

Отже побудована математична модель дозволяє проектувати технологічний процес складання долота з прогнозованою точністю, що сприяє зниженню браку на 25% у порівнянні з базовим процесом.

На далі перспективним є дослідження впливу технологічних чинників при формуванні ніпеля долота на його експлуатаційні показники.

Список літератури

1. Симонов В.В., Выскребцов В.Г. Работа шарошечных долот и их совершенствование. - М.: Недра, 1975. -240с.,
2. Комм Э.Л. Исследование влияния конструктивных и технологических факторов на работоспособность, износ и нагруженность опор шарошечных долот: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.15.10 / Всесоюзный Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт буровой техники "ВНИИБТ". - М., 1978. - 28с.
3. Журавлев А.Н. Структурная оптимизация процессов сборки многорядных роликовых опор: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.02.08 / Самарский гос. техн. университет. - Самара, 2004. - 21с.
4. Ерехин В.В. Погрешность базирования деталей в установочно-зажимных самоцентрирующихся механизмах. // Сборка в машиностроении, приборостроении. - 2007. - №3. - С. 3-6.

УДК 539. 376

**В.П.Голуб, д-р.техн.наук, М.Н.Регульский, канд.техн.наук, А. А.Русинов,
канд.техн.наук
Институт механики им. С.П. Тимошенко НАН Украины г.Киев, Украина**

ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ ПРИ ДВУХОСНОМ СТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Виконані дослідження стосуються обґрунтування методики прогнозування довготривалої міцності тонкостінних трубчастих конструктивних елементів на основі нового аналітичного підходу з застосуванням концепції еквівалентних напружень. Наведено розрахунки часу до руйнування тонкостінних трубчастих зразків, що навантажувалися внутрішнім тиском, внутрішнім тиском і осьовою силою, крутним моментом, а також крутним моментом і осьовою силою. Констатовано задовільне узгодження розрахункових довговічностей з даними експериментів, запозичених з робіт різних авторів, що оцінювалося за допомогою регресійного аналізу й побудови границь довірчих областей.

A new approach in view of the time to fracture calculation of thin-walled structural components under long-term biaxial loading has been developed. The approach is based on the equivalent stresses concept. The calculation of the time to fracture of thin-walled tubular specimens under internal pressure, internal pressure with tension, pure torsion, torsion with tension is presented. A satisfactory agreement of the calculations with experimental data has been obtained. The assessment of the agreement is performed by means of regression analysis and drawing of the confidence boundaries.

Введение. Наступление предельного состояния в результате процессов ползучести характерно в основном для элементов конструкций энергетического оборудования, газотурбинных силовых агрегатов, а также технологических аппаратов с высокотемпературными рабочими процессами. Широкий класс конструктивных элементов такого оборудования составляют участки трубопроводов и сосуды давления,

стенки которых находятся при работе в условиях плоского напряженного состояния. Поскольку тенденция к повышению рабочих параметров и экономичности вновь создаваемых энергетических машин и аппаратов является вполне устойчивой, актуальность совершенствования и создания новых инженерных методов расчета на длительную прочность вполне очевидна.

Определение характеристик длительной прочности конструкций всегда связано с преодолением ряда трудностей, связанных с учетом фактора сложности напряженного состояния [1]. Известно, что основной массив необходимой для расчетов информации получен на основе экспериментов при одноосном нагружении стандартных образцов материалов. В связи с этим непосредственное использование этих данных для условий сложного напряженного состояния может приводить к существенным погрешностям и используется, как правило, при сравнительных оценках прочности. Одним из направлений преодоления затруднений, связанных с учетом сложности напряженного состояния, в расчетах на длительную прочность является применение концепции эквивалентных напряжений и разработка на её основе критериев длительной прочности.

Целью настоящего исследования является разработка и апробация методики прогнозирования длительной прочности тонкостенных металлических труб при различных видах плоского напряженного состояния, инициированного такими видами нагрузок как внутреннее давление, чистое кручение, внутреннее давление с растяжением и кручение с растяжением. При этом предполагается, что с изменением уровня нагружения соотношение между главными напряжениями остается постоянным.

Методика базируется на применении двухпараметрического критерия длительной прочности, структура которого сформирована на основе подхода изложенного в работах [2,3]. Отличительной особенностью указанного подхода является то, что выбор инвариантов напряженного состояния, входящих в структуру критерия, осуществляется посредством построения специального интерполяционного диапазона и на основе данных единичного базового эксперимента для одного из уровней нагружения при плоском напряженном состоянии. Критерий учитывает знаки главных напряжений.

Постановка задачи и основные соотношения. Основное внимание сосредоточено в настоящей работе на исследовании возможности идентификации материальных констант, входящих в структуру выбранного критерия длительной прочности, посредством проведения единичного идентифицирующего базового эксперимента при наиболее простых видах плоского напряженного состояния. Оценка достоверности прогнозируемых долговечностей проводилась посредством регрессионного анализа экспериментальных данных и построения соответствующих доверительных областей.

Критерий длительной прочности, предложенный в работе [2], дает следующие соотношения для эквивалентного напряжения, первое из которых относится к тем

расчетным случаям, когда знаки главных напряжений совпадают, и второе – когда знаки главных напряжений противоположны:

$$\sigma_{eqv} = \begin{cases} \alpha\sigma_{\max} + (1-\alpha)\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^{\chi} s_i & (\sigma_1 \geq \sigma_2 > 0) \\ 2\beta\tau_{\max} + (1-\beta)\left(\frac{\sqrt{2}}{3}\right)^{\chi} \tau_{oct} & (\sigma_1 > 0; \sigma_2 < 0); \end{cases} \quad (1)$$

Критерий объединяет инварианты, соответствующие максимальному нормальному напряжению σ_{\max}

$$\sigma_{\max} = \sigma_1 \quad (2)$$

и интенсивности касательных напряжений s_i

$$s_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}, \quad (3)$$

в случае совпадающих знаков главных напряжений, а также максимальному касательному напряжению $2\tau_{\max}$

$$2\tau_{\max} = \sigma_1 - \sigma_2 \quad (4)$$

и октаэдрическому касательному напряжению τ_{oct}

$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} \quad (5)$$

в случае противоположных знаков главных напряжений.

В формулах (1) χ - параметр Надаи-Лоде, который для двухосного напряженного состояния выражается следующей формулой:

$$\chi = 2 \frac{\sigma_2}{\sigma_1} - 1, \quad (6)$$

и α, β - зависящие от температуры константы материала, определяемые из базового идентифицирующего эксперимента.

С целью упрощения записи в соотношениях (1) – (6) предполагается что главное напряжение σ_2 меньше σ_1 . При конкретизации выражений для главных напряжений посредством введения в них приложенных нагрузок для рассмотренных ниже видов сложного напряженного состояния индексы при главных напряжениях расставлены согласно общепринятой схеме с тремя индексами: $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$.

Напомним, что условие эквивалентности рассматривается здесь по долговечности и предполагает равенство эквивалентного напряжения σ_{eqv} для сложного напряженного состояния, рассчитанного по критерию (1), и напряжения, при

одноосном растяжении σ_t при одной и той же долговечности. Прогнозируемые долговечности в конечном итоге рассчитывают посредством кривой длительной прочности:

$$t_R = \frac{1}{B\sigma_t^m} \Rightarrow \frac{1}{B\sigma_{eqv}^m} \quad (7)$$

В следующих двух разделах приведен более конкретный вид соотношений для расчета долговечностей при всех указанных выше видах нагружения, реализующих соответствующие плоские напряженные состояния.

1. Прогнозирование длительной прочности тонкостенных трубчатых образцов при совпадающих знаках главных напряжений. В данном разделе рассмотрены те случаи реализации плоского напряженного состояния в образцах, когда знаки главных напряжений совпадают, а именно: при нагружении образцов внутренним давлением, а также внутренним давлением с растяжением.

Уровень нагружения в экспериментах при внутреннем давлении с растяжением представлен величиной внутреннего давления. При этом соотношение между нагрузкой от внутреннего давления и растягивающей нагрузкой учитывается посредством безразмерного силового параметра δ . Время до разрушения трубчатых образцов рассчитывается посредством соотношения (7) и первого из соотношений (1). Подставив первое соотношение из (1) в (7) и принимая во внимание соотношения (2) и (3) получаем следующую формулу для расчета времени до разрушения:

$$t_R = \frac{1}{B \left[\frac{\sqrt{3}\alpha\sigma_1 + (1-\alpha)(\sqrt{3})^{1-\lambda} \sqrt{(\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2)}}{\sqrt{3}} \right]^m} \quad (8)$$

Для определения константы α в качестве результатов базового идентифицирующего эксперимента использованы данные испытаний тонкостенных трубчатых образцов при нагружении их только внутренним давлением.

Соотношение для определения константы α посредством испытаний при внутреннем давлении имеет следующий вид:

$$\alpha = \frac{2\sigma_t - \lambda\bar{p}_t}{\lambda\bar{p}_t}, \quad (9)$$

где \bar{p}_t - внутреннее давление в идентифицирующем базовом эксперименте; σ_t - напряжение, соответствующее на кривой длительной прочности для одноосного нагружения той же долговечности, что и в идентифицирующем базовом эксперименте при внутреннем давлении; λ - геометрический безразмерный параметр трубчатых образцов:

$$\lambda = \frac{D_m}{2h}. \quad (10)$$

В соотношении (10) D_m - средний диаметр трубчатого образца; h - толщина стенки образца.

Значения B и m , найденные из соотношения (7) при $\sigma_{eqv} = \sigma_t$ и значения α , найденные из соотношения (9) для исследованных материалов приведены в табл.1.

Таблица 1

Значения констант

Материал	$\theta, ^\circ\text{C}$	λ	δ	$B, \text{Mna}^{-m} \cdot \text{час}^{-1}$	m	α	Ссылки
Сталь 20	500	10,5	0	$4,19 \cdot 10^{-17}$	6,51	0,92	[4]
Аустенитная сталь 1X18H9T	527	20,5	0	$2,41 \cdot 10^{-40}$	14,91	0,87	[6]
			30				
			57				
Сталь ЭИ847	600	49,5	0	$3,65 \cdot 10^{-63}$	24,48	0,93	[5]
			23,5				

В последнем столбце таблицы указаны ссылки на литературные источники, из которых заимствованы экспериментальные данные.

В тонкостенных трубчатых образцах, нагруженных внутренним давлением p , главные напряжения действуют в продольном и тангенциальном направлении и определены соотношениями:

$$\sigma_1 = \frac{pD_m}{2h}, \quad \sigma_2 = \frac{pD_m}{4h}, \quad \sigma_3 = 0. \quad (11)$$

Подставив выражения (11) для σ_1 и σ_2 в (8) получим следующее соотношение для расчетов времени до разрушения тонкостенных труб, нагруженных внутренним давлением:

$$t_R = \frac{1}{B \left\{ \left[1 - \left(1 - 2(\sqrt{3})^\chi \right) \alpha \right] \frac{D_m}{2h} \right\}^m \left(\frac{p}{2(\sqrt{3})^\chi} \right)^m}. \quad (12)$$

На рис. 1а, и б приведены зависимости времени до разрушения от величины внутреннего давления p для Стали 20, и стали ЭИ847 соответственно.

Пунктиром показаны результаты расчета (прогноз) по формуле (12). Точками показаны экспериментальные данные.

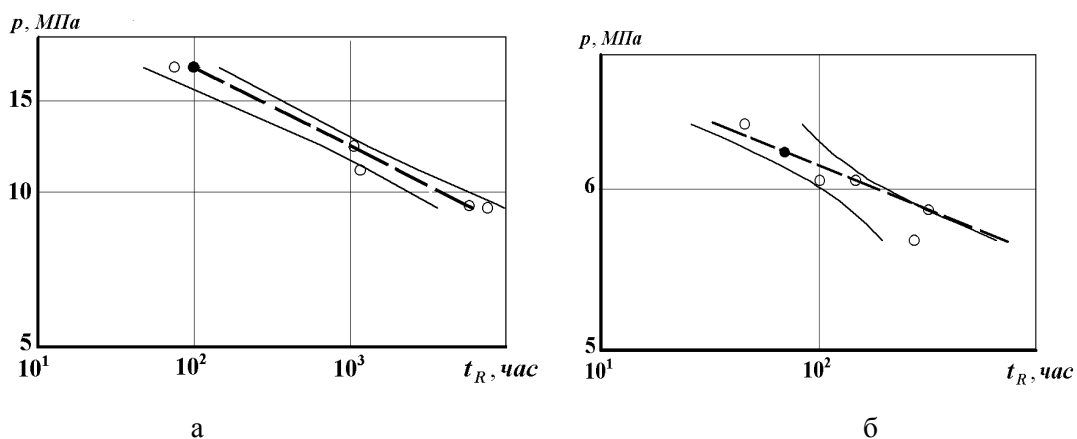


Рис. 1. Зависимости времени до разрушения трубчатых образцов от величины внутреннего давления: а - сталь 20, $\theta = 500$ °С; б - сталь ЭИ847, $\theta = 600$ °С.

На рис.1, а также на рисунках приведенных ниже, полностью зачерненным точкам соответствуют экспериментальные данные, которые для случаев внутреннего давления и чистого кручения были использованы в качестве результатов единичных базовых экспериментов при определении константы α или β . Тонкими линиями нанесены границы доверительных областей, построенные на основе обработки представленных на этих же рисунках экспериментальных данных для доверительных вероятностей, равных 95%. Границы доверительных областей расположены симметрично относительно эмпирических линий регрессии, которые на рисунках не показаны.

Рассмотрим тонкостенный трубчатый конструктивный элемент нагруженный внутренним давлением p и продольной осевой силой N . Два взаимноперпендикулярные направления действия главных напряжений будут такими же, как и при действии только внутреннего давления, т. е. тангенциальное и продольное. По какому из этих направлений будет действовать σ_1 , а по какому σ_2 зависит от соотношения величин внутреннего давления и осевой силы N . Если $N/\pi D_m h \leq p D_m / 4h$, то соотношения для главных напряжений можно представить следующим образом:

$$\sigma_1 = \frac{p D_m}{2h}; \sigma_2 = \frac{p D_m}{4h} + \frac{N}{\pi D_m h}; \sigma_3 = 0 . \quad (13)$$

Если $N/\pi D_m h > p D_m / 4h$, то в этих соотношениях σ_1 и σ_2 меняются местами, а именно:

$$\sigma_1 = \frac{p D_m}{4h} + \frac{N}{\pi D_m h}; \sigma_2 = \frac{p D_m}{2h}; \sigma_3 = 0 . \quad (14)$$

Подставив соотношения для главных напряжений (13) в (8) с учетом (10) получим следующую формулу для расчетов времени до разрушения тонкостенных труб при совместном действии внутреннего давления и продольного растяжения.

$$t_R = \frac{1}{B} \left\{ \sqrt{4\delta^2 + 3\left(\frac{D_m}{2h}\right)^2} + \left[\frac{(\sqrt{3})^{1+\chi} D_m}{h} - \sqrt{4\delta^2 + 3\left(\frac{D_m}{2h}\right)^2} \right] \alpha \right\}^{-m} \left(\frac{p}{2(\sqrt{3})^{1+\chi}} \right)^{-m} \quad (15)$$

Аналогично, подставив (14) в (8) получим следующий вид формулы:

$$t_R = \frac{1}{B} \left\{ \sqrt{4\delta^2 + 3\left(\frac{D_m}{2h}\right)^2} + \left[(\sqrt{3})^{1+\chi} \left(\delta + \frac{D_m}{2h} \right) - \sqrt{4\delta^2 + 3\left(\frac{D_m}{2h}\right)^2} \right] \alpha \right\}^{-m} \left(\frac{p}{2(\sqrt{3})^{1+\chi}} \right)^{-m} \quad (16)$$

В формулах (15) и (16) $\delta = \frac{N}{\pi D_m h p}$ и является силовым безразмерным параметром.

Значения константы материала α в формулах (15) и (16) для расчетов взяты теми же, что были получены в базовом эксперименте при нагружении только внутренним давлением.

На рис. 2а и б для трубчатых образцов из стали ЭИ847 и стали 1Х18Н9Т при совместном воздействии на них внутреннего давления и кручения приведены зависимости времени до разрушения от величины нагрузки, уровень которой представлен величиной внутреннего давления p . Пунктиром показаны результаты расчета (прогноз) по формулам (15) и (16). Точками показаны экспериментальные данные. Тонкими линиями показаны границы 95%-ных доверительных областей.

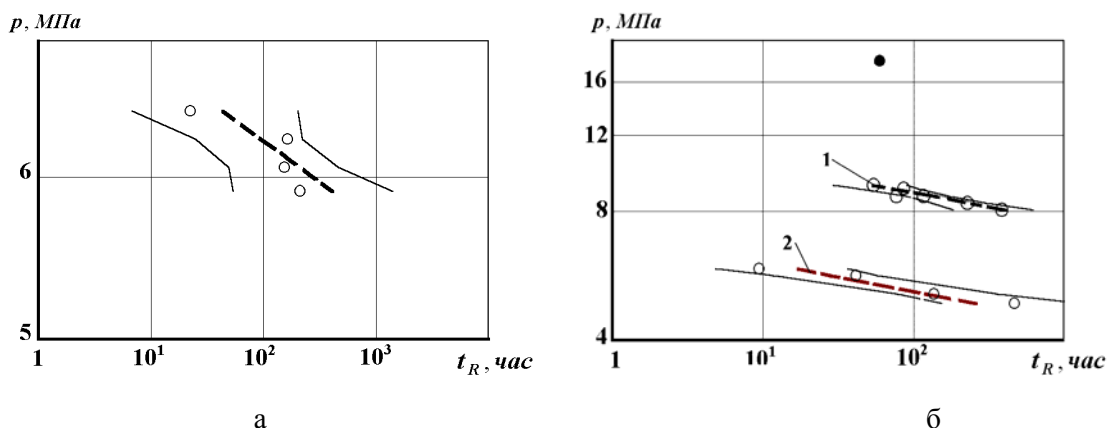


Рис. 2. Зависимости времени до разрушения от уровня нагружения для трубчатых образцов, нагруженных внутренним давлением и растяжением: а – сталь ЭИ847, $\theta = 600^{\circ}\text{C}$, $\delta = 23,5$; б – сталь 1Х18Н9Т, $\theta = 527^{\circ}\text{C}$, $\delta = 30$ (1), $\delta = 57$ (2).

2. Прогнозирование длительной прочности тонкостенных трубчатых образцов при противоположных знаках главных напряжений. В данном разделе рассмотрено решение задач прогнозирования времени до разрушения при длительном статическом нагружении трубчатых конструктивных элементов крутящим моментом (чистое кручение), а также крутящим моментом с наложением осевой растягивающей нагрузки, т.е. те случаи нагружения, когда знаки главных напряжений противоположны. Уровень нагружения в экспериментах при чистом кручении и кручении с растяжением представлен величиной крутящего момента M_T . При этом соотношение между растягивающей и крутящей нагрузкой учитывается посредством безразмерного силового параметра $\nu = D_m N / 2M_T$. Для расчетов воспользуемся уравнением кривой длительной прочности (7) и вторым соотношением из (1). Подставив второе соотношение (1) в (1.7) и приняв во внимание (4) и (5) получим следующую формулу для расчета времени до разрушения:

$$t_R = \frac{1}{B \left[\beta(\sigma_1 - \sigma_2) + (1 - \beta) \left(\frac{\sqrt{2}}{3} \right)^{1+\chi} \left(\sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} \right) \right]^m}. \quad (17)$$

Как и в формулах (1) - (6) в формуле (17) подразумевается, что главное напряжение σ_2 алгебраически меньше σ_1 .

Для определения константы β в качестве результатов базового идентифицирующего эксперимента использованы данные испытаний тонкостенных трубчатых образцов при чистом кручении. Соотношение для определения константы β при чистом кручении имеет следующий вид:

$$\beta = \frac{3\sigma_t W - \sqrt{6} \bar{M}_t}{(6 - \sqrt{6}) \bar{M}_t}, \quad (18)$$

где \bar{M}_t - крутящий момент в идентифицирующем базовом эксперименте; σ_t - напряжение, соответствующее на кривой длительной прочности для одноосного нагружения той же долговечности, что и в идентифицирующем базовом эксперименте при чистом кручении. В формуле (18) W соответствует полярному моменту сопротивления при кручении тонкостенных труб $W = \frac{\pi D_m^2 h}{2}$.

Значения B и m , найденные из соотношения (7) при $\sigma_{eqv} = \sigma_t$ и значения β , найденные посредством соотношения (18) для исследованных материалов приведены в табл.2.

Значения констант

Материал	$\theta, ^\circ\text{C}$	λ	ν	$B, \text{МПа}^{-m} \cdot \text{час}^{-1}$	m	β	Ссылки
Сталь 15X1M1Ф	570	6,0	0	$1,41 \cdot 10^{-19}$	7,00	0,52	[7]
			2,0				
Сталь 1X18Н12	610	6,0	0	$1,72 \cdot 10^{-21}$	8,27	0,48	[7]
			2,0				

При чистом кручении выражения для главных напряжений имеют следующий вид:

$$\sigma_1 = \frac{2M_T}{\pi D_m^2 h} = \tau; \quad \sigma_2 = 0; \quad \sigma_3 = -\frac{2M_T}{\pi D_m^2 h} = -\tau, \quad (19)$$

где τ - среднее касательное напряжение (усреднение по толщине стенки). При этом силовой безразмерный параметр ν равен нулю.

Подставив (19) в (17) и учитывая, что при чистом кручении $\chi = 0$, получим следующую формулу для расчетов времени до разрушения тонкостенных труб при чистом кручении:

$$t_R = \frac{1}{B \left[2\beta + (1-\beta) \frac{\sqrt{6}}{3} \right]^m \left(\frac{2M_T}{\pi D_m^2 h} \right)^m} \quad (20)$$

На рис. 3а (пунктирная линия 1) приведена зависимость времени до разрушения от величины крутящего момента M_T для трубчатых образцов из стали 1X18Н12Т при чистом кручении. Пунктирная линия (прогноз) соответствует расчету по формуле (20). Точками представлены данные экспериментов. Тонкими линиями показаны границы 95%-ных доверительных областей.

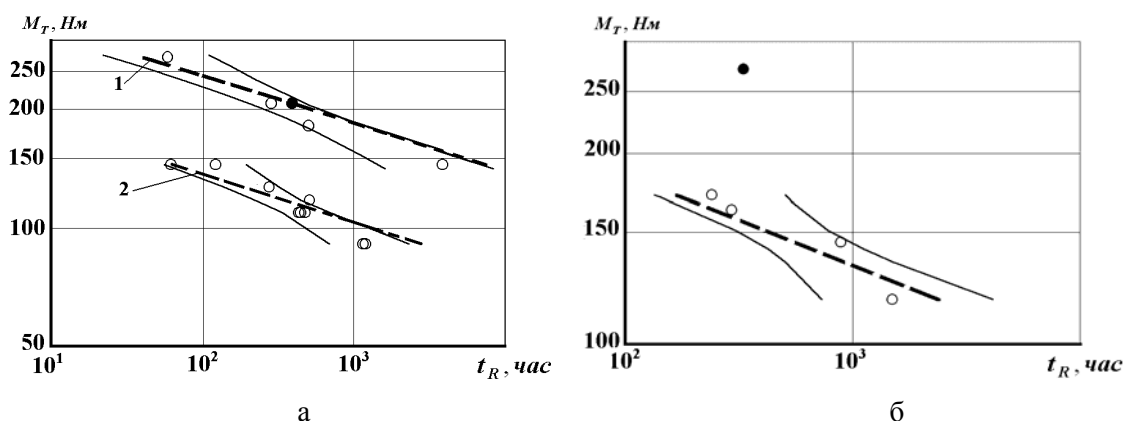


Рис. 3. Зависимости времени до разрушения от уровня нагружения для трубчатых образцов при чистом кручении (1) и чистом кручении с растяжением (2):

а – сталь 1X18Н12Т, $\theta = 610^\circ\text{C}$, $\nu = 0$ (1), $\nu = 2$ (2);

б – сталь 15X1M1Ф, $\theta = 570^\circ\text{C}$, $\nu = 2$ (2).

При нагружении тонкостенного трубчатого образца крутящим моментом M_T совместно с осевой силой N выражения для главных напряжений имеют следующий вид:

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} \left[\frac{N}{\pi D_m h} + \sqrt{\left(\frac{N}{\pi D_m h} \right)^2 + 4 \left(\frac{2M_T}{\pi D_m^2 h} \right)^2} \right]; \quad \sigma_2 = 0; \quad (21)$$

$$\sigma_3 = \frac{1}{2} \left[\frac{N}{\pi D_m h} - \sqrt{\left(\frac{N}{\pi D_m h} \right)^2 + 4 \left(\frac{2M_T}{\pi D_m^2 h} \right)^2} \right].$$

Подставив соотношения (21) в (17) получаем формулу для расчетов времени до разрушения тонкостенных труб, подверженных длительному статическому нагружению одновременно крутящим моментом и осевой продольной силой:

$$t_R = \frac{1}{B \left[\left(\sqrt{4 + \nu^2} \right) \beta + \sqrt{(3 + \nu^2)} (1 - \beta) \left(\frac{\sqrt{2}}{3} \right)^{1+\chi} \right]^m \left(\frac{2M_T}{\pi D_m^2 h} \right)^m}. \quad (22)$$

Для расчетов значения констант материалов β в формуле (22) использовались те же, что были получены в единичных базовых экспериментах при нагружении чистым кручением.

На рис. 3а и б приведены зависимости времени до разрушения трубчатых образцов от величины нагрузки для стали 1Х18Н12Т и стали 15Х1М1Ф при совместном воздействии на них кручения и растяжения. При этом уровень нагрузки представлен крутящим моментом M_T , а значение силового безразмерного параметра ν , характеризующего соотношение нормальных и касательных напряжений, для обеих сталей соответствует $\nu=2$. Пунктирные линии соответствуют расчетному прогнозу по формуле (22), а точки - экспериментальным данным. Тонкими линиями показаны границы 95%-ных доверительных областей. Полностью зачерненным точкам соответствуют результаты единичных идентифицирующих базовых экспериментов при чистом кручении.

Обсуждение результатов. В основу реализованной методики прогнозирования характеристик длительной прочности положена концепция эквивалентных напряжений, согласно которой действие системы напряжений в условиях сложного напряженного состояния может быть сведено к эквивалентному по долговечности напряжению в условиях одноосного нагружения стандартных образцов материала при простом растяжении. На основе анализа экспериментальных данных, полученных разными исследователями, в работе [2] было показано, что выбранная структура смешанного критерия длительной прочности (1) является приемлемой для прогнозирования

длительной прочности металлических конструкционных материалов, работающих при повышенных температурах.

Основным этапом методики является определение материальных констант α или β на основе данных единичного базового идентифицирующего эксперимента при одном из видов плоского напряженного состояния. Единичным мы называем его потому, что такой эксперимент достаточно провести на одном из уровней нагружения, при котором время испытаний является приемлемым, например, в диапазоне долговечностей 100-300 часов. Разумеется, что для получения более достоверной информации, необходимо на выбранном уровне нагружения провести испытания нескольких образцов с последующим усреднением данных по долговечности. Значение ограниченного предела длительной прочности σ_t , входящее в формулу (9) для α или в формулу (18) для β , определяется из уравнения кривой длительной прочности для стандартных образцов материала, испытанных при одноосном нагружении, как значение, соответствующее усредненной долговечности трубчатых образцов, испытанных в базовом идентифицирующем эксперименте при одном из видов плоского напряженного состояния.

Заключительным этапом является расчет прогнозируемых долговечностей по формулам вида (12), (15), (16), (20) и (22) для соответствующих плоских напряженных состояний. При этом исходной информацией для расчетов прогнозируемых характеристик длительной прочности при плоском напряженном состоянии являются кривая длительной прочности, соответствующая одноосному нагружению стандартных образцов материала, и результаты единичного базового идентифицирующего эксперимента при плоском напряженном состоянии для одного из уровней нагружения. В расчетах эквивалентных напряжений принято предположение о том, что при постоянной температуре константы материалов, входящие в структуру критерия длительной прочности, не зависят от времени до разрушения и вида нагружения. При совпадающих знаках главных напряжений в качестве результатов идентифицирующего базового эксперимента использованы данные, полученные при нагружении внутренним давлением, и расчеты времени до разрушения осуществлялись затем не только для внутреннего давления, а также и для случаев нагружения внутренним давлением совместно с растяжением. При противоположных знаках главных напряжений константа материала была определена из опытов на чистое кручение, и затем была использована в расчетах для кручения совместно с растяжением.

Из рассмотрения графиков, представленных на рисунках, следует, что прогнозируемые кривые длительной прочности в исследованных диапазонах долговечностей укладываются в 95%-ные доверительные области, для каждого из рассмотренных видов плоского напряженного состояния. С учетом этого можно констатировать удовлетворительное согласование расчетного прогноза с экспериментальными данными.

Выводы. Сформулированы необходимые этапы методики прогнозирования длительной прочности при плоском напряженном состоянии и приведены примеры её

реализации для плоского напряженного состояния с совпадающими знаками главных напряжений, а также для случая, когда знаки главных напряжений противоположны. Показана возможность определения констант материала посредством базового идентифицирующего эксперимента при сравнительно легко реализуемых видах плоского напряженного состояния, а именно: при внутреннем давлении для совпадающих знаков главных напряжений и при чистом кручении в случае противоположных знаков главных напряжений. Использование, полученных таким образом значений констант, в расчетах для плоских напряженных состояний с другим соотношением главных напряжений, отличным от того, которое имело место в базовом эксперименте, позволяет получать приемлемые оценки долговечностей. Удовлетворительное согласование расчетных оценок долговечности с экспериментальными данными свидетельствует в пользу обоснованности сделанного предположения о независимости константы материала α или β от времени до разрушения и вида нагружения при постоянной температуре.

Список литературы

1. Grigorenko Ya. M. and Kharitonova L. V. Stress Analysis of Flexible Noncircular Cylindrical Shell with Hinged Edges for Different Critical Loads // International Applied Mechanics.- 2006.- Vol.42, N 2, pp. 162-168.
2. Golub V.P. Derivation of creep long-term fracture criteria under plane state of stress. International Journal of Mechanical Sciences 2005; 47:1807
3. Голуб В.П., Крижановский В.И., Русинов А.А. Смешанный критерий длительного разрушения в условиях ползучести при плоском напряженном состоянии // Прикладная механика. – 2003. –Том 39, № 5. – С. 64 – 75.
4. Кац Ш.Н. Исследование длительной прочности углеродистых труб // Теплоэнергетика.- 1956.- № 11.- С. 37-40.
5. Кисилевский В.Н., Чуприна А.Ф., Осасюк В.В. Исследование длительной прочности стали ЭИ847 при сложном напряженном состоянии и переменных температурах // В сб.: Термопрочность материалов и конструктивных элементов. Вып. 4.- Киев : Наук. Думка, 1967.- С. 209-213.
6. Лебедев А.А. Экспериментальное исследование длительной прочности хромоникелетитановой стали в условиях двухосного растяжения // В сб.: Термопрочность материалов и конструктивных элементов.- Киев : Наукова думка, 1965.- С. 77-83.
7. Трунин И.И. Оценка сопротивления длительному разрушению и некоторые особенности деформирования при сложном напряженном состоянии // ПМТФ.- 1963.- № 1.- С. 110-114.