

## МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КОНЦЕНТРАЦИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Cherepanov A.P.

### FULL-SCALE METHODS FOR ESTIMATING CONCENTRATIONS OF MECHANICAL VOLTAGE

**Аннотация.** Рассмотрены методы оценки концентраций механических напряжений проведением компьютерного эксперимента на моделях сварных швов с дефектами, имеющими зоны с повышенной концентрацией напряжений в виде непровара корня сварного шва. В работе отмечается, что натурное исследование напряженного состояния с определением коэффициентов концентрации напряжений на самом оборудовании затруднено из-за длительности развития деградационных процессов, износа и старения, поэтому их проведение связано с риском и большими временными и материальными издержками. Аналитические методы исследования математическими моделями и прикладными пакетами находят все более широкое применение.

**Ключевые слова:** дефект, концентратор напряжений, критерий прочности, напряженное состояние непровар, стенка, труба.

**Abstract.** Methods of estimation of mechanical stress concentrations by conducting a computer experiment on models of welds with defects having zones with increased stress concentration in the form of non-welding of the root of the weld are considered. The paper notes that a full-scale study of the stress state with the determination of stress concentration coefficients on the equipment itself is difficult due to the duration of the development of degradation processes, wear and aging, therefore, their conduct is associated with risk and high time and material costs. Analytical research methods using mathematical models and application packages are increasingly being used.

**Keywords:** defect, pipe, stress concentrator, strength criterion, stress state is not tested, wall.

Рассмотрено исследование напряженного состояния (НС) моделей сварных швов с дефектами, имеющих зоны с повышенной концентрации напряжений в виде непровара корня сварного шва. Натурные эксперименты и сравнение их результатов с аналитическим исследованием адекватной математической модели являются надежными методами верификации. Однако натурные эксперименты не обладают точностью данных из-за невозможности непосредственного измерения. Натурное исследование НС на самом оборудовании затруднено из-за длительности развития деградационных процессов, износа и старения, поэтому они требуют значительного времени, их проведение связано с риском и большими материальными издержками. Аналитические исследования адекватной математической модели ограничиваются простыми задачами и особыми условиями приложения нагрузки [1], но с развитием программных комплексов они находят все более широкое применение.

Расчетно-экспериментальное исследование прочности деталей машин с концентраторами механических напряжений проводят определением НС в момент разрушения. Оценка опасности концентраторов напряжений характеризу-

ются критериями прочности, преимущественно двухосным НС в момент разрушения детали.

Уравнение предельного состояния материала детали, находящейся в условиях сложного НС представлено критерием прочности Писаренко-Лебедева [2], который включает две характеристики напряженного состояния – интенсивность напряжений, с которой связывают пластическое деформирование и, как следствие, вязкое разрушение, и наибольшее (в алгебраическом смысле) главное напряжение, величина которого определяет возможность хрупкого разрушения. Согласно [2] эквивалентные напряжения определяют формулой [3]:

$$\sigma_{\text{экв}} = \chi \cdot \sigma_i + (1 - \chi) \cdot \sigma_1^{\text{пред}} \cdot A^{1-g^{\text{пред}}} \leq \sigma_{\text{пред}} \quad (1)$$

где  $\chi$  – коэффициент пластичности материала, который характеризует степень ответственности за разрушение по деформации сдвига с образованием трещины в материале;

$\sigma_{\text{пред}}$  – предельное напряжение для материала конструкции, найденное из экспериментов на одноосное растяжение;

$\sigma_1^{\text{пред}}$  – предельное напряжение, найденное из экспериментов на одноосное растяжение;

$g^{\text{пред}}$  – расчетный параметр, характеризующий НС в момент разрушения детали;

$A$  – прочностной параметр материала детали, определяемый формулой:

$$A = \frac{\varphi - \sqrt{3 \cdot \chi}}{1 - \chi}; \quad (2)$$

где  $\varphi$  – отношение пределов прочности по нормальным и касательным напряжениям, определяемое формулой:

$$\varphi = \frac{\sigma_{\text{в}}}{\tau_{\text{в}}}, \quad (3)$$

где  $\sigma_{\text{в}}$  и  $\tau_{\text{в}}$  – пределы прочности по нормальным и касательным напряжениям.

Коэффициент пластичности материала изменяется в пределах  $0 \leq \chi \leq 1$  [3]. Для материалов, находящихся в абсолютно хрупком состоянии, коэффициент пластичности  $\chi = 0$ , в абсолютно пластичном состоянии -  $\chi = 1$ .

Обобщенный критерий прочности Писаренко-Лебедева [3] дает достаточно достоверные результаты для широкого класса различных материалов, находящихся как в пластичном, так и в хрупком состоянии. Однако его использование невозможно из-за отсутствия экспериментальных данных. Поэтому коэффициент пластичности материала предложено определять из отношения [3]:

$$\chi = \frac{\sigma_{\text{р}}}{\sigma_{\text{с}}}, \quad (4)$$

где  $\sigma_{\text{р}}$  и  $\sigma_{\text{с}}$  – предельное напряжение, найденное в результате испытаний на одноосное растяжение и сжатие (предел текучести, условный предел прочности, истинный предел прочности, допускаемое напряжение).

Относительное остаточное сужение определяется экспериментально с использованием следующего соотношения:

$$\psi = \frac{A_0 - A_{ш}}{A_0}, \quad (5)$$

где  $A_0$  – первоначальная площадь поперечного сечения стандартного образца;  
 $A_{ш}$  – площадь образца в самом узком месте (шейке) после его разрушения.

Относительное остаточное сужение также изменяется в пределах от 0 до 1 и ее значения приводятся в справочной литературе для сталей различных марок, поэтому согласно [3] принято, что  $\chi = \psi$ .

В основе этих работ [4] лежит определение вида НС, возникающего в некоторых точках конструкции под нагрузкой, в частности для врезки патрубка НС наблюдается в малом элементе на внутренней кромке самого патрубка, которое характеризуют величиной коэффициента его жёсткости и которое равно отношению первого инварианта тензора напряжений ко второму, определяемому формулой:

$$g = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}, \quad (6)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения, возникающие в точке наблюдения;  
 $\sigma_i$  – интенсивность напряжений, определяемая формулой:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}. \quad (7)$$

Экспериментальное исследование напряжённого состояния [4] показало, что увеличение коэффициента жёсткости вида НС приводит к тому, что очаг разрушения смещается независимо от того, что уровень напряжений в ней не является максимальным для конструкции в целом. Существенно, что такое перемещение может происходить как в случае циклического характера нагружения конструкции, так и в случае её квазистатического разрушения [5].

Численное моделирование значения (1) выражается коэффициентом концентрации напряжений [5] и определяется формулой:

$$K_\sigma = \frac{\sigma_i^{max}}{\sigma_i^{nom}}, \quad (8)$$

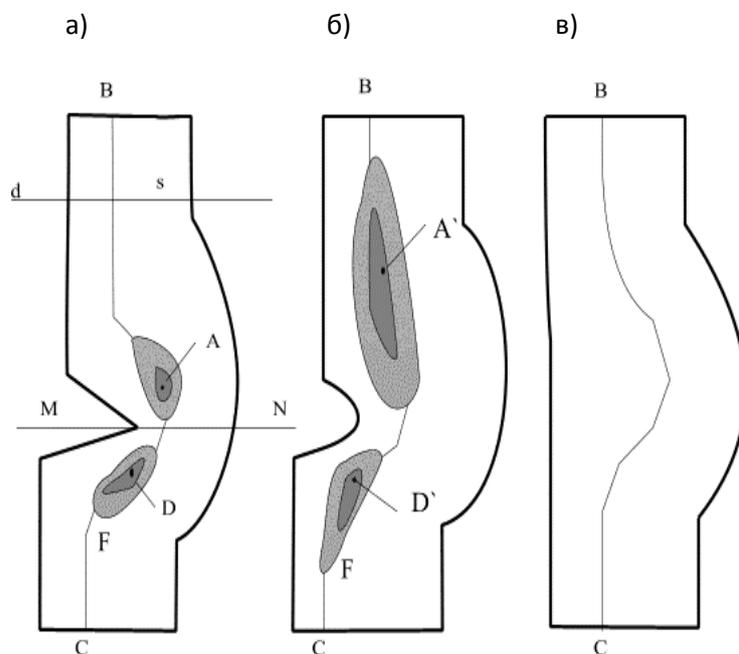
где  $\sigma_i^{max}$  – интенсивность напряжений в точке наблюдения рабочей зоны образца;

$\sigma_i^{nom}$  – номинальные эквивалентные напряжения.

Следует учесть, что для определения параметров  $\chi$  и  $A$  необходимы прочностные испытания материалов с использованием разнотипных лабораторных образцов и испытательных машин.

Натурные эксперименты на моделях отдельных элементов конструкции до настоящего времени проводились, например, по оценке напряженного состояния зон патрубков сосудов [6, 7], при этом использовались преимущественно модели из полимерных материалов. [8, 9, 10]. Для проведения оценочных экспериментов моделей предпочтительнее компьютерное моделирование с использованием математических моделей изучаемых объектов.

Исследование НДС сварного шва трубы с непроваром корня шва и распределение внутренних напряжений в стенке [11] проведено с целью определения зон их концентрации. В качестве образца использован сварной шов стального трубопровода диаметром  $d = 200$  мм, толщиной стенки  $s = 8$  мм, модулем продольной упругости  $E = 195000$  МПа при внутреннем давлении 1,0 МПа. Смещение кромок сварного шва 2 мм.



шва  
Сочетания максимумов напряжений  
в зонах  $A$ ,  $D$  и  $A^*$ ,  $D^*$  заштрихованы

МПа. Смещение кромок сварного шва 2 мм.

Образцы сечений сварных швов показаны на рисунке 1, которые в сечениях а) и б) имеют дефекты, сечение в) не имеет дефекта. Сочетания максимумов напряжений в зонах  $A$ ,  $D$  и  $A^*$ ,  $D^*$  показаны более плотной штриховкой. Характер распределения концентраций напряжения на внутренней поверхности стенки вдоль некоторых направлений определено численными методами.

Напряжения рассчитаны вдоль линии  $BC$  для каждого образца. При этом усиление шва с наружной стороны выбрано одинаковых размеров. В качестве расчетной математической модели использован МКЭ. Материал стенок и шва считался однородным имеющим одинаковый модуль упругости и температуру. Площадь сечения образцов разбивалась расчетной сеткой с четырехугольными ячейками и числом узлов от трех до пяти тысяч. Концентрации полученных напряжений определены путем отнесения к напряжениям в стенке на значительном удалении от шва.

На рисунке 2 показаны результаты расчета коэффициентов концентрации напряжений в образцах с дефектами сварного шва и приведены рассчитанные коэффициента концентрации  $K$  осевых компонентов напряжений вдоль линий  $BC$  (рисунок 1).

Влияние непровара корня шва в форме острого клина (рисунок 1, а) приводит к резкому повышению коэффициента концентрации напряжений в виде двугорбой вершины с точками  $A-D$ .

В точке  $A$  коэффициент концентрации напряжений  $K_A=5,3$ , в точке  $D$  –  $K_D=4,9$ . Вблизи устья клина, в точке  $E$ , достаточно локальное расположение концентрации напряжений –  $K_E=3,9$ .

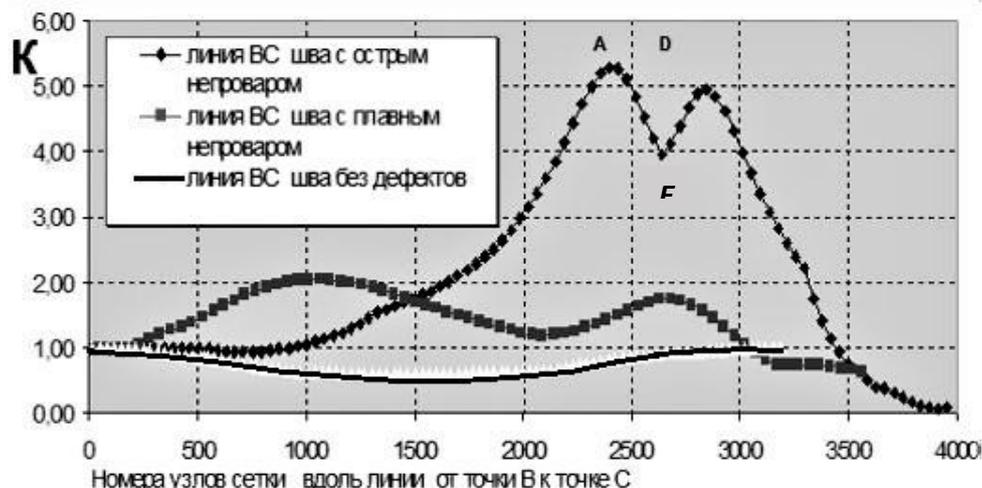


Рисунок 2 – Результаты расчета коэффициентов концентрации напряжений в образцах с дефектами сварного

Различие в высоте вершин концентрации напряжений можно объяснить:

— некоторой несимметричностью формы клина относительно линии  $M-N$  (рисунок 1, а), которая перпендикулярна к оси трубы;

— влияние непровара корня шва в виде плавной дуги (рисунок 1, б) приводит также к двугорбому распределению концентрации  $A^* - D^*$  с коэффициентами  $K=2,0$  и  $K=1,8$ , при этом эффект двугорбых вершин расплывается практически на всю длину образца с общим понижением концентрации напряжений;

— двугорбой вершины концентрации напряжений в обоих случаях свидетельствует о наличии двух приблизительно симметричных зон абсолютных максимумов концентрации напряжений “справа” и “слева” от дефекта, а не в самом его устье как это можно было бы ожидать;

— концентрация напряжений вдоль бездефектного образца (рисунок 1 в) ведет себя предсказуемо с понижением концентрации напряжений ниже единицы в зоне усиления шва;

— влияние смещения кромок труб относительно друг друга приводит к заметному снижению концентрации напряжений на участках  $F-C$  и далее от зоны шва.

Полученные значения коэффициентов концентрации напряжений могут использоваться при определении напряжений в стыковых сварных швах, имеющих упомянутые выше дефекты.

Результаты исследований лабораторного образца для механических испытаний [10] позволили экспериментально определить коэффициенты концентрации напряжений в зонах изменения сечения конструктивных элементов с применением метода конечных элементов [12].

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Языков В.А.** Конечно–элементный анализ напряженно – деформированного состояния резьбового соединения // Технические науки. Вестник ТОГУ. № 1(4).–2007 <http://www.khstu.ru/vestnik/articles/251.pdf> (дата обращения: 28.12.2009).
2. **Писаренко Г.С., Лебедев А.А.** Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии — Киев: Наукова Думка, 1976. — 416 с.
3. **Белов А.В., Неумоина Н.Г.** Об использовании обобщенного критерия прочности Писаренко-Лебедева в расчетах на прочность при неизотермических процессах нагружения // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 9-2. – С. 8-10; URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=5820> (дата обращения: 03.05.2023).
4. **Смирнов–Аляев Г.А., Цикидовский В.П.** Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением. М., Машиностроение, 1972.
5. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. (ПНАЭ Г-7-002-86). // Госатомэнергонадзор СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
6. **Махутов Н.А., Фролов К.В., Стекольников В.В.** и др. Экспериментальные исследования деформаций и напряжений в водо–водяных энергетических реакторах. – М.: Наука, 1990. – 296 с.
7. **Махутов Н.А.** Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность: В 2 ч. / Н.А. Махутов. – Новосибирск: Наука, 2005. – Ч. 1: Критерии прочности и ресурса – 494 с.
8. Модельные исследования и натурная тензометрия энергетических реакторов / Н.А. Махутов, К.В. Фролов, Ю.Г. Драгунов и др. М.: Наука, 2001. – 293 с. (Серия «Исследование напряжений и прочности ядерных реакторов»).
9. Моделирование прочности и разрушения несущих конструкций технических систем/ Доронин С.В., Лепихин А.М., Москвичев В.В. и Шокин Ю.И. Новосибирск: Наука, 2005. – 249 с.
10. **Хенли Э., Кумamoto Дж.** Надежность технических систем и оценка риска. – М.: Машиностроение, 1988. – 216 с.
11. **Черепанов А.П., Порошин Ю.В.** Влияние дефектов сварного шва на концентрацию напряжений в стенке. Прочность и надежность нефтегазового оборудования. М.: ГУП НИКИЭТ. 2001. – С 42.
12. **Шимкович Д.Г.** Расчёт конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. – М.: ДМК Пресс, 2001. – 448 с.