

УДК 539.388.1

Можаровская Т.Н., к.т.н., доц., Можаровский В.Н., к.т.н., доц.
НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ТРЕТЬЕГО ИНВАРИАНТА ДЕВИАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОГО СТАТИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Mozharovskaya T., Mozharovskyy V.
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (mmi@kpi.ua)

CONSTRUCTIONAL MATERIALS DURABILITY REGARDING THE THIRD INVARIANT INFLUENCE OF A STRESS DEVIATOR IN THE CONDITION OF COMBINED STRESS

В статье представлены экспериментальные закономерности длительной прочности стали 15Х2МФА и объединенная кривая длительной прочности стали 1Х18Н9Т в относительных координатах в условиях ползучести и сложного напряженного состояния.

Изучено влияние третьего инварианта девиатора напряжений на основную характеристику долговечности материалов, что в последующем позволит обосновать подходы к оценке ресурса конструкционных материалов с учетом ряда эксплуатационных факторов.

Ключевые слова: длительная прочность, третий инвариант девиатора напряжений, длительное статическое нагружение.

Введение

Вследствие сложных механических и тепловых воздействий материал реальных конструкций в подавляющем большинстве случаев работает в условиях сложного (плоского или объемного) напряженного состояния. В практике механических испытаний материалов при сложном напряженном состоянии наиболее широко распространен метод испытаний тонкостенных трубчатых образцов, подвергаемых действию комбинированных нагрузок (осевой силе, крутящему моменту и внутреннему давлению). Это объясняется, прежде всего, тем, что на трубчатых образцах обеспечивается широкий диапазон напряженных состояний и реализуются все возможные комбинации девиатора напряжений.

Постановка задачи

В настоящей статье рассматривается задача об оценке долговечности тонкостенной цилиндрической оболочки, подвергаемой одновременному растяжению и кручению при наличии упругопластических деформаций в условиях длительного статического нагружения. Такие задачи решаются по упрощенной схеме, согласно которой определяют напряженное состояние в опасной точке данной конструкции, а затем действие сложного напряженного состояния в данной точке сводят к действию одноосного напряженного состояния, подобрав для этого величину эквивалентного напряжения. При этом для определения времени до разрушения исследуемого материала в условиях сложного напряженного состояния используют простейшие зависимости длительной прочности:

$$t_p = A\sigma^{-m} \text{ или } t_p = C \exp(-B\sigma), \quad (1)$$

где A , m , C , B – постоянные, определяемые из эксперимента при одноосном напряженном состоянии, заменив в них напряжение σ на соответствующее эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экв}}$

$$t_p = A\sigma_{\text{экв}}^{-m} \text{ или } t_p = C \exp(-B\sigma_{\text{экв}}) \quad (2)$$

В работах [1-3] представлены некоторые критерии определения $\sigma_{\text{экв}}$ при решении задач длительной прочности при сложном напряженном состоянии.

Одна и та же величина эквивалентного напряжения в опасной точке элемента может быть достигнута различными путями нагружения. На рис.1 в координатах Ильюшина [4] показаны различные пути нагружения для плоского напряженного состояния, в частности при растяжении и кручении тонкостенной цилиндрической оболочки при $\sigma_{\text{экв}} = \sigma_i$.

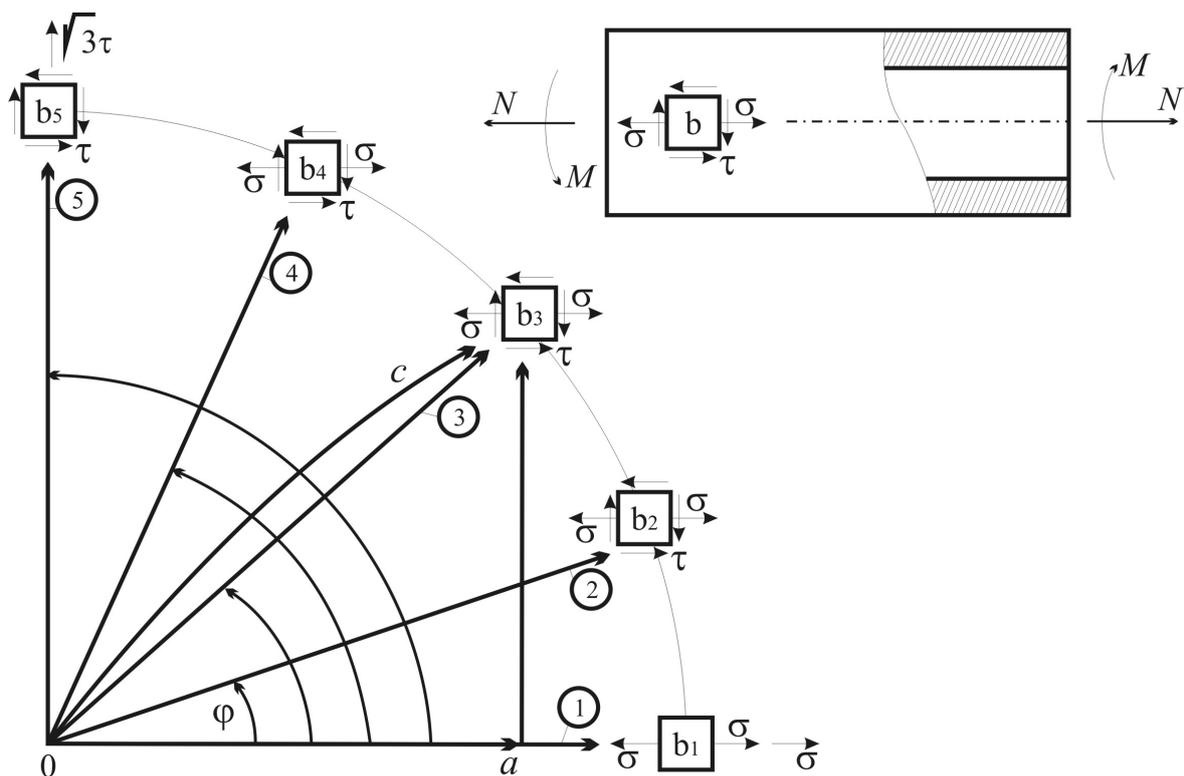


Рис. 1. Различные пути нагружения при достижении одинаковой величины интенсивности напряжений в тонкостенной цилиндрической оболочке при растяжении и кручении

Здесь кривая b_1 - b_5 – кривая равных интенсивностей напряжений ($\sigma_i = \text{const}$); $0b_1$ - $0b_5$ – траектории пропорционального нагружения; $0cb_3$ – криволинейная траектория; $0ab_3$ – ломаная траектория.

Результаты исследований.

Проведенные экспериментальные исследования стали 15X2МФА ($T=823$ К) по пропорциональным траекториям нагружения при различных углах φ ($\varphi = \arctg \frac{\sqrt{3}\tau_{z\theta}}{\sigma_{zz}}$), позволили получить кривые длительной прочности, которые представлены на рис. 2.

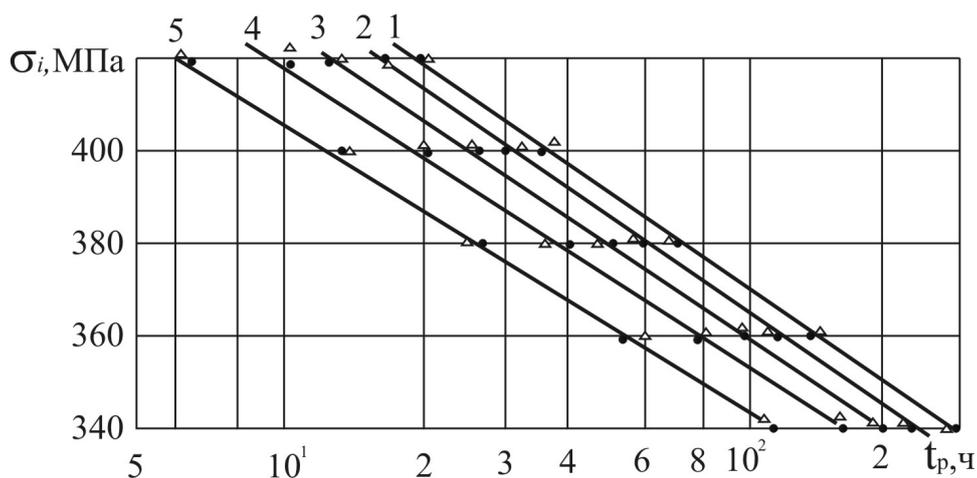


Рис. 2. Кривые длительной прочности стали 15X2МФА при $T=283$ К: 1 – $\varphi = 0$; 2 – $\varphi = \pi/6$ рад; 3 – $\varphi = \pi/4$ рад; 4 – $\varphi = \pi/3$ рад; 5 – $\varphi = \pi/2$ рад

Напряжения определялись следующим образом:

$$\sigma_{zz} = \frac{N}{\pi D_{cp} \delta}; \tau_{z\theta} = \frac{2M_{кр}}{\pi D_{cp}^2 \delta^2} \quad (3)$$

где N – осевая сила; $M_{кр}$ – крутящий момент; $D_{ср}$ – средний диаметр образца; δ – толщина стенки образца.

Как видно из рис. 2, время до разрушения t_p существенно зависит от параметра φ , который является в данном случае характеристикой вида напряженного состояния.

Кривые длительной прочности удовлетворительно могут быть описаны уравнением:

$$t_p(\sigma_i, \varphi) = H(\varphi) \exp \left[-\frac{\sigma_i}{h(\varphi)} \right], \quad (4)$$

где $H(\varphi), h(\varphi)$ – параметры материала, зависящие только от угла направления траектории нагружения (φ), которые приведены в табл.1.

Таблица 1

Значения параметров H и h в зависимости от φ для стали 15X2МФА

Материал и температура испытаний	Параметры	φ , рад				
		0	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$\pi/2$
15X2МФА, T=823K	$H(\varphi) \cdot 10^{-7}$, ч	1,7779	2,1096	2,5213	2,8333	2,8397
	$h(\varphi)$, МПа	30,3908	29,9987	29,5672	28,3059	26,8168

Таким образом, и параметры, приведенные в таблице 1, свидетельствуют о том, что процессы пластического деформирования при длительном статическом нагружении по различным траекториям пропорционального нагружения существенно зависят от вида напряженного состояния.

Как показано во многих работах, пластические свойства материала [1, 5, 6], зависимости между компонентами девиатора напряжений и девиатора деформаций [5, 7], а также характеристики ползучести [1, 6] при данном значении σ_i зависят от траектории нагружения. Следовательно, и долговечность материала при $\sigma_i = \text{const}$ при различных путях нагружения должна быть различной, о чем и свидетельствуют исследования длительной прочности [5, 6, 8] как полиэтиленовых, так и металлических образцов, подвергаемых одновременному растяжению и кручению.

Используя результаты исследований [5, 6] и приняв за эквивалентное напряжение интенсивность напряжений σ_i , можно установить взаимосвязь между относительными величинами α, β, γ (рис.3):

$$\alpha = \frac{\sigma}{\sigma_i}; \beta = \frac{\sqrt{3}\tau}{\sigma_i}; \gamma = \frac{t_p \varphi}{t_{p0}}, \quad (5)$$

где $\varphi = \arctg \frac{\beta}{\alpha}$ – угол направления траектории пропорционального нагружения; t_p – время до разрушения материала при данной величине интенсивности напряжений, достигнутой по этой траектории; t_{p0} – долговечность материала при растяжении ($\varphi=0$).

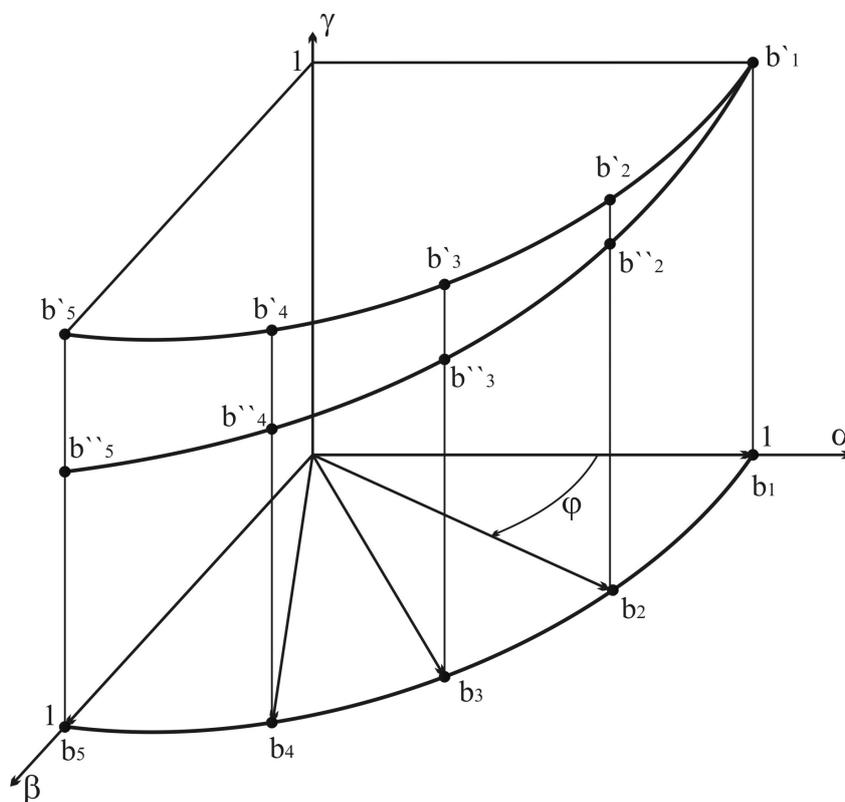


Рис. 3. Обобщенная кривая длительной прочности стали 1X18N9T в относительных координатах

Кривая b_1 - b_5 на рис.3 соответствует равным величинам интенсивности напряжений. Если считать, что кривая деформирования для данного материала инвариантна к виду напряженного состояния, а, следовательно, и эквивалентное напряжение не зависит от траектории пропорционального нагружения, то мы должны получить кривую одинаковой долговечности b'_1 - b'_5 , т.е. одинаковую относительную величину времени до разрушения $\gamma=1$. Однако как показано в [5, 6], действительная кривая для стали 1X18H9T при $\sigma_i=410$ МПа соответствует кривой b''_1 - b''_5 и может быть удовлетворительно описана уравнением:

$$\gamma = 1 - \frac{1}{3} \left[1 - \frac{(1 + \frac{3}{4}tg^2\varphi)^2}{(1 + tg^2\varphi)^3} \right], \quad (6)$$

которую, используя соотношения (5), можно привести к виду:

$$\gamma = 1 - \frac{1}{3} \left\{ 1 - \frac{\left[1 + \frac{9}{4} \left(\frac{\tau}{\sigma} \right)^2 \right]^2}{\left[1 + 3 \left(\frac{\tau}{\sigma} \right)^2 \right]^3} \right\} \quad (7)$$

Поскольку инварианты девиатора напряжений при одновременном растяжении и кручении тонкостенной цилиндрической оболочки определяются как:

$$\left. \begin{aligned} I_1(D_6) &= 0 \\ I_2(D_6) &= \frac{1}{3}\sigma^2 + \tau^2 \\ I_3(D_6) &= \frac{2}{27}\sigma^3 + \frac{1}{3}\sigma\tau^2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

то выражение (7) можно представить в виде:

$$\gamma[I_2(D_6), I_3(D_6)] = 1 - \frac{1}{3} \left[1 - \frac{27}{4} \frac{I_3^2(D_6)}{I_2^3(D_6)} \right] \quad (9)$$

Если учесть, что $I_2(D_6) = \frac{\sigma_i^2}{3}$, а интенсивность напряжений во всех экспериментах при различных траекториях пропорционального нагружения постоянна, то относительная величина времени до разрушения будет функцией только третьего инварианта девиатора напряжений и примет вид:

$$\gamma[I_3(D_6)] = 1 - \frac{1}{3} \left[1 - \left(\frac{27}{2} \right)^2 \frac{I_3^2(D_6)}{\sigma_i^6} \right]. \quad (10)$$

Вывод

Анализируя зависимости (6), (7), (9), (10) можно утверждать, что длительная прочность материала является функцией величины интенсивности напряжений σ_i и траектории пропорционального нагружения, характеристикой которой является угол φ . Поскольку все экспериментальные исследования проводились при $\sigma_i = \text{const}$, то величина времени до разрушения исследуемых конструкционных материалов зависит только от третьего инварианта девиатора напряжений ($I_3(D_6)$). Следовательно, выражение для определения времени до разрушения материалов в условиях сложного напряженного состояния примет вид:

$$t_{p\theta} = A\sigma_i^{-m} \left\{ 1 - \frac{1}{3} \left[1 - \left(\frac{27}{2} \right)^2 \frac{I_3(D_6)}{\sigma_i^6} \right] \right\}, \quad (11)$$

где A и m – постоянные материала, определяемые из эксперимента на длительную прочность материала при одноосном напряженном состоянии.

Анотація. В статті представлені експериментальні закономірності тривалої міцності сталі 15X2МФА і об'єднана крива тривалої міцності сталі 1X18H9T у відносних координатах в умовах повзучості та складного напруженого стану. Вивчено вплив третього інваріанта девиатора напружень на основну характеристику довговічності, що в подальшому дозволить обґрунтувати підходи щодо оцінки ресурсу конструкційних матеріалів з урахуванням ряду експлуатаційних факторів.

Ключові слова: довготривала міцність, третій інваріант девиатора напружень, довготривале статичне навантаження.

Abstract. The paper deals with the problem of estimating the durability of a thin-walled cylindrical shell involving plastoelastic deformation under the conditions of a prolonged static loading and combined stress that is relevant to the resource evaluation of constructional elements operating under the influence of a wide range of factors that have a significant impact on their load carrying capability.

The paper presents the experimental patterns of long-term strength of 15X2MFA steel and a conjoint curve of long-term strength of 1X18H9T steel in relative coordinates and in the condition of creeping and combined stress which strongly prove that the processes of a plastic deformation and damage by a prolonged static loading for different trajectories of a proportional loading significantly depend on the type of a stress state.

The influence of the third invariant of a stress deviator is examined on the basic characteristic of constructional materials durability that will further allow to prove approaches to the resource evaluation regarding operational factors.

Keywords: creep-rupture strength, third invariant of the stress deviator, long-term static loading.

Библиографический список использованной литературы

1. *Наместников В.С.* О ползучести при постоянных нагрузках в условиях сложного напряженного состояния.- Изв. АН СССР, Отд-ние техн. наук, 1957, №4, с.141-146.
2. *Писаренко Г.С., Лебедев А.А.* Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии.- Киев: Наук. думка, 1976.- 415с.
3. *Сдобырев В.П.* Критерий длительной прочности для некоторых жаропрочных сплавов при сложном напряженном состоянии.- Изв. АН СССР. Отд-ние техн. наук. Механика и машиностроение, 1959, №6, с.93-99.
4. *Ильюшин А.А.* Пластичность.- М. : Изд-во АН СССР, 1963.-272с.
5. *Бобырь Н.И.* О зависимости между интенсивностью напряжений и интенсивностью пластических деформаций с учетом вида напряженного состояния.- Вестн. Киевск. политехн. ин-та. Сер. Машиностроение, 1979, вып. 16, с. 93-98.
6. *Можаровский Н.С., Бобырь Н.И.* Упругопластическое деформирование и разрушение материалов в условиях плоского напряженного состояния при различных путях пропорционального нагружения.- Пробл. прочности, 1980, №10, с.73-79.
7. *Можаровская Т.Н.* К установлению соотношений между компонентами девиатора пластических деформаций и компонентами девиатора напряжений при плоском напряженном состоянии.- Пробл. прочности, 1980, №6, с.120-123.
8. *Гольденблат И.И., Баженов В.Л., Копнов В.А.* Длительная прочность в машиностроении.- М. : Машиностроение, 1977.- 250с.

References

1. *Namestnikov V.S.* O polzuchesti pri postojannyh nagruzkah v uslovijah slozhnogo naprjazhennogo sostojanija. Izv. AN SSSR, Otd-nie tehn. nauk, 1957, no 4, p.141-146.
2. *Pisarenko G.S., Lebedev A.A.* Deformirovanie i prochnost' materialov pri slozhnom naprjazhennom sostojanii. Kiev: Nauk. dumka, 1976. 415p.
3. *Sdobyrev V.P.* Kriterij dlitel'noj prochnosti dlja nekotoryh zharoprochnyh splavov pri slozhnom naprjazhennom sostojanii. Izv. AN SSSR. Otd-nie tehn. nauk. Mehanika i mashinostroenie, 1959, no 6, p.93-99.
4. *Il'jushin A.A.* The Plastic. Moskva.: Izd-vo AN SSSR, 1963. 272p.
5. *Bobyry' N.I.* O zavisimosti mezhdju intesivnost'ju naprjazhenij i intesivnost'ju plasticheskijh deformacij s uchetom vida naprjazhennogo sostojanija. Vestn. Kievsk. politehn. in-ta. Ser. Mashinostroenie, 1979, no 16, p. 93-98.
6. *Mozharovskij N.S., Bobyr' N.I.* Uprugoplasticheskoe deformirovanie i razrushenie materialov v uslovijah ploskogo naprjazhennogo sostojanija pri razlichnyh putjah proporcional'nogo nagruzhennija. Probl. prochnosti, 1980, no 10, p.73-79.
7. *Mozharovskaja T.N.* K ustanovleniju sootnoshenij mezhdju komponentami deviatora plasticheskijh deformacij i komponentami deviatora naprjazhenij pri ploskom naprjazhennom sostojanii. Probl. prochnosti, 1980, no 6, p.120-123.
8. *Gol'denblat I.I., Bazhenov V.L., Kopnov V.A.* Long-term strength in mashing building. Moskva.: Mashinostroenie, 1977. 250.

Подана до редакції 07.04.14