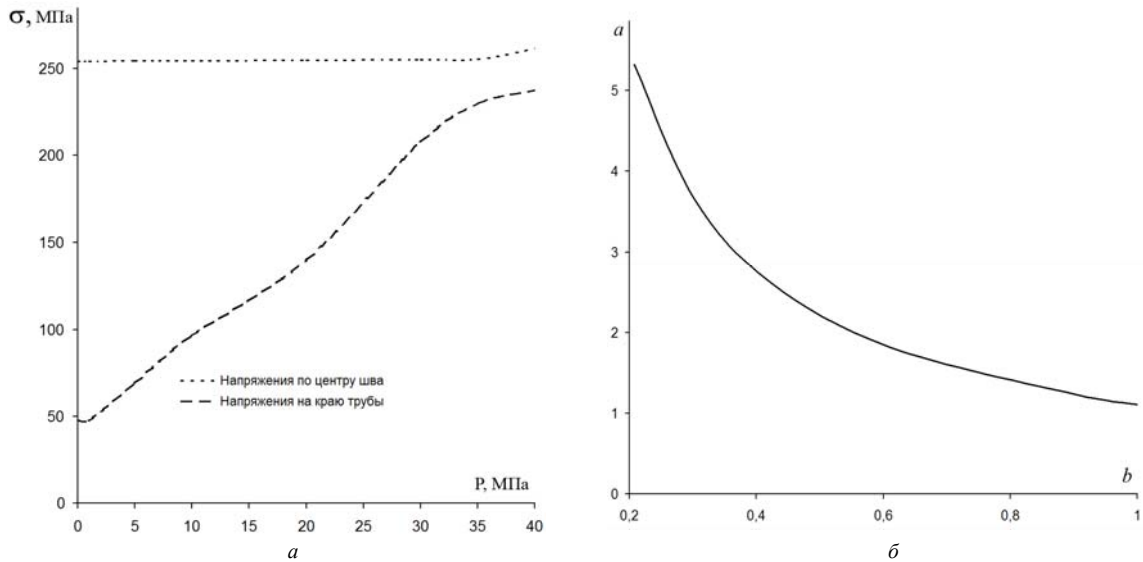


Рис. 7. Сравнение напряжений по центру сварного шва с напряжениями на краю трубы

повлиять на несущую способность основной конструкции. Возможно, при более выпуклой форме сварного шва концентрация напряжений будет выше, что показано в [1].

Остаточные температурные напряжения (рис. 5) для данной расчетной модели в своем максимуме превышают предел текучести на 21 %. Места их максимальных значений также находятся в зоне провара на внутренней поверхности трубы и под поверхностью на внешнем диаметре трубы в местах изгиба - соединения сварного шва с основным металлом.

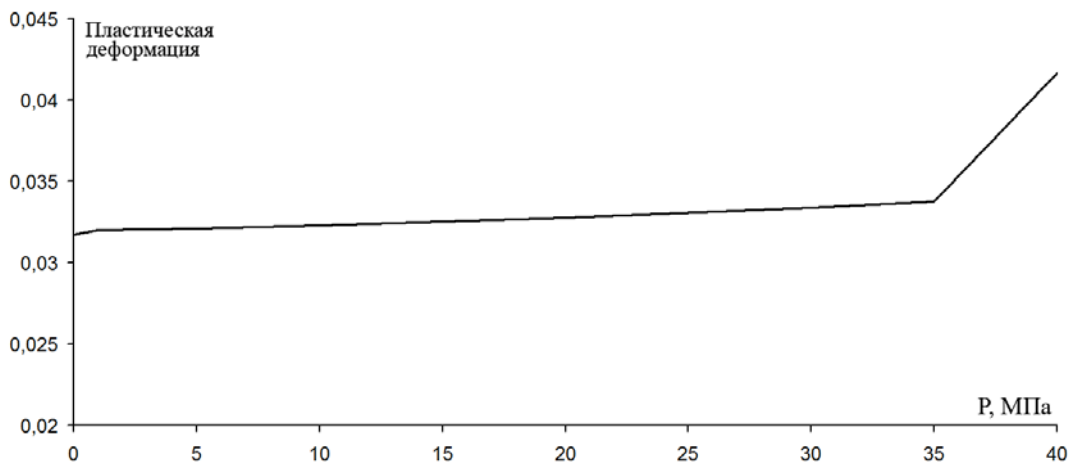


Рис. 8. Пластическая деформация в сварном соединении в зависимости от внешней нагрузки

Однако, анализируя рис. 6, можно увидеть, что при увеличении внутреннего давления в трубе величина максимальных напряжений в сварном шве (остаточных температурных + напряжения от внешней нагрузки) не изменяется. Она равна максимальному значению остаточных температурных напряжений. При этом величина напряжений на краю трубы (в области, расположенной сравнительно далеко от сварного соединения) увеличивается. Этот факт проиллюстрирован на рис. 7а.

Напряжения в центре сварного соединения начинают расти только тогда, когда напряжения в основном материале приближаются к границе текучести, при этом соотношение напряжений в сварном шве и в основном материале минимально и стремится к 1 (рис.7б).

Так же следует отметить, что согласно рис. 8 пластическая деформация в сварном шве при нагружении основного материала в упругой области практически не увеличивается, ее рост начинается с ростом напряжений в сварном шве, что соответствует моменту, когда основной материал трубы на отдаленном от сварного шва участке начинает переходить в пластическую область.

Выводы.

Анализируя выше изложенное можно отметить следующее: остаточные напряжения в сварном шве имеют величину превышающую предел текучести, однако их интенсивность не растет под действием внешних механических нагрузок (внутреннего давления в трубе). Рост напряжений и пластической деформации в сварном шве наблюдается только тогда, когда основной материал трубы вдали от сварного шва начинает переходить в пластическую область. Следовательно остаточные температурные напряжения в сварном шве не влияют на статический запас прочности конструкции, определенный по пределу текучести.

При изготовлении стыковых сварных соединений согласно ГОСТ 5264-80 концентрация напряжений из-за геометрической формы сварного шва не превышает 10%, что существенно не влияет на запас прочности конструкции.

Список литературы.

1. Николаев Г.А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформаций конструкций./ Г.А.Николаев, С.А.Куркин, В.А.Винокуров.// - М.: Высшая школа. - 1982. - 272с.
2. Прохоренко В.М. Моделирование напряженно-деформированного состояния при сварке стікових соединений средствами программного комплекса ABAQUS./ В.М. Прохоренко, Б.О.Яхно, Д.В. Прохоренко.// – Вест. Нац. техн. ун-та Украины «Киев. политехн. ин-т» : серия «Машиностроение». – 2011. - № 61. – С.134-139.
3. Махненко В.И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций./ В.И.Махненко// - К. Наукова думка. - 2006. - 618с.
4. Винокуров В.А. Сварные деформации и напряжения/ В.А. Винокуров // - М.: Машиностроение. - 1968. - 236с.
5. Торчун И.П. Внутренние усилия и деформации при сварке / И.П.Торчун. - М.: Машгиз, 1964 - 180с.
6. Getting Started with ABAQUS. - USA, Abaqus inc., 2003 - 497 p.