

УДК 621:539.2:539.62

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОБОБЩЕННОГО КРИТЕРИЯ ПРОЧНОСТИ ПИСАРЕНКО – ЛЕБЕДЕВА В ПРАКТИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ НА ДЛИТЕЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ

Белов А.В., Неумоина Н.Г., Поливанов А.А.

Камышинский технологический институт (филиал) ГОУ «Волгоградский государственный технический университет», Камышин, e-mail: polivanov@kti.ru

В статье рассматривается один из подходов к описанию обобщенного критерия длительной прочности Писаренко – Лебедева, который используется при определении эквивалентных напряжений в кинетическом уравнении повреждаемости Ю.Н. Работнова. Нахождение обобщенного критерия длительной прочности, который наилучшим образом описывает эквивалентное изменение напряжений, представляет значительную сложность. Существует множество таких критериев, но для их конкретизации требуются дополнительные экспериментальные данные, такие как пределы прочности материалов, полученные при испытании на сжатие и кручение. Наиболее обоснованным и универсальным критерием, по мнению авторов, является обобщенный критерий длительной прочности Писаренко – Лебедева. Авторами предложен простой и удобный в использовании метод нахождения эквивалентного напряжения при конкретизации этого критерия. Для проверки достоверности предложенного способа конкретизации проведены расчеты времени разрушения цилиндрической оболочки под действием внутреннего давления и тонкой пластинки с круглым отверстием, растянутой внешними радиальными силами, для которых имеются результаты натурных экспериментов. Полученные результаты расчетов достаточно хорошо согласуются с аналогичными экспериментальными результатами. Таким образом, предложенный метод конкретизации обобщенного долгосрочного критерия прочности Писаренко – Лебедева позволяет более точно прогнозировать повреждение конструкции и время до ее разрушения по сравнению с классическими критериями длительной прочности.

Ключевые слова: критерий длительной прочности, высокотемпературная ползучесть, повреждаемость, напряженно-деформированное состояние

ABOUT THE ELECTION STRENGTH CRITERIA IN CALCULATIONS FOR LONG-TERM STRENGTH FOR NON-ISOTHERMAL PROCESSES OF LOADING

Belov A.V., Neumoina N.G., Polivanov A.A.

Kamyshin Technological Institut (branch) of Volgograd State Technical University, Kamyshin, e-mail: polivanov@kti.ru

The paper summarizes one the approach to the describing the Pisarenko-Lebedev generalized long-term strength criterion, which is used in determining the equivalent stress in the Yu. Rabotnov's kinetic equation of damageability. Finding the long-term strength criterion, which describes the equivalent stress change in the best way, is of considerable complexity. There are multiple long-term strength criteria, but no precise recommendations on their use, which is what makes this problem so difficult to solve. The most reasonable and universal criterion is generalized Pisarenko-Lebedev generalized long-term strength criterion. The authors proposed a simple and easy-to-use method to find the equivalent stress when using the Pisarenko-Lebedev generalized strength criterion. To verify the reliability of the proposed criterion, the calculations of time to failure a cylindrical shell under the action of internal pressure and a thin lamina with a round hole stretched by external radial forces are carried out. The obtained results coincide with similar experimental results. Therefore, proposed method for concretizing the Pisarenko-Lebedev generalized long-term strength criterion enables more accurate damage and time-to-rupture predictions, compared with other long-term strength criteria.

Keywords: long-term strength criterion, high temperature creep, damage, stress-strain state

Данная публикация является продолжением исследований, проводимых авторами и опубликованных ранее в диссертациях [1, 2], а позже в статьях [3, 4]. Одной из наиболее сложных проблем в расчётах на длительную прочность является определение значений эквивалентных напряжений [5], на основе которых рассчитывается время до разрушения конструкции. Для таких расчётов наиболее универсальным и обоснованным, по мнению авторов, является обобщенный критерий длительной прочности Писаренко – Лебедева [6].

В предыдущей публикации [4] авторами был предложен достаточно простой и удоб-

ный способ конкретизации обобщенного критерия длительной прочности Писаренко – Лебедева, применяемого при определении эквивалентных напряжений, используемых для описания процессов накопления повреждений в материале с помощью кинетического уравнения повреждаемости Ю.Н. Работнова [7]. При этом параметр, характеризующий «степень ответственности сдвиговой деформации за микроразрушение, создающий благоприятные условия для растрескивания и разрушения материала» [6], считается равным относительному остаточному сужению при разрыве стандартного образца, значение которого мож-

но определить по информации, имеющейся в справочной литературе для большинства конструкционных материалов. В работах [3] и [4] был проведен анализ экспериментальных данных, который показал, что такой подход обеспечивает возможность вычисления эквивалентного напряжения с достаточной степенью достоверности. Кроме этого, с использованием обобщенного критерия длительной прочности Писаренко – Лебедева и предложенного способа его конкретизации был проведен расчет напряженно-деформированного состояния плоской пластины с отверстием [4].

Однако для того, чтобы сделать окончательный вывод о возможности использования предложенного способа конкретизации обобщенного критерия длительной прочности Писаренко – Лебедева, требуется сравнение результатов расчетов, полученных с помощью рассмотренного критерия длительной прочности, с результатами натурных экспериментов. Только в случае хорошего согласования результатов расчетов и экспериментов можно считать предложенный способ конкретизации обобщенного критерия длительной прочности Писаренко – Лебедева достаточно обоснованным [8].

Цель исследования: выполнение проверочных численных расчетов времени до разрушения ряда простых осесимметричных конструкций (к которым, в частности, относятся кольцевые пластины и трубы), для которых имеются экспериментальные значения времени разрушения. На основе сравнения полученных результатов планируется сделать вывод о достоверности предложенного способа конкретизации обобщенного критерия длительной прочности Писаренко – Лебедева, предложенного ранее авторами в публикации [4].

Материалы и методы исследования

Для определения эквивалентного напряжения при помощи обобщенного критерия длительной прочности Писаренко – Лебедева используется следующее соотношение [6]:

$$\sigma_{\text{эkv}} = \chi \sigma_i + (1 - \chi) \cdot \sigma_1. \quad (1)$$

Здесь $\sigma_{\text{эkv}}$ – эквивалентное напряжение; χ – коэффициент пластичности материала, характеризующий степень ответственности сдвиговой деформации за макроразрушение, σ_i – интенсивность напряжений, которая в случае плоского напряженного состояния будет определяться с помощью следующей формулы: $\sigma_i = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 - \sigma_2^2}$, σ_1 и σ_2 – главные нормальные напряжения.

Для конкретизации указанного критерия требуется определить значение величины χ . В работе [4] достаточно подробно описаны варианты определения данного параметра при различных видах нагружения. Там же был предложен простой и удобный для использования в практических расчетах способ определения этого параметра. Суть его заключается в том, что параметр χ для материала принимается численно равным относительному остаточному сужению ψ_c сплошного круглого образца, полученному при его испытании на ползучесть и длительную прочность при постоянном напряжении σ и заданной фиксированной температуре T .

Возможность использования такого подхода обусловлена многочисленными результатами практических испытаний стандартных цилиндрических образцов, изготовленных из металлов и сплавов на ползучесть и длительную прочность, проведенных в разные годы, например, таких как [9].

Тщательный анализ этих результатов позволил выявить следующую закономерность [1, 10]: при высоких уровнях напряжений, значительно превышающих предел текучести материала, преобладает внутризеренное (вязкое) разрушение, которое сопровождается локализацией деформаций ползучести и последующим образованием характерной шейки [11]. Относительное остаточное сужение образца ψ_c , полученное при испытаниях на ползучесть, почти равно относительному остаточному сужению ψ , полученному при стандартном испытании на растяжение цилиндрических образцов при той же температуре.

Вместе с тем, если значение действующих напряжений незначительно превышает предел ползучести материала и значительно ниже предела текучести, в основном преобладает межзеренный характер деформации, имеет место охрупчивание материала без образования шейки, то есть деформация образца в течение всего процесса нагружения практически постоянна по всей длине [12, 13]. Величина накопленной необратимой деформации в таких условиях, наоборот, будет малой, а время до разрушения – большим, порядка тысяч, а в отдельных случаях – десятков тысяч часов. В этих условиях величина относительного остаточного сужения ψ_c будет стремиться к нулю, а разрушение материала будет иметь хрупкий характер. В условиях эксплуатации реальных конструкций это представляет серьезную опасность, поскольку материал разрушается внезапно и без видимых деформаций.

Опираясь на результаты, изложенные выше, авторами была построена зависи-

мость $\psi_c = f(\sigma)$ для фиксированных значений температуры следующего вида [4]:

$$\psi_c = \frac{\sigma}{\left(\sigma_B - \sigma_{0,2}/10^5\right)} \psi, \quad (2)$$

где ψ_c – относительное остаточное сужение стандартного образца круглого сечения, получаемое при испытании на ползучесть и длительную прочность при постоянном напряжении σ и фиксированной температуре T ; ψ – относительное остаточное сужение, полученное при испытании на разрыв (при мгновенной деформации) стандартного образца круглого сечения при его и при такой же температуре; σ_B – предел прочности материала; $\sigma_{0,2}/10^5$ – предел ползучести материала при указанной температуре.

Таким образом, в рамках рассмотренного здесь подхода вычисление эквивалентного напряжения для каждого элемента конструкции производится с использованием следующей формулы:

$$\sigma_{\text{экр}} = \psi_c \sigma_i + (1 - \psi_c) \cdot \sigma_1. \quad (3)$$

Величина ψ_c вычисляется по формуле (2). Исходные данные, необходимые для выполнения расчетов, дополняются следующими механическими свойствами материала, определяемыми при фиксированной температуре в пределах диапазона ее изменения в процессе эксплуатации конструкции: предел прочности, предел ползучести и относительное остаточное сужение. Эти данные имеются в справочной литературе для большинства конструкционных материалов [14, 15].

В работе [4] был проведен анализ результатов моделирования, полученных с использованием предложенного подхода, который показал, что выбор критерия длительной прочности оказывает влияние на оценку расчетного времени до разрушения конструкции существенным образом, и это влияние тем больше, чем меньше нагрузка и больше время нагружения конструкции. Предложенный вариант конкретизации обобщенного критерия Писаренко – Лебедева позволяет учитывать изменение пластических характеристик материала (охрупчивание), возникающее при развитии деформаций ползучести.

Следующим этапом исследований является проверка достоверности результатов прочностного расчета конструкций, получаемых с использованием обобщенного критерия Писаренко – Лебедева.

К настоящему времени опубликовано большое количество работ, посвященных экспериментальным и теоретическим ме-

тодам изучения накопления повреждений в кристаллических телах и их разрушению. Примерами могут служить некоторые работы, приведенные в обзоре [9]. Однако в основном эти работы посвящены исследованию повреждаемости цилиндрических образцов или других изделий с простой геометрической формой. Однако для проведения полноценной проверки достоверности предложенного способа конкретизации критерия длительной прочности требуются результаты натурных экспериментов по исследованию ползучести и разрушения изделий, выполненных в виде тонких оболочек вращения.

К сожалению, в настоящее время такие эксперименты практически не проводятся, как в России, так и в мире. Поэтому авторами были взяты за основу результаты экспериментов, опубликованных в предыдущие годы, такие как [16, 17]. Далее рассмотрим эти эксперименты более подробно.

Результаты исследования и их обсуждение

В рамках данной работы будут рассмотрены результаты двух натурных экспериментов – цилиндрическая оболочка, находящаяся под действием внутреннего давления и тонкая пластинка с круглым отверстием, растягиваемая внешними радиальными силами. Для каждого из экспериментов имеются данные о времени разрушения, а также значения деформаций конструкций в определенные моменты времени.

В рассматриваемом примере путем сопоставления результатов расчета и эксперимента оценивается достоверность определения, с помощью разработанной методики, времени разрушения оболочек, находящихся в условиях неустановившейся ползучести.

В качестве материала в обеих задачах была взята сталь 20, механические характеристики которой, необходимые для решения рассматриваемых задач, взяты из справочной литературы [14, 15]. Эти характеристики использовались авторами ранее при расчетах других конструкций.

В данной статье будут рассмотрены только результаты расчетов времени до разрушения конструкций и их соответствие результатам экспериментов. Анализ кинетики разрушения конструкций, развитие деформаций и накопление повреждений этих конструкций будут проанализированы авторами позже в других публикациях.

Расчет обеих конструкций проводился с использованием четырех различных критериев длительной прочности:

– максимальное главное напряжение (критерий Джонсона): $\sigma_{\text{экр}} = \sigma_1$;

- интенсивность напряжений (критерий Каца): $\sigma_{\text{экв}} = \sigma_i$;
- критерий Сдобырева: $\sigma_{\text{экв}} = 0,5 \cdot (\sigma_1 + \sigma_i)$;
- обобщенный критерий Писаренко – Лебедева $\sigma_{\text{экв}} = \psi_c \sigma_i + (1 - \psi_c) \cdot \sigma_1$.

Расчеты с применением первых трех критериев были проведены авторами ранее в работах [3] и [4].

Минимальная оценка времени разрушения конструкции (абсолютно хрупкое разрушение) возможна при использовании критерия Джонсона, а максимальная (абсолютно пластическое разрушение) – при использовании критерия Каца [3, 4]. Это означает, что независимо от того, какой критерий длительной прочности применяется, время до разрушения элемента конструкции всегда будет находиться в диапазоне между значениями, полученными при использовании критериев Каца и Джонсона. Критерий Сдобырева – это их полусумма, таким образом, вклад вязкого и хрупкого характеров разрушений в общую картину должен быть равнозначным.

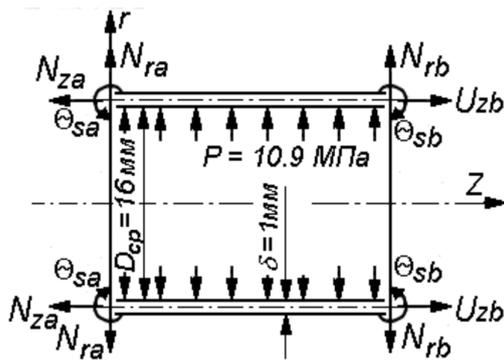


Рис. 1. Ползучесть и разрушение цилиндрической оболочки под действием внутреннего давления (эксперимент Ш.Н. Каца)

В данном эксперименте был исследован процесс ползучести и разрушения тонкой цилиндрической оболочки при действии на нее постоянного внутреннего давления (рис. 1). Данный эксперимент был проведен в 1955 г. ученым Ш.Н. Кацем [16] с целью обоснования предложенного им критерия длительной прочности. Торцы рассматриваемой оболочки заглушены до-

нышками, вследствие чего в ее элементах, помимо окружных, возникают и меридиональные напряжения. Исходные данные, заложенные в условие задачи, соответствуют условиям эксперимента, выполненного на тонкостенном образце из материала, имеющего аналогичные стали 20 основные механические характеристики. Образец испытывался при постоянной температуре $T = 500^\circ\text{C}$ и постоянном внутреннем давлении $P = 10,9$ МПа и имел следующие геометрические размеры: средний диаметр 3,57 см; толщину стенки 0,17 см.

В табл. 1 приведены экспериментальные и расчетные значения времени разрушения исследуемой конструкции, полученные с использованием четырех различных критериев длительной прочности.

Как видно из табл. 1, использование в расчете в качестве критерия длительной прочности значений наибольшего главного напряжения позволило определить время разрушения оболочки с достаточно малой, по сравнению с экспериментом, погрешностью 5,5%. В то время как использование критериев Сдобырева и интенсивности напряжения дает завышенные, соответственно на 47% и 137%, значения долговечности образца, что совершенно неприемлемо.

Использование обобщенного критерия длительной прочности Писаренко – Лебедева позволяет получить результат, наиболее близкий к экспериментальному.

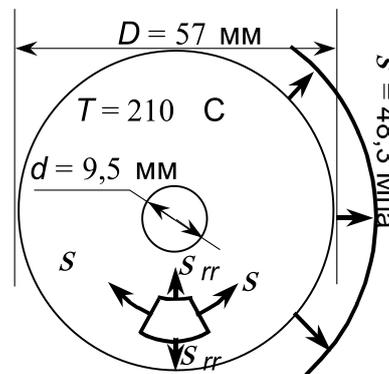


Рис. 2. Ползучесть и разрушение тонкой пластинки с круглым отверстием (эксперимент Д. Хейхерста)

Таблица 1

	Эксперимент	Результаты расчетов с использованием следующих критериев			
		$\sigma_{\text{экв}} = \sigma_1$	$\sigma_{\text{экв}} = \sigma_i$	$\sigma_{\text{экв}} = 0,5 \cdot (\sigma_1 + \sigma_i)$	$\sigma_{\text{экв}} = \psi_c \sigma_i + (1 - \psi_c) \cdot \sigma_1$
Время разрушения образца (час)	1176	1112	2785	1732	1154
Погрешность, %		5,5	137	47	1,8

Таблица 2

	Эксперимент	Результаты расчетов с использованием следующих критериев			
		$\sigma_{\text{экв}} = \sigma_1$	$\sigma_{\text{экв}} = \sigma_i$	$\sigma_{\text{экв}} = 0,5 \cdot (\sigma_1 + \sigma_i)$	$\sigma_{\text{экв}} = \psi_c \sigma_i + (1 - \psi_c) \cdot \sigma_1$
Время разрушения образца (час)	410	348	1118	602	397
Погрешность, %		15,1	172,7	46,8	3,1

В данной задаче была исследована кинетика изменения напряженно-деформированного состояния и процесса разрушения, вследствие ползучести, тонкой круглой пластинки диаметром 5,7 см с центральным круговым отверстием диаметром 0,95 см (рис. 2). Пластинка при постоянной температуре $T = 500^\circ\text{C}$ подвергается длительному, всестороннему растяжению нагрузкой интенсивностью 48,3 МПа. Эксперимент, результаты которого приведены в работе [17], выполнялся на специально спроектированной установке и специальных образцах крестообразной формы. Конструкции испытательной установки и испытуемого образца обеспечивали возникновение в центральной части образца равномерно нагруженного участка радиусом 57 мм. Это позволило рассматриваемую задачу решать в осесимметричной постановке.

В ходе вычислительного эксперимента было установлено, что уровень напряжений в элементах пластинки в течение всего процесса ее нагружения остается существенно ниже предела текучести материала 150 МПа. Это указывает на преобладание хрупкого характера разрушения над вязким.

Как видно из табл. 2, использование в расчете в качестве значений напряжения позволило определить время полного разрушения пластинки с достаточно малой по сравнению с экспериментом погрешностью 15%. Использование же в расчетах критериев и привело к значительному (соответственно в 2,7 раза и 1,5 раза) завышению расчетной долговечности пластинки. Также можно сделать вывод, что полученные результаты подтверждают достоверность обобщенного критерия длительной прочности Писаренко – Лебедева и предложенного способа его конкретизации.

В результате проведенных исследований авторами установлено, что использование в расчетах критериев длительной прочности, не соответствующих преобладающим механизмам разрушения, может привести к существенным погрешностям при определении времени разрушения оболочек.

Заключение

Таким образом, в ходе проведенных исследований была подтверждена адекватность предложенного способа конкретизации обобщенного критерия длительной прочности Писаренко – Лебедева. Полученные результаты расчетов имеют хорошее согласование с аналогичными экспериментальными результатами. Следовательно, предложенный способ конкретизации обобщенного критерия длительной прочности Писаренко – Лебедева, по мнению авторов, обеспечивает получение наиболее точных результатов расчетов, по сравнению с другими широко применяемыми критериями длительной прочности. Однако в настоящей статье рассмотрено всего два варианта конструкций и способа их нагружения и один материал. Поэтому утверждать об универсальности рассмотренного критерия длительной прочности только на основании представленных результатов нельзя. В дальнейшем авторы планируют продолжить исследования.

Авторы также будут признательны всем специалистам, выполняющим аналогичные прочностные расчеты конструкций, за любые конструктивные замечания и рекомендации.

Список литературы

1. Белов А.В. Осесимметричное упругопластическое напряженно-деформированное состояние оболочек вращения с учётом повреждаемости материала при ползучести: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Киев, 1989. 18 с.
2. Поливанов А.А. Осесимметричное упругопластическое деформирование многослойных оболочек вращения с учётом повреждаемости материала при ползучести: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2004. 19 с.
3. Белов А.В., Неумоина Н.Г. Об использовании обобщенного критерия прочности Писаренко – Лебедева в расчётах на прочность при неизотермических процессах нагружения // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 9. С. 8–10.
4. Белов А.В., Неумоина Н.Г., Поливанов А.А. О выборе критерия прочности в расчётах на длительную прочность при неизотермических процессах нагружения // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 1. С. 20–25.
5. Алиев М.М., Шафиева С.В., Гилязова С.Р. Критерий длительной прочности для разносопротивляющихся материалов // Материалы научной сессии ученых Альметьевского государственного нефтяного института. 2015. Т. 1. № 1. С. 254–257.

6. Лебедев А.А. Развитие теорий прочности в механике материалов. Проблемы прочности. 2010. № 5. С. 127–146.
7. Хохлов А.В. Критерий разрушения и кривые длительной прочности, порождаемые определяющим соотношением нелинейной теории наследственности Ю.Н. Работнова // Вестник машиностроения. 2017. № 6. С. 39–46.
8. Хохлов А.В. Кривые длительной прочности, порождаемые линейной теорией вязкоупругости в сочетании с критериями разрушения, учитывающими историю деформирования // Труды МАИ. 2016. № 91. С. 2.
9. Вологов П.С., Грибов Д.С., Трусов П.В. Поврежденность и разрушение: обзор экспериментальных работ // Физическая мезомеханика. 2015. Т. 18. № 3. С. 11–24.
10. Вологов П.С., Грибов Д.С., Трусов П.В. Поврежденность и разрушение: классические континуальные теории // Физическая мезомеханика. 2015. Т. 18. № 4. С. 68–87.
11. Арутюнян Р.А. Высокотемпературное охрупчивание и длительная прочность металлических материалов // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2015. № 2. С. 96–105.
12. Хохлов А.В. Кривые длительной прочности, порождаемые линейной теорией вязкоупругости в сочетании с критериями разрушения, учитывающими историю деформирования // Труды МАИ. 2016. № 91. С. 2.
13. Арутюнян Р.А. Охрупчивание и разрушение металлов в условиях высокотемпературной ползучести // Вестник Кыргызско-Российского славянского университета. 2017. Т. 17. № 1. С. 8–12.
14. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Издательство «Дельта», 2008. 816 с.
15. Драгунов Ю.Г., Зубченко А.С., Каширский Ю.В. и др. Марочник сталей и сплавов. М., 2014. 1216 с.
16. Кац Ш.Н. Исследование длительной прочности углеродистых труб // Теплоэнергетика. 1955. № 2. С. 37–40.
17. Nahurst D. Creep rupture under multi axial states of stress. J. of mech. and phys. of solids. 1972. V. 20. P. 381–390.