

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПЛАСТИНЧАТЫХ ОБРАЗЦОВ-ПРОТОТИПОВ С УПРАВЛЯЕМЫМ ВИДОМ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

*Зеньков Е.В.*

*Иркутский национальный исследовательский технический университет;  
Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск*

**Ключевые слова:** конструкционная прочность, моделирование, напряженно-деформированное состояние, образец-прототип, метод конечных элементов.

**Аннотация.** В статье представлен численный расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) пластинчатых образцов-прототипов материала для изгибных механических испытаний арки на основе использования метода конечных элементов с применением пре- постпроцессора Femap with NXNastran. При моделировании процессов деформирования образцов-прототипов использованы граничные условия закрепления и нагружения, приближенные к реальным условиям лабораторных испытаний. Выявлено, что изменение геометрических параметров U-образных канавок позволяет воспроизводить в рабочей зоне образцов-прототипов управляемый вид НДС (различное соотношение величин главных напряжений) в процессе их механических испытаний до разрушения. Указанное обстоятельство позволяет на стадии лабораторных исследований использовать эти образцы-прототипы для оценки конструкционной прочности конструкционных материалов на типовых одноприводных испытательных машинах. Получены зависимости характеристик вида и уровня НДС в рабочей зоне образцов-прототипов от их основных геометрических параметров.

## NUMERICAL INVESTIGATION OF DEFORMATION OF PLATE PROTOTYPE SPECIMENS WITH A CONTROLLED TYPE OF STRESS STATE

*Zenkov E. V.*

*Irkutsk National Research Technical University;  
Irkutsk State Transport University, Irkutsk*

**Keywords:** structural strength, modeling, stress-strain state, prototype sample, finite element method.

**Abstract.** The article presents a numerical calculation of the stress-strain state (SSS) of lamellar prototypes of the material for bending mechanical tests of the arch based on the finite element method using the Femap with NXNastran pre-postprocessor. When modeling the processes of deformation of prototype specimens, the boundary conditions of fastening and loading were used, which are close to the real conditions of laboratory tests. It has been revealed that the change in the geometric parameters of the U-shaped grooves makes it possible to reproduce in the working area of the prototype specimens a controlled type of SSS (different ratio of the principal stresses) during their mechanical tests to failure. This circumstance allows using these prototypes at the stage of laboratory research to assess the structural strength of structural materials on standard single-drive testing machines. The dependences of the characteristics of the type and level of SSS in the working area of prototype samples on their main geometrical parameters are obtained.

### Введение

Несущие (высоконагруженные) элементы конструкций в процессе эксплуатации могут подвергаться комплексу статических или повторяющихся (циклических) нагрузок, создающих в этих элементах объёмное напряженно-деформированное состояние (НДС), характеризующее концентрацией напряжений вблизи конструктивных неоднородностей (отверстий, выступов, пазов и т.п.), вблизи которых могут располагаться очаги разрушений. Возникающее вблизи таких зон НДС, точнее, его уровень и вид определяют ресурс работы конструкции при статическом и циклическом нагружении [1]. Существенно, что при различных видах НДС – в условиях всестороннего сжатия, одноосного растяжения или сдвига, а также при сложных видах НДС, являющиеся их комбинацией, критерии прочности материала конструкций могут значительно различаться [2-3], что приводит к необходимости

применения объединённых критериев прочности, использующих различные уравнения предельного состояния материалов [1, 4-9].

Расчётная оценка статической конструкционной прочности материала детали с учётом вида НДС может осуществляться на основе применения различных уравнений предельного состояния, например, уравнений типа Писаренко-Лебедева, Ягна-Бужинского, Друккера-Прагера и др. [1]. В работах [8-10] предложена расчётно-экспериментальная методика расчёта конструкционной прочности, позволяющая вычислять уточнённые прочностные характеристики материала (значения весовых множителей у слагаемых, ответственных за различные механизмы разрушения), определяемых по результатам разрушения в лабораторных условиях специальных образцов используемого материала, имеющих в очаге их разрушения тот же вид НДС, что и в очаге возможного разрушения рассматриваемой конструкции. Существенно, что предложенные образцы могут в этом случае испытываться до разрушения на типовых одноприводных испытательных машинах [11, 12]. Реализация предложенной методики возможна и с применением специальной испытательной техники с несколькими силовыми приводами, создающей разнонаправленные воздействия на испытываемый лабораторный образец материала [8], однако процесс испытания в этом случае существенно усложняется [8, 9, 11, 12].

### Постановка задачи

Реализация подхода, учитывающая вид НДС, возникающего в очагах возможного разрушения элементов конструкций предполагает выполнение следующих основных этапов:

– расчётный анализ уровня и вида НДС в элементах рассматриваемой конструкции в условиях, соответствующих её эксплуатации;

– определение инвариантов НДС, входящих в объединённый критерий прочности используемого конструкционного материала в этих элементах в возможных очагах их разрушения;

– выбор лабораторных образцов-прототипов для механических испытаний до разрушения с заданным (выбранным по результатам предварительного расчета характеристик НДС) значением инвариантов НДС, определяющих прочность материала конструкции в соответствии с используемым объединённым критерием прочности.

Реализация первого этапа осуществляется с применением компьютерных технологий инженерного анализа. В частности, на основе применения метода конечных элементов (МКЭ) при решении задач механики деформирования твёрдого тела. Использование хорошо разработанного аппарата механики деформирования на основе МКЭ, а также проверенных численных и аналитических методов решения краевых и контактных задач механики, позволяет на первом этапе для расчёта НДС конструкции применять известные программные комплексы, например, MSC.PATRAN, ANSYS, Femap (with NX Nastran) и другие. Вторая задача может быть решена в автоматизированном режиме путем вычисления соответствующей функции, заданной в программном комплексе после выполнения первого этапа. Этот этап позволяет определить характеристики вида НДС, возникающего в исследуемой конструкции в очаге её возможного разрушения под действием эксплуатационных нагрузок. В соответствии с предложенной методикой [8-10] третья задача может быть решена в том случае, если имеются лабораторные образцы-прототипы для механических испытаний, значение инвариантов НДС (вид НДС) которых в момент разрушения совпадает с значениями характеристик вида НДС, определённых на втором этапе с помощью компьютерных технологий. В данной работе в качестве критерия подобия напряжённо-деформируемых состояний, возникающих в исследуемых конструкциях и в соответствующих им образцах-прототипах для механических испытаний, используется величина  $\Pi$  – характеристика вида НДС, равная отношению первого инварианта тензора напряжений ко второму [1, 2, 4]

$$\Pi = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}, \quad (1)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения, возникающие в очаге возможного разрушения;  $\sigma_i$  – эквивалентное напряжение, определяемое формулой

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

Тензометрия, а также численное моделирование полей напряжений высоконагруженных деталей машин и механизмов [1, 3, 5, 6] показало, что значения величины коэффициента  $\Pi$  в возможном очаге разрушения широкого класса машиностроительных конструкций лежит в диапазоне значений

$$-2 \leq \Pi \leq -1; 1 \leq \Pi \leq 2. \quad (3)$$

Примером учёта вида НДС ( $\Pi < 0$ , [2]) ответственных конструктивных элементов является расчётная оценка прочности зоны контакта тела качения подшипника букс железнодорожных вагонов. В этом случае значение величины  $\Pi$  близко к  $-2$  и для стали типа ШХ4, используемой для изготовления подшипников, нормативные допускаемые контактные напряжения равны 3500 МПа [11], что более чем вдвое превышает предел прочности этой стали в условиях одноосного растяжения, равный 1250 МПа. Эксперименты, показывающие противоположный эффект – снижение прочностных свойств материала в условиях двухосного растяжения (так называемый «жесткий вид НДС», соответствующий второму из неравенств (3) [2]) приведены в [7].

Проблемой, возникающей при осуществлении оценки конструкционной прочности на основе применения объединенных критериев прочности, является сложность создания в соответствующих лабораторных образцах для механических испытаний вида НДС, характеризуемого различным соотношением инвариантов НДС в соответствии с неравенствами (3). При этом наиболее опасное с точки зрения зарождения и развития дефектов является соотношение инвариантов НДС, соответствующее «жесткому виду НДС», для которого  $\Pi = 2$ .

В настоящее время для оценки прочности материала в условиях сложного НДС могут использоваться образцы материала различной геометрической формы, в частности лабораторные образцы пластинчатого типа. Например, образец, имеющий форму прямоугольной пластины с концентраторами механических напряжений, выполненных в виде U- и V-образных вырезов одинакового размера и конфигурации и расположенных на узких противоположных сторонах пластины [12]. Использование таких образцов не обеспечивает необходимой точности оценки конструкционной прочности материала, так как изменение величины  $\Pi$  в диапазоне (3), существенно ограничено. Более точно позволяет моделировать исследуемое НДС образец для оценки прочности материала, имеющий форму призмы, два боковых выступа, расположенных продольно [13]. Указанный образец имеет в поперечном сечении П-образную форму и под действием одноосно направленного испытательного усилия, в рабочей зоне, создаёт НДС, удовлетворяющее одному из неравенств (3). Недостатком представленного образца являются сложность его формы (наличие системы выемок и выступов) и схема его базирования в опорных элементах приспособления, требующая использования как массивных боковых призматических опор, так и двух концевых опор образца, что существенно повышает требования к точности изготовления и качеству контактирующих поверхностей, необходимых для создания двухосного НДС.

### **Описание конструкции и условий деформирования пластинчатого образца-прототипа**

Задача повышения точности моделирования конструкционной прочности материала может быть решена с помощью конструирования на основе численного моделирования методом конечных элементов конструкции образца-прототипа, способного создавать в своей рабочей зоне диапазон возможного изменения коэффициента  $\Pi$ , характеризующего неравенством (3). Указанным условиям отвечает конструкция образца-прототипа для оценки прочности материала при сложном напряженном состоянии (рис. 1), имеющего форму круглой пластины с концентраторами напряжений в виде диаметрально расположенных U-

или V-образных канавок (далее – пластинчатый образец-прототип). В процессе испытаний пластинчатого образца-прототипа используется его опирание по наружной кромке (см. рис. 2) и при этом в его рабочей зоне, расположенной в центре круглой пластины на поверхности нижней U-образной канавки, может создаваться НДС, удовлетворяющее одному из неравенств (3).

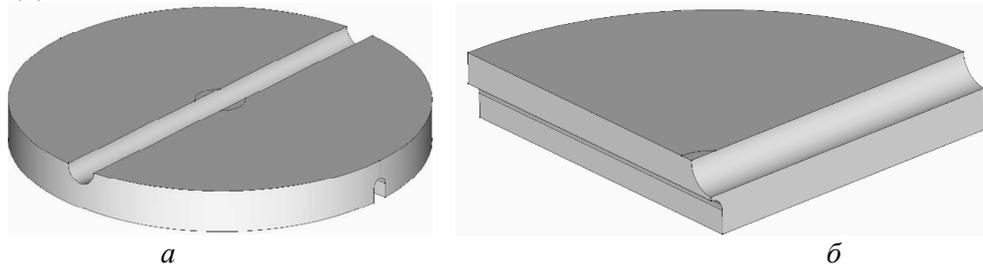


Рис. 1. Конструкция пластинчатого образца-прототипа, *a* – общий вид, *б* – четверть образца, высеченная из него двумя плоскостями симметрии

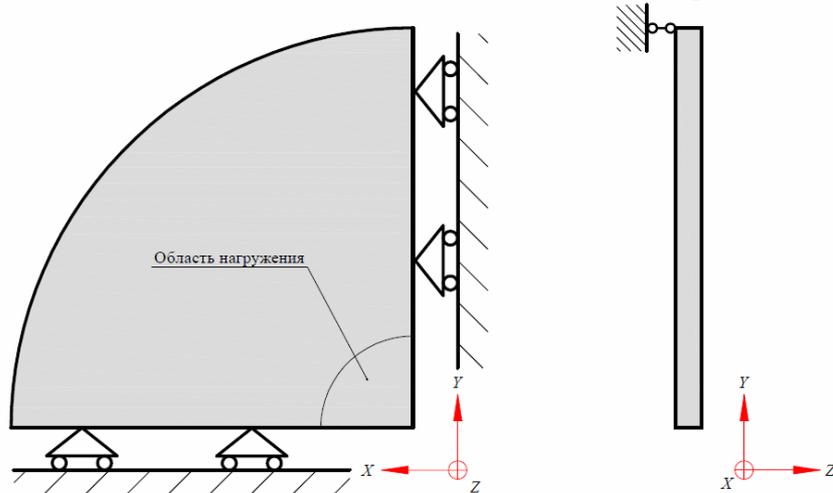


Рис. 2. Граничные условия закрепления пластинчатого образца-прототипа

На рисунке 1,*б* видно, что вблизи оси вращения исходной круговой пластины, на которой располагаются канавки, его материал образует относительно тонкий слой переменной толщины между поверхностями канавок. В процессе механических испытаний образец-прототип опирается по своему наружному круговому контуру (на рисунке 1 – стороной опирания является нижняя сторона круговой пластины). В своей центральной части образец в процессе испытаний нагружается вертикальной направленной вниз (перпендикулярно срединной поверхности круговой пластины) силой. Указанная сила распределяется в процессе испытаний на стороне нагружения образца по малой круговой поверхности в центральной части образца (круговой сектор на рисунке 2).

### Описание численной модели деформирования и результатов исследования НДС пластинчатых образцов-прототипов

Для исследования расчетных зависимостей изменения вида НДС образцов-прототипов использовалась математическая модель объемного упругого деформирования. В случае однородного изотропного материала эта модель определяется дифференциальными уравнениями равновесия теории упругости  $\mathbf{u}$

$$L\mathbf{u} = (\lambda + \mu) \text{grad div } \mathbf{u} + \mu \Delta \mathbf{u} = 0. \quad (4)$$

где  $L$  – дифференциальный оператор теории упругости;  $\mathbf{u}$  – искомый вектор перемещений в точках области  $D$ , занимаемой деформируемыми элементами конструкции;  $\lambda, \mu$  – коэффициенты, которые определяют механику однородного изотропного материала исследуемой конструкции (параметры Ламе).

Уравнение (4) рассматривается в области, занимаемой материалом образца и ограниченной поверхностью  $S = S_\sigma + S_{u\sigma}$ , при краевых условиях

$$(\mathbf{v} \cdot \mathbf{T}) \Big|_{S_\sigma} = \mathbf{F}(M), M \in S_\sigma; (\mathbf{u} \cdot \mathbf{v}) \Big|_{S_{u\sigma}} = 0, (\mathbf{v} \cdot \mathbf{T} \cdot \boldsymbol{\tau}) \Big|_{S_{u\sigma}} = 0, M \in S_{u\sigma}. \quad (5)$$

где  $S_\sigma$ ,  $S_{u\sigma}$ , – поверхности рассматриваемых образцов, на которых заданы поверхностные перемещения, поверхностные силы и смешанные (контактные) краевые условия соответственно;  $\mathbf{T}$  – тензор напряжений;  $\mathbf{F}(M)$  – вектор поверхностных сил, заданный на поверхности  $S_\sigma$ ;  $\mathbf{v}$ ,  $\boldsymbol{\tau}$  – единичные вектора, определяющие нормальное и касательное направления к поверхности  $S$  в точке  $M$ .

Исследование НДС конструктивных вариантов пластинчатых образцов-прототипов проводилось по результатам их численного моделирования методом конечных элементов с помощью программного средства Femap (with NX Nastran). Для минимизации вычислительных ресурсов ЭВМ и повышения точности расчетных характеристик НДС выполнялась дискретизация четвертой части пластинчатых образцов-прототипов с заданием соответствующих граничных условий кинематического закрепления. Дискретизация получаемых КЭ-моделей выполнялась на основе гексаэдра первого порядка аппроксимации и управляемой локализации сгущения разбивки КЭ-сетки (рис. 3), обеспечивающей относительную погрешность сходимости получаемых расчетных характеристик НДС не более 5%. Общее количество КЭ в используемых расчетных моделях в среднем не превысило 110 тыс.

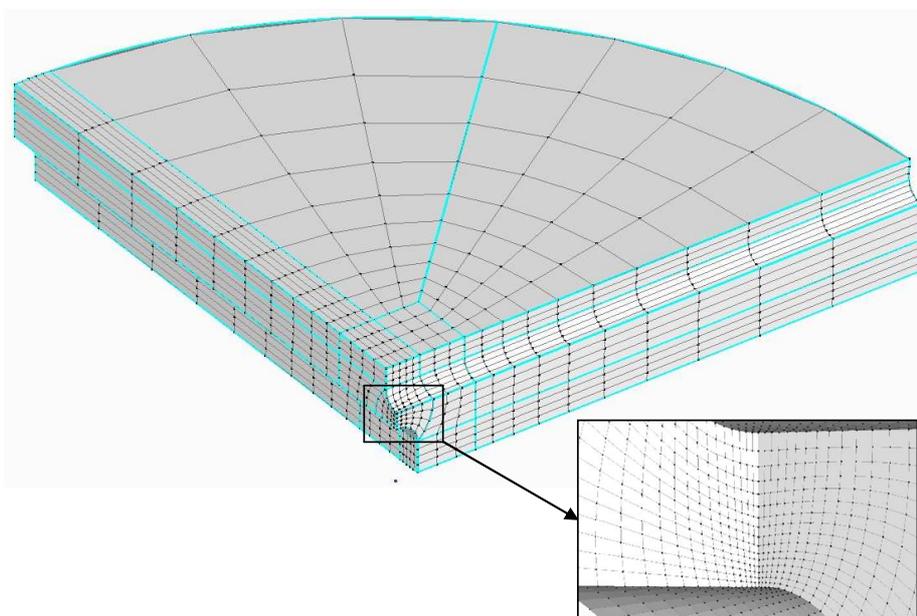


Рис. 3. Дискретная модель пластинчатого образца-прототипа

В вычислительных экспериментах на наружной кромке образцов-прототипов ставились краевые условия, соответствующие закреплению в пространстве точек этой кромки в осевом направлении (см. рис. 2). Нагружение выполнялось приложением к центральной части образцов-прототипов единичного давления, равномерно распределённого в пределах окружности диаметром, равным четверти диаметра верхней поверхности образца-прототипа. При упругом объемном деформировании свойства материала принимались равным: модуль Юнга  $E = 210000$  МПа и коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ , массовая плотность  $\rho = 7,85E-9$  тонн/м<sup>3</sup>.

Исходными геометрическими параметрами пластинчатых образцов-прототипов являлись размеры нижней и верхней канавок – их ширины и глубины. Исследования включали построение расчетных зависимостей величины  $\Pi$  – коэффициента вида НДС, вычисляемого по формуле (1), и  $K_\sigma$  – коэффициента концентрации эквивалентных напряжений, вычисляемого по формуле (6)

$$K_\sigma = \sigma_i^{\max} / \sigma_i^{\text{ном}}, \quad (6)$$

от основных геометрических параметров образцов-прототипов в их рабочей зоне. В формуле (6)  $\sigma_i^{max}$  – эквивалентные напряжения в рабочей зоне;  $\sigma_i^{ном}$  – номинальные эквивалентные напряжения – интенсивность напряжений в центре аналогично нагруженного пластинчатого образца-прототипа без канавок-концентраторов на его сторонах (аналогичного по диаметру и толщине). Для представленных образцов-прототипов наружный диаметр принимался неизменным и равным  $D = 200$  мм, толщина –  $H = 20$  мм.

В вычислительных экспериментах рассматривались варианты пластинчатых образцов-прототипов, способные воспроизводить значения величин  $K_\sigma$  и  $\Pi$ , характерных для реальных конструкций [13, 14]. В вычислительных экспериментах рассматривались следующие диапазоны изменения варьируемых значений геометрических параметров (рис. 4)

$$\rho_n = \frac{R_n}{H} \in [0,25; 0,6]; \rho_o = \frac{R_o}{H} \in [0,15; 0,25]; \zeta = \frac{Z}{H} \in [-0,2; 0,15], \quad (7)$$

где  $H$  – толщина образца-прототипа  $R_n$  – радиус канавки на стороне нагружения образца-прототипа,  $R_o$  – радиус канавки на стороне опирания образца-прототипа,  $Z$  – расстояние от рабочей зоны до срединной поверхности образца-прототипа, взятое с минусом, если рабочая зона располагается ниже срединной и с плюсом – выше срединной поверхности. В рассмотрение брались следующие безразмерные геометрические параметры:  $\rho_n$  – относительный радиус канавки на стороне нагружения образца-прототипа;  $\rho_o$  – относительный радиус канавки на стороне опирания образца-прототипа;  $\zeta$  – относительное смещение рабочей зоны в направлении от срединной поверхности образца-прототипа.

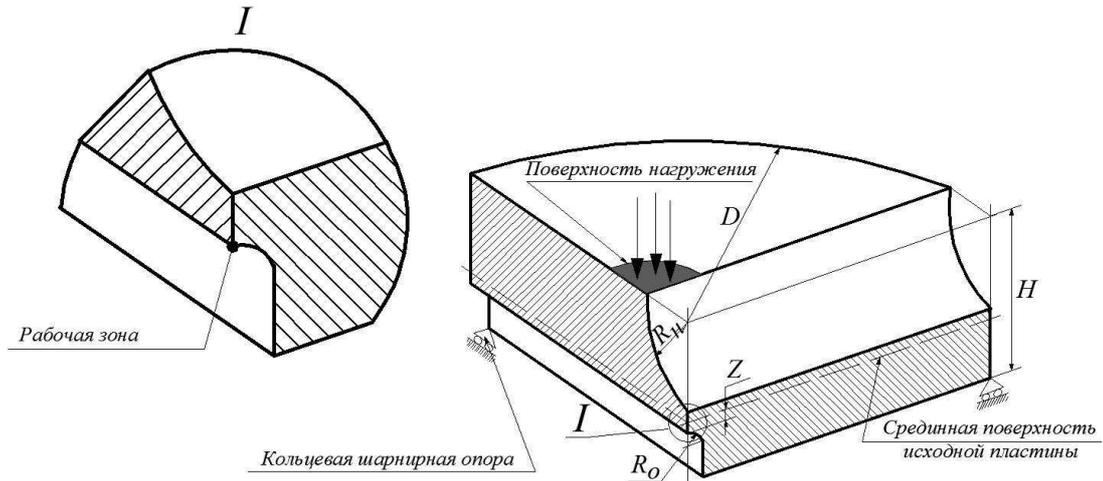


Рис. 4. Геометрические параметры пластинчатого образца-прототипа,  $I$  – рабочая зона образца

На рисунке 5 представлен один из результатов численного моделирования упругого НДС образцов-прототипов в виде распределения интенсивности напряжений  $\sigma_i$ .

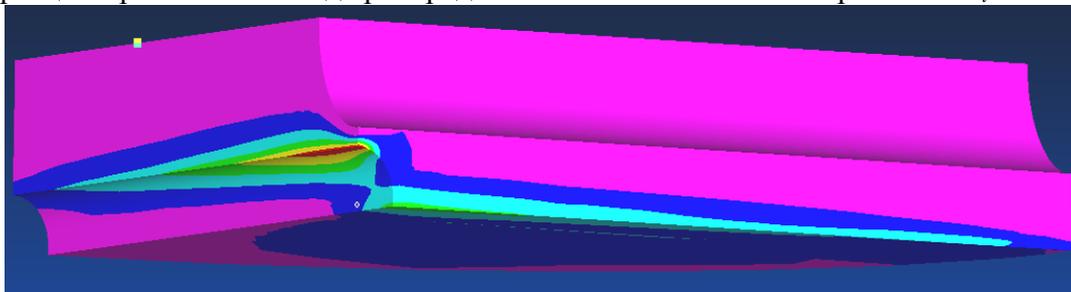


Рис. 5. Распределение интенсивности напряжений  $\sigma_i$  в пластинчатом образце-прототипе

На рисунках 6 и 7 приведены диаграммы вариантных исследований расчетных характеристик НДС пластинчатых образцов-прототипов при их упругом объемном деформировании методом конечных элементов.

На рисунках 6,а,б приведены расчетные распределения значений  $\Pi$  и  $K_\sigma$  в рабочей зоне пластинчатых образцов-прототипов при фиксированных значениях относительного радиуса

канавки на стороне опирания  $\rho_o = \rho_o^{min} = 0,15$ , на рисунках 7,а,б – при  $\rho_o = \rho_o^{max} = 0,25$ . Как следует из результатов вычислительных экспериментов, величина  $\Pi$  изменяется в пределах от 1,2 до 1,75 (рис. 6 и 7). Установлено, что концентрация напряжений  $K_\sigma$  имеет достаточно низкое значение (изменяется в пределах  $0,2 < K_\sigma < 1,4$ ). Выявленный диапазон изменения геометрических параметров пластинчатых образцов-прототипов не приводит к необходимому изменению величины  $\Pi$  во всём диапазоне, описываемом неравенствами (3).

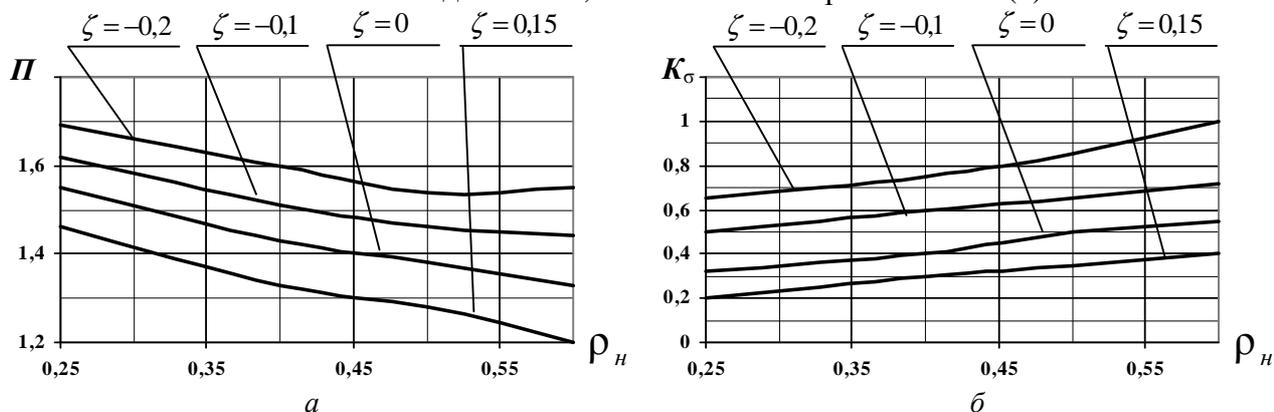


Рис. 6. Распределение коэффициентов  $\Pi$  (а) и  $K_\sigma$  (б) от основных геометрических параметров образцов-прототипов при  $\rho_o=0,15$

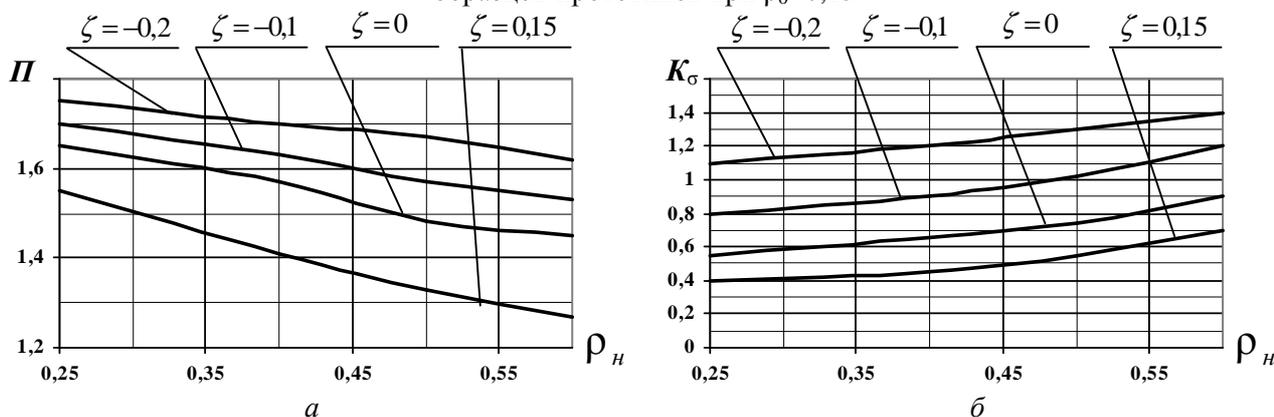


Рис. 7. Распределение коэффициентов  $\Pi$  (а) и  $K_\sigma$  (б) от основных геометрических параметров образцов-прототипов при  $\rho_o=0,25$

Полученные результаты в совокупности позволяют выявить такие конфигурации пластинчатых образцов-прототипов, для которых характеристики НДС (параметры НДС –  $\Pi$  и  $K_\sigma$ ) удовлетворяют диапазону, описываемому неравенствами (3). Исследованные образцы с концентраторами напряжений в виде U-образных канавок позволяют моделировать напряжённые состояния, управляемый вид которого принимает значения в диапазоне от 1,2 до 1,75 в зависимости от значений ширины и глубины U-образных канавок. Установлено, что смещение перемычки к поверхности нагружения при постоянной ее толщине и минимальной ширине канавки на стороне опирания приводит к выраженному снижению вида напряжённого состояния в рабочей зоне, изменяя при этом положительное значение коэффициента  $\Pi$  на отрицательное по мере смещения.

#### Список литературы

1. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
2. Смирнов-Аляев Г.А. Механические основы пластической обработки металлов. Инженерные методы. – Л.: Машиностроение, 1968. – 272 с.
3. Цвик Л.Б., Пимштейн П.Г., Борсук Е.Г. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния многослойного цилиндра с монолитным вводом. // Проблемы прочности. – 1978. – № 4. – С. 74-77.
4. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. – К.: Изд-во Дельта, 2008. – 816 с.

5. Лебедев А.А., Ковальчук Б.И., Гигиняк Ф.Ф., Ламашевский В.П. Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии // Под ред. А.А. Лебедева. – Киев: Изд-во Дом «Ин Юре», 2003. – 540 с.
6. Цвик Л.Б. Зеньков Е.В. Определение прочностных характеристик материалов экспериментальных призматических образцов при двухосном растяжении // Вестник машиностроения. – 2015. – №1. – С. 42-46.
7. Zenkov E.V., Tsvik L.B. Formation of divergent testing efforts and experimental evaluation of material strength under biaxial stretching // PNRPU Mechanics Bulletin. 2015, no. 4, pp. 110-120.
8. Zenkov E.V., Tsvik L.B. Accuracy improvement for combined static strength criterion for structures under complex loading // Materials Physics and Mechanics. 2018, vol. 40, pp. 124-132. DOI: 10.18720/МІІМ.4012018\_15.
9. Zenkov E.V. Update of the equations of the limit state of the structural material with the realization of their deformation // IOP Conference Series. Journal of Physics: Conference Series. 2017, vol. 944, p. 012128. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012128.
10. Зеньков Е.В., Цвик Л.Б. Уточнение уравнений предельного состояния материала конструкций с учетом реального вида их деформирования // Системы. Методы. Технологии. – 2017. – №2(34). – С. 28-34.
11. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных), ГосНИИВ. – М.: ВНИИЖТ, 1996.
12. ГОСТ 25.504-82. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости. – М.: ИП Издательство стандартов, 2004.
13. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иоселевич Г.Б. Расчёт на прочность деталей машин. – М.: Машиностроение, 1979. – 700 с.
14. Кузнецов А.М., Лившиц В.И., Татаринов В.Г. и др. Сосуды и трубопроводы высокого давления: Справочник. – Иркутск: Издание ГП «Иркутская областная типография № 1», 1999. – 600 с.

### References

1. Kogaev V.P., Makhutov N.A., Gusenkov A.P. Calculations of machine parts and structures for strength and durability. – М.: Mechanical Engineering, 1985. – 224 p.
2. Smirnov-Alyayev G.A. Mechanical foundations of plastic processing of metals. Engineering methods. – L.: Mechanical Engineering, 1968. – 272 p.
3. Tsvik LB, Pimshtein P.G, Borsuk E.G. Experimental studies of the stress-strain state of a multilayer cylinder with a monolithic bushing // Problems of strength. 1978, no. 4, pp. 74-77.
4. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. Handbook on resistance of materials. – Kiev: Delta, 2008. – 816 p.
5. Lebedev A.A., Kovalchuk B.I., Giginyak F.F., Lamashevsky V.P. Mechanical properties of structural materials in a complex stress state // Ed. by A.A. Lebedev. – Kiev: In Yure, 2003. – 540 p.
6. Tsvik L.B., Zenkov E.V. Determination of strength characteristics of materials of experimental prismatic specimens under the biaxial tension // Bulletin of Mechanical Engineering. 2015, no. 1, pp. 42-46.
7. Zenkov E.V., Tsvik L.B. Formation of divergent testing efforts and experimental evaluation of material strength under biaxial stretching // PNRPU Mechanics Bulletin. 2015, no. 4, pp. 110-120.
8. Zenkov E.V., Tsvik L.B. Accuracy improvement for combined static strength criterion for structures under complex loading // Materials Physics and Mechanics. 2018, vol. 40, pp. 124-132. DOI: 10.18720/МІІМ.4012018\_15.
9. Zenkov E.V. Update of the equations of the limit state of the structural material with the realization of their deformation // IOP Conference Series. Journal of Physics: Conference Series. 2017, vol. 944, p. 012128. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012128.
10. Zenkov E.V., Tsvik LB Refinement of the equations of the limiting state of the structure material taking into account the real type of their deformation // Systems. Methods. Technology. 2017, no. 2(34), pp. 28-34.
11. Standards for the calculation and design of wagons of 1520 mm gauge railways of the Ministry of Railways (non-self-propelled), GosNIIV. – М.: VNIIZhT, 1996.
12. GOST 25.504-82. Calculations and strength tests. Methods for calculating the characteristics of fatigue resistance. – М.: ИП Publ. house of standards, 2004.
13. Birger I.A., Shorr B.F., Ioselevich G.B. Calculation of the strength of machine parts. – М.: Mechanical Engineering, 1979. – 700 p.
14. Kuznetsov A.M., Livshits V.I., Tatarinov V.G. et al. Vessels and high-pressure pipelines: Handbook. – Irkutsk: Irkutsk Regional Printing House No.1, 1999. – 600 p.

### Сведения об авторах:

### Information about authors:

<p><b>Зеньков Евгений Вячеславович</b> – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механики и сопротивления материалов ИРНТУ, доцент кафедры управления качеством и инженерной графики ИрГУПС</p>	<p><b>Zenkov Evgeniy Vyacheslavovich</b> – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of mechanics and resistance of materials Department IRNRTU, associate professor of quality management and engineering graphics Department IRSTU</p>
<p>jovanny1@yandex.ru</p>	

Получена 29.11.2022