

УДК 620.16

А. А. Александров

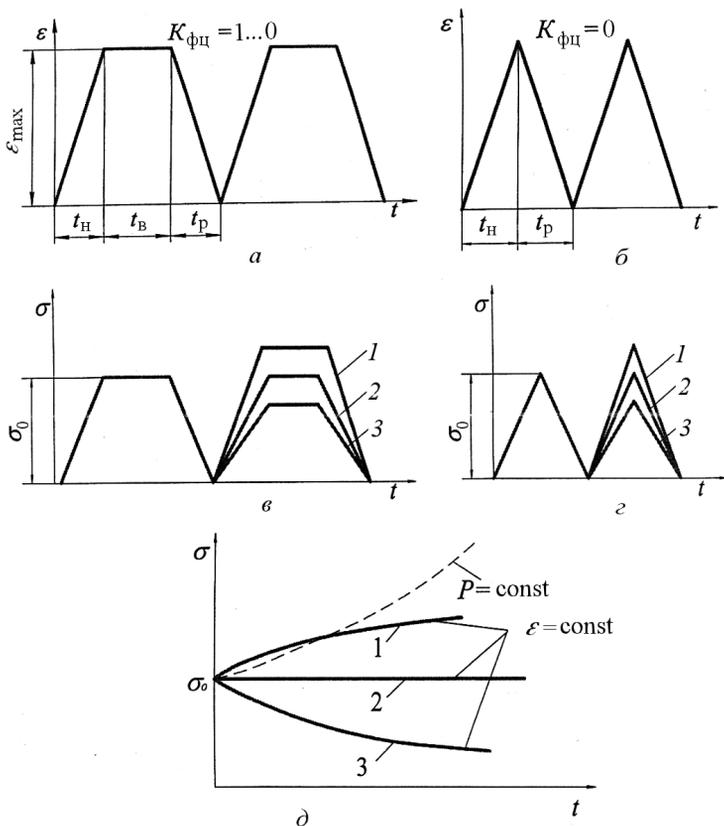
**ОЦЕНКА СКОРОСТИ МЕХАНО-ХИМИЧЕСКОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ОБРАЗЦОВ ПРИ ПОВТОРНО-СТАТИЧЕСКОМ ИЗГИБЕ<sup>1</sup>***Приведен анализ кинетики механохимической повреждаемости металла при повторно-статическом нагружении.*

Многие резервуары, предназначенные для хранения жидких углеводородов работают в режиме повторно-статического нагружения. Рабочая среда резервуаров содержит компоненты, вызывающие заметную коррозию, усиливаемую механическими напряжениями (механохимическая повреждаемость). Поэтому возникает вопрос оценки скорости механохимической повреждаемости металла при повторно-статических нагрузках. Такие данные необходимы для оценки ресурса действующих резервуаров.

Рассмотрим случай, когда контролирующим параметром циклического нагружения является заданная деформация (жесткое нагружение). Цикловое изменение деформаций и напряжений в образце в условиях коррозионного воздействия рабочих сред показано на рисунке. Характер изменения напряжений зависит от циклических характеристик стали. Для циклически упрочняющихся сталей отмечается поцикло-вой рост напряжений (до определенной наработки), а для циклически разупрочняющихся — их снижение. В конструктивных элементах из циклически стабилизирующихся сталей напряжения от цикла к циклу должны оставаться неизменными, несмотря на коррозионное растворение металла. В образцах из разупрочняющихся сталей поцикловые напряжения снижаются.

Пусть напряженное состояние в плоском образце с толщиной  $\delta_0$  создается в результате чистого изгиба с прогибом  $f$  таким образом, что коэффициент формы цикла  $K_{\text{фц}} = 0$  ( $K_{\text{фц}} = t_{\text{в}}/t_{\text{ц}}$ , где  $t_{\text{в}}$  и  $t_{\text{ц}}$  — время выдержки и полное время цикла). При этом напряжения и деформации на крайних волокнах составляют:  $\varepsilon_{\text{н}} = \frac{\delta_0}{2\rho}$  и  $\sigma_{\text{н}} = C \left( \frac{\delta_0}{2\rho} \right)^m$ , где  $\rho$  — радиус кривизны образца;  $C$  и  $m$  — константы кривой деформационного упрочнения при динамическом нагружении. Величины  $\rho$  и  $f$  связаны

<sup>1</sup>Работа выполнена под руководством профессора Р.С. Зайнуллина



**Кинетика изменения напряженного состояния при жестком повторно-статическом нагружении:**

1 — циклически упрочняющиеся; 2 — стабильные; 3 — разупрочняющиеся стали

зависимостью  $\rho \approx \frac{l^2}{8f}$ , где  $l$  — рабочая длина образца. Из этих выражений следует, что по мере коррозионного растворения образца напряжения и деформации должны снижаться. Скорость интенсивности пластической деформации  $\dot{\varepsilon}_i$  возрастает пропорционально увеличению номинальной деформации  $\varepsilon_H$  и частоты нагружения  $\nu$ :  $\dot{\varepsilon}_i = \nu \varepsilon_H$ . Скорость деформации, соответствующую статическому нагружению, можно представить как  $\dot{\varepsilon}_{i0} = \nu_0 \varepsilon_H$ , где  $\nu_0$  — условная частота нагружения, соответствующая статическому деформированию. Следовательно

$$\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{i0}} = \frac{\nu}{\nu_0}. \quad (1)$$

На основании обобщения данных работы [1] и уравнения (1) скорость механохимической повреждаемости в условиях повторно-статического нагружения можно представить в следующем виде:

$$v = v_0(1 + k_\sigma \sigma_i)(1 + k_\varepsilon \varepsilon_i) \frac{\nu}{\nu_0}, \quad (2)$$

где  $v$  и  $v_0$  — скорости коррозии напряженного и ненапряженного металла;  $k_\sigma$  и  $k_\varepsilon$  — механохимические параметры;  $\sigma_i$  — интенсивность напряжений циклического нагружения;  $\nu_0$  — частота нагружения, соответствующая медленному статическому нагружению.

Принято считать нагружение статическим, если скорость деформации составляет порядка  $0,01 \dots 0,1 \text{ мин}^{-1}$ . При амплитуде деформации  $\varepsilon_n = 0,01$  и частоте нагружения  $\nu = 50$  циклов в минуту (верхнее значение частоты малоциклового нагружения) динамическая составляющая механохимического эффекта  $\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{i0}} = 5 \dots 50$ . Таким образом, нестационарность нагружения усиливает механохимический эффект на порядок и более. Очевидно, что чем меньше амплитуда деформации, тем ниже динамический механохимический эффект.

Величины  $k_\sigma \approx 0,0015 \text{ МПа}^{-1}$  и  $k_\varepsilon = 5 \dots 7$  для низкоуглеродистых и низколегированных сталей [1]. При упругих деформациях  $\varepsilon_i/\varepsilon_{iv} = \nu/\nu_0 = 1,0$ . Однако из этого не следует, что в условиях многоциклового нагружения коррозионная среда не влияет на процессы накопления повреждений. Дело в том, что для поликристаллических металлов характерны различная ориентировка, анизотропия физико-механических свойств, дефекты строения кристаллической решетки отдельных зерен (кристаллитов), а также наличие различных дефектов и примесей. В таком случае в напряженном металле даже при напряжениях, намного меньших макроскопического предела текучести  $\sigma_T$ , возникают локальные участки всестороннего растяжения или сжатия и очаги микропластических деформаций, ускоряющих коррозионное растворение. Поэтому есть основания полагать, что при высокочастотном (многоцикловом) нагружении механохимический эффект может проявляться еще в большей степени, чем при малоцикловом нагружении.

Очевидно, что скорость уменьшения толщины образца при испытаниях определяется по формуле (2) с обратным знаком

$$\frac{d\delta}{dt} = \nu_0(1 + k_\sigma\sigma_i)(1 + k_\varepsilon\varepsilon_i)\frac{\nu}{\nu_0}. \quad (3)$$

Степень механохимической повреждаемости металла при повторно-статическом нагружении зависит от коэффициента формы цикла  $K_{\text{фц}}$ . Когда  $K_{\text{фц}} = 0$  (рисунок б), деформации изменяются пропорционально времени:

$$\varepsilon = \varepsilon_n \frac{t}{t_n}, \quad (4)$$

где  $t_n$  — время полупериода нагружения.

Степень поврежденности на полупереме нагружения определяется интегрированием уравнения (3). Приближенно степень уменьшения толщины образца на произвольном переме нагружения  $\Delta\delta_k$  при  $0 < t < t_n$  определяется по формуле

$$\Delta\delta_k^H = v_0 \frac{\nu}{v_0} (0,5k_\varepsilon\varepsilon_n)[1 + k_\sigma C(0,5\varepsilon_n)m]t_n. \quad (5)$$

Аналогично на полупереме разгрузки:  $\Delta\delta^H = \Delta\delta^P$  при  $t_n = t_0$ . Изменение толщины образца за полный перем

$$\Delta\delta_k = \Delta S_k^H + \Delta S_k^P = v_0 \frac{\nu}{v_0} (t_n + t_p)(0,5k_\varepsilon\varepsilon_n + 1)[1 + k_\sigma C(0,5\varepsilon_n)m]. \quad (6)$$

Отношение  $\frac{\Delta\delta_k}{t_n + t_p}$  представляет собой среднюю скорость механохимической повреждаемости за перем нагружения  $v_{cp}^k$ . В расчетах необходимо учитывать скорость деформации на полуперемех нагружения и разгрузки. Однако можно допускать  $t_n = t_p$ , тогда  $v_{cp}^k = \frac{\Delta\delta}{2t_n}$ .

В случае трапециевидальной формы перема на участке нагружения и разгрузки (см. рисунок, а) изменение толщины образца определяется по формуле (6). На участке постоянной деформации динамическая составляющая механохимического эффекта ( $\dot{\varepsilon}_i/\dot{\varepsilon}_{i0}$ ) равна единице, а изменение толщины образца за время  $t_b$  определяется по формуле:

$$\Delta S_k^B = t_b v_0 (1 + k_\varepsilon\varepsilon_n)(1 + k_\sigma C\varepsilon_n^m). \quad (7)$$

Общее изменение толщины образца за перем равно сумме  $\Delta S_k = \Delta S_k^H + \Delta S_k^B + \Delta S_k^P$ . При этом средняя скорость повреждаемости за полный перем нагружения составит:

$$\bar{v}_{cp}^k = v_{cp}^k/v_0 = K_{\text{фц}}(1 + k_\varepsilon\varepsilon_n)(1 + k_\sigma C\varepsilon_n^m) + (1 - K_{\text{фц}})\frac{\nu}{v_0}(1 + 0,5k_\varepsilon\varepsilon_n)[(1 + k_\sigma C(0,5\varepsilon_n)^m)]. \quad (8)$$

Величина, обратная значению  $\bar{v}_{cp}$  ( $T_0 = 1/\bar{v}_{cp}$ ), представляет собой отношение времени “жизни” образца при циклическом нагружении ко времени “жизни” ненапряженного образца. При заданной частоте нагружения  $\nu$  и наработке ( $N$  или  $t$ ) на основании выражения (8) определяется остаточная толщина образца и степень повреждаемости:

$$S_{\text{ост}} = S_0 - \nu_{cp}N/\nu; \quad \Pi = \Delta S/S_0 = \nu_{cp}N/S_0\nu. \quad (9)$$

Задавая допустимую толщину образца  $[S]$ , устанавливают допустимое число перемех нагружения  $[N]$ :

$$[N] = (S_0 - [S])\nu/\nu_{cp}. \quad (10)$$

Наряду с механохимической повреждаемостью в процессе циклического нагружения имеет место усталостная (малоцикловая и многоцикловая) повреждаемость.

Степень повреждаемости от коррозионного и циклического воздействий можно оценить на основании обобщенного критерия суммирования повреждений [2]:

$$K_{\Pi} = \sum \Pi_i + (1 - K_{\Pi}) \sum w_i = 1, \quad (11)$$

где  $\Pi$  и  $w_i$  — функции меры механохимической и малоцикловой повреждаемости;  $K_{\Pi}$  — постоянная.

Формула (8) получена в предположении независимости напряжений и деформаций при изменении толщины образца. Между тем, по мере коррозионного растворения, при испытаниях образцов с постоянным смещением напряжения и деформации снижаются. Поэтому при оценке поцикловой повреждаемости значения деформаций и напряжений должны корректироваться с учетом изменения геометрии образца в процессе испытаний по формулам:

$$\varepsilon_{\text{н}} = \frac{S_0 - \Delta S_{\text{к}}}{2\rho}; \quad \sigma_{\text{н}} = C \left( \frac{S_0 - \Delta S_{\text{к}}}{2\rho} \right)^m. \quad (12)$$

Приведенные результаты кинетики механохимического разрушения реализуются в основном при проведении коррозионно-усталостных испытаний, поскольку в реальных конструкциях номинальные напряжения не превосходят предела текучести металла  $\sigma_{\text{T}}$  (в среднем  $\sigma_{\text{н}} \approx 0,6\sigma_{\text{T}}$ ). Тем не менее, результаты анализа могут быть использованы при оценке долговечности реальных конструктивных элементов. Наличие различного рода концентраторов способствует реализации в локальных образцах упруго-пластических деформаций при упругих номинальных напряжениях. Причем, в зоне концентраторов напряжений реализуется нагружение, близкое к жесткому, с коэффициентом асимметрии  $r = -1,0$ . Заметим, что приведенные зависимости (5)–(8) справедливы и для симметричного цикла нагружения, так как механохимический эффект не зависит от знака напряжения.

Аналогичным образом производится оценка механохимической повреждаемости в случае гармонического изменения деформаций, например, по закону

$$\varepsilon_i = \varepsilon_* (a + b \sin 2\pi t + \nu), \quad (13)$$

где  $\varepsilon_* > 0$ ;  $a, b, \nu$  — постоянные. Для симметричного цикла  $a = 0$  и  $b = 1,0$ ;  $\varepsilon_i = \varepsilon_{\text{н}} \sin 2\pi t$ . Дифференцируя по времени  $t$  выражение (13), находим скорость деформации

$$\frac{d\varepsilon_i}{dt} = \varepsilon_* \frac{2\pi}{t_{\text{ц}}} \cos 2\pi \frac{t}{t_{\text{ц}}}. \quad (14)$$

Отношение скоростей деформации  $\dot{\epsilon}_i/\dot{\epsilon}_{i0}$  составляет

$$\frac{\dot{\epsilon}_i}{\dot{\epsilon}_{i0}} = \frac{\nu \cos 2\pi t \alpha \nu}{\nu_0 \cos 2\pi t \alpha \nu_0}. \quad (15)$$

**Вывод.** На базе приведенных соотношений может быть сформулирована методика оценки ресурса действующих резервуаров, трубопроводов и дымовых труб, эксплуатирующихся в условиях длительного действия агрессивных сред и подвергающихся многократным повторно-статическим нагрузкам.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. З а й н у л л и н Р. С. Механика катастроф. Определение работоспособности оборудования в условиях механохимической повреждаемости. – М.: МИБ СТС, 1997. – 426 с.
2. Шестериков С. А., Локащенко А. М. Ползучесть и длительная прочность металлов // Итоги науки и техники. Механика деформируемого твердого тела. – М.: ВИНТИ, 1980. – Т. 13. – С. 3–104.

Статья поступила в редакцию 30.11.2004

Александров Анатолий Александрович родился в 1951 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1975 г. Канд. техн. наук, доцент, директор Опытного завода МГТУ им. Н.Э. Баумана. Лауреат премии правительства России. Автор более 20 научных работ, 4 книг, патентодержатель двух патентов.

A. A. Aleksandrov (b. 1951) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1975. Ph. D. (Eng.), assoc. professor, director of the Experimental Factory of the Bauman Moscow State Technical University. Winner of the Prize of Government of the Russian Federation. Author of more than 20 publications and 4 books, patent holder of 2 patents.

---

**В издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
в 2004 г. вышла в свет книга**

**Калугин В.Т.**

Аэрогазодинамика органов управления полетом летательных аппаратов: Учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 648 с.: ил.

ISBN 5-7038-1968-7 (в пер.)

Изложены результаты исследований различных способов управления аэродинамическими характеристиками ракет, ракетных блоков и космических спускаемых аппаратов. Даны методы математического и физического моделирования процессов обтекания органов управления полетом. Систематизирован материал по аэродинамическим, струйным и газодинамическим органам управления, позволяющий создать расчетную базу для аэрогазодинамического проектирования управляющих и тормозных устройств летательных аппаратов.

Книга предназначена для студентов и аспирантов авиационных и ракетно-космических специальностей вузов и технических университетов. Может быть полезна инженерам и научным работникам, специализирующимся в области аэрогазодинамики и проектирования летательных аппаратов.

По вопросам приобретения обращаться по тел. 263-60-45;  
e-mail: press@bmstu.ru