

УДК 629.4.015 + 625.1.03

Исследование интенсивности напряжений и вида комплексного напряжённого состояния в зоне концентратора напряжений в виде V-образной канавки на плоских дисковых образцах. Часть 1

© Ф. М. Минаев, Д. А. Еловенко

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация

Аннотация. Показан новый запатентованный вид плоского дискового образца с концентратором напряжений в виде V-образной канавки, а также допустимые целевые вариации его геометрических параметров. Исследовано изменение интенсивности напряжений и параметр вида напряжённого состояния в зоне скругления сходящихся граней канавки (в контрольной точке) в зависимости от изменения радиуса этого скругления. Исследование различных вариантов образцов проводилось уже описанным нами ранее методом локальной адаптации конечно-элементных сеток (в статье приводится ссылка на эту работу). Результаты исследований представлены для трёх вариантов глубины (высоты) V-образной канавки h : в соотношении 30, 50 и 70 % от толщины образца. Для каждой из этих глубин были рассмотрены варианты образцов с различным параметром усечения и радиусами скругления V-образной канавки, равными 2, 3 и 4 мм. Анализ результатов показал возможность моделирования комплексного вида напряжённого состояния, характеризуемого двухосным растяжением в широком диапазоне значений на сравнительно простом объекте. Также был показан характер изменения степени интенсивности эквивалентных напряжений модели с наличием концентратора напряжений в виде V-образной канавки и без него.

Ключевые слова: геометрическая модель, дисковый образец, концентратор напряжений, интенсивность напряжений, вид напряжённого состояния

The Research of the Stress Intensity and the Type of Complex Stress State in the Zone of the Stress Concentrator in the Form of a V-Shaped Groove on Flat Disk Samples. Part 1

© Fedor M. Minaev, Denis A. Elovenko

Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation

Abstract. The article presents a new patented form of a flat disk sample with a stress concentrator in the form of a V-shaped groove, as well as the permissible target variations of its geometric parameters. The article studies the change in the stress intensity and the parameter of the type of stress state in the rounding zone of the converging groove faces (at the control point), depending on the change in the radius of this rounding. The research of various variants of the samples has been carried out by the method of local adaptation of finite element meshes already described by us earlier (the article provides a link to this work). The article presents the research results for three variants of the depth (height) of the V-shaped groove h : in the ratio of 30, 50 and 70 % of the sample thickness. For each of these depths, specimen variants with different truncation parameters and V-groove rounding radii equal to 2, 3 and 4 mm are considered. Analysis of the results shows the possibility of modeling a complex type of stress state, characterized by biaxial tension in a wide range of values on a relatively simple object. The change in the degree of intensity of equivalent stresses in the model with and without a stress concentrator in the form of a V-shaped groove is also shown.

Keywords: geometric model, disk sample, stress concentrator, stress intensity, type of stress state

Дисковый образец для оценки прочности материала в условиях сложного НДС имеет геометрическую форму полностью круглой или усечённой пластины постоянной толщины (рис. 1), имеющей поверхности опирания и нагружения, ограниченные внешними круговыми контурами, центры которых совпадают с геометрическими центрами этих поверхностей [1]. Образец имеет канавку V-

образной формы, расположенную на одной из плоских поверхностей, усечение основной пластины может осуществляться двумя плоскостями, симметричными относительно её геометрического центра и перпендикулярными её срединной поверхности.

Канавка 4 расположена на нижней поверхности 2. Канавка имеет в поперечном сечении V-образную форму, симметричную

относительно плоскости, перпендикулярной срединной поверхности геометрии образца 1 (рис. 1). В процессе деформирования образца он опирается узкой кольцевой частью поверхности 2, ограниченной цилиндрической поверхностью внешнего контура образца 3, на кольцевую опору 7. В центральной части образца к его поверхности нагружения

5 прикладывалось единичное нормальное давление 8, действующее по поверхности круговой формы 9 (формы сектора под 90° для четверти образца). Под действием этой силы на поверхности радиуса скругления 10, которая является рабочей зоной V-образной канавки 4, на оси вращения образца возникает двухосное НДС.

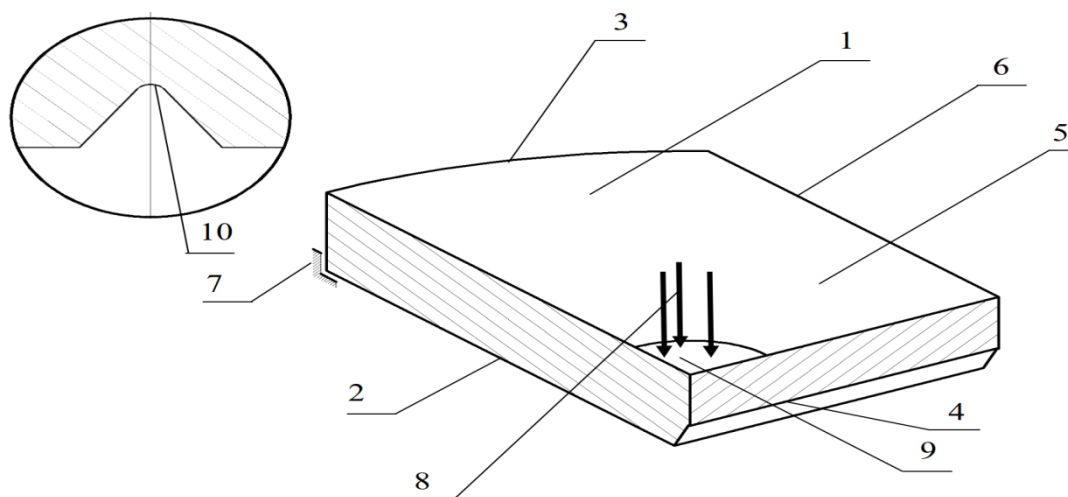


Рис. 1. Конструктивная схема дискового образца (четверть образца, высеченная из него двумя плоскостями симметрии)

Далее нами был проведён численный (компьютерный) анализ степени интенсивности эквивалентных напряжений и коэффициента вида напряжённого состояния нескольких вариантов образцов, у каждого из которых грани V-образной канавки сходятся под 60° друг к другу с радиусом их сопряжения "R" (рис. 2).

Изменение этого радиуса позволяет получить различную степень интенсивности напряжений в контрольной точке и получить диапазон изменения вида НДС.

Численный (компьютерный) анализ проводился с применением метода локальной адаптации конечно-элементных сеток [2] с целью повышения точности вычислительного процесса. Точность этого метода для выполнения инженерных расчётов уже была подтверждена нами ранее [3].

Степень интенсивности напряжений в образцах определялась отношением величины эквивалентных напряжений соответствующей геометрической формы образца, имеющего описанный выше концентратор напряжений, и образца, который не имеет концентратор напряжений (образец без канавки). Коэффициент вида комплексного напряжённого состояния в образцах определяется соотношением (1) [1].

Проведён анализ образцов, условно разделённых на три группы по глубине (высоте) V-образной канавки h , величина которой составляла 30, 50 и 70 % от толщины образца S соответственно.

Результаты анализа первой группы образцов представлены на рисунке 3. Графики зависимости изменения интенсивности напряжений $\sigma_{\text{экв}}$ от степени усечения (ширины усечённого образца) показывают значения отношений эквивалентных напряжений образца с V-образной канавкой и без нее (рис. 3 а). На рисунке 3 б представлены графики зависимости изменения вида комплексного напряжённого состояния (так называемого коэффициента "П" [1]) от степени усечения образца. При этом сплошной линией показаны кривые результатов для моделей с радиусом сопряжения граней V-образной канавки в 2 мм, штриховой – для моделей с радиусом сопряжения 3 мм, а пунктирной – для моделей с радиусом сопряжения 3 мм соответственно.

Аналогичные результаты представлены на рисунках 4 и 5 для второй и третьей групп исследованных образцов, глубина V-образной канавки которых составляла 50 и 70 % от толщины образца S (см. рис. 2).

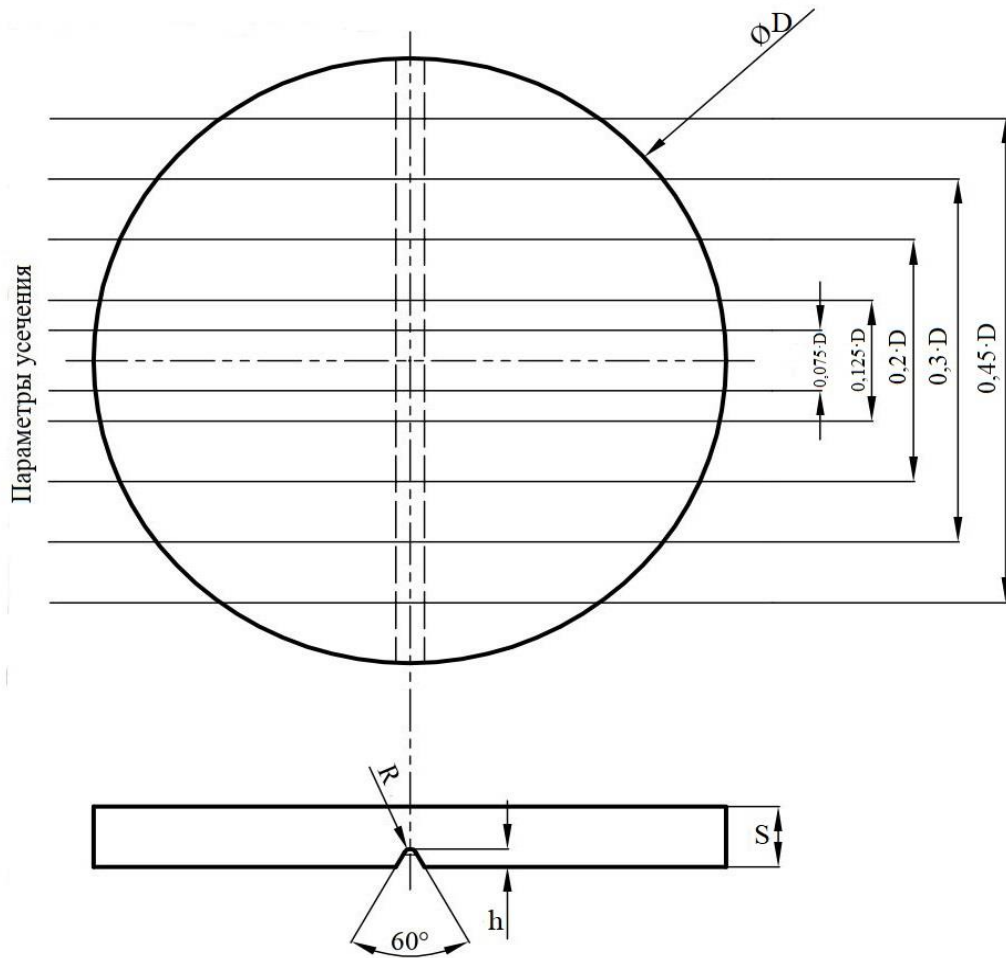


Рис. 2. Основные геометрические параметры дискового образца

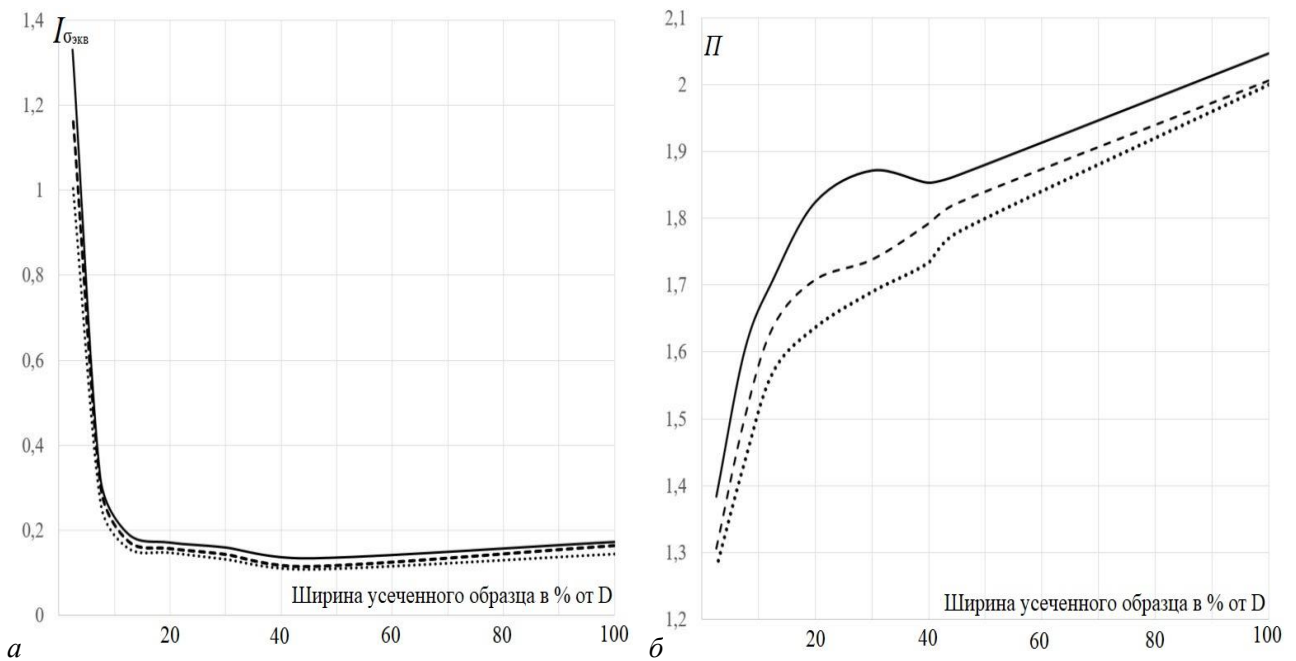


Рис. 3. Зависимость изменения степени интенсивности напряжений: а) и коэффициента вида напряжённого состояния; б) от ширины усечения плоского дискового образца с глубиной V-образной канавки в 30 % от его толщины

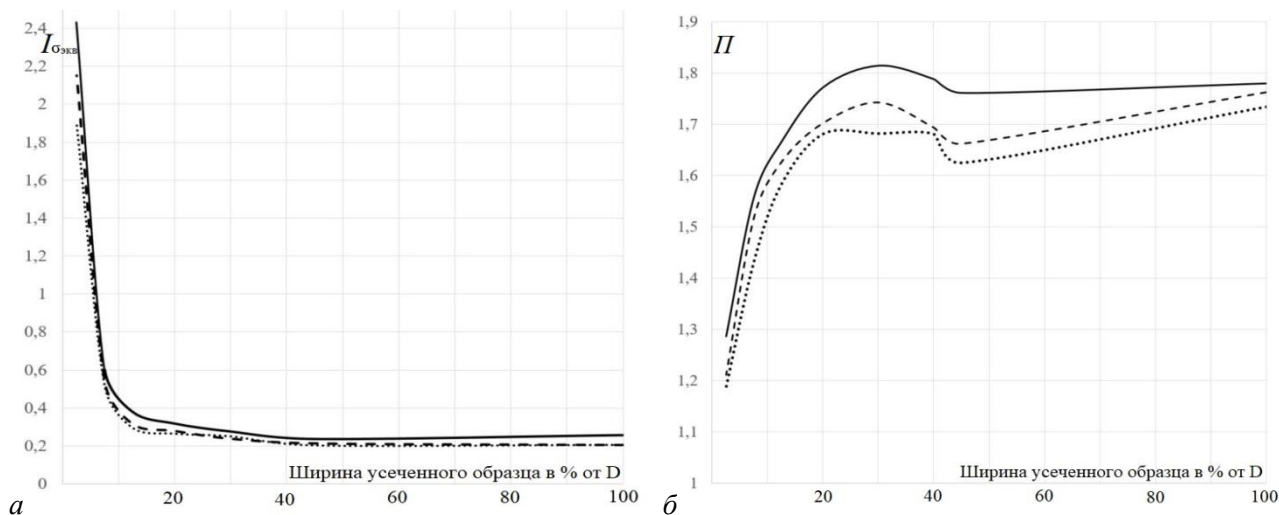


Рис. 4. Зависимость изменения степени интенсивности напряжений: а) и коэффициента вида напряжённого состояния; б) от ширины усечения плоского дискового образца с глубиной V-образной канавки в 50 % от его толщины

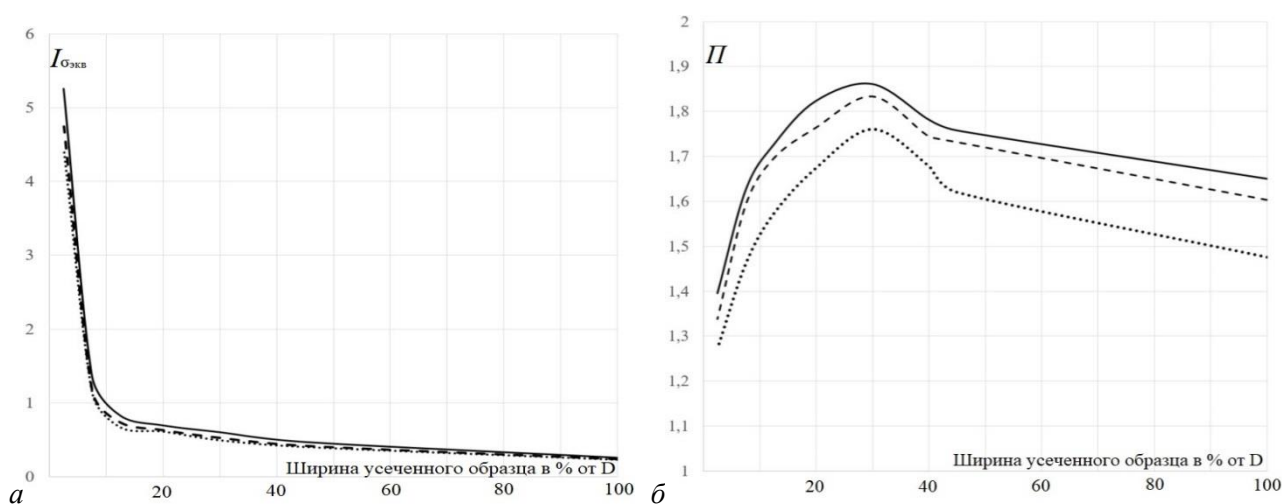


Рис. 5. Зависимость изменения степени интенсивности напряжений: а) и коэффициента вида напряжённого состояния; б) от ширины усечения плоского дискового образца с глубиной V-образной канавки в 70 % от его толщины

Результаты исследования степени интенсивности напряжений ($I_{\sigma_{экв}}$) показывают, что данный параметр возрастает по мере увеличения глубины V-образной канавки. Степень интенсивности напряжений крайне слабо изменяется в диапазоне параметра усечения образца (см. рис. 2) от 15 % до 100 % величины диаметра дискового образца "D". Однако в области значений параметра усечения менее 15 % $I_{\sigma_{экв}}$ изменяется на порядок более существенно. Также отметим, что незначительное изменение радиуса сопряжения граней V-образной канавки практически никак не влияет на изменение параметра $I_{\sigma_{экв}}$. Хорошая корреляция степени интенсивности напряжений на представленных выше графиках даёт основание считать корректными конечно-элементные модели, погрешность результатов анализа ко-

торых удовлетворяет требуемой точности инженерных расчётов.

Полученные нами значения коэффициента вида комплексного напряжённого состояния "П" (см. рис. 3–5 б) охватывают существенную область значений для двухосного растяжения от 1,2 до 2 при максимально теоретически возможных значениях этого параметра от 0 до 2. На всех графиках изменения "П" также видна хорошая корреляция кривых, показывающая качество полученных результатов с требуемой инженерной точностью. Вновь стоит отметить незначительное слияние изменения радиуса сопряжения граней V-образной канавки для указанных ранее значений.

В заключение отметим, что проанализированная нами вариация геометрических параметров дискового образца позволяет

моделировать различные соотношения состояния двухосного растяжения. В этой связи появляется возможность применения образца сравнительно простой геометрической формы для оценки конструкционной

прочности материала различных узлов и деталей машин, работающих в условиях комплексного НДС, характеризуемого двухосным растяжением.

Список источников

1. Пат. № 2734276, Российская Федерация, RU (11) 2734276 (13) С1. Дисковый образец для оценки конструкционной прочности материала / Л. Б. Цвик, Е. В. Зеньков, И. С. Бочаров, Д. А. Еловенко; заявитель и патентообладатель Иркутский государственный университет путей сообщения. Заявл. 22.10.2019; опубл. 14.10.2020. Бюл. № 5.

2. Еловенко Д. А., Носков Д. П., Вальдимат Г. И., Сигов Р. С. Метод локальной адаптации конечно-элементных сеток при исследовании НДС конструкций с малоразмерными геометрическими элементами // Молодежный вестник ИрГТУ. 2019. Т. 9. № 2. С. 11–17. [Электронный ресурс]. URL: <http://xn--b1agjigi1ai.xn--p1ai/journals/2019/02/articles/02> (14.07.2021).

3. Минаев Ф. М., Еловенко Д. А. Оценка точности и повышения скорости вычислительного процесса при использовании метода фрагментирования и локальной адаптации конечно-элементных моделей на примере трёхмерной модели полости в виде сфероида // Молодежный вестник ИрГТУ. 2021. Т. 11. № 3. С. 7–13. [Электронный ресурс]. URL: <http://xn--b1agjigi1ai.xn--p1ai/journals/2021/03/articles/01> (02.10.2021).

4. Охотников Д. И. Прямое численное моделирование ламинарно-турбулентного перехода на сетках с локальным сгущением // Ученые записки Казанского университета. Серия: Физико-математические науки. 2017. Т. 159. № 2. С. 216–230.

5. Жданов А. В., Иванченко А. Б., Новикова Е. А., Шинаков И. В. Определение напряже-

ний и деформаций в контакте звеньев РВМ методом конечных элементов // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 12. С. 75–78.

6. Троханяк В. И., Куляк Б. В. Исследование процесса генерации 3D-сетки промышленной теплицы методом конечных элементов в Ansys Meshing // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. 2016. Т. 3. № 6. С. 219–227.

7. Кургузов В. Д. Выбор параметров сетки конечных элементов при моделировании роста трещин гидроразрыва // Вычислительная механика сплошных сред. 2015. Т. 8. № 3. С. 254–263.

8. Власов А. Н., Волков-Богородский Д. Б., Знаменский В. В., Мнушкин М. Г. Генерация нерегулярных гексаэдральных сеток // Вестник МГСУ. 2012. № 4. С. 78–87.

9. Васева И. А., Лисейкин В. Д. Применение метода конечных элементов для построения адаптивных сеток // Вычислительные технологии. 2011. Т. 16. № 5. С. 3–15.

10. Yang Du, Li Ma, Jinyang Zheng, Fan Zhang, Anda Zhang. Coupled simulation of explosion-driven fracture of cylindrical shell using SPH-FEM method // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2016. Vol. 139–140. P. 28–35.

11. FEMAP Commands. Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. [Электронный ресурс]. URL: https://www.plm.automation.siemens.com/store/en-us/trial/femap.html?stc=rudi100002&ef_id (14.07.2021).

Сведения об авторах / Information about the Authors

Минаев Фёдор Михайлович, студент группы СДМ-18-1, Институт авиамашиностроения и транспорта, Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Российская Федерация, e-mail: minaev3000@inbox.ru

Еловенко Денис Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и стандартизации в машиностроении, Институт авиамашиностроения и транспорта, Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Российская Федерация, e-mail: elovenko03@gmail.com

Fedor M. Minaev, Student, Institute of Aircraft Engineering and Transport, Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov Str., Irkutsk, 664074, Russian Federation, e-mail: minaev3000@inbox.ru

Denis A. Elovenko, Cand. Sci. (Technics), Associate Professor of Design and Standardization of Mechanical Engineering Department, Institute of Aircraft Engineering and Transport, Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov Str., Irkutsk, 664074, Russian Federation, e-mail: elovenko03@gmail.com