

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.791

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ
МЕТОДА КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
К ИССЛЕДОВАНИЮ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ УЗЛОВ

Квасницкий В.В., Ермолаев Г.В., Матвиенко М. В., Бугаенко Б.В., Квасницкий В.Ф.

Постановка задачи. Узлы цилиндрической формы типа цилиндров, втулок, втулок с фланцами широко применяются при изготовлении машин и другой техники в различных отраслях промышленности. Используются как однородные, так и разнородные материалы деталей узлов, а также многослойные втулки. Одним из распространенных способов соединения разнородных материалов является диффузионная сварка в вакууме (ДСВ) [1]. Основными параметрами режима ДСВ являются температура и давление сжатия. В условиях эксплуатации узлы также зачастую нагружены высокими внутренними и внешними давлениями. Кроме того, вследствие различия коэффициентов линейного термического расширения (КЛТР) в сварных узлах из разнородных материалов формируются собственные напряжения. Напряженно-деформированное состояние (НДС) в процессе ДСВ на разных участках соединения не одинаково и распределение пластических деформаций далеко от равномерного [2-5], что существенно влияет как на процесс сварки, так и на работоспособность узлов.

Поэтому исследование НДС узлов при их изготовлении и эксплуатации является **актуальным**.

Для оценки НДС используют аналитические методы [6-8], компьютерное моделирование [2-5] и экспериментальные методы [9]. В работе [9] для оценки возможности применения и точности метода компьютерного моделирования исходили из сравнения результатов расчета радиальных перемещений внешней поверхности цилиндрического образца с экспериментальными замерами, однако, научный интерес представляет также сопоставление с результатами аналитического решения.

Цель работы – сравнение и количественная оценка результатов компьютерного моделирования НДС с аналитическим расчетом.

Изложение основного материала. Анализ литературы [6-8] показал, что аналитические решения имеются для небольшого числа типов задач и граничных условий. В частности для осесимметричных напряженно-деформированных состояний цилиндрических узлов типа однородных и многослойных втулок имеются аналитические решения для нагружений внутренним и внешним давлением или неравномерно нагретых по толщине. При этом рассматриваются втулки достаточно большой длины, т.е. без учета краевых эффектов на торцах. В многослойных втулках слои считаются не скрепленными между собой, т.е. возможно их взаимное проскальзывание в процессе деформации.

В данной работе для аналитического расчета напряжений использовались формулы работы [7] для толстостенной втулки, нагруженной внутренним давлением:

$$\sigma_r = p \frac{r^2}{R^2 - r^2} \left(1 - \frac{R^2}{\rho^2} \right),$$
$$\sigma_t = p \frac{r^2}{R^2 - r^2} \left(1 + \frac{R^2}{\rho^2} \right),$$

и неравномерно нагретой по толщине:

$$\sigma_t = \frac{\alpha E(T_1 - T_2)}{2(1 - \mu) \left(R^2 - r^2 \right) \ln \frac{R}{r}} \left(R^2 \left(1 - \ln \frac{R}{\rho} \right) - r^2 \left(1 - \ln \frac{r}{\rho} \right) - \frac{R^2 r^2}{\rho^2} \ln \frac{R}{r} \right),$$

Распределение температуры по толщине втулки принималось как для случая установившегося потока:

$$T = \frac{T_2 \ln \frac{\rho}{r} - T_1 \ln \frac{\rho}{R}}{\ln \frac{R}{r}}.$$

Расчеты аналитическим методом и методом компьютерного моделирования выполнялись для втулок (рис.1,а), с размерами, как в эксперименте [9]: внутренний радиус $r = 5$ мм, наружный радиус $R = 15$ мм, высота $h = 80$ мм, для нагружения внутренним давлением ($p = 10$ МПа) и неравномерным нагревом, ($T_1 = 83,7^\circ\text{C}$ и $T_2 = 62,5^\circ\text{C}$). Полученные эпюры напряжений приведены на рис. 2 и 3 соответственно. Сплошными линиями показаны результаты аналитического решения, а точками – компьютерного моделирования.

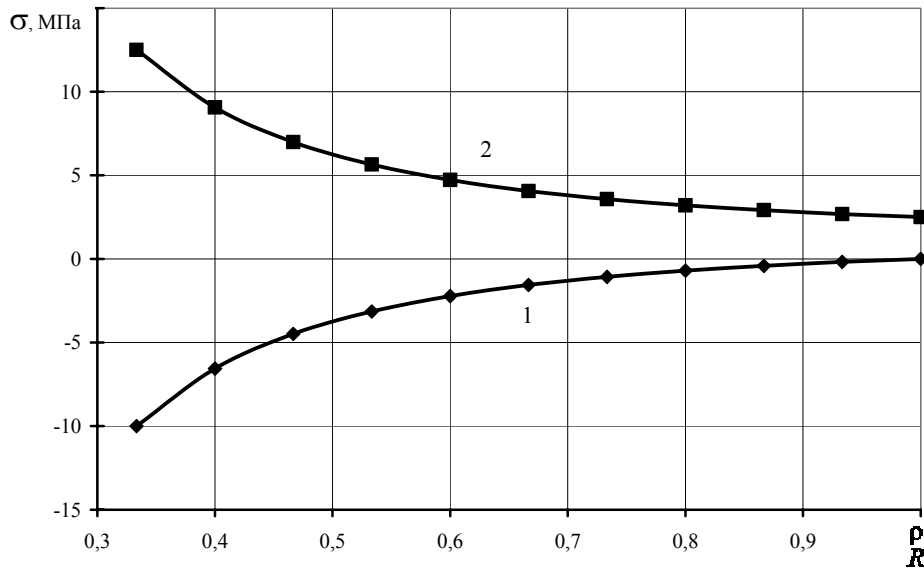


Рис. 2 Эпюры радиальных (1) и окружных (2) напряжений по толщине втулки, нагруженной внутренним давлением

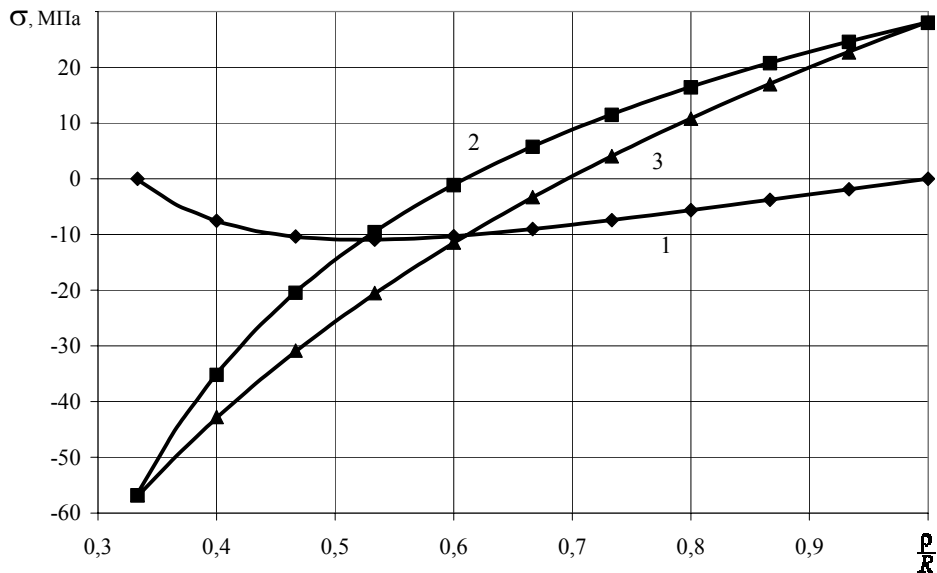


Рис. 3 Эпюры радиальных (1) окружных (2) и осевых (3) напряжений неравномерно нагретой по толщине втулки

Анализ результатов показал, что при принятых соотношениях размеров и граничных условиях результаты решений аналитического и методом компьютерного моделирования совпадают с точностью до трех-четырех знаков, т.е. практически полностью, что подтверждает достоверность получаемых методом компьютерного моделирования результатов и правильность выбора модели.

Вместе с тем, метод компьютерного моделирования более совершенен с точки зрения задания граничных условий и выбора соотношений размеров втулки, в частности, он позволяет изучать НДС коротких втулок, в которых нельзя не учитывать краевые эффекты на торцах.

В качестве примера такой задачи выполнен расчет НДС при равномерном нагреве на 100°C двухслойной втулки (рис. 1,б) с размерами: внутренний радиус $r_1 = 5$ мм, наружный радиус $R_2 = 25$ мм, радиус по границе раздела слоев $R = 15$ мм, высота $h = 50$ мм. Слои втулки выполнены из материалов с отличающимися КЛТР ($\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2 = 10 \cdot 10^{-6}$ 1/град) и одинаковыми модулями упругости ($E_1 = E_2 = E = 1 \cdot 10^5$ МПа). Эпюры, получен-

ные в результате аналитического расчета (сплошные линии) и компьютерного моделирования (линии с точками) приведены на рис.4.

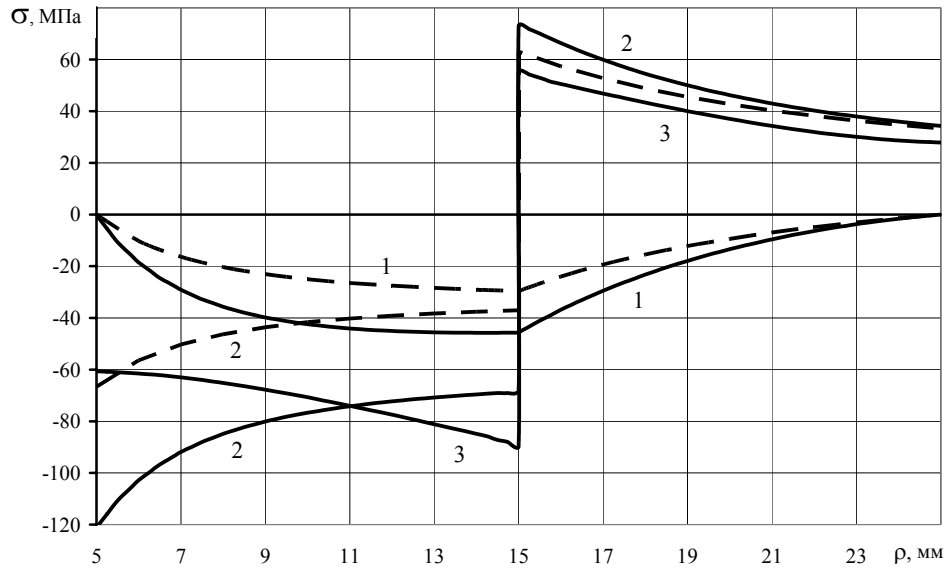


Рис. 4 Эпюры радиальных (1), окружных (2) и осевых (3) напряжений при нагреве двух-слойной втулки, полученные методом компьютерного моделирования (сплошные линии) и аналитическим расчетом (пунктирные линии)

Для аналитического решения использовались формулы, приведенные в [7 и 8]:
радиальные напряжения во внутреннем слое

$$\sigma_r = -\frac{p_k R^2}{R^2 - r_1^2} \left(1 - \frac{r_1^2}{\rho^2} \right),$$

радиальные напряжения в наружном слое

$$\sigma_r = \frac{p_k R^2}{R_2^2 - R^2} \left(1 - \frac{R_2^2}{\rho^2} \right),$$

окружные напряжения во внутреннем слое

$$\sigma_t = -\frac{p_k R^2}{R^2 - r_1^2} \left(1 + \frac{r_1^2}{\rho^2} \right),$$

окружные напряжения в наружном слое

$$\sigma_t = \frac{p_k R^2}{R_2^2 - R^2} \left(1 + \frac{R_2^2}{\rho^2} \right),$$

где p_k – давление на границе раздела слоев,

$$p_k = \frac{E\Delta}{2R_2^3} \cdot \frac{(R^2 - r_1^2)(R_2^2 - R^2)}{R_2^2 - r_1^2}.$$

$r_1 = 5$ мм – внутренний радиус втулки, $R = 15$ мм – радиус по границе раздела слоев, $R_2 = 25$ мм – наружный радиус втулки, ρ – текущий радиус, $\Delta = (\alpha_1 - \alpha_2)TR$ – натяг.

Как видно из сравнения результатов, при одинаковом характере распределения напряжений по толщине двухслойной втулки, величины их, особенно окружных во внутреннем слое, при компьютерном моделировании – больше. Это объясняется тем, что аналитическое решение получено на основе предположения об отсутствии осевых напряжений.

Вместе с тем, как показывает эпюра осевых напряжений, их величина достаточно велика, при чем во внутреннем слое они, как и окружные напряжения – сжимающие, что и приводит к увеличению последних.

Таким образом, компьютерное моделирование по сравнению с аналитическим решением, не уступая ему в точности, является более совершенным, так как позволяет более точно учитывать существующие граничные условия.

Выводы. Метод компьютерного моделирования, основанный на конечно-элементном анализе, достаточно точно отражает напряженно-деформированное состояние узлов и позволяет получать достоверные результаты.

Применение метода компьютерного моделирования за счет более широких возможностей задания граничных условий позволяет исследовать узлы практически любой сложности.

Stress distribution in junctions by type of homogeneous and multilayer plugs, which are loaded by internal pressure or non-uniformly heated on the thickness, has been determined by method of computer modelling. It has been established that such modelling in comparison with analytical decision is not inferior to it by accuracy but it is more complete because it allows to take into account actually existing limiting conditions.

1. 1. Казаков Н.Ф. Диффузионная сварка материалов / Н.Ф. Казаков. – М.: Машиностроение, 1976. – 312с.
2. Квасницкий В.В., Ермолаев Г.В., Матвиенко М.В. Влияние напряженного состояния на параметры режима диффузионной сварки разнородных сталей. Зб. наукових праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2007, – № 1 (412). – с. 33-40.
3. Квасницкий В.В., Ермолаев Г.В., Матвиенко М.В. Закономерности формирования напряженно-деформированного состояния при диффузионной сварке разнородных металлов применительно к узлам цилиндр-цилиндр и втулка-втулка. Зб. наукових праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2007, – № 5 (416). – с. 57-65.
4. Общие закономерности формирования напряженного состояния при диффузионной сварке деталей цилиндрической формы / В.Д.Кузнецов, В.В.Квасницкий, Г.В. Ермолаев и др. – Зб. наукових праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2007, – № 6 (417). – с. 62-73.
5. 5. Махненко В.И., Квасницкий В.В., Ермолаев Г.В. Влияние физико-механических свойств соединяемых металлов и геометрии деталей на распределение напряжений при диффузионной сварке. Автоматическая сварка, К., 2008, № 1, с. 5–11.
6. Тимошенко С.П. Курс теории упругости. Киев, Наукова думка, 1972, 508с.
7. Канторович З.Б. Основы расчета химических машин и аппаратов. М., Машгиз, 1960, 744с.
8. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в трех томах. Том 2. Под ред. И.А.Биргера и Я.Г.Пановко. М., Машгиз, 1968. 464 с.
9. Экспериментальное исследование деформирования сварного узла типа втулка-втулка из разнородных материалов / Ю.Г. Золотой, В.В. Квасницкий, А.В. Лабарткава и др. – Зб. наукових праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2008, – № 4 (421). – с. 41-47.