

УДК 539.3

## ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ В РАЙОНЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО КОНЦЕНТРАТОРА

А.Н. Бородой, И.А. Волков, Ю.Г. Коротких

Тенденция развития конструкций и аппаратов современного машиностроения характеризуется увеличением их рабочих параметров, значительным ростом удельного веса нестационарных режимов термосилового нагружения, широким внедрением сварной технологии изготовления конструкций. Всё более жёсткие требования предъявляются к снижению материалоемкости конструкции, обеспечение которых связано с повышением общей и местной напряжённости конструктивных элементов ( $0,7...0,8\sigma_T$  - предела текучести материала) и, как следствие этого, уменьшением коэффициента запаса прочности. Значительно увеличиваются требования к надёжности и длительности безаварийной работы конструкции. Указанные тенденции привели к тому, что в настоящее время основными задачами проектирования конструкций и аппаратов новой техники являются: задача надёжной расчётной оценки ресурса конструкции на стадии проектирования и задача диагностики ресурса конструкции в процессе их эксплуатации.

Новый подход при расчёте конструкции в настоящее время основывается на условии, что все изготовленные конструкции содержали те или иные дефекты или трещины, появившиеся во время эксплуатации. В этих условиях долговечность конструкции определяется временем развития дефекта до критического состояния, и расчёт развития макродефектов в реальных конструкциях является сейчас одной из основных ещё до конца не решённых проблем. Это объясняется с одной стороны сложностью экспериментальных исследований процесса распространения произвольно расположенных макротрещин и определения напряжённо-деформированного состояния (НДС) на фронте развивающейся трещины, а с другой – большой трудоёмкостью при определении трёхмерного НДС в окрестности дефектов численными методами. В этой ситуации сочетание экспериментальных методов и эффективных численных расчётов НДС тела с трещиной на основе последних достижений механики разрушения может решить проблему.

Расчётная оценка ресурса элементов конструкций требует детального исследования НДС в локальной зоне вокруг конструктивных концентраторов напряжений. В связи с большой трудоёмкостью решению трёхмерных задач в большинстве случаев этот анализ проводят в предположении либо плоской деформации, либо плоского напряжённого состояния. Однако напряжённое состояние вокруг концентратора имеет существенно трёхмерный характер, отличающийся от плоского напряжённого состояния и плоской деформации, что может повлиять на время, место и характер образующейся трещины.

Исследование трёхмерных полей напряжений в районе цилиндрического концентратора радиуса  $R$  в плите при различных отношениях  $R/H$  (рис. 1), где  $H$  - толщина плиты, проводилось с учётом упругопластического деформирования при активном процессе нагружения [1].

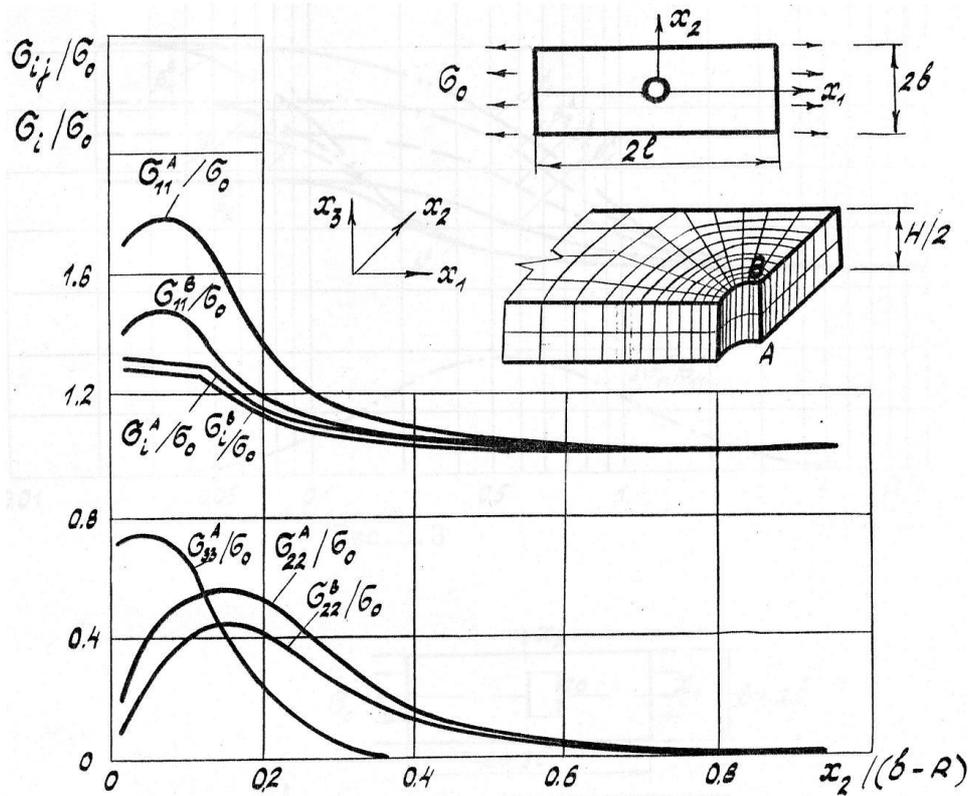


Рис. 1

Применялась дифференциальная теория пластичности с линейным кинематическим упрочнением ( $E = 6,65 \times 10^4$  МПа,  $\nu = 0,3$ ,  $g_1 = 1370$  МПа,  $g_2 = 0$ ,  $\sigma_T = \sigma_{0,2} = 186$  МПа) [2,3].

На рис. 1 показана сетка конечных элементов для 1/8 части пластины на 0-уровне. Количество степеней свободы на 0-уровне составляет 1400, на 1-уровне  $\approx 8000$ .

В дальнейшем применяют следующие обозначения:  $\beta = \frac{\sigma}{\sigma_u}$  - параметр вида напряжённого состояния, значками «А» и «В» обозначены компоненты на горизонтальной плоскости симметрии и наружной поверхности плиты соответственно,  $\sigma_0$  - заданное растягивающее напряжение,  $\sigma_{11} = \sigma_{11}^A - \sigma_{11}^B$ .

Анализировались варианты  $R/H$  от 0,02 до 10. На рис. 1 для случая  $R/H = 0,2$ ,  $\sigma_0/\sigma_T = 0,8$  показано распределение относительных компонент напряжённого состояния  $\frac{\sigma_{ij}}{\sigma_0}$ ,  $\frac{\sigma_i}{\sigma_0}$  в плоскости  $x_1 = 0$  на наружной поверхности пластины и на горизонтальной плоскости симметрии.

На рис. 2 для того же случая приведено распределение  $\frac{\sigma_{ij}}{\sigma_0}$  по толщине пластины в плоскости  $x_2 = 0,1(b - R)$ .

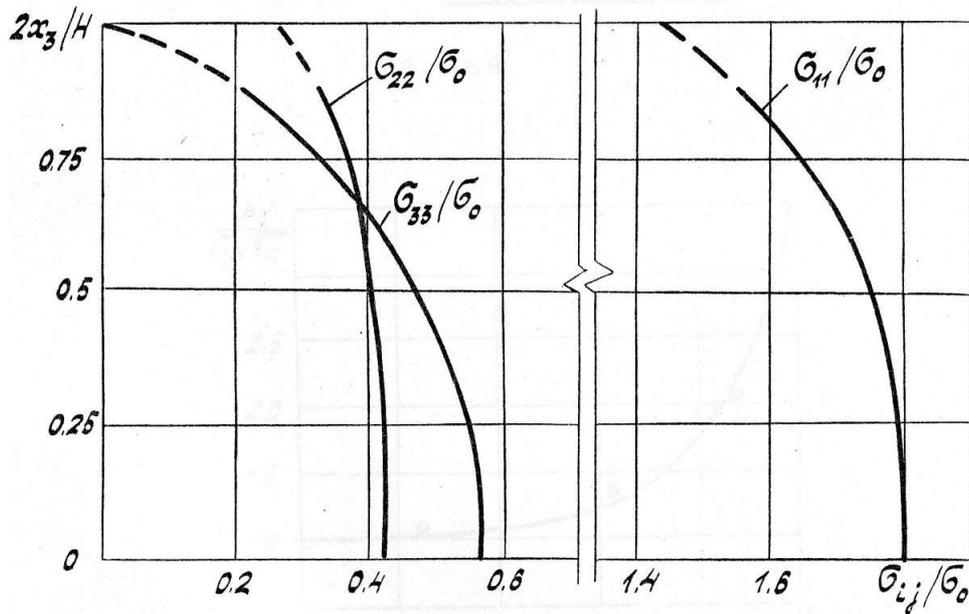


Рис. 2

На рис. 3 показаны изменения параметров напряжённого состояния в зависимости от  $R/H$  в двух наиболее опасных точках сечения  $x_1 = 0$  А и В (рис. 1) для четырёх вариантов нагрузки: первый вариант – упругое решение ( $\sigma_0/\sigma_T = 0,1$ ), второй -  $\sigma_0/\sigma_T = 0,6$ , третий -  $\sigma_0/\sigma_T = 0,8$ , четвёртый -  $\sigma_0/\sigma_T = 0,9$ .

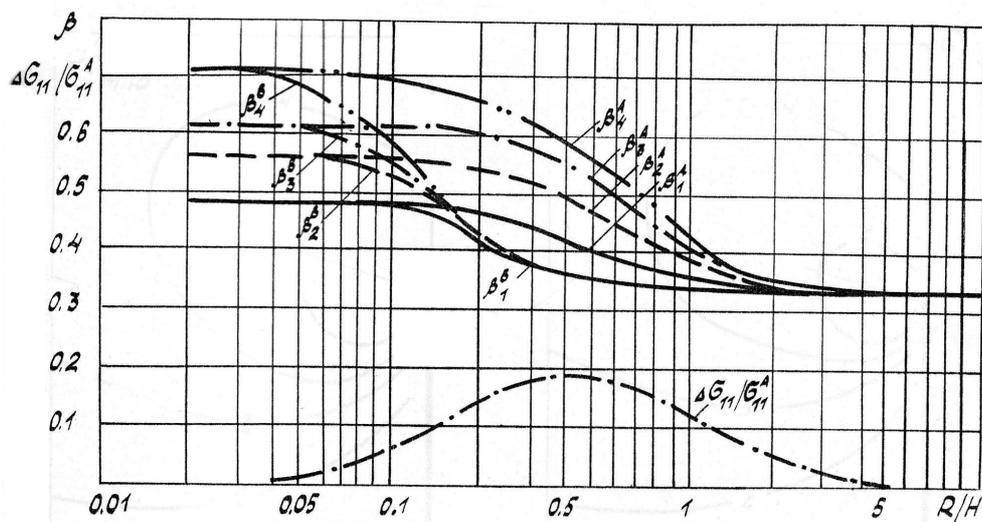


Рис. 3

Характерной особенностью (рис. 3) является существование трёх зон:  $R/H \leq 0,05$ ,  $0,05 \leq R/H \leq 5$  и  $R/H \geq 5$ .

В пределах первой зоны расчёт можно вести согласно постановки плоской деформации, в третьей зоне – плоского напряжённого состояния, в средней зоне необходим трёхмерный расчёт, иначе погрешность в определении напряжённого состояния может составить ощутимое значение. Например, при  $\sigma_0/\sigma_T = 0,8$  эта погрешность достигает 28% (рис.3).

Как видно из рис. 3 при увеличении  $\sigma_0$  качественный характер изменения компонент напряжений от  $R/H$  сохраняется, однако граница зон расширяется в сторону меньших значений  $R/H$ , а погрешность определения напряжений в средней зоне по плоской деформации плоскому напряжённому состоянию увеличивается, например, при  $\sigma_0/\sigma_T = 0,9$  погрешность может составить около 38%, при часто допускаемом в практике  $\sigma_0/\sigma_T = 0,6$  - 21%.

Точность построения зависимости  $\beta_1$  (упругое решение) можно проверить следующим образом. Значение  $\beta_1$  при  $R/H = 5$  постоянно, оно соответствует условию плоского напряжённого состояния, для которого  $\sigma_{33} = 0$ . Величина  $\sigma_{11} = 3\sigma_0$ ,  $\sigma_{22} = 0$  - из упругого решения плиты с отверстием. Тогда  $\sigma = \frac{1}{3}\sigma_{11} = \sigma_0$ , интенсивность напряжений  $\sigma_u = 3\sigma_0$ , параметр вида напряжённого состояния  $\beta = \sigma_u/\sigma_0 = 0,333$ , что соответствует значению  $\beta_1$  при  $R/H > 5$ , определённого численным расчётом. В первой зоне, где  $R/H < 0,05$ , параметр  $\beta_1$  также постоянен, он соответствует условию плоской деформации, для которой  $\sigma_{33} \neq 0$ , и согласно закону Гука  $\sigma_{33} = \nu(\sigma_{11} + \sigma_{22})$ . Нормальные напряжения  $\sigma_{22} = 0$ ,  $\sigma_{11} = 3\sigma_0$ , как и в случае плоского напряжённого состояния. Величина  $\sigma_u = \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{33}) = \sigma_0(1 + \nu)$ , интенсивность напряжений  $\sigma_u = 3\sigma_0\sqrt{1 - \nu + \nu^2}$ . При условии  $\nu = 0,3$ ,  $\beta_1 = \sigma/\sigma_u = 0,4876$ , что также соответствует значениям  $\beta_1$  на рис. 3 при  $R/H < 0,05$ .

Аналогичные исследования проводились для бокового концентратора, имеющего форму полуцилиндра ( $E = 7,875 \times 10^4$  МПа,  $\nu = 0,3$ ,  $g_1 = 1120$  МПа,  $g_2 = 0$ ,  $\sigma_T = \sigma_{0,2} = 180$  МПа). Результаты расчёта полностью соответствуют зависимостям, показанным на рис. 3, что позволяет рекомендовать указанные результаты для выбора схемы расчёта (плоское напряжённое состояние, плоская деформация и трёхмерный расчёт) в районе концентратора напряжений.

Представленные графики (рис. 3) использовались при решении проблемы о месте образования трещины при различных  $R/H$  и  $\sigma_0/\sigma_T$ .

### Литература

[1] **Коротких, Ю.Г.** Анализ трёхмерных полей напряжений в районе цилиндрического концентратора / Ю.Г. Коротких, А.Н. Паутов, М.Ф. Паутов // Прикладные проблемы прочности и пластичности: Анализ и оптимизация деформируемых систем / Всесоюз. межвуз. сб. / Горьк. Ун-т. – Горький, 1988. – С. 24 - 32.

[2] **Волков, И.А.** Уравнение состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями / И.А. Волков, Ю.Г. Коротких. – М.: Физматлит, 2008. – 464 с.

[3] **Коротких, Ю.Г.** Моделирование процессов упругопластического деформирования сталей при сложном нагружении / Ю.Г. Коротких, И.А. Волков, И.Ю. Гордлеева // Устойчивость, ползучесть при сложном нагружении. - Тверь: Изд-во ТГТУ, 2000. - С. 60-65.

*Волжская государственная академия водного транспорта, Нижний Новгород, Россия.*

*Поступила: 03.10.08.*