

Уточнение уравнений предельного состояния материала конструкций с учетом реального вида их деформирования

Е.В. Зеньков^{1 a}, Л.Б. Цвик^{2 b}

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова 83, Иркутск, Россия

²Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского 15, Иркутск, Россия

^ajovanny1@yandex.ru, ^btsvik_1@mail.ru

Статья поступила 24.04.2017, принята 30.04.2017

Рассматривается необходимость учета вида напряженно-деформированного состояния (НДС) в возможном очаге разрушения деталей машин и механизмов при оценке их конструкционной прочности. Приводятся два способа учета вида НДС — на основании так называемых объединенных критериев прочности и анализа результатов лабораторных испытаний специальных образцов, имеющих в очаге их разрушения тот же вид НДС, что и в очаге возможного разрушения рассматриваемого элемента конструкции. Обоснована ограниченность использования этих способов на примере рассмотрения физически непротиворечивого объединенного критерия Писаренко–Лебедева. Предлагается уточненная расчетно-экспериментальная методика расчета, сочетающая в себе элементы этих двух способов и заключающаяся в определении прочностных параметров материала конструкции, входящих в уравнение критерия Писаренко–Лебедева с учетом реального вида НДС наиболее нагруженной области конструкции. Реализация методики осуществляется на основе подбора соответствующих экспериментальных лабораторных образцов, где вид НДС в рабочей зоне совпадает с видом НДС конструкции, прочность которой оценивается. Приведен алгоритм действий по определению прочностных параметров, входящих в уравнение предельного состояния материала конструкции. Процесс уточнения уравнения предельного состояния продемонстрирован при определении прочностных параметров стали 50ХФА, находящейся в состоянии двухосного растяжения, характерного для наружной поверхности в зоне стыка патрубка с корпусом штуцерного узла сосуда давления. Расчетно-экспериментальным путем установлено, что для данной стали предельное значение механических напряжений почти на четверть снижается по сравнению с величиной ее традиционного предела прочности.

Ключевые слова: уравнение предельного состояния; призматический образец; одноприводная машина; метод конечных элементов; прочностные параметры; двухосное растяжение; конструкционная прочность; моделирование; критерий прочности; напряженно-деформированное состояние.

Update of the equations of the limit state of the structural materials with the realization of their deformation

E.V. Zenkov^{1 a}, L.B. Tsvik^{2 b}

¹Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia

²Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia

^ajovanny1@yandex.ru, ^btsvik_1@mail.ru

Received 24.04.2017, accepted 30.04.2017

The need to take into account the type of stress-strain state (SSS) in a possible center of destruction of machine parts and mechanisms in evaluating their structural strength is considered. There are two ways to account for the type of SSS - based on the so-called combined strength criteria and analysis of the results of laboratory tests of special samples that have the same type of SSS in the focus of their destruction as in the area of possible destruction of the structural element under consideration. The limitations of the use of these methods on the example of considering the physically consistent Pisarenko-Lebedev joint test are justified. A refined calculation and experimental calculation technique, which combines the elements of these two methods, is proposed. It determines the strength parameters of the construction material that enter into the equation of the Pisarenko-Lebedev test, taking into account the real type of SSS of the most loaded area of the design. Implementation of the methodology is based on the selection of appropriate experimental laboratory samples, where the type of SSS in the working area is the same as the type of construction of SSS, the strength of which is estimated. An algorithm for determining the strength parameters entering into the equation of the limiting state of the structural material is given. The process of refinement of the limit state equation is demonstrated when determining the strength parameters of 50HFA steel in the state of biaxial stretching, which is characteristic of the outside surface in the joint area of the branch pipe with the body of the pressure vessel junction. It has been calculated by experimental means that for a given type of steel the limiting value of mechanical stresses is reduced by almost a quarter compared with the value of its traditional strength limit.

Keywords: limit state equation; prismatic sample; single-drive machine; finite element method; strength parameters; biaxial stretching; structural strength; modeling; strength criterion; stress-strain state.

Введение

Оценка конструкционной прочности деталей машин и механизмов должна в ряде случаев осуществляться с учетом вида напряженно-деформированного состояния (НДС) в возможном очаге их разрушения [1–5]. Такой учет важен, например, при оценке статической прочности штуцерных узлов сосудов давления, элементов железнодорожных вагонов — боковой рамы, цельнокатаного колеса, при анализе прочности различных деталей в виде пластин и оболочек, изгибаемых в двух различных направлениях, при действии температурных перепадов и в других случаях. Ряд методик расчета на прочность [6–10] опирается при этом на результаты лабораторных испытаний образцов, имеющих в очаге их разрушения тот же вид НДС, что и в рассматриваемой детали. Для этого обычно используется испытательное оборудование с несколькими силовыми приводами, создающими разнонаправленные воздействия на испытываемый образец.

Учет вида НДС может осуществляться двумя способами. Первый из них представлен так называемыми объединенными критериями прочности (далее — уравнениями предельного состояния) типа Писаренко–Лебедева, Ягна–Бужинского, Друккера–Прагера и др. [3] и основан на предварительном определении прочностных характеристик материала рассматриваемой конструкции, определяемых путем квазистатического разрушения лабораторных образцов в условиях типовых видов нагружения этого материала — одноосного растяжения, сжатия и среза (соответственно определение значений σ_v , $\sigma_{сж}$ и $\tau_{ср}$). Указанные условия являются объединенным критерием прочности, так как содержат два слагаемых с различными весовыми множителями, которые соответствуют разрушению срезом (первое слагаемое) и отрывом. С указанных позиций фактором, ограничивающим точность такого способа, является различие реального вида НДС конструкции и вида НДС образцов, испытываемых до разрушения при определении величин σ_v , $\sigma_{сж}$ и $\tau_{ср}$. Кроме того, необходимость предварительного определения указанных величин и соответствующее разнообразие лабораторной испытательной техники усложняет реализацию этого способа, но не исключает его.

Второй способ учета вида НДС опирается на результаты лабораторных испытаний специальных образцов, имеющих в очаге их разрушения тот же вид НДС, что и в очаге возможного разрушения рассматриваемого элемента конструкции. При реализации второго способа используется специальная испытательная техника с несколькими силовыми приводами, создающая разнонаправленные воздействия на испытываемый образец, что также затрудняет привычное использование этого способа и сдерживает его применение.

В данной работе рассматривается уточненная расчетно-экспериментальная методика расчета, сочетающая в себе элементы этих двух способов и позволяющая с помощью типовых одноприводных испытательных машин учесть реальный вид НДС элемента конструкции в очаге разрушения. При этом уточнение расче-

та достигается за счет использования экспериментальных данных о разрушении лабораторного образца, напряженное состояние которого в момент разрушения моделирует в рабочей зоне напряженное состояние реальной конструкции.

Постановка задачи и методика решения проблематики. Для определенности рассмотрим уравнение предельного состояния типа Писаренко–Лебедева [1; 3], используемое при оценке статической прочности конструкций, изготовленных из изотропных материалов. Соответствующее условие, при котором наступает квазистатическое разрушение материала, сопровождаемое появлением трещин, имеет вид:

$$\alpha \sigma_i^{nped} + (1 - \alpha) \sigma_1^{nped} A^{1-P} = \sigma_v, \quad (1)$$

где σ_i — интенсивность напряжений в возможном очаге разрушения;

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

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — главные напряжения, возникающие в этом очаге; P — коэффициент Смирнова–Аляева [4; 5], характеризующий вид НДС в рассматриваемой точке, определяемый равенством:

$$P = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}, \quad (3)$$

(в случае двухосного растяжения величина P достигает значения $P = 2$, в случае простого одноосного растяжения $P = 1$, простого одноосного сжатия $P = -1$); α и A — эмпирические константы, характеризующие прочность материала, не зависящие от вида и уровня НДС материала детали в очаге ее разрушения (далее — прочностные параметры материала) и вычисляемые по формулам:

$$\alpha = \frac{\sigma_v}{\sigma_{сж}}, \quad A = \frac{\varphi - \sqrt{3}\alpha}{1 - \alpha}, \quad \varphi = \frac{\sigma_v}{\tau_{ср}}. \quad (4)$$

Как уже отмечалось ранее, точность рассматриваемого уравнения предельного состояния (1) в ряде случаев недостаточна для инженерной практики вследствие различия реального вида НДС в возможном очаге разрушения конструкции и вида НДС образцов, испытываемых до разрушения при определении величин $\sigma_v, \sigma_{сж}, \tau_{ср}$ и входящих в уравнение (1) посредством констант α и A , не зависящих от коэффициента P и уровня НДС материала детали в очаге ее разрушения. В работах [11; 12] значение величины P , определяемой равенством (3), существенно влияет на расположение очага разрушения: с увеличением P (по Смирнову–Аляеву — с увеличением «жесткости» вида НДС) предельные значения интенсивности напряжений и первого главного напряжения снижаются.

Для уточнения уравнения предельного состояния материала конструкции и, соответственно, повышения достоверности ее прочностного расчета предложен расчетно-экспериментальный подход, заключающийся

в определении прочностных параметров материала исследуемой конструкции, входящих в уравнение (1), с учетом реального вида НДС наиболее нагруженной

области конструкции. Общая схема предлагаемого подхода представлена на рис. 1.

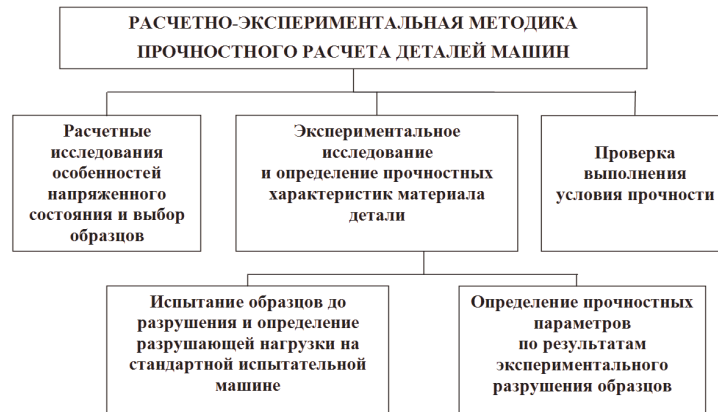


Рис. 1. Схема уточненного прочностного расчета на основе уравнения предельного состояния материала конструкции с учетом реального вида ее НДС

Суть предлагаемого подхода состоит в следующем. Из уравнения (1) видно, что α и A могут рассматриваться как коэффициенты эмпирической формулы, характеризующие конструкционную прочность материала рассматриваемой конструкции с определенными расчетными значениями величин $\sigma_1^{пред}$, $\sigma_i^{пред}$ и $\Pi^{пред}$. Т.е. параметры α и A могут быть вычислены непосредственно из уравнения (1), зная остальные его параметры — $\sigma_1^{пред}$, $\sigma_i^{пред}$ и $\Pi^{пред}$. Из этого вытекает, что α и A , вычисляемые из (4), не обладают в этом случае традиционным физическим смыслом, заложенным изначально в критерий Писаренко–Лебедева, а являются параметрами постоянными или мало зависящими от вида НДС материала, из которого изготовлена конструкция. С учетом сказанного прочностные параметры α и A могут быть видоизменены, что позволяет рассматривать их как коэффициенты эмпирической формулы, определяемые по результатам испытаний до разрушения образцов, моделирующих НДС оцениваемой конструкции в ее интересующей области. Параметры α и A могут определяться более сложным образом и, по крайней мере, слабо зависеть от величины коэффициента Π , определяемой равенством (3).

В работе, как и в уравнении Писаренко–Лебедева, сохраняется предположение о независимости параметров α и A , входящих в уравнение (1), от величин интенсивности σ_i и первого главного напряжения σ_1 в возможном очаге разрушения, но не исключается зависимость этих параметров от величины Π . Уравнение (1) при таком подходе является аппроксимацией истинного уравнения предельного состояния, построенного для конкретного (или относительно узкого диапазона изменения) значения коэффициента Π , характеризующего тот или иной вид НДС. Этот вид определяется конструктивными особенностями испытанных до разрушения образцов, а очаг их разрушения должен при этом характеризоваться значением Π , совпадающим (или близким по величине) со значением Π для области конструкции, рассчитываемой на прочность.

При реализации предлагаемого подхода после отыскания расчетного значения коэффициента Π для опре-

деления значений параметров α и A , входящих в уравнение (1), необходимо осуществить подбор соответствующих экспериментальных лабораторных образцов так, чтобы вид их НДС совпадал (или был близок) с видом НДС конструкции, прочность которой оценивается. В этом случае для определения двух параметров α и A достаточно испытания до разрушения двух лабораторных образцов, отличающихся друг от друга геометрическими размерами и расчетными характеристиками НДС в момент разрушения их материала. В соответствии с этим определение прочностных параметров α и A осуществляется на основании следующего алгоритма:

- подбор геометрических параметров двух различных конструктивных вариантов образцов специальной формы со значениями Π , близких к Π для области оцениваемой конструкции;
- испытание до разрушения конструктивных вариантов образцов;
- расчетное определение величин $\sigma_1^{пред}$, $\sigma_i^{пред}$ и $\Pi^{пред}$ — характеристик уровня и вида НДС, входящих в уравнение (1), в зоне разрушения выбранных образцов;
- определение величин α и A из разрешающей системы уравнений:

$$\alpha \sigma_i^{1 пред} + (1 - \alpha) \sigma_1^{1 пред} A^{1 - \Pi^{1 пред}} = \sigma_\sigma \quad (5)$$

$$\alpha \sigma_i^{2 пред} + (1 - \alpha) \sigma_1^{2 пред} A^{1 - \Pi^{2 пред}} = \sigma_\sigma,$$

где значения величин $\sigma_i^{1 пред}$, $\sigma_1^{1 пред}$, $\Pi^{1 пред}$ соответствуют экспериментально установленному моменту разрушения первого из подобранных образцов; $\sigma_i^{2 пред}$, $\sigma_1^{2 пред}$, $\Pi^{2 пред}$ — второго из разрушенных образцов.

Уточнение расчета достигается в предлагаемой методике за счет использования экспериментальных данных о разрушении лабораторных образцов, полученных в условиях НДС реальной конструкции. Обстоятельством, вызывающим затруднение при реализации подхода в уточнении уравнения предельного состояния материала конструкции, является необходимость иметь значения прочностных характеристик с учетом их за-

в зависимости от соотношения главных напряжений. Авторами работы предложен призматический образец для оценки прочности материала при сложном напряженном состоянии [9], который позволяет получать ин-

формацию о прочности материала в зависимости от требуемого коэффициента Π путем его нагружения на стандартной испытательной машине (рис. 2).

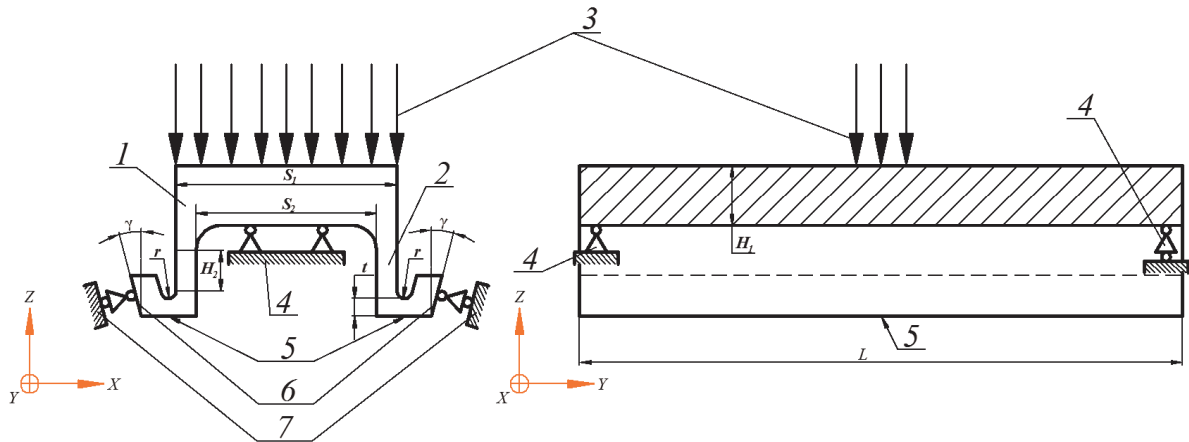


Рис. 2. Геометрические параметры и схема нагружения призматического образца: 1 — образец; 2 — боковые выступы образца; 3 — усилие, создаваемое толкателем испытательной машины; 4 — концевые опоры; 5 — рабочая зона; 6 — наклонные опорные поверхности образца; 7 — наклонные поверхности призматической опоры

Результаты расчетных и экспериментальных исследований. С целью реализации процесса уточнения уравнения предельного состояния материала конструкции с учетом особенностей ее деформирования было осуществлено определение прочностных параметров α и A для стали 50ХФА, находящейся в условиях двухосного растяжения ($1 < \Pi < 2$). Для исследований выбрано НДС, характеризуемое значением величины $\Pi = 1,85$. Указанное состояние соответствует виду НДС в момент разрушения штуцерного узла сосуда давления на его наружной поверхности, в зоне стыка патрубка с корпусом [11].

Предварительно было осуществлено испытание на растяжение стандартных круглых образцов из стали 50ХФА. Результаты показали, что выбранная сталь характеризуется значениями предела текучести $\sigma_T = 1\,050$ МПа, предела прочности $\sigma_B = 1\,300$ МПа и относительным удлинением $\delta = 7,5\%$ [14; 15; 19; 20].

По методике (см. рис. 1) для определения значений двух параметров α и A , входящих в уравнение (1), предварительно необходимо осуществить разрушение двух конструктивных вариантов образцов, отличающихся друг от друга размерами и соответствующими значениями величин $\sigma_i^{1\text{ пред}}, \sigma_1^{1\text{ пред}}$ и $\sigma_i^{2\text{ пред}}, \sigma_1^{2\text{ пред}}$ в

момент разрушения, но совпадающих (или близких) по значению с коэффициентом Π в своих рабочих зонах. В этом случае уравнения вида (1), соответствующие двум выбранным конструктивным вариантам, образуют систему двух нелинейных алгебраических уравнений относительно неизвестных величин α и A , которая может быть решена методом последовательных приближений. Возможность и порядок выбора необходимых образцов приведены, например, в работах [15; 19; 20]. В соответствии с алгоритмом были изготовлены две серии образцов, № 1 и 2, по три образца в каждой серии. Их размеры (табл. 1) подбирались так, чтобы в рабочей зоне образцов их НДС характеризовалось значением $\Pi = 1,85$ [19; 20].

Экспериментальное разрушение призматических образцов, геометрические размеры которых для серий № 1 и 2 приведены в табл. 1, осуществлялось на типовой одноприводной испытательной машине Instron 5989. Результаты показали, что для усилий F_1 и F_2 (рис. 2, поз. 3) в момент разрушения (по результатам усреднения экспериментальных данных) выполнялись равенства:

$$F_1 = 205 \text{ кН}; F_2 = 235 \text{ кН}. \quad (6)$$

Таблица 1

Основные размеры экспериментальных призматических образцов

$H, \text{ мм}$	$H_1, \text{ мм}$	$H_2, \text{ мм}$	$H_3, \text{ мм}$	$S, \text{ мм}$	$L, \text{ мм}$	№ 1, 2 $t, \text{ мм}$	$r, \text{ мм}$	$\gamma, \text{ град}$
33	12	11	21	44	220	4 6	2	15

Полученные значения усилий F_1 и F_2 были использованы как исходные величины для численного анализа НДС конструктивных вариантов образцов в момент их разрушения. При этом использовались заранее разработанные расчетные модели деформирования, подтвержденные вычислительными тестами и натурным

экспериментом. Численный анализ осуществлялся с помощью метода конечных элементов с учетом возможного возникновения в материале образца упруго-пластических деформаций. При этом в качестве математической модели процесса развития упруго-пластических деформаций использованы уравнения пластиче-

ского течения с изотропным упрочнением (уравнения Прандтля–Рейсса [17]). Таким образом, для первого из подобранных призматических образцов ($\Pi^1_{пред} = 1,9$) определялись расчетные величины $\sigma_i^{1 пред}$, $\sigma_1^{1 пред}$; для второго ($\Pi^2_{пред} = 1,8$) из разрушенных образцов — $\sigma_i^{2 пред}$, $\sigma_1^{2 пред}$. Результаты численного анализа призматических образцов серии № 1 ($\Pi^1_{пред} = 1,9$) в момент их разрушения (момент возникновения трещины) пока-

заны на рис. 3 а — распределение интенсивности напряжений, на рис. 3 б — распределение компоненты первого главного напряжения. Результаты численного анализа деформирования призматических образцов серии № 2 ($\Pi^2_{пред} = 1,8$) в момент их разрушения приведены на рис. 4 а — распределение интенсивности напряжений, на рис. 4 б — распределение компоненты первого главного напряжения.

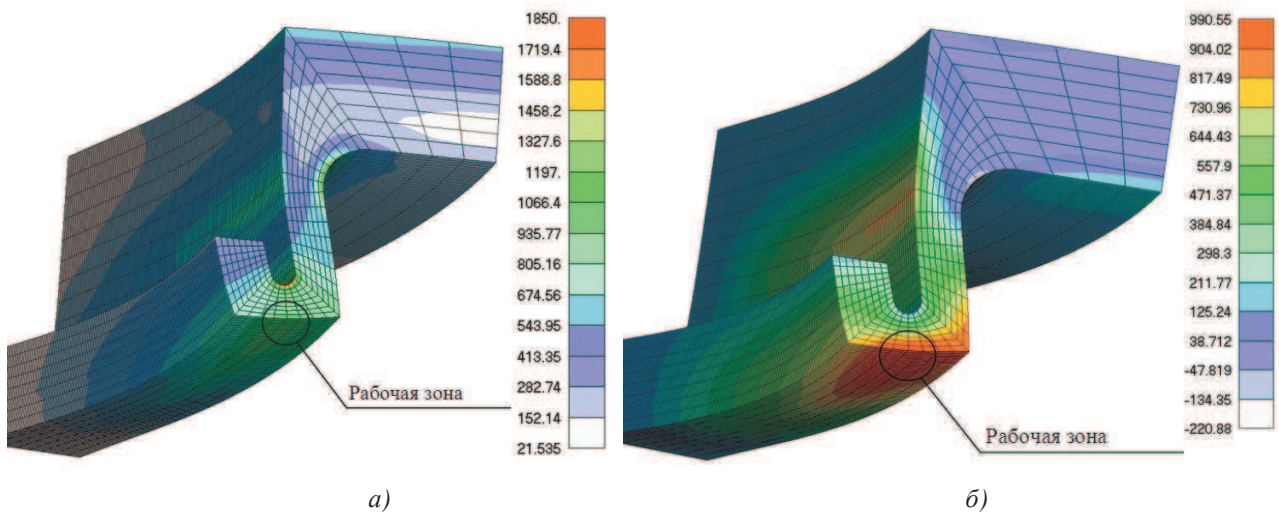


Рис. 3. Расчетное распределение напряжений в момент разрушения образцов серии № 1 (вид четверти образца, высеченной из него двумя плоскостями симметрии): а — интенсивности напряжений σ_i ; б — первого главного σ_1

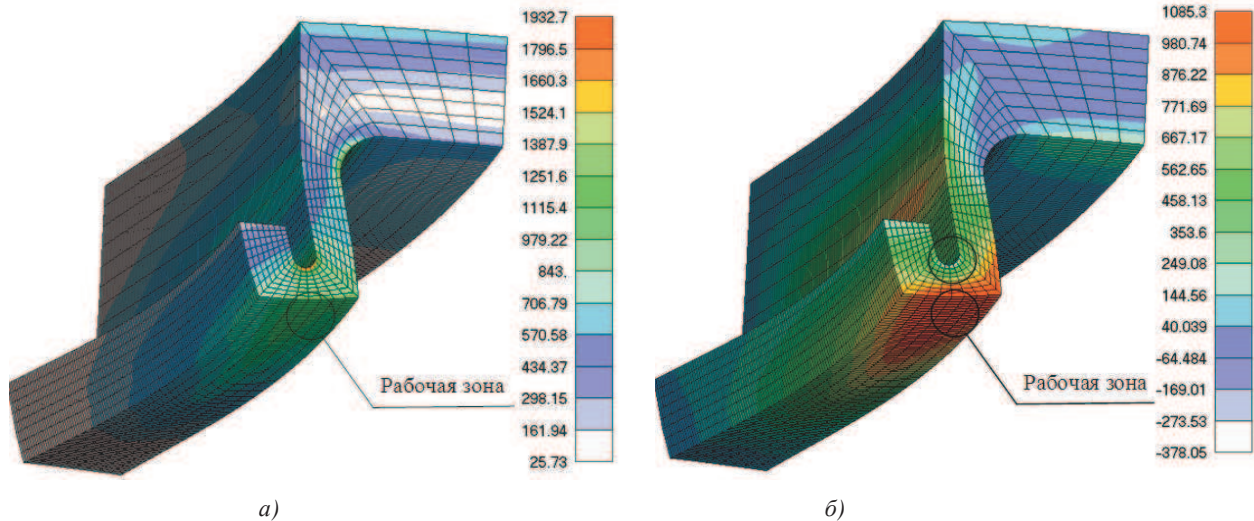


Рис. 4. Расчетное распределение напряжений в момент разрушения образцов серии № 2 (вид четверти образца, высеченной из него двумя плоскостями симметрии): а — интенсивности напряжений σ_i ; б — первого главного σ_1

В совокупности полученные расчетно-экспериментальные данные представлены в табл. 2. Полученные экспериментальные результаты показывают, что влияние двухосного растяжения в очаге разрушения конструкции может быть значительным — для испытанных образцов серии № 1 предельное значение интенсивности напряжений $\sigma_i^{1 пред}$, соответствующего моменту их разрушения, равно 895 МПа, что почти на четверть ниже значения предела прочности σ_σ исследуемой стали $\sigma_i^{пред} = \sigma_\sigma = 1\,270$ МПа, определенного в

условиях одноосного растяжения ($\Pi = 1$). Полученный результат качественно совпадает с результатом экспериментальных исследований Я.А. Вилимок, К.А. Назарова, А.К. Евдокимова [20], установивших аналогичный эффект существенного снижения (более чем на четверть) величины $\sigma_i^{пред}$ в условиях двухосного растяжения стали 12Х18Н10Т с коэффициентом вида НДС $\Pi \approx 2$, полученный на специальном испытательном оборудовании.

Таблица 2

Расчетные характеристики НДС образцов в момент их разрушения

Номер серии	Рабочая зона			
	σ_1 , МПа	σ_2 , МПа	σ_i , МПа	Π
1	985	743	892	1,9
2	1 050	615	917	1,8

Для определения прочностных параметров уравнения (1), подставив полученные из эксперимента (табл. 2) расчетные значения характеристик НДС в систему уравнений (5), получаем:

$$\begin{cases} \alpha 892 + (1 - \alpha) 985 A^{1-1,9} = 1270 \\ \alpha 917 + (1 - \alpha) 1050 A^{1-1,8} = 1270 \end{cases} \quad (7)$$

Решая систему уравнений (7) относительно величин α и A методом последовательных приближений, получаем следующие равенства:

$$\alpha = 0,73; \quad A = 0,40. \quad (8)$$

Эти значения позволяют использовать уравнения (1) для уточненного расчета на прочность элементов конструкций, изготовленных из стали 50ХФА и характеризующихся равенством $\Pi \approx 1,85$.

Выводы

Предложенный расчетно-экспериментальный подход уточнения уравнения предельного состояния материала конструкции, основанный на предварительной расчетной оценке вида НДС в возможном очаге разрушения конструкции и на последующем квазистатическом испытании до разрушения соответствующих призматических образцов, позволил определить численные значения прочностных параметров, входящих в уравнение предельного состояния типа Писаренко-Лебедева, характеризующихся значением $\Pi \approx 1,85$ и изготовленных из рассматриваемой стали.

Расчетно-экспериментальным путем установлено, что для стали 50ХФА, из которой были изготовлены опытные призматические образцы для лабораторных испытаний, предельное значение первого главного напряжения при двухосном растяжении ($\Pi \geq 1,8$) почти на четверть снижается по сравнению с величиной ее предела прочности, определенного в условиях одноосного растяжения ($\Pi = 1$).

Литература

1. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Дельта, 2008. 816 с.
2. Лебедев А.А., Ковальчук Б.И. Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии. Киев: Изд. дом «Ин Юре», 2003. 540 с.
3. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты де-

талей машин и конструкций на прочность и долговечность. М.: Машиностроение, 1985. 224 с.

4. Цвик Л.Б., Зеньков Е.В. Определение прочностных характеристик материалов экспериментальных призматических образцов при двухосном растяжении // Вестн. машиностроения. 2015. № 1. С. 42–46.

5. Есиев Т.С., Басиев К.Д., Стеклов О.И. Образец для испытания металла при двухосном напряженном состоянии: пат. 2073842 Рос. Федерация. № 925042491; заявл. 18.05.92; опубл. 20.02.97, Бюл. № 7.

6. Гагарин Ю.А., Пичков С.Н. Исследование поведения дефектов в полях растягивающих и сжимающих напряжений // Проблемы прочности и пластичности: межвуз. сб. ст. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2000. С. 11–116.

7. Вансович К.А., Ядров В.И. Экспериментальное изучение скорости роста поверхностных трещин в алюминиевом сплаве АК6 и в стали 20 при двухосном нагружении // Изв. Самар. науч. центра Рос. акад. наук. 2013. № 4. С. 436–438.

8. Гагарин Ю.А. О влиянии характера напряженного состояния на пластичность и разрушение конструкционных сталей // Проблемы прочности. 1978. № 6. С. 70–75.

9. Важенцев О.Г. Призматический образец для оценки механических свойств материала: а.с. 1793320 СССР. № 4904190/28; заявл. 22.01.91; опубл. 07.02.93, Бюл. № 5.

10. Цвик Л.Б. Укрепление отверстий и статическая прочность осесимметричных штуцерных узлов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1993. № 1. С. 58–65.

11. Зеньков Е.В., Цвик Л.Б., Запольский Д.В. Призматический образец для оценки прочности материала: пат. 2516599 Рос. Федерация. № 2012140619/28; заявл. 29.09.12; опубл. 27.03.14, Бюл. № 9.

12. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики. М.: Высш. школа, 1986. 416 с.

13. Галин Л.А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости. М.: Наука, 1980. 304 с.

14. Зеньков Е.В., Андреева А.А. Методика экспериментального исследования полей деформаций на основе использования цифровой оптической системы // Проблемы транспорта Восточной Сибири: сб. науч. тр. IV Всерос. науч.-практической конф. ИрГУПС. Иркутск, 2013. Ч. 1. С. 95–99.

15. Зеньков Е.В., Цвик Л.Б. Расчетно-экспериментальная оценка напряженно-деформированного состояния лабораторного образца с галтельным // Вестн. ИрГТУ. Иркутск, 2013. № 9. С. 70–78.

16. Sutton M.A., Orteu J.-J., H.Schreier H. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements // University of South Carolina, Columbia, SC, USA, 2009. 364 p.

17. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение, 1975. 398 с.

18. Lohr R.D., Ellison E.G., Biaxial high strain fatigue testing of Cr-Mo-V steel // Fatigue Eng. Mater, and Structure. 1980. № 1. P. 19-37.

19. Zenkov E.V., Tsvik L.B. Stress-Strain State of Prismatic Samples with Hollow Chamfers // Russian Engineering Research, 2013. Vol. 33, № 10. P. 562-565.

20. Zenkov E.V., Tsvik L.B. Formation of divergent testing efforts and experimental evaluation of material strength under biaxial stretching // PNRPU Mechanics Bulletin, 2015. № 4. P. 110-120.

References

1. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. Handbook on the resistance of materials. Kiev: Del'ta, 2008. 816 p.
2. Lebedev A.A., Koval'chuk B.I. Mechanical properties of structural materials in complex stress state. Kiev: Izd. dom «In Yure», 2003. 540 p.
3. Kogaev V.P., Makhutov N.A., Gusenkov A.P. Calculations of machine parts and structures for strength and durability. M.: Mashinostroenie, 1985. 224 p.
4. Tsvik L.B., Zen'kov E.V. Determination of strength characteristics of materials at two-axis tension of experimental prismatic specimens // Russian Engineering Research. 2015. № 1. P. 42-46.
5. Esiev T.S., Basiev K.D., Steklov O.I. A sample for testing a metal under a biaxial stress state: pat. 2073842 Ros. Federatsiya. № 925042491; zayavl. 18.05.92; opubl. 20.02.97, Byul. № 7.
6. Gagarin Yu.A., Pichkov S.N. Investigation of the behavior of defects in the fields of tensile and compressive stresses // Problemy prochnosti i plastichnosti: mezhd. sb. st. N. Novgorod: Izd-vo NNGU, 2000. P. 11-116.
7. Vansovich K.A., Yadrov V.I. Experimental Research the Growth Rate of Surface Cracks in AK6 Aluminium Alloy and in Steel 20 at Biaxial Loading // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2013. № 4. P. 436-438.
8. Gagarin Yu.A. Effect of the nature of the stressed state on ductility and failure in structural steels // Strength of Materials. 1978. № 6. P. 70-75.
9. Vazhentsev O.G. Prismatic sample for evaluation of mechanical properties of the material: a.s. 1793320 SSSR. № 4904190/28; zayavl. 22.01.91; opubl. 07.02.93, Byul. № 5.
10. Tsvik L.B. Strengthening holes and axisymmetric static strength choke assemblies // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 1993. № 1. P. 58-65.
11. Zen'kov E.V., Tsvik L.B., Zapol'skii D.V. Prismatic sample for evaluation of material strength: pat. 2516599 Ros. Federatsiya. № 2012140619/28; zayavl. 29.09.12; opubl. 27.03.14, Byul. № 9.
12. Targ S.M. Short course of theoretical mechanics. M.: Vyssh. shkola, 1986. 416 p.
13. Galin L.A. Contact problems of the theory of elasticity and viscoelasticity. M.: Nauka, 1980. 304 p.
14. Zen'kov E.V., Andreeva A.A. Methods of experimental study of deformation fields through the use of digital optical system // Problemy transporta Vostochnoi Sibiri: sb. nauch. tr. IV Vseros. nauch.-prakticheskoi konf. IrGUPS. Irkutsk, 2013. Ch. 1. P. 95-99.
15. Zen'kov E.V., Tsvik L.B. Experiment-Calculated Evaluation of Stress-Strain State of Laboratory Specimen with Radius Chamfer // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2013. № 9. P. 70-78.
16. Sutton M.A., Ortu J.-J., H.Schreier N. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements // University of South Carolina, Columbia, SC, USA, 2009. 364 p.
17. Malinin N.N. Applied theory of plasticity and creep Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti. M.: Mashinostroenie, 1975. 398 p.
18. Lohr R.D., Ellison E.G., Biaxial high strain fatigue testing of Cr-Mo-V steel // Fatigue Eng. Mater. and Structure. 1980. № 1. P. 19-37.
19. Zenkov E.V., Tsvik L.B. Stress-Strain State of Prismatic Samples with Hollow Chamfers // Russian Engineering Research, 2013. Vol. 33, № 10. P. 562-565.
20. Zenkov E.V., Tsvik L.B. Formation of divergent testing efforts and experimental evaluation of material strength under biaxial stretching // PNRPU Mechanics Bulletin, 2015. № 4. P. 110-120.