

АНАЛИЗ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ОБРАЗЦОВ ПЛАСТИНЧАТОГО ТИПА ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

Научная статья

Зеньков Е.В.^{1,*}

¹ORCID : 0000-0003-4414-0307;

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Российская Федерация

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (jovanny1[at]yandex.ru)

Аннотация

В статье представлен анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) лабораторных образцов пластинчатого типа для оценки конструкционной прочности материала. Дается описание конструкции указанного типа образца, математическая модель деформирования и результаты вычислительных экспериментов на основе использования метода конечных элементов с применением пре-постпроцессора Femap. Выявлено, что изменение геометрических параметров U-образных канавок образца позволяет воспроизводить в его рабочей зоне управляемый вид НДС (различное соотношение величин главных напряжений) в процессе их механических испытаний. Указанное обстоятельство позволяет на стадии лабораторных исследований использовать эти образцы для оценки прочности конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии при нагружении на типовых одноприводных испытательных машинах.

Ключевые слова: конструкционная прочность, численное моделирование, вид напряженно-деформированного состояния, лабораторный образец, метод конечных элементов.

AN ANALYSIS OF DEFORMATION OF LABORATORY PLATE-TYPE SAMPLES UNDER A COMPLEX STRESS STATE

Research article

Zenkov E.^{1,*}

¹ORCID : 0000-0003-4414-0307;

¹Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation

* Corresponding author (jovanny1[at]yandex.ru)

Abstract

The article presents an analysis of the stress-strain state of laboratory plate-type samples to evaluate the structural strength of the material. A description of the design of the specified sample type, a mathematical model of deformation and the results of computational experiments based on the use of the finite element method using the Femap pre-processor are given. It was revealed that change of geometrical parameters of U-shaped grooves of the sample makes it possible to reproduce controlled type of the mode of deformation in its working area (different correlation of principal stresses values) in the course of their mechanical tests. The specified circumstance makes it possible to use these specimens at the stage of laboratory researches to evaluate strength of structural materials under complex stressed state during loading on typical single-drive testing machines.

Keywords: constructional strength, numerical simulation, stress-strain state type, laboratory sample, finite element method.

Введение

Высоконагруженные детали машин и элементы конструкций в процессе их эксплуатации подвергаются комплексу статических или циклических нагрузок, создающих объёмное напряженно-деформированное состояние (НДС), характеризуемое 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 [1]. Анализ работ [2], [3] показывает: при стандартных напряженных состояниях – при растяжении, сжатии и сдвиге, в сравнении с двухосным напряженным состоянием, характеризуемом некоторым соотношением базовых напряженных состояний, прочность материала различаются, что приводит к необходимости применения объединённых критериев прочности, включающих в свои описываемые уравнения слагаемые, учитывающие различные механизмы разрушения материала [1], [4], [7], [9].

В качестве теоретической основы для оценки прочности материала используются объединённые критерии прочности, структура которых описывается так называемыми уравнениями предельного состояния, к которым можно отнести известные уравнения Писаренко-Лебедева, Ягна-Бужинского, Друккера-Прагера и др. [1]. В работах [8], [9], [10] предложена методика, позволяющая вычислять характеристики прочности в процессе разрушения специальных образцов материала в лабораторных условиях. Указанные образцы способны воспроизводить в своей рабочей зоне вид напряженного состояния, соответствующий виду напряженного состояния опасной зоны исследуемой конструкции. Существенно, что механические испытания до разрушения специальных образцов производится на стандартной испытательной машине [11], [12].

В предложенной работе в качестве критерия подобия напряжённого состояния, возникающего в деформируемых объектах и в соответствующих им образцах для испытаний, используется коэффициент Π – параметр напряженного состояния, равный 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; σ_i – эквивалентное напряжение, определяемое формулой

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

Проблемой, возникающей при выполнении оценки конструкционной прочности на основе объединенных критериев прочности, является сложность создания в лабораторных образцах для механических испытаний вида НДС, характеризуемого различным соотношением инвариантов НДС в соответствии с неравенствами

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

Стоит отметить, что наиболее опасное с точки зрения зарождения и развития дефектов является соотношение инвариантов НДС, соответствующее положительным значениям (растягивающим) компонент главных напряжений, для которого $\Pi = 2$.

В настоящее время для оценки прочности материала в условиях сложного НДС существуют множество конфигураций образцов, имеющие различной формы выемки, канавки или вырезы [12], [13]. Однако использование таких и других образцов не обеспечивает необходимой точности оценки конструкционной прочности материала, так как изменение коэффициента Π в диапазоне (3) значительно ограничено. Кроме того, сложность их формы (наличие системы выемок и выступов) и схема базирования повышает требования к точности изготовления и качеству поверхностей.

Описание лабораторного образца пластинчатого типа

Возможность повышения точности и достоверности моделирования конструкционной прочности материала открывается с помощью современных технологий моделирования и конструирования на основе метода конечных элементов. Предложена конфигурация образца, способного воспроизводить в своей рабочей зоне изменение коэффициента Π в диапазоне (3). Конструкция образца представлена на рис. 1 и имеет форму круглой пластины с концентраторами напряжений в виде диаметрально расположенных U- или V-образных канавок (далее – пластинчатый образец). В процессе испытаний пластинчатого образца он опирается по своей 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, соответствующее одному из неравенств (3).

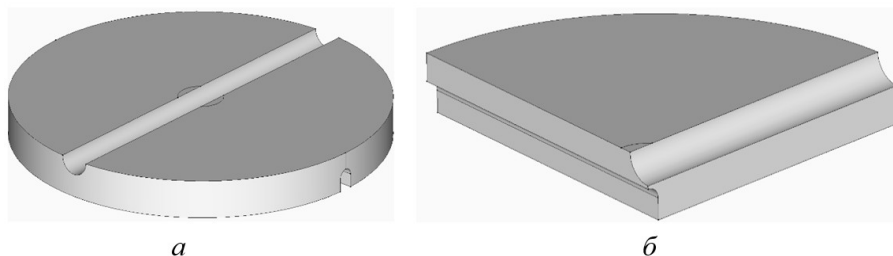


Рисунок 1 - Конструкция пластинчатого образца:
а – общий вид; б – четверть образца, высеченная из него двумя плоскостями симметрии

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.103.1>

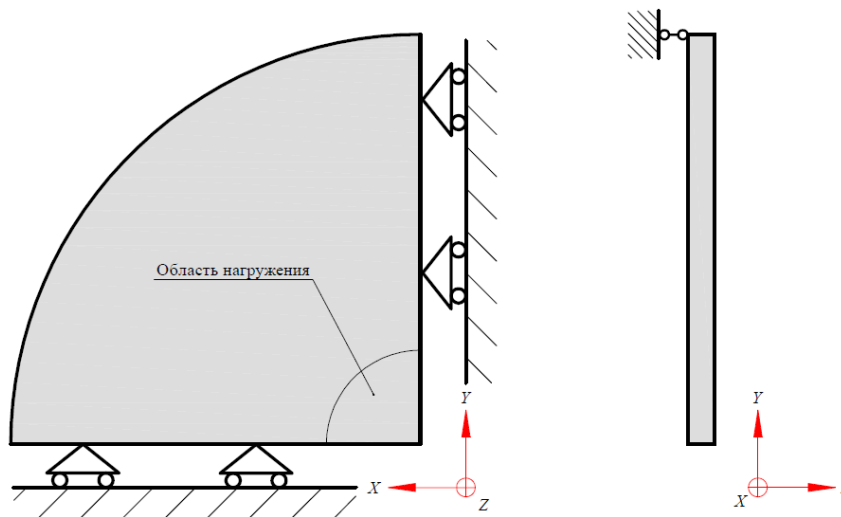


Рисунок 2 - Условия закрепления и нагружения пластинчатого образца
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.103.2>

В процессе механических испытаний образец опирается по своему наружному круговому контуру (на рис. 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 рис. 2).

Численная модель упругого деформирования и результаты вычислительных экспериментов

При проведении вычислительных экспериментов по выявлению зависимостей изменения вида НДС образцов от геометрических параметров образцов использовалась математическая модель объемного упругого деформирования. В случае однородного изотропного материала эта модель определяется дифференциальными уравнениями равновесия теории упругости u

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

где L – дифференциальный оператор теории упругости;

u – искомый вектор перемещений в точках области D , занимаемой деформируемыми элементами конструкции;

λ, μ – 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

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

где $S_\sigma, S_{u\sigma}$ – поверхности рассматриваемых образцов, на которых заданы поверхностные перемещения, поверхностные силы и смешанные (контактные) краевые условия соответственно;

T – тензор напряжений;

$F(M)$ – вектор поверхностных сил, заданный на поверхности S_σ ;

v, τ – единичные вектора, определяющие нормальное и касательное направления к поверхности S в точке M .

Моделирование НДС конструктивных вариантов пластинчатых образцов проводилось 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 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). Указанная дискретизация позволила обеспечить относительную погрешность сходимости получаемых расчетных характеристик НДС не более 5%. Общее количество КЭ в используемых расчетных моделях в среднем не превысило 110 тыс.

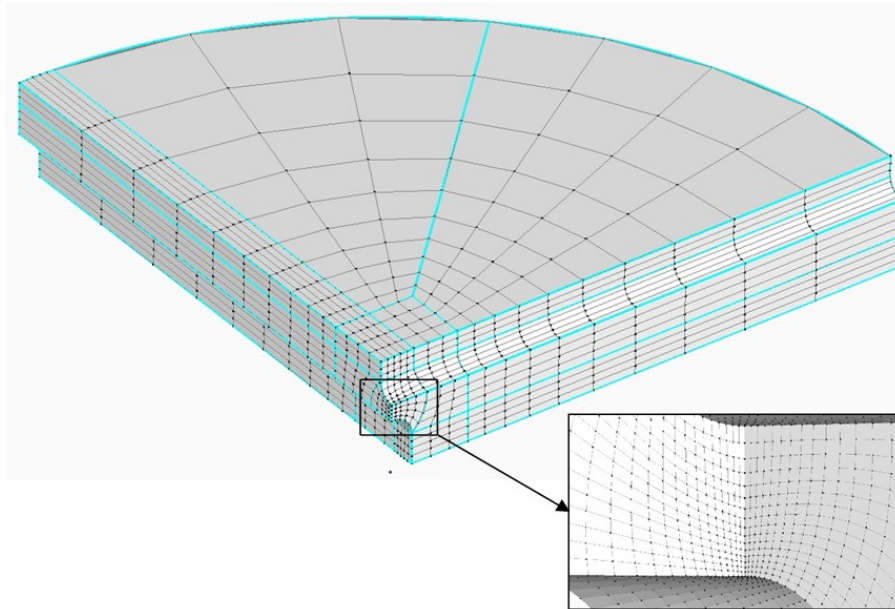


Рисунок 3 - Дискретная модель четверти пластинчатого образца
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.103.3>

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 единичного давления, распределённого в пределах окружности диаметром, равным четверти диаметра верхней поверхности образца. 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/м³.

При численном моделировании НДС рассматривались варианты пластинчатых образцов, способные воспроизводить значения величин K_σ и Π , характерных для реальных конструкций [13], [14]. В качестве величины K_σ , выступал коэффициент концентрации эквивалентных напряжений, вычисляемый по формуле (6)

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

В формуле (6) σ_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 наружный диаметр принимался неизменным и равным $D = 200$ мм, толщина – $H = 20$ мм.

В вычислительных экспериментах рассматривались следующие диапазоны изменения варьируемых значений геометрических параметров (рис. 4)

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

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

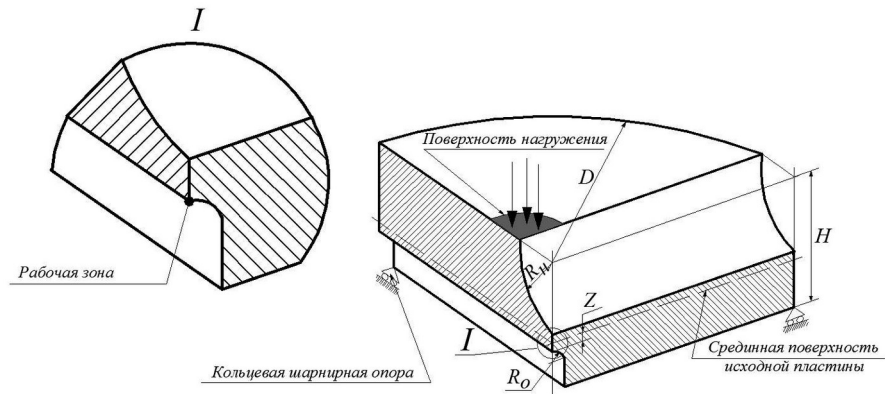


Рисунок 4 - Геометрические параметры пластинчатого образца-прототипа:
 I – рабочая зона образца
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.103.4>

На рис. 5 представлен один из результатов численного моделирования упругого НДС образцов пластинчатого типа в виде распределения интенсивности напряжений σ_1 .

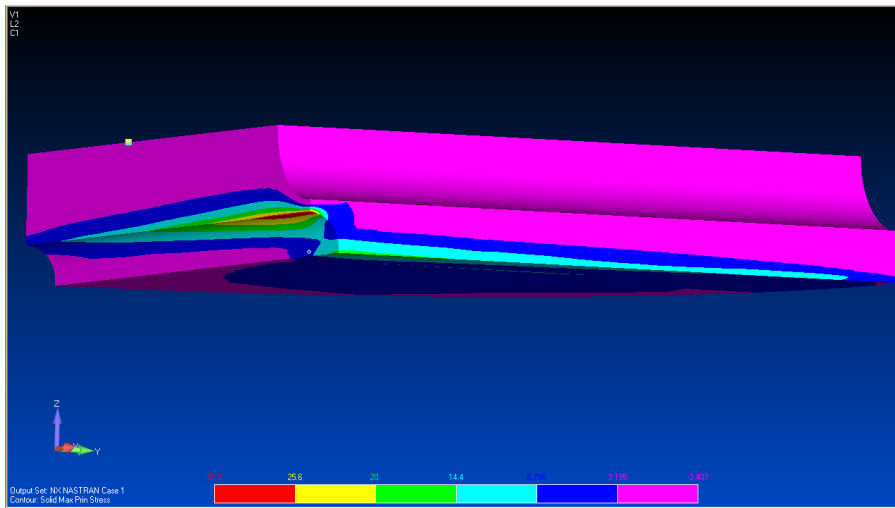


Рисунок 5 - Распределение интенсивности напряжений σ_1 в пластинчатом образце
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.103.5>

На рис. 6 и рис. 7 приведены диаграммы вариантов исследований расчетных характеристик НДС пластинчатых образцов при их упругом объемном деформировании методом конечных элементов.

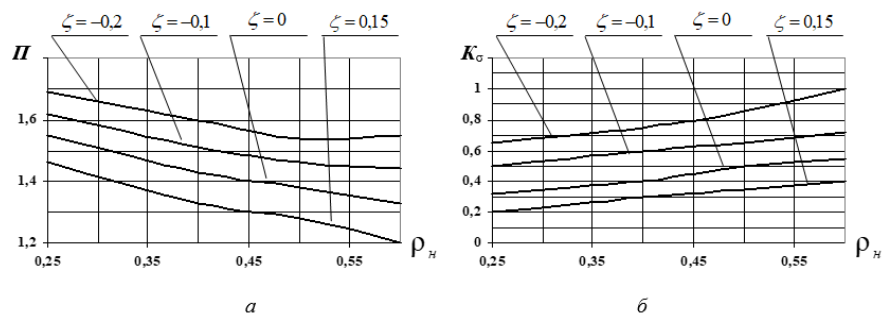


Рисунок 6 - Распределение коэффициентов Π (а) и K_σ (б) от основных геометрических параметров образцов-прототипов при $\rho_0=0,15$
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.103.6>

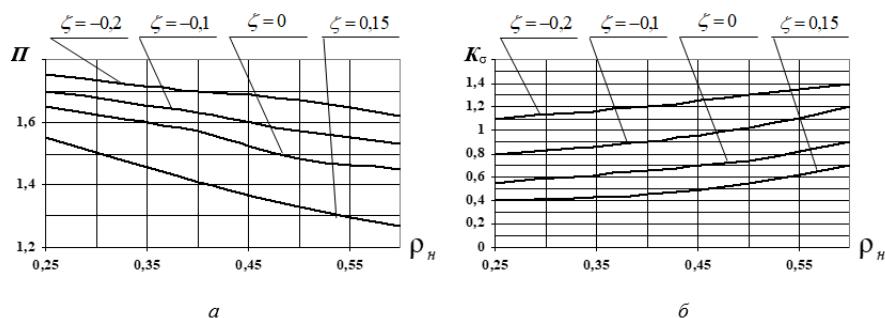


Рисунок 7 - Распределение коэффициентов Π (а) и K_{σ} (б) от основных геометрических параметров образцов-прототипов при $\rho_0=0,25$
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.103.7>

На рис. 6, а и рис. 6, б приведены расчетные распределения значений Π и K_{σ} в рабочей зоне пластинчатых образцов-прототипов при фиксированных значениях относительного радиуса канавки на стороне опирания $\rho_0 = \rho_0^{\min} = 0,15$, на рис. 7, а и рис. 7, б – при $\rho_0 = \rho_0^{\max} = 0,25$. Как следует из результатов вычислительных экспериментов, величина Π изменяется в пределах от 1,2 до 1,75 (рис. 6 и рис. 7). Установлено, что концентрация напряжений K_{σ} имеет достаточно низкое значение (изменяется в пределах $0,2 < K_{\sigma} < 1,4$). Выявленный диапазон изменения геометрических параметров пластинчатых образцов не приводит к необходимому изменению величины Π во всём диапазоне, описываемом неравенствами (3).

Заключение

Полученные результаты в совокупности позволяют выявить такие конфигурации пластинчатых образцов, для которых характеристики НДС (параметры Π и K_{σ}) 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.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Когаев В.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность / В.П. Когаев, Н.А. Махутов и др. — М.: Машиностроение, 1985. — 224 с.
2. Смирнов-Аляев Г.А. Механические основы пластической обработки металлов. Инженерные методы / Г.А. Смирнов-Аляев. — Л.: Машиностроение, 1968. — 272 с.
3. Цвик Л.Б. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния многослойного цилиндра с монолитным вводом / Л.Б. Цвик, П.Г. Пимштейн и др. // Проблемы прочности. — 1978. — 4. — с. 74-77.
4. Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев и др. — К.: Дельта, 2008. — 816 с.
5. Лебедев А.А. Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии / А.А. Лебедев, Б.И. Ковальчук и др. — Киев: Дом ИнЮре, 2003. — 540 с.
6. Цвик Л.Б. Определение прочностных характеристик материалов экспериментальных призматических образцов при двухосном растяжении / Л.Б. Цвик, Е.В. Зеньков // Вестник машиностроения. — 2015. — 1. — с. 42-46.
7. Zenkov E.V. Formation of divergent testing efforts and experimental evaluation of material strength under biaxial stretching / E.V. Zenkov, L.B. Tsvik // PNRPU Mechanics Bulletin. — 2015. — 4. — p. 110-120.
8. Zenkov E.V. Accuracy improvement for combined static strength criterion for structures under complex loading / E.V. Zenkov, L.B. Tsvik // Materials Physics and Mechanics. — 2018. — 40. — p. 124-132. — DOI: 10.18720/МПМ.4012018_15.
9. Zenkov E.V. Update of the equations of the limit state of the structural material with the realization of their deformation / E.V. Zenkov // Journal of Physics: Conference Series. — 2017. — Vol. 944. — p. 012128. — DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012128.
10. Зеньков Е.В. Уточнение уравнений предельного состояния материала конструкций с учетом реального вида их деформирования / Е.В. Зеньков, Л.Б. Цвик // 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. — 158 с.

12. ГОСТ 25.504-82. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости. — М.: Стандартинформ, — 2004. — 58 с.
13. Биргер И.А. Расчёт на прочность деталей машин / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр и др. — М.: Машиностроение, 1979. — 700 с.
14. Кузнецов А.М. Сосуды и трубопроводы высокого давления / А.М. Кузнецов, В.И. Лившиц и др. — Иркутск: Иркутская областная типография № 1, 1999. — 600 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Kogaev V.P. Raschety detaley mashin i konstruktsiy na prochnost' i dolgovechnost' [Calculations of machine parts and structures for strength and durability] / V.P. Kogaev, N.A. Makhutov and et al. — М.: Mashinostroenie, 1985. — 224 p. [in Russian]
2. Smirnov-Alyayev G.A. Mekhanicheskiye osnovy plasticheskoy obrabotki metallov. Inzhenernyye metody [Mechanical bases of plastic processing of metals. Engineering methods] / G.A. Smirnov-Alyayev. — L.: Mashinostroenie, 1968. — 272 p. [in Russian]
3. Tsvik L.B. Eksperimental'nyye issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya mnogosloynnogo tsilindra s monolitnym vvodom [Experimental studies of the stress-strain state of a multilayer cylinder with a monolithic input] / L.B. Tsvik, P.G. Pimshtein et al. // Problemy prochnosti [Problems of strength]. — 1978. — 4. — p. 74-77. [in Russian]
4. Pisarenko G.S. Spravochnik po soprotivleniyu materialov [Handbook on the strength of materials] / G.S. Pisarenko, A.P. Yakovlev et al. — K.: Delta, 2008. — 816 p. [in Russian]
5. Lebedev A.A. Mekhanicheskiye svoystva konstruktsionnykh materialov pri slozhnom napryazhennom sostoyanii [Mechanical properties of structural materials under complex stress state] / A.A. Lebedev, B.I. Kovalchuk et al. — Kyiv: Dom InYure, 2003. — 540 p. [in Russian]
6. Tsvik L.B. Opredeleniye prochnostnykh kharakteristik materialov eksperimental'nykh prizmaticheskikh obraztsov pri dvukhosnom rastyazhenii [Determination of the strength characteristics of materials of experimental prismatic samples under biaxial tension] / L.B. Tsvik, E.V. Zenkov // Vestnik mashinostroeniya [Bulletin of mechanical engineering]. — 2015. — 1. — p. 42-46. [in Russian]
7. Zenkov E.V. Formation of divergent testing efforts and experimental evaluation of material strength under biaxial stretching / E.V. Zenkov, L.B. Tsvik // PNRPU Mechanics Bulletin. — 2015. — 4. — p. 110-120.
8. Zenkov E.V. Accuracy improvement for combined static strength criterion for structures under complex loading / E.V. Zenkov, L.B. Tsvik // Materials Physics and Mechanics. — 2018. — 40. — p. 124-132. — DOI: 10.18720/МПМ.4012018_15.
9. Zenkov E.V. Update of the equations of the limit state of the structural material with the realization of their deformation / E.V. Zenkov // Journal of Physics: Conference Series. — 2017. — Vol. 944. — p. 012128. — DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012128.
10. Zenkov E.V. Utochneniye uravneniy predel'nogo sostoyaniya materiala konstruktsiy s uchetom real'nogo vida ikh deformirovaniya [Refinement of the equations of the limiting state of the material of structures, taking into account the real form of their deformation] / E.V. Zenkov, L.B. Tsvik // Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technology]. — 2017. — 2(34). — p. 28-34. [in Russian]
11. Normy dlya rascheta i proyektirovaniya vagonov zheleznnykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh), GosNIIV [Norms for the calculation and design of railway carriages of the Ministry of Railways of 1520 mm gauge (non-self-propelled), GosNIIV]. — М.: VNIIZhT, 1996. — 158 p. [in Russian]
12. GOST 25.504-82. Raschety i ispytaniya na prochnost'. Metody rascheta kharakteristik soprotivleniya ustalosti [Calculations and strength tests. Methods for calculating the characteristics of fatigue resistance]. — М.: Standartinform, — 2004. — 58 p. [in Russian]
13. Birger I.A. Raschot na prochnost' detaley mashin [Calculation for the strength of machine parts] / I.A. Birger, B.F. Schorr et al. — М.: Mashinostroenie, 1979. — 700 p. [in Russian]
14. Kuznetsov A.M. Sosudy i truboprovody vysokogo davleniya: Spravochnik [Vessels and pipelines of high pressure: a Handbook] / A.M. Kuznetsov, V.I. Livshits et al. — Irkutsk: Irkutsk Regional Printing House No. 1, 1999. — 600 p. [in Russian]