Учитывая, что повреждающее действие других режимов намного меньше повреждающего действия при движении в карьере, получим значение усталостной долговечности для типового условия эксплуатации:

$$L_\Sigma = \frac{22500}{0{,}1} = 225000 \text{ км},$$

т.е. в данных условиях эксплуатации усталостная долговечность рамы по выбранной опасной зоне составит 225 тыс.км.

ЛИТЕРАТУРА

1. Почтенный Е.К. Кинетическая теория механической усталости. -Минск: Наука и техника, 1973.-216 с.; 2. Почтенный Е.К. Прогнозирование долговечности и диагностика усталости деталей машин. – Минск, Наука и техника, 1983,246 с.ил.; 3. Почтенный Е.К. Кинетика усталости машиностроительных конструкций.-Минск, “Арти-Фекс”, 2002, 186 с. ил.

УДК 539.3

А.О. Громыко, О.В. Громыко, М.А. Журавков, Д.Г. Медведев

ИССЛЕДОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ОБОЛОЧКИ С УЧЁТОМ ИНЕРЦИИ ВРАЩЕНИЯ

Белорусский государственный университет
Минск, Беларусь

Уравнения движения элемента тонкой цилиндрической оболочки с учетом инерции вращения имеют вид:

$$\nabla^4 u - \frac{\nu}{R}\frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + \frac{1}{R}\frac{\partial^3 w}{\partial x \partial s^2} = -\frac{2(1+\nu)}{E}\mu\frac{\partial^2}{\partial t^2}\left[\frac{1-\nu^2}{E}\mu\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \right.$$

$$\left. -\frac{3-\nu}{2}\nabla^2 u + \frac{\nu}{R}\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{1-\nu}{2}\frac{I_2}{\mu R}\frac{\partial^3 w}{\partial x \partial s^2}\right];$$

$$\nabla^4 v - \frac{2+\nu}{R}\frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial s} - \frac{1}{R}\frac{\partial^3 w}{\partial s^3} = -\frac{2(1+\nu)}{E}\mu\frac{\partial^2}{\partial t^2}\left[\frac{1-\nu^2}{E}\mu\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} - \right.$$

$$\left. -\frac{I_2}{\mu R}\frac{\partial^3 w}{\partial s \partial x^2} - \frac{1-\nu}{2}\frac{I_2}{\mu R}\frac{\partial^3 w}{\partial s^3} + \frac{1-\nu^2}{E}\frac{I_2}{R}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\left(\frac{\partial w}{\partial s}\right) - \frac{3-\nu}{2}\nabla^2 v + \frac{1}{R}\frac{\partial w}{\partial s}\right];$$

$$\frac{h^2}{12}\nabla^8 w + \frac{1-\nu^2}{R^2}\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = -\frac{2(1+\nu)}{E}\mu\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}\left\{\left(\frac{1-\nu^2}{E}\mu\frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{3-\nu}{2}\nabla^2\right)\left[\frac{w}{R^2} + \right.\right.$$

$$+\frac{h^2}{12}\nabla^4 w + \frac{1-\nu^2}{E}\mu\frac{\partial^2}{\partial t^2}\left(w + \frac{I_1}{\mu}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{I_2}{\mu}\frac{\partial^2 w}{\partial s^2}\right) + \frac{\nu^2}{R}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} +$$

$$+\frac{1}{R^2}\frac{\partial^2 w}{\partial s^2} + \frac{1-\nu}{2}\nabla^4\left(w + \frac{I_1}{\mu}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{I_2}{\mu}\frac{\partial^2 w}{\partial s^2}\right) +$$

$$\left.\left. + \frac{(1-\nu)(2+\nu)}{2R}\frac{I_2}{\mu R}\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial s^2} - \frac{1-\nu}{2R}\frac{I_2}{\mu R}\frac{\partial^4 w}{\partial s^4} - \frac{1-\nu^2}{E}\frac{I_2}{R}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\frac{\partial^2 w}{\partial s^2}\right\}, \qquad (1)$$

где I_1 и I_2 – осевой и окружной моменты инерции сечений единичных элементов оболочки;

μ – масса, отнесённая к единице объёма элемента оболочки;
h, R – толщина и радиус срединной поверхности оболочки;
u, v, w – составляющие смещения;
E, ν – модуль упругости и коэффициент Пуассона;
x, s – координаты; l – длина оболочки.

В дальнейшем полагаем $I_1 \approx I_2 = \mu \frac{h^2}{12}$. Решение системы (1) ищем в виде:

$$u = \sum_i A_i l^{\lambda_i x^*} \cos m\varphi \sin \omega t;$$
$$v = \sum_i B_i l^{\lambda_i x^*} \sin m\varphi \sin \omega t, \quad (i = 1,2,3,4,...8); \tag{2}$$
$$w = \sum_i C_i l^{\lambda_i x^*} \cos m\varphi \sin \omega t \quad где\, x^* = x/l.$$

В результате подстановки (2) в (1), принимая, что $\frac{|\lambda_i^2| R^2}{m^2 l^2} \ll 1$, получим

$$A_i = C_i \lambda_i M \frac{R}{l}, \quad (i = 1,2,3,4); \tag{3}$$
$$B_i = C_i N, \quad (i = 1,2,3,4), \tag{4}$$
$$(1-\nu)(1-\nu^2)\left(\frac{\lambda_i R}{l}\right)^4 = F, \quad (i = 1,2,3,4), \qquad где \tag{5}$$
$$M = \frac{m^2[1-\nu^2+(1+\nu^2)k\Omega] + 2\nu(1+\nu)\Omega}{(1-\nu)m^4 - (3-\nu)(1+\nu)\Omega m^2 + 2(1+\nu)\Omega^2};$$
$$N = \frac{m[m^2(1-\nu)(1-k\Omega) - 2\Omega + 2k\Omega^2]}{(1-\nu)m^4 + 2\Omega^2 - (3-\nu)\Omega m^2};$$
$$\Omega = \frac{1-\nu^2}{E}\mu R^2 \omega^2; \quad k = \frac{h^2}{12R^2}; \quad f = \frac{\omega}{2\pi}.$$
$$F = 2\Omega^3(1+km^2) - \Omega^2\left[2 + (3-\nu-2k)m^2 + km^4(5-\nu)\right] +$$
$$+\Omega\left[(1-\nu)m^2(1+m^2+km^2) + 2km^6(2-\nu)\right] - km^8(1-\nu).$$

Очевидно, корнями уравнения (5) являются:

$$\lambda_1 = +k, \ \lambda_2 = -k, \ \lambda_3 = +ik, \ \lambda_4 = -ik, \tag{6}$$

где k – действительное число.

Для жестко заделанной по одному краю консольной оболочки решения уравнений (1) должны удовлетворять граничным условиям (начало координат располагаем на свободном крае):

$$x = 0, \ \frac{\partial u}{\partial x} - \nu \frac{w}{R} = 0; \ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \nu \frac{\partial^2 w}{\partial s^2} = 0; \ \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + \nu \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial s^2} = 0; \tag{7}$$
$$x = l, \ u = v = w = \frac{\partial w}{\partial x} = 0. \tag{8}$$

После подстановки выражения (2) в (7) и (8) с учетом (3), (4) (полагая $\frac{|\lambda_i^2| R^2}{e^2} M \ll 1$), получим:

при $x=l$

$$\sum_i C_i l^{\lambda_i} = 0; \ \sum_i C_i \lambda_i l^{\lambda_i} = 0;$$

при $x=0$

$$\sum_i C_i \lambda_i^2 = 0; \ \sum_i C_i \lambda_i^3 = 0 \ \ (i = 1,2,3,4). \tag{9}$$

Характеристическое уравнение получим после подстановки в (9) корней (6):

$$\operatorname{ch} kl \cos kl = -1, \tag{10}$$

Приближенные значения корней этого уравнения следующие:

$$k_1 = 1{,}875; \ k_2 = 4{,}694; \ k_3 = 7{,}855; \ k_4 = 10{,}9996; k_5 = 14{,}137.$$

Следующие значения k_n могут быть представлены выражением

$$k_n = \frac{2n-1}{2}\pi \qquad при\ n > 5.$$

Возвращаясь к уравнению (5), вычисляем значения частот собственных колебаний цилиндрической оболочки.

Для проведения численных расчетов рассмотрим цилиндрическую оболочку со следующими параметрами:

$$\frac{h}{R} \approx 0{,}031; \ \frac{R}{l} = 0{,}22; \ k = \frac{h^2}{12R^2} \approx 0{,}80 \cdot 10^{-4}; \nu = 0{,}3;$$

$$E = 2{,}1 \cdot 10^{11}\ Па; \ \mu = 7{,}95 \cdot 10^{-5}\ кгсек^2/см^2; \ n = 1;$$

$$m = 4; \ 6; \ 8; \ 10; \ 12; \ 14; \ 16.$$

Полученные на ЭВМ результаты вычислений и данные эксперимента сведены в следующую таблицу.

m	Без учета инерции вращения			С учетом инерции вращения			Эксперимент
	Частота $f \cdot 10^4$, Гц						
	f_1	f_2	f_3	f_1	f_2	f_3	f
4	0,47	2,52	11,0	0,47	2,52	11,0	-
6	0,75	5,16	15,6	0,75	5,16	15,7	0,85
8	1,28	12,6	20,7	1,29	12,0	20,7	1,75
10	1,77	15,7	27,2	2,45	15,7	27,2	2,35
12	2,46	1,79	30,4	3,70	17,6	30,1	3,0
14	3,16	20,7	37,3	4,94	19,9	37,3	-
16	3,99	25,0	43,7	6,05	25,5	43,7	-

Анализ данных численных расчетов и их сравнение с данными испытаний показывает, что учет инерции вращения приводит к уточнению частот и особенно необходим при расчете высших форм колебаний тонких упругих оболочек.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пелех Б.Л. Теория оболочек с конечной сдвиговой жесткостью. Киев: Наукова думка, 1973. 248 с. 2. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. М.: Высшая школа, 1980. 480 с. 3. Тимошенко С.П., Войновский – Кригер С. Пластинки и оболочки. М.: Наука, 1966. 635 с. 4. Новожилов В.В., Черных К.Ф., Михайловский Е.И. Линейная теория тонких оболочек. Л.: Политехника, 1991. 655 с. 5. Палий О.М., Спиро В.Е. Анизотропные оболочки в судостроении. Л.: Судостроение, 1977. 392 с. 6. .Журавков М.А. Математическое моделирование деформационных процессов в твердых

деформируемых средах. Минск: БГУ, 2002. 456 с. 7. Громыко О.В. Расчет регулярных ферменных конструкций по континуальной схеме. Минск: БГУ, 2004. 192 с.

УДК 539.3

А.Н. Панов, С.М. Минюкович, А.П. Мышко, Д.Н. Сидоренко, В.Г. Махнач, Г.А. Башеев, А.Н. Губаревич, Н.А. Сокол

ЦИКЛИЧЕСКАЯ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ, ПАССИВНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ АНАЛИЗА, ПРОВЕРКИ ВЫХОДНЫХ ПРОЕКТНЫХ ДАННЫХ И ЭФФЕКТИВНОСТИ

Институт механики и надежности машин НАН, РУП МАЗ
Минск, Беларусь

При проектировании продукции и процессов необходимо осуществлять анализ и проверку полученных разработчиками решений - соответствия «входных» проектных данных - «выходным», т.е. достигнуто ли то, что хочет потребитель. Только после этого появляется право утвердить проектную документацию для производства. Такими данными для пространственной сборной несущей конструкции являются, в том числе, параметры ресурса (например, циклическая долговечность) и пассивной безопасности (например, выполнение законодательных ограничений по обеспечению жизненного остаточного пространства при опрокидывании автобуса). Для их прогнозирования (на этапе когда имеется только документации) и оценки (на этапе опытного образца) необходимы с одной стороны параметры и характеристики процессов повреждений локальных зон и сборных конструкций в целом, с другой - характеристики процессов нагружения, а также методология осуществления. Создание базы знаний и банка данных (физических и математических) для проведения упомянутых этапов проектирования возможно только на основе системного, комплексного подхода. Проанализировав [11-13,15-21]ситуацию с методологическим и практическим обеспечением проблемы – анализа, проверки результатов проектирования несущих конструкций и оптимизации проектных решений в автобусном производстве производителей бывшего СССР и мира можно сделать следующие замечания.

Во-первых, на практике необходимо использовать тот или иной алгоритм (от конкретных случаев) действующей в организации процедуры разработки и производства продукции. Цель процедуры – гармоничное выполнение как законодательных ограничений, так и требований системы менеджмента качества организации для удовлетворения заинтересованных сторон (потребитель, организация, поставщики, общество и т.д.). Необходимы гармонично действующие процедуры менеджмента организации как между собой, так и с целями в области качества, надежности, безопасности и ресурсное обеспечение (затраты на качество) [1]. Процедуры «анализа результатов проектирования несущей конструкции на соответствие «входных проектных данных» - «выходным» (ресурс и т.п.)», «проверка результатов проектирования несущей конструкции на соответствие «входных проектных данных» - «выходным»» в методическом плане и на практике требуют постоянного совершенствования. Это потенциал для результативного, эффективного проектирования и основание для обоснованного утверждения проектной документации, к исключению дорогостоящих ошибок выявляемых в эксплуатации.