

## Прогнозирование высокотемпературной длительной прочности поврежденных конструкций

М. М. Алексюк

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

*Предлагается метод аналитической оценки высокотемпературной длительной прочности конструкций с повреждениями сплошности материала, которые являются концентраторами напряжений. Рассматриваются процессы, связанные с образованием диффузионных пор. Диффузионные процессы в металлах существенно усиливаются с повышением температуры и напряжений.*

**Ключевые слова:** длительная прочность, повреждение материала, концентрация напряжений, диффузионная пора, время, температура.

**Введение.** В данной работе предлагается модель разрушения поврежденных конструкций при длительном действии нагрузки, влияние которой увеличивается в местах повреждения сплошности материала. Рассматриваются процессы, предшествующие разрушению материала при длительном нагружении, и их ускорение с повышением температуры и напряжений [1].

Основным фактором, влияющим на ресурс прочности конструкции при любых режимах нагружения, является концентрация напряжений [2].

Известны механизмы и методы расчета концентрации напряжений для дефектов сплошности материала (надрезы, отверстия, пазы [3]), полученных на конструкционном и технологическом уровне, а также внутри структуры материала, где в качестве концентраторов выступают скопления дислокаций и микротрещины [4, 5]. Действие структурных механизмов концентрации зависит от физических свойств материала и от факторов, которые влияют на структуру (температура, время, радиация, напряжение) [6].

При различных видах нагружения и разных повреждениях действуют одни и те же механизмы концентрации. Нами рассматривается модель расчета прочности конструкций, поврежденных полыми дефектами.

Для технических расчетов прочности целесообразно ограничиться конструкционными механизмами концентрации напряжений, не затрагивая структурных концентраторов. Тогда предельным напряжением разрушения материала вблизи механического повреждения будет предел прочности материала при статическом нагружении –  $\sigma_{\text{в}}$ , так как в этом показателе, полученном экспериментально, уже учтено действие структурной концентрации напряжений. Влияние температуры на статический предел прочности определяется известными методами [3].

Прочность конструкции при длительном нагружении  $\sigma_{t(T)}$  зависит от действия соответствующих механизмов концентрации напряжений, температуры в местах повреждения и определяется следующим соотношением:

$$\sigma_{t(T)} = \sigma_{\text{в}(T)} / K_0, \quad (1)$$

где  $\sigma_{в(T)}$  – статический предел прочности материала, зависящий от температуры;  $K_0$  – обобщенный коэффициент концентрации напряжений.

Концентраторы увеличивают напряжение с помощью нескольких механизмов. Рассмотрим два основных, которые связаны с формой и размерами повреждений. Действие одного из механизмов концентрации обусловлено особенностями взаимодействия между волнами напряжений и свободной поверхностью дефектов. Волны отражаются от поверхности полых дефектов с потерей полуволны. Иными словами, напряжение растяжения преобразуется в напряжение сжатия, которое должно перемещать за собой отражающую поверхность. Однако этому препятствует сопротивление материала на боковых, по отношению к фронту волны, поверхностях дефекта, принимая на себя дополнительную нагрузку, которая зависит от соотношения между отражающей и боковыми поверхностями дефекта. Для них величина концентрации напряжения, выраженного в виде коэффициента  $K_l$ , составляет [2]

$$K_l = 1 + \sqrt{l/2r}, \quad (2)$$

где  $l$  – длина дефекта, определяемая путем измерения;  $r$  – длина зоны действия усиленных напряжений, вычисляемая расчетом, на которую влияют форма и размеры боковой поверхности дефекта, деформативность материала, напряженное состояние, температура и т.д. (рис. 1).

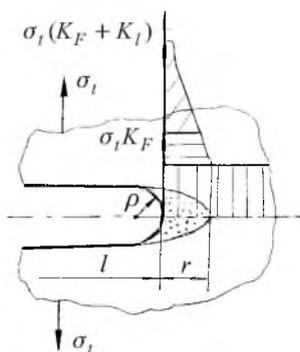


Рис. 1. Распределение напряжений в полном дефекте материала.

В общем случае [5]

$$r = \rho_0(1 + \varepsilon_c) \exp\left(\frac{\sigma_{в(T)}}{\sigma_{т(T)}} - 1\right), \quad (3)$$

где  $\rho_0$  – кривизна боковой поверхности дефекта;  $\varepsilon_c$  – предельная деформация материала;  $\sigma_{т(T)}$  – предел текучести.

С ростом хрупкости материала значение  $r$  уменьшается. При хрупком разрушении, когда  $\sigma_{в} \approx \sigma_{т}$ , имеем  $r \approx \rho$ . Этот механизм универсальный. Он действует во всех полых дефектах материала.

Предел прочности  $\sigma_{в(T)}$  зависит от температуры и определяется в соответствии с соотношением [3]

$$\sigma_{в(T)} = \sigma_{в(300)} \exp\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{300}\right), \quad (4)$$

где  $\sigma_{в(300)}$  – табличное значение предела прочности при комнатной температуре.

Предел текучести  $\sigma_{т(T)}$  также зависит от температуры и условий нагружения и определяется [5] следующим уравнением:

$$\sigma_{т(T)} = \beta(B\dot{\epsilon}G^2T)^{1/3} \exp\frac{U_0}{3kT}, \quad (5)$$

где  $\beta = \sigma_1/\tau_{\max}$  – коэффициент “жесткости” напряженного состояния, характеризующийся соотношением между наибольшими нормальными и касательными напряжениями;  $B$  – коэффициент, характеризующий деформационную способность материала;  $\dot{\epsilon}$  – скорость пластической деформации;  $G$  – модуль сдвига материала;  $T$  – рабочая температура материала;  $U_0$  – энергия активации пластической деформации;  $k$  – постоянная Больцмана.

Другой механизм концентрации напряжений обусловлен уменьшением напряженного сечения конструкции за счет пустотелого дефекта, препятствующего прохождению волн напряжения. Действие этого механизма учитывается с помощью коэффициента концентрации напряжений  $K_F$ :

$$K_F = \frac{1}{1 - f_s}, \quad (6)$$

где  $f_s$  – площадь сечения дефектов относительно общей площади сечения.

Однако при длительном нагружении дефекты появляются вследствие образования пустотелых диффузионных пор вдоль границ зерен внутри структуры напряженного материала. Эти дефекты также уменьшают напряженные сечения в локальной зоне уже действующих напряжений и приводят к дополнительной концентрации (рис. 1):

$$f_s = f_d + f_D. \quad (7)$$

Здесь  $f_d, f_D$  – площади сечений дефектов материала вследствие механических повреждений и физического образования диффузионных пор в виде отношения  $f_d = F_d/F_0$ , где  $F_d$  и  $F_0$  – площади сечений дефектов материала и конструкции, определяемые по данным технических измерений; значение  $f_D$  находится расчетным путем.

При расчете  $f_D$  необходимо учитывать закономерности образования диффузионных пор, скорость их роста в зависимости от температуры, уровня напряжений и времени действия нагрузок. Применяются аналитические методы, созданные на основе анализа диффузионных процессов в материале, особенно при высоких температурах [4, 5]. Поскольку диффузия протекает более интенсивно в местах с наибольшим напряжением, каковыми являются границы зерен, в них происходит преобразование избыточной

энергии границ в поверхностную энергию диффузионных пор. Этот процесс наиболее активен в местах контакта двух и более зерен [4]. Процесс роста диффузионных пор существенно усиливается с увеличением напряжения в вершинах дефектов.

В поликристаллических металлах поры растут вследствие диффузионного перемещения вакансий в направлении действия наибольших растягивающих сил. Концентрация вакансий образует поры овальной формы на границах зерен. Все диффузионные поры независимо от их происхождения имеют два общих свойства: свободные поверхности пор являются сферическими сегментами и их ориентация относительно границ зерна обеспечивает равновесное натяжение внутренних поверхностей. Геометрические характеристики пор показаны на рис. 2 [4].

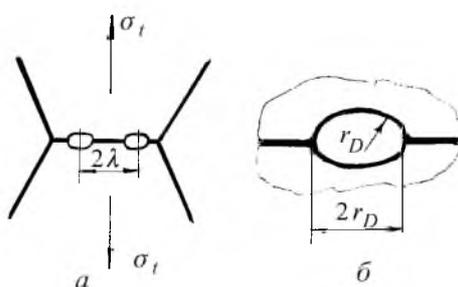


Рис. 2. Расположение (а), форма и размеры (б) диффузионных пор на границах зерен.

В процессе роста поры не теряют свою равновесную форму. Площадь пор на границе кристалла равна:

$$f_D = \pi N_D r_D^2, \quad (8)$$

где  $N_D = 1/\pi\lambda^2$  – относительная плотность диффузионных пор на единицу площади границы зерен;  $\lambda$  – расстояние между порами на границе зерна;  $r_D$  – радиус сферической поверхности поры.

Подставив  $N_D$  в уравнение (8), получим значение относительной площади пор в виде

$$f_D = (r_D/\lambda)^2. \quad (9)$$

Скорость роста пор зависит от плотности потока вакансий к поверхности поры и определяется свойствами структуры материала, температурой и уровнем напряжений [4]:

$$\frac{dr_D}{dt} = \frac{2\pi D_B \Omega z (\sigma_w K_l - \sigma_0)}{k T r_D \lambda}, \quad (10)$$

где  $D_B$  – коэффициент зернограницной диффузии;  $z$  – площадь границы зерна, способного диффундировать;  $\Omega$  – атомный объем;  $\sigma_w$  – рабочее напряжение;  $\sigma_0 = \gamma/r_0$  – приведенное поверхностное натяжение.

После интегрирования уравнения (10) при начальных условиях  $T = 0$ ,  $r_D = 0$  определяется зависимость размера поры от времени действия и уровня нагрузки, температуры и структурных свойств материала:

$$r_D = \left( \frac{4\pi D_B \Omega z (\sigma_w K_l - \sigma_0) t}{kT\lambda^2} \right)^{1/2}. \quad (11)$$

Подставив  $r_D$  уравнение (9), определим относительную площадь диффузионных пор:

$$f_D = \frac{4\pi D_B \Omega z (\sigma_w K_l - \sigma_0) t}{kT\lambda^3}. \quad (12)$$

Значение  $f_D$  увеличивается пропорционально времени и существенно зависит от температуры, действие которой определяет диффузионную активность материала. Наиболее эффективным температурно-чувствительным фактором является коэффициент зернограничной диффузии  $D_B$  [4]:

$$D_B = D_{300} \exp\left(-\frac{U_D}{kT}\right), \quad (13)$$

где  $D_{300}$  – коэффициент диффузии при  $T = 300$  К;  $U_D$  – энергия активации диффузии.

Для начала процесса образования диффузионных пор необходимо, чтобы напряжение в месте повреждения превышало уровень приведенного поверхностного натяжения  $\sigma_0$  материала. Диффузионные процессы являются преобладающим фактором образования повреждений при температурах выше  $0,5T_{пл}$ , когда коэффициент диффузии  $D_B$  увеличивается в  $10^5 \dots 10^9$  раза. Именно этот фактор доминирует при высокотемпературном разрушении в случае длительного нагружения.

После подстановки значений  $f_d$  и  $f_D$  в формулу (6) коэффициент концентрации напряжений  $K_F$  при образовании диффузионных пор равен

$$K_F = \frac{kT\lambda^3}{(1 - f_d)kT\lambda^3 - 4\pi D_B \Omega z (\sigma K_l - \sigma_0) t}. \quad (14)$$

В результате проведенных преобразований определены все характеристики концентрации напряжений в поврежденной конструкции. Влияние температуры и времени отображается в формуле для коэффициента  $K_F$ , который чувствителен к этим характеристикам. Совместное действие механизмов концентрации становится понятным из рис. 1, где показаны графики эпюр дополнительных напряжений. Совместное действие концентраторов напряжений  $K_0$  выражается формулой

$$K_0 = K_l + K_F. \quad (15)$$

Таким образом, конструкционная прочность при длительном напряжении  $\sigma_{t(T)}$  определяется с помощью уравнения (1) после подстановки в него значений, входящих в (2), (4), (14), (15).

Общее уравнение длительной прочности поврежденных конструкций  $\sigma_{t(T)}$  имеет вид

$$\sigma_{t(T)} = \frac{\sigma_{в(T)} [kT\lambda^3(1+f_d) + 4\pi D_B \Omega z (\sigma_w K_l - \sigma_0) t]}{K_l [kT\lambda^3(1+f_d) + 4\pi D_B \Omega z (\sigma_w K_l - \sigma_0) t] + kT\lambda^3}. \quad (16)$$

Уравнение (16) описывает зависимость прочности при длительном нагружении  $\sigma_{t(T)}$  от формы и размеров повреждения, времени действия нагрузки и температуры, которая существенно влияет на интенсивность диффузионного роста микродефектов внутри материала.

Для проверки правильности предложенных зависимостей был проведен расчет длительной прочности ряда поврежденных конструкций из разных материалов при различных температурных условиях нагружения. Расчетные данные сравнивались с результатами реальных испытаний конструкций на длительную прочность при разных температурных режимах. Были рассмотрены три материала на основе Fe, Ni, Mo [7]. В таблице представлены исходные расчетные и экспериментальные данные. При выполнении расчетов в качестве постоянных величин использовали следующие:  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;  $\sigma_0 = 0,3$  МПа;  $z = 10^{-6}$  м<sup>2</sup>;  $D_{300} = 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с;  $\varepsilon = 10^{-6}$  с<sup>-1</sup>;  $\beta = 0,5$ ;  $t = 3 \cdot 10^7$  с;  $\lambda = 12 \cdot 10^{-6}$  м.

Результаты расчетов длительной прочности поврежденных конструкций удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Различие в показателях не превышает 20%. Полученные результаты по определению длительной прочности поврежденных конструкций свидетельствуют, что основными параметрами, влияющими на величину  $\sigma_t$ , являются рабочие напряжения, форма и размеры дефектов, температура, при которой работает конструкция, и время действия нагрузки.

Уравнение (16) содержит основные нагружающие параметры, в том числе и время  $t$ . Решив его относительно  $t$  при рабочем напряжении  $\sigma_w$ , можно рассчитать срок безопасной работы поврежденной конструкции при заданном рабочем давлении или усилии.

Преобразованная формула (16) принимает вид

$$t = \frac{kT\lambda^3(1-f_d) \left( K_l + \frac{1}{1-f_d} - \frac{\sigma_{в(T)}}{\sigma_w} \right)}{4\pi D_B \Omega z (\sigma_w K_l - \sigma_0) \left( K_l - \frac{\sigma_{в(T)}}{\sigma_w} \right)}. \quad (17)$$

Если учитывать скорость роста дефектов, то можно прогнозировать долговечность конструкций, например действующих трубопроводов, резервуаров и т.п., работающих при высоких температурах.

**Результаты расчетов длительной прочности и оценка погрешности метода**

Сплав	$K_F$	$K_I$	$G \cdot 10^4$ , МПа	$\dot{\epsilon} \cdot 10^{-6}$ , с <sup>-1</sup>	$B \cdot 10^{-5}$ , Па · с/К	$\Omega \cdot 10^{-30}$ , м <sup>3</sup>	$U_0 \cdot 10^{-20}$ , Дж	$U_B \cdot 10^{-5}$ , Дж
ЭИ-415 (основа Fe)	1,20	2,5	7,8	1	13,25	11,8	3,50	280
ЭИ-607 (основа Ni)	1,50	3,3	7,5	1	10,30	10,9	3,50	150
ВМ-2 (основа Mo)	1,33	2,9	7,3	1	455,70	15,6	3,04	436
	$T$ , К	$\sigma_{в(T)}$ , МПа	$\sigma_{т(T)}$ , МПа	$D_B$ , м <sup>2</sup> /с	$\sigma_t^{рас}$ , МПа	$\sigma_t^{экс}$ , МПа	Погрешность прогноза, %	
ЭИ-415 (основа Fe)	300	850	740	10 <sup>-16</sup>	98	120	18	
	600	650	590	10 <sup>-10</sup>	85	96	12	
	900	440	420	10 <sup>-4</sup>	72	82	10	
ЭИ-607 (основа Ni)	300	1050	650	10 <sup>-16</sup>	106	132	20	
	600	850	580	10 <sup>-10</sup>	88	104	16	
	900	700	550	10 <sup>-4</sup>	74	84	12	
ВМ-2 (основа Mo)	300	750	680	10 <sup>-16</sup>	103	130	21	
	600	620	570	10 <sup>-10</sup>	96	116	17	
	900	570	480	10 <sup>-4</sup>	84	98	14	
	1200	400	290	10 <sup>-2</sup>	72	82	12	

К сожалению, автор не располагает сведениями о долговечности поврежденных конструкций длительного нагружения, что не позволяет сравнить их реальную долговечность с расчетной.

Особенность предлагаемого метода расчета длительной прочности заключается в том, что данные по структуре материалов используются в виде информации для расчета концентрации напряжений в дефектах.

**Резюме**

Запропоновано метод аналітичної оцінки високотемпературної тривалої міцності конструкцій з пошкодженнями суцільності матеріалу, які є концентраторами напружень. Розглядаються процеси, які впливають на виникнення дифузійних пор. Дифузійні процеси в металах суттєво підсилюються з підвищенням температури і напруги.

1. *Кривеньок В. В.* Прогнозирование длительной прочности тугоплавких металлов и сплавов. – Киев: Наук. думка, 1990. – 248 с.
2. *Knott G. F.* Fundamentals of Fracture Mechanics. – London: Butterworths, 1975. – 256 p.
3. *Махутов Н. А.* Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. – М.: Машиностроение, 1981. – 272 с.
4. *Ashby M. A.* Intergranular fracture during power law creep // Acta Met. – 1979. – 27, No. 10. – P. 1505 – 1518.

5. *Алексюк М. М.* Прогнозирование характеристик высокотемпературной прочности кристаллических материалов и конструкций из них / АН УССР. Ин-т пробл. прочности. – Препр. – Киев, 1990. – 32 с.
6. *Мешков Ю. Я.* Физические основы разрушения стальных конструкций. – Киев: Наук. думка, 1981. – 240 с.
7. *Троценко В. Т., Покровский В. В., Каплуненко В. Г.* Прогнозирование трещиностойкости теплозащитных сталей с учетом влияния размеров образцов. Сообщ. 2. Вязкое разрушение // Пробл. прочности. – 1997. – № 2. – С. 5 – 19.

Поступила 20. 12. 2001