ОБ ОЦЕНКЕ ВРЕМЕНИ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Ю.В. НЕМИРОВСКИЙ

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, Новосибирск, Россия

e-mail: shulgin@itam.nsc.ru

Работа основных элементов конструкций теплоэлектростанций, ядерных и парогазовых энергетических установок, химических реакторов, аэро- и космических объектов характеризуется длительным воздействием высоких уровней температурно-силового нагружения, обуславливающих развитие неконтролируемых процессов ползучести и деградации конструкционных материалов, которые могут в определенный момент привести к тяжелым катастрофическим последствиям. В аналогичных эксплуатационных ситуациях находятся многие объекты промышленного и гражданского строительства, гидростатические сооружения, действующие системы нефте- газопроводов, продуктопроводов химических производств и многие другие ответственные объекты. Прогнозирование их длительной работоспособности является исключительно важной проблемой.

Сложность ее практического решения заключается прежде всего в том, что физическая реализация экспериментов на моделях объектов в условиях, соответствующих номинальным эксплуатационным режимам затруднительна или невозможна, поскольку продолжительность таких испытаний может составлять сотни тысяч часов и более. Наиболее распространенными являются длительные испытания на ползучесть стандартных образцов различных конструкционных материалов, которые показывают, что в общем случае явление ползучести проявляется в виде трех характерных стадий: стадия упрочнения (неустановившаяся ползучесть), нелинейное вязкое течение (установившаяся ползучесть) и стадия ускоренной ползучести (предразрушение). В настоящее время существует большое количество моделей, аппроксимирующих зависимости между деформациями ползучести, напряжениями и температурой для различных групп материалов на различных стадиях ползучести [1–5]. При этом для описания третьей стадии ползучести часто используются различные гипотезы, связанные с параметром повреждаемости [1, 6] и учитывающие индивидуальные деформационные свойства конструкционных материалов [7, 8]. Однако громоздкость некоторых из них и узкие границы применимости часто затрудняют их практическое использование. Попытки построения единых аппроксимаций на всем диапазоне ползучести оказались мало состоятельными в связи с хорошо известной [2] нестабильностью коэффициентов таких чрезмерно общих уравнений и их статистической неустойчивостью. Кроме того, с позиций формальной статистики определение большого числа коэффициентов требует выполнения большой программы длительных испытаний при неизбежном разбросе данных вследствие разброса свойств материала и неточности соблюдения режимов испытаний. Таким образом, последующие расчеты будут опираться на не слишком достоверную входную информацию.

При расчетах сложных сооружений возникают следующие затруднения: а) сложность конфигурации сооружений и рассмотрение всей исследуемой области приводит к задачам большой размерности, что существенно повышает трудоемкость счета; б) при высоких уровнях нагружения и нагрева требуется использование итерационных процедур решения нелинейных задач “мгновенного” (начального) состояния, возникающих из-за термочувствительности материалов и появления пластических деформаций, которые порождают определенные ошибки входной информации для последующих решений задач ползучести; в) задачи нелинейной ползучести решаются шагами по временным слоям [1, 9, 10] с учетом всей истории нагружения, что, наряду с большой трудоемкостью, может приводить с течением времени к нестабильности результатов за счет накапливаемых ошибок; д) эксперименты длительной прочности образцов часто характеризуются большим разбросом данных, составляющим десятки и сотни процентов и перенос этих данных на конструкции, работающие в условиях сложного напряженного состояния носит эвристический характер. По видимому, именно вследствие вышеперечисленных сложностей в литературе отсутствует единообразный подход, позволяющий сравнительно простым способом получить оценки времен допустимой эксплуатации разнообразных конструкций при длительном воздействии температур и нагрузок.

В данной работе в основу разработки соответствующего метода расчета положим концепцию жизнеспособности материала, за меру которой (как паспортную характеристику) примем площадь стандартной диаграммы растяжения образца при заданном уровне температуры. Такие диаграммы известны практически для любого конструкционного материала или могут быть легко получены при кратковременных испытаниях по стандартным методикам. Концепция жизнеспособности материала заключается в том, что для разрушения материала (независимо от условий нагружения) необходимо затратить работу, равную вышеупомянутой паспортной характеристике A_*. Таким образом, при длительном нагружении образца материала заданной нагрузкой N и при заданном уровне температуры T, критерий длительной прочности можно представить в форме

$$A_0 + A_p = A_*(T), \tag{1}$$

$$A_0 = \int_0^{\bar{\varepsilon}_0} f(\bar{\varepsilon}, T)\, d\bar{\varepsilon},\ (\varepsilon_0 \le \varepsilon_*),\ A_* = \int_0^{\bar{\varepsilon}_*} f(\bar{\varepsilon}, T)\, d\bar{\varepsilon},\ \bar{\varepsilon} = \varepsilon - \alpha T,$$

$$\bar{\varepsilon}_0 = \varepsilon_0 - \alpha T,\ \bar{\varepsilon}_* = \varepsilon_* - \alpha T,\ \sigma = N / F.$$

Здесь: ε — деформация, ε_0 — уровень деформаций, достигнутый при нагреве T и “мгновенном” нагружении усилием N, ε_* — предельная деформация мгновенного разрушения образца, α — коэффициент линейного температурного расширения материала, $\sigma = f(\bar{\varepsilon}, T)$ — функция, определяющая паспортную диаграмму растяжения материала при данной температуре, A_p — работа, накопленная в процессе ползучести к моменту разрушения:

$$A_p = \int_0^{t_1} \sigma \dot{p}_1 dt + \int_{t_1}^{t_2} \sigma \dot{p}_2 dt + \int_{t_1}^{t_*} \sigma \dot{p}_3 dt, \tag{2}$$

t_1, t_2 — времена окончаний первой и второй фазы ползучести, t_* — время разрушения, $\dot{p}_1, \dot{p}_2, \dot{p}_3$ — скорости деформации ползучести, соответственно, на первом, втором и третьем участке кривой ползучести. Если на каждом из участков ползучести законы ползучести установлены в форме

$$\dot{p}_1 = \varphi_1(\sigma, T, t),\ \dot{p}_2 = \varphi_2(\sigma, T),\ \dot{p}_3 = \varphi_3(\sigma, T, t), \tag{3}$$

то из условий

$$\varphi_1(\sigma, T, t_1) = \varphi_2(\sigma, T) = \varphi_3(\sigma, T, t_2)$$

можно получить зависимости

$$t_1 = \Psi_1(\sigma, T),\ t_2 = \Psi_2(\sigma, T). \tag{4}$$

Подставляя (3) и (4) в (2) и далее в (1), можно определить время разрушения

$$t_* = \Psi_3(\sigma, T, \varepsilon_0). \tag{5}$$

Таким образом, в рамках предлагаемой концепции для определения времени разрушения необходимо знание “мгновенной” диаграммы растяжения и законов ползучести (3) и нет необходимости в проведении испытаний до полного разрушения, которые дают обычно очень большой разброс.

Учитывая, что зависимости (3) на разных участках ползучести характеризуются различной степенью разброса экспериментальных данных (наибольшей стабильностью характеризуются зависимости установившейся ползучести), можно, не ухудшая существенно достоверности результатов, обработать экспериментальные данные на первом и третьем участках ползучести так, чтобы кривые (3) в плоскости $p \sim t$ заменить хордами, проходящими через точки $t = (0, t_1)$ и $t = (t_2, t_*)$. Тогда вместо (3) будем иметь приближенные зависимости

$$\dot{p}_1 = \bar{\varphi}_1(\sigma, T),\ \dot{p}_2 = \varphi_2(\sigma, T),\ \dot{p}_3 = \bar{\varphi}_3(\sigma, T). \tag{6}$$

В таком случае функция Ψ_3 в равенстве (5) будет иметь вид

$$\Psi_3 = \frac{A_* - A_0 - \sigma\left[(\bar{\varphi}_1 - \varphi_2)\Psi_1 + (\varphi_2 - \bar{\varphi}_3)\Psi_2\right]}{\sigma \bar{\varphi}_3}. \tag{7}$$

Если в качестве приближения использовать продолжение участка установившейся ползучести на весь отрезок $0 \le t \le t_*$, то для Ψ_3 будем иметь простое выражение

$$\Psi_3 = \frac{A_* - \sigma\varphi_4}{\sigma\varphi_2}, \tag{8}$$

где $p_0 = \varphi_4(\sigma, T)$ — значение деформации ползучести, отсекаемой этим продолжением на оси $t = 0$.

Предлагаемый подход позволяет естественным образом объяснить наблюдаемые в экспериментах точки перелома на кривых длительной прочности [1–5]: выражение A_0 при мгновенном нагружении будет различным в случае упругого и пластического деформирования. Он позволяет учитывать термочувствительность материалов при высоких уровнях температур. В случае стационарного нагружения и нагрева вследствие постоянства величин A_0, A_* из равенства (1) следует, что работа деформации ползучести A_p, накопленная к моменту разрушения, должна быть при заданной температуре константой материала, что находит подтверждение при испытаниях ряда материалов до разрушения [6, 7, 11].

В случае термо- и циклически стабильных материалов длительность эксплуатации при совместном действии стационарных и циклически изменяющихся нагрузок и температур можно определить с помощью формулы

$$A_0 + \sum_{i=1}^{k} dA_i^{(n)} + \sum_{j=1}^{m} dA_j^{(c)} + \int_{t_m}^{t_*} \sigma\dot{p}dt = A_*, \tag{9}$$

где: A_0 — работа при мгновенном нагружении, $dA_i^{(n)}$ — работа пластических деформаций на i-ом цикле, $dA_j^{(c)}$ — работа деформаций ползучести на j-ом цикле,

$$dA_i^{(n)} = \int_{\varepsilon_{0i-1}}^{\varepsilon_{0i}} \sigma d\varepsilon,\ dA_j^{(c)} = \int_{t_{j-1}}^{t_j} \sigma\dot{p}dt.$$

При циклическом изменении температур величину A_* следует выбрать при среднем уровне температурного цикла.

В случае сложного напряженного состояния для изотропных материалов в качестве эквивалентных мер напряжений, деформаций и скоростей ползучести могут быть использованы, соответственно, интенсивность напряжений

$$\sigma_u = \frac{1}{\sqrt{6}}\left[(\sigma_{11}-\sigma_{22})^2 + (\sigma_{22}-\sigma_{33})^2 + (\sigma_{33}-\sigma_{11})^2 + 6\left(\sigma_{12}^2+\sigma_{23}^2+\sigma_{31}^2\right)\right]^{1/2},$$

интенсивность деформаций сдвига

$$\varepsilon_u = \sqrt{\frac{2}{3}}\left[(\varepsilon_{11}-\varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{22}-\varepsilon_{33})^2 + (\varepsilon_{33}-\varepsilon_{11})^2 + 6\left(\varepsilon_{12}^2+\varepsilon_{23}^2+\varepsilon_{31}^2\right)\right]^{1/2}$$

и интенсивность скоростей деформаций сдвига при ползучести

$$\dot{p}_u = \sqrt{\frac{2}{3}}\left[(\dot{p}_{11}-\dot{p}_{22})^2 + (\dot{p}_{22}-\dot{p}_{33})^2 + (\dot{p}_{33}-\dot{p}_{11})^2 + 6\left(\dot{p}_{12}^2+\dot{p}_{23}^2+\dot{p}_{31}^2\right)\right]^{1/2},$$

σ_{ij}, ε_{ij}, $\dot{p}_{ij}$, $(i,\ j = 1,\ 2,\ 3)$ — компоненты тензоров напряжения, деформации “мгновенного” состояния и деформации ползучести. Тогда время разрушения может быть определено из равенства (1), если в нем принять

$$A_0 = \int_0^{\varepsilon_{0u}} f(\varepsilon_u, T)\,d\varepsilon_u,\ (\varepsilon_{0u} \le \varepsilon_*),\ A_p = \int_0^{t_1}\sigma_u\dot{p}_{1u}dt + \int_{t_1}^{t_2}\sigma_u\dot{p}_{2u}dt + \int_{t_2}^{t_*}\sigma_u\dot{p}_{3u}dt.$$

При полном решении задачи к этим соотношениям необходимо дополнительно прибавить общеизвестные [1, 12, 13] статические уравнения равновесия, кинематические соотношения Коши и соотношения связи между напряжениями и деформациями, описывающие термоупругие, термопластические соотношения и соотношения ползучести, и, при необходимости, уравнения теплопроводности. Поскольку в общем случае величины A_0, A_p будут функциями координат точки $\overline{x} \in V$ (*V* — объем, занимаемый рассматриваемым телом), то условие возникновения разрушения конструкции в случае сложных напряженно-деформированных и тепловых полей следует сформулировать в форме

$$\sup_{\overline{x}\in V}\left[A_0\left(\overline{x}\right)+A_p\left(\overline{x}\right)-A_*\left(T\left(\overline{x}\right)\right)\right]=0. \qquad (10)$$

В качестве простейшего примера рассмотрим задачу об определении времени разрушения цилиндрической оболочки радиуса *R* и толщины $\delta \ll R$, нагруженной осевой силой *N*, внутренним давлением *q* и крутящим моментом *M*. В случае достаточно длинной оболочки поле напряжений в ней можно считать однородным и связанным с нагрузками следующими зависимостями

$$\sigma_{11}=\frac{N}{2\pi R\delta},\ \sigma_{22}=\frac{qR}{\delta},\ \sigma_{12}=\frac{M}{2\pi R^2\delta},\ \sigma_u=\sqrt{\sigma_{11}^2-\sigma_{11}\sigma_{22}+\sigma_{22}^2+3\sigma_{12}^2}. \qquad (11)$$

Если уровень нагрузок таков, что $\sigma_u \le \sigma_0\left(T\right)$ (“мгновенное” упругое деформирование), то, считая для простоты материал несжимаемым (коэффициент Пуассона $\nu = 0.5$), будем иметь

$$A_0=\frac{\sigma_u^2}{2E\left(T\right)},\ \sigma_u\le\sigma_0, \qquad (12)$$

σ_0 — предел текучести, *E* — модуль упругости. Пренебрегая первым участком ползучести, предполагая, что в установившемся режиме ползучесть характеризуется степенным законом $\dot{p}_u=C\left(T\right)\sigma_u^{n(T)}$ и продлевая это соотношение до разрушения, для времени разрушения получим соотношение

$$t_*=\frac{\left(A_*-A_0\right)\left(n+1\right)}{C\sigma_u^{n+1}}. \qquad (13)$$

Если при мгновенном нагружении оболочка перейдет в пластическое состояние ($\sigma_* > \sigma_u > \sigma_0$) и диаграмма растяжения будет кусочно-линейной, то время разрушения снова будет определяться формулой (13), если для A_0 вместо (12) принять выражение

$$A_0=\frac{\sigma_0^2}{2E}+\frac{\left(\sigma_u-\sigma_0\right)^2}{2E_k\left(T\right)},\ \sigma_0\left(T\right)\le\sigma_u\le\sigma_*\left(T\right), \qquad (14)$$

E_k — модуль упрочнения, σ_* — мгновенный предел прочности. В этом случае для A_* будем иметь выражение

$$A_*=\frac{\sigma_0^2}{2E}+\frac{\left(\sigma_*-\sigma_0\right)^2}{2E_k\left(T\right)}. \qquad (15)$$

Таким образом, время можно определить, опираясь на известные для большинства материалов характеристики: модули упругости и упрочнения, предел упругости, предел прочности и характерные постоянные закона установившейся ползучести.

Большинство крупноразмерных газгольдеров, хранилищ жидких и сыпучих веществ имеют форму оболочек вращения. Если пренебречь краевыми эффектами, то напряжения в них можно представить в форме [14]

$$\sigma_{11}=\frac{q\left(\varphi\right)R_1}{h\left(\varphi\right)}-\frac{R_1}{R_2}\sigma_{22},\ \sigma_{22}=\frac{Q}{2\pi R_2 h\left(\varphi\right)\sin^2\varphi},\ \sigma_{12}=0, \qquad (16)$$

где φ — угол между нормалью $\vec{n}$ и осью вращения меридиональной кривой оболочки вращения, *Q* — осевая равнодействующая осевых нагрузок, *h* — толщина оболочки, R_1, R_2 — радиусы кривизны меридионального и нормального сечений оболочки. В случае тонкой оболочки температуру можно считать равномерно распределенной по толщине. Тогда при выполнении неравенства

$$\max_{\varphi}\left[\sigma_u(\varphi)-\sigma_0(T)\right]\le 0 \tag{17}$$

оболочка при мгновенном нагружении будет находиться в упругом состоянии и выражение для $A_0(\varphi)$ определяется из равенства (12). Время разрушения t_* можно определить из равенства

$$\sup_{\varphi}\left[A_0+\frac{C(T)\sigma_u^{n+1}}{n+1}t_*+\alpha T(\sigma_{11}+\sigma_{22})-A_*(T)\right]=0, \tag{18}$$

где A_0 определяется выражением (12). При нагрузках, нарушающих неравенство (17) при мгновенном нагружении, часть оболочки будет находиться в упругом состоянии, а другая часть — в пластическом. Тогда, принимая для A_0, соответственно, выражения (12) и (14), из равенства (18) получим значения t_{1*} и t_{2*}. Время допустимой эксплуатации определяется равенством $t_*=\min(t_{1*},\, t_{2*})$.

Предложенный подход позволяет решать задачу о рациональной конструкции для заданного времени безопасной эксплуатации. Под такой конструкцией будем понимать конструкцию, разрушающуюся в заданное время t_* одновременно во всех точках. Соответствующее распределение толщины $h(\varphi)$ для рассматриваемых оболочек может быть найдено из равенства

$$A_0+\frac{\sigma_u^{n+1}}{n+1}t_*+\alpha T(\sigma_{11}+\sigma_{22})-A_*(T)=0.$$

В частном случае полусферического сосуда ($R_1=R_2=R$), заполненного жидкостью с удельным весом γ, будем иметь

$$\sigma_{11}=\frac{\gamma R^2}{3h}\Psi_1(\varphi),\ \sigma_{22}=\frac{\gamma R^2}{3h}\Psi_2(\varphi),\ \sigma_u=\frac{\gamma R^2}{3h}\sqrt{\Psi_1^2-\Psi_1\Psi_2+\Psi_2^2},$$

$$\Psi_1=\frac{1-\cos^3\varphi}{\sin^2\varphi},\ \ \Psi_2=3\cos\varphi-\Psi_1.$$

Для торообразного баллона ($R_1=a,\ R_2=(a+b\sin\varphi)/\sin\varphi$), нагруженного внутренним равномерно распределенным давлением q, будем иметь

$$\sigma_{11}=\frac{qa}{2h}\Psi_1(\varphi),\ \sigma_{22}=\frac{qa}{2h},\ \sigma_u=\frac{qa}{2h}\sqrt{\Psi_1^2-\Psi_1+1},\ \Psi_1(\varphi)=\frac{2b+a\sin\varphi}{b+a\sin\varphi},$$

где: $2a$ — диаметр тора, $2b$ — диаметр поперечного сечения тора.

Для газгольдера в форме цилиндра с полусферическими днищами интенсивность напряжений в цилиндрической и сферической частях будет равна, соответственно

$$\sigma_u=\frac{\sqrt{3}}{2}\frac{qR}{\delta},\ \sigma_u=\frac{qR}{2h},$$

q — давление газа. В случае $\delta/h=\sqrt{3}$ время разрушения будет одинаковым в обеих частях конструкции и в зависимости от уровня давления будет определяться формулами (13), (14) или (13), (15). Время допустимой эксплуатации t^* можно определить путем замены $A_*\to A^*=kA_*$ ($k<1$ — коэффициент надежности). Предлагаемый подход позволяет связать прогноз допустимого времени эксплуатации с процедурами контрольных замеров текущего состояния конструкций. Например, контроль состояния магистральных трубопроводов определяется путем периодических замеров диаметров трубопровода [15]. Тогда предельное по эксплуатации ($t = t^*$) приращение диаметра трубопровода будет определяться формулой

$$\frac{\Delta R^*}{R} = \alpha T + \frac{\sigma}{E} + \frac{\left(kA_* - \sigma^2 / 2E\right)}{\sigma} \quad \text{при } \sigma \le \sigma_0$$

или

$$\frac{\Delta R^*}{R} = \alpha T + \frac{\sigma}{E_л} + \sigma_0\left(\frac{1}{E} - \frac{1}{E_k}\right)\frac{\left(kA_* - \sigma^2 / 2E - \left(\sigma - \sigma_0\right)^2 / 2E_k\right)}{\sigma}$$

при $\sigma \ge \sigma_0$, где $\sigma = qR / \delta$. При расчете для простоты использована мгновенная кусочно-линейная диаграмма растяжения и закон установившейся ползучести (E — модуль упругости, E_k — модуль упрочнения, σ_0 — предел текучести). При низких уровнях нагрузок и температур работой мгновенной деформации можно пренебречь по сравнению с общей работой, накапливаемой к моменту разрушения. Тогда для расчетов может быть использован упрощенный метод [16], опирающийся лишь на закон деформирования при установившейся ползучести.

Литература

[1] Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций.— М.: Наука, 1966.—752 с.
[2] Лепин Г.Ф. Ползучесть металлов и жаропрочность.— М.: Металлургия, 1976.— 344 с.
[3] Булыгин И.П. и др. Атлас диаграмм растяжения при высоких температурах, кривых ползучести и длительной прочности сталей и сплавов для двигателей.— М.: Оборонгиз, 1953.— 173 с.
[4] Ковпак В.И. Прогнозирование жаропрочности металлических материалов.— Киев: Наукова думка, 1981.— 240 с.
[5] Геминов В.Н. Ползучесть металлов и сплавов/“Итоги науки и техники”, ВИНИТИ, Металловедение и термическая обработка.— М.: ВИНИТИ, 1984.— 97 с.
[6] Никитенко А.Ф. Ползучесть и длительная прочность металлических материалов.— Новосибирск: Изд-во Ин-та гидродинамики СО РАН и НГАСУ, 1997.— 278 с.
[7] Соснин О.В., Торшенов Н.Г. О ползучести и разрушении титанового сплава ОТ–4 в интервале температур 400–500 °С//Проблемы прочности.— 1972.— № 7.— С. 55–59.
[8] Еремин Ю.А., Радченко В.П., Самарин Ю.П. Расчет индивидуальных деформационных свойств элементов конструкций в условиях ползучести//Машиноведение.— 1984.— № 1.—С. 67–72.
[9] Бурлаков А.В., Львов Г.И., Морачковский О.К. Длительная прочность оболочек.— Харьков: Вища школа.— 1981.— 102 с.
[10] Ползучесть элементов машиностроительных конструкций/под редакцией чл.-к. АН УССР А.Н. Подгорного.— Киев: Наукова думка, 1984.— 262 с.
[11] Соснин О.В., Горев Б.В., Никитенко А.Ф. Энергетический вариант теории ползучести.— Новосибирск: Ин-т гидродинамики— 95 с.
[12] Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести.— М.: Машиностроение, 1968.— 400 с.
[13] Соколовский В.В Теория пластичности.— М.: Высшая школа, 1969.— 608 с.
[14] Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки.— М.: Физматгиз, 1963.— 635 с.
[15] Зверьков В.В., Костовецкий Д.Л., Кац Ш.Н. Расчет и конструирование трубопроводов.— Л.: Машиностроение.— 1979.— 246 с.
[16] Немировский Ю.В. О времени эксплуатации и разрушения конструкций в условиях ползучести//Прикладная механика.— 1970.— Т. VI, вып. 3.— С. 47–54.