

The amount of knots of breaking up along the meridian of every link was accepted $n_l=201$, and on the thickness of layers $k_1=11$, $k_2=9$.

As a result of decision tasks are set that the prospected process of ladening an active ladening will be realized in every point of shell.

Conclusions

Thus, in the real lecture the methodology for determination of the axisymmetrical non-stationary temperature fields and thermoelastoplastic stress-strain state in the thin laminated shells of revolution with the layers of variable thickness is worked out. Dependence on a temperature of thermophysical properties of material is taken into account.

REFERENCES

1. Galishin AZ (2003) Determining the axisymmetric geometrically nonlinear thermoviscoelastoplastic state of laminated shells by the theory of deformation along paths of small curvature. *International Applied Mechanics*, Vol. 39, No. 7, 2003
2. Shevchenko YN, Babeshko ME, Terehov (1992) Thermoviscoelastoplastic processes of the combined deformation of structural elements. 329P. (in Russian)
3. Шевченко Ю.Н., Стебляк П.А. Вычислительные методы в стационарных и нестационарных задачах теории термопластичности/ Проблемы обчислювальної механіки і міцності конструкцій. Збірник наукових праць.- Випуск 18.- Дніпропетровськ, 2012.- С. 211-226.
4. Галишин А.З., Стебляк П.А., Шевченко Ю.Н. Определение нестационарных температурных полей в тонких слоистых оболочках вращения при осесимметричном нагреве/ Математичні проблеми технічної механіки (тематичний випуск). Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету.- Випуск 2 (19).- Дніпродзержинськ, 2012.- С. 3-12.
5. http://www.splav.kharkov.com/mat_start.php name_id=3
6. <http://www.penetrion.odessa.ua/catalogue/14>

Поступила в редколлегию 29.01.2013

УДК 539.374

БАБЕШКО М.Е., д. физ.-мат.н.
САВЧЕНКО В.Г., д.т. н.

Институт механики им. С.П. Тимошенко НАН Украины

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТЖИГА ЛИСТОВОЙ СТАЛИ 25ХГСА НА ПРОЧНОСТЬ СОСУДОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Введение. Наиболее часто тонкостенные сосуды высокого давления являются конструктивными элементами транспортных установок как емкости для топлива, используются в тормозных системах автомобильного и железнодорожного транспорта в качестве резервуаров для сжатого воздуха. В летательных аппаратах с ЖРД тонкостенными сосудами являются баки с окислителем и горючим, а с ТРД - корпуса двигателей, заполненные твердым топливом. Назначение сосуда и условия его работы определяют требования к материалу, конструктивному оформлению и технологии изготовления. Прочность емкостей, работающих в условиях высокого давления, зависит от многих факторов, в частности, от геометрии, свойств материала, режима

нагрузки и др. Прочностные характеристики материала конструкции значительно отличаются при разных температурах отжига при снятии сварочных напряжений, возникающих в процессе изготовления. В данной работе определяются значения разрушающей нагрузки тонкостенного элемента ответственной конструкции, моделируемого оболочкой вращения, в зависимости от температуры отжига.

Для определения разрушающего давления необходимо поэтапно решать осесимметричную задачу пластичности для тонкой изотропной оболочки, моделирующей исследуемый конструктивный элемент, увеличивая уровень нагрузки на каждом следующем этапе. Необходимо на каждом этапе использовать полученные в результате расчета компоненты напряженно-деформированного состояния (НДС) оболочки для проверки выбранного критерия прочности. Тот уровень нагрузки, при котором выполняется критерий прочности

$$\sigma_e = \sigma_n, \quad (1)$$

где σ_e - эквивалентное напряжение, а σ_n - предел прочности материала, будет соответствовать разрушению. В качестве эквивалентного напряжения будем использовать три известных из литературы [1] выражения, а именно

$$\sigma_e = \sigma_{\max}, \quad (2)$$

где $\sigma_{\max} = \sigma_1$ - максимальное главное нормальное напряжение, $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$;

критерий Сдобырева [2]

$$\sigma_e = (\sigma_i + \sigma_{\max})/2, \quad (3)$$

где σ_i - интенсивность напряжений;

критерий Мизеса

$$\sigma_e = S\sqrt{3}, \quad (4)$$

где S - интенсивность касательных напряжений [3],

$$S = \left(\frac{1}{2} s_{ij} s_{ij} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad (5)$$

s_{ij} - компоненты девиатора напряжений, $\sigma_i = S\sqrt{3}$.

В общем случае главные нормальные напряжения определяются выражениями, приведенными например в [3]

При наличии массивных частей конструкции необходимо решать задачу в пространственной постановке [4].

Постановка задачи и основные соотношения. Рассмотрим оболочку вращения, первоначально находящуюся в ненапряженном и недеформированном состоянии при температуре $T = T_0 = 20^0 C$, а затем подвергнутую действию возрастающего равномерного внутреннего давления при этой же температуре. Предполагается, что оболочка изготовлена из изотропного материала, а меридиан оболочки может состоять из конечного числа звеньев разной геометрии. Оболочка отнесена к криволинейной ортогональной системе координат s, θ, ζ , связанной с недеформированной непрерывной координатной поверхностью; s ($s_a \leq s \leq s_b$) - меридиональная координата, s_a, s_b - координаты, соответствующие торцам оболочки; θ ($0 \leq \theta \leq 2\pi$) - окружная координата; ζ ($\zeta_0 \leq \zeta \leq \zeta_k$) - координата, отсчитываемая по нормали к координатной поверхности, ζ_0 соответствует внутренней поверхности оболочки, а ζ_k - наружной ее поверхности; толщина оболочки $h_i = \zeta_k - \zeta_0$. В качестве координатной поверхности выбирается срединная либо одна из поверхностей

оболочки. Предполагается, что в процессе нагружения материал оболочки деформируется в пределах и за пределами упругости, а деформации ползучести пренебрежимо малы по сравнению с упругими и пластическими составляющими. Задачу будем решать в квазистатической постановке с использованием гипотез Кирхгофа - Лява и соотношений геометрически линейной теории оболочек [5]. Для описания деформирования изотропных материалов будем использовать соотношения теории процессов деформирования по траекториям малой кривизны [3,4], линеаризованные методом дополнительных напряжений. Задачу о НДС оболочки будем решать методом последовательных приближений.

Следует заметить, что методы решения осесимметричной задачи пластичности для тонких изотропных оболочек в такой постановке описаны в ряде работ [3,4,6-8 и др.] и неоднократно применялись к определению упругопластического НДС конкретных оболочек, однако в этих работах не проводилась оценка прочности исследуемых объектов. В отличие от этого в данной работе при поэтапном определении упругопластического НДС оболочки оценивается ее прочность с помощью выбранных критериев (1) – (4).

Для решения задачи процесс нагружения разбиваем на ряд малых этапов во времени таким образом, чтобы моменты времени, разграничивающие этапы, как можно лучше совпадали с моментами начала возможной разгрузки. На каждом этапе используем дифференциальные уравнения равновесия [5] элемента осесимметрично нагруженной оболочки вращения при отсутствии кручения, геометрические соотношения [5] и физические уравнения [3,4]. Последние представим в виде связи между компонентами тензоров напряжений σ_{ss} , $\sigma_{\theta\theta}$ и деформаций ε_{ss} , $\varepsilon_{\theta\theta}$, $\varepsilon_{\zeta\zeta}$ в произвольной точке рассматриваемой оболочки в форме закона Гука с дополнительными напряжениями.

$$\begin{aligned}\sigma_{ss} &= A_{11}\varepsilon_{ss} + A_{12}\varepsilon_{\theta\theta} - A_1, \\ \sigma_{\theta\theta} &= A_{12}\varepsilon_{ss} + A_{22}\varepsilon_{\theta\theta} - A_2,\end{aligned}\quad (5)$$

где

$$A_{11} = A_{22} = \frac{E}{1-\nu^2}, \quad A_{12} = \nu A_{11}; \quad A_1 = A_{11}\left(e_{ss}^{(p)} + \nu e_{\theta\theta}^{(p)}\right), \quad A_2 = A_{11}\left(e_{\theta\theta}^{(p)} + \nu e_{ss}^{(p)}\right). \quad (6)$$

В (6) E, ν - соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона материала, $e_{ss}^{(p)} = \varepsilon_{ss}^{(p)}$, $e_{\theta\theta}^{(p)} = \varepsilon_{\theta\theta}^{(p)}$, $\varepsilon_{\zeta\zeta}^{(p)} = -(\varepsilon_{ss}^{(p)} + \varepsilon_{\theta\theta}^{(p)})$ - пластические составляющие компонент деформации, вычисляемые как сумма приращений этих компонент

$$\varepsilon_{ss}^{(p)} = \sum_{m=1}^M \Delta_m \varepsilon_{ss}^{(p)}, \quad \Delta_m \varepsilon_{ss}^{(p)} = \langle c_{ss} \rangle_m \Delta_m \Gamma_p^*, \quad \langle c_{ss} \rangle_m = \left\langle \frac{2\sigma_{ss} - \sigma_{\theta\theta}}{S} \right\rangle_m (s, \theta), \quad (7)$$

где угловые скобки означают средние на этапе значения заключенных в них величин,

$$S = \left[\frac{1}{3} \left(\sigma_{ss}^2 - \sigma_{ss}\sigma_{\theta\theta} + \sigma_{\theta\theta}^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (8)$$

Γ_p^* - интенсивность накопленной пластической деформации сдвига,

$$\Gamma_p^* = \sum_{m=1}^{M-1} \Delta_m \Gamma_p^* + \Delta_M \Gamma_p^*. \quad (9)$$

Предполагается, что между интенсивностями касательных напряжений S и накопленной пластической деформации сдвига Γ_p^* существует зависимость вида

$$S = \Phi(\Gamma_p^*), \quad (10)$$

которую необхідно конкретизировать на основе экспериментально полученных мгновенных диаграмм одноосного растяжения $\sigma \sim \varepsilon$ с использованием соответствующих формул [3,4] перехода от одноосного НДС к сложному

$$S = \frac{\sigma}{\sqrt{3}}, \quad \Gamma_p^* = \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\varepsilon - \frac{\sigma}{E} \right). \quad (11)$$

Приращение интенсивности накопленной пластической деформации $\Delta_M \Gamma_p^*$ за текущий этап нагружения определяется в процессе последовательных приближений.

Используем соотношения (5) для получения связи между усилиями N_s, N_θ , моментами M_s, M_θ и деформациями и изменениями кривизны $\varepsilon_s, \varepsilon_\theta, \kappa_s, \kappa_\theta$ координатной поверхности оболочки. Получим

$$\begin{aligned} N_s &= C_{11}^{(0)} \varepsilon_s + C_{12}^{(0)} \varepsilon_\theta + C_{11}^{(1)} \kappa_s + C_{12}^{(1)} \kappa_\theta - N_{1D}^{(0)}, \\ N_\theta &= C_{12}^{(0)} \varepsilon_s + C_{22}^{(0)} \varepsilon_\theta + C_{12}^{(1)} \kappa_s + C_{22}^{(1)} \kappa_\theta - N_{2D}^{(0)}, \\ M_s &= C_{11}^{(1)} \varepsilon_s + C_{12}^{(1)} \varepsilon_\theta + C_{11}^{(2)} \kappa_s + C_{12}^{(2)} \kappa_\theta - N_{1D}^{(1)}, \\ M_\theta &= C_{12}^{(1)} \varepsilon_s + C_{22}^{(1)} \varepsilon_\theta + C_{12}^{(2)} \kappa_s + C_{22}^{(2)} \kappa_\theta - N_{2D}^{(1)}, \end{aligned} \quad (12)$$

где
$$C_{mn}^{(j)} = \int_{\zeta_0}^{\zeta_k} A_{mn} \zeta^j d\zeta, \quad N_{mD}^{(j)} = \int_{\zeta_0}^{\zeta_k} A_{mD} \zeta^j d\zeta \quad (m, n = 1, 2; j = 0, 1, 2). \quad (13)$$

Соотношения (12) вместе с уравнениями равновесия и геометрическими соотношениями образуют систему 12 уравнений. Выбрав в качестве основных неизвестных функции $N_s, Q_s, M_s, u, w, \vartheta_s$, где Q_s - перерезывающее усилие, u, w - перемещения точек координатной поверхности в меридиональном и нормальном направлениях, ϑ_s - угол поворота нормали к координатной поверхности, приведем эту систему к системе шести обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\frac{d\bar{Y}}{ds} = P(s)\bar{Y} + \bar{f}(s) \quad (14)$$

при граничных условиях

$$B_1 \bar{Y}(s_a) = \bar{b}_1, \quad B_2 \bar{Y}(s_b) = \bar{b}_2, \quad (15)$$

где \bar{Y} - вектор-столбец разрешающих функций, $\bar{Y} = \{N_s, Q_s, M_s, u, w, \vartheta_s\}$, $P(s)$ - матрица системы, $\bar{f}(s)$ - вектор-столбец дополнительных слагаемых, B_1, B_2 - заданные матрицы, \bar{b}_1, \bar{b}_2 - заданные векторы-столбцы граничных условий. Ненулевые элементы матрицы $P(s)$ и вектора $\bar{f}(s)$ вычисляются по формулам [3]. Из этих формул видно, что элементы матрицы разрешающей системы зависят от геометрии оболочки и упругих свойств материала, а компоненты вектора $\bar{f}(s)$ зависят еще и от внешних нагрузок и пластических деформаций, которые необходимо уточнять в процессе последовательных приближений.

Для проведения вычислений необходимо задать геометрию оболочки, условия закрепления и нагружения, а также свойства ее материала. Последние задаются в виде диаграммы растяжения $\sigma \sim \varepsilon$ и коэффициента Пуассона. Разбиение на этапы удобно выполнить таким образом, чтобы на первом этапе оболочка деформировалась в пределах упругости.

В первом приближении на первом этапе нагружения принимаем $A_1 = A_2 = 0$. После вычисления элементов матрицы $P(s)$ и компонент вектора-столбца $\vec{f}(s)$ решаем краевую задачу (14),(15) путем сведения к задачам Коши, для решения которых используем метод Рунге – Кутты с дискретной ортогонализацией [9]. Получив в результате решения краевой задачи разрешающие функции, находим компоненты деформаций, а по ним – компоненты напряжений (5). Далее вычисляем интенсивность касательных напряжений (8). Затем находим приращение интенсивности пластической деформации сдвига по формулам

$$\Delta_M \Gamma_p^* = \frac{\sqrt{3}}{2} \Delta_M \varepsilon^{(p)}, \quad \Delta_M \varepsilon^{(p)} = \sum_{i=1}^{L-1} \Delta_{Mi} \varepsilon^{(p)} + \Delta_{ML} \varepsilon^{(p)},$$

$$\Delta_{ML} \varepsilon^{(p)} = \frac{S\sqrt{3} - \sigma^{(d)}}{E}, \quad (16)$$

где L – номер текущего приближения на M – м этапе, а $\sigma^{(d)}$ определяется из зависимости (10) с использованием (11) по вычисленному в предыдущем приближении значению Γ_p^* (9). Процесс последовательных приближений на этапе завершается при выполнении условия

$$\left| \Delta_{ML} \varepsilon^{(p)} \right| \leq \delta, \quad (17)$$

где δ - наперед заданное число. В процессе последовательных приближений выполняется проверка направленности процесса нагружения. Если найденное в первом приближении приращение интенсивности пластических деформаций (16) в элементе отрицательно, это означает, что в данном элементе происходит разгрузка, и соответствующее приращение на данном этапе считается равным нулю.

Для оценки величины разрушающей нагрузки на каждом этапе нагружения необходимо проверить выполнение критериев прочности (1) –(4). В осесимметрично нагруженной тонкой оболочке главными напряжениями являются меридиональное σ_{ss} и окружное $\sigma_{\theta\theta}$, поэтому в (1)-(4) следует учитывать, что $\sigma_{\max} = \max(\sigma_{ss}, \sigma_{\theta\theta})$, а S определяется формулой (8).

Результаты решения задачи. Выполнено определение разрушающей нагрузки для оболочки, моделирующей корпус двигателя, нагруженной возрастающим внутренним давлением. Материал оболочки - сталь 25ХГСА. Расчеты проводились для трех значений температуры отжига $T_1 = 200^0 C$; $T_2 = 480^0 C$, $T_3 = 580^0 C$. Диаграммы растяжения [10,11] представлены на рис.1; цифры 1, 2, 3 соответствуют значениям

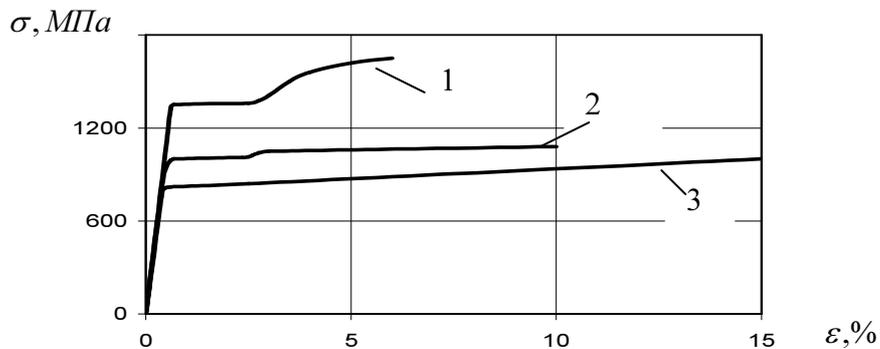


Рисунок 1

температуры отжига T_1, T_2, T_3 .; пределы прочности материала при соответствующих температурах отжига равны 1650 МПа, 1080 МПа, 1000 МПа. В качестве координатной поверхности выбрана ее внутренняя поверхность. Меридиан оболочки показан на рис.2, где $L = 52,6\text{см}$; $R_1 = 6,63\text{см}$; $R_2 = 8,5\text{см}$; толщина оболочки $h = 0,15\text{см}$.

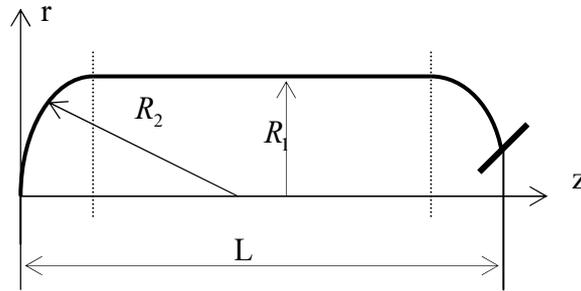


Рисунок 2

В результате вычислений было установлено, что в начальной стадии нагружения при упругом деформировании материала максимальными являются меридиональные напряжения, которые возникают в тороидальной части оболочки у контура $s = s_b$, но не достигают критического уровня. При дальнейшем возрастании нагрузки и развитии пластических деформаций максимальными становятся окружные напряжения в цилиндрической части оболочки. Это означает, что разрушение оболочки происходит по образующей. Разрушающие нагрузки приведены в таблице.

Таблица

	$T_1 = 200^0 C$	$T_2 = 480^0 C$	$T_3 = 580^0 C$
Критерий (2)	36,8 МПа	23,1 МПа	22,6 МПа
Критерий (3)	38,9 МПа	25,9 МПа	24,1 МПа
Критерий (4)	42,5 МПа	28,2 МПа	25,6 МПа

Как видно из таблицы, величины разрушающей нагрузки существенно зависят от температуры отжига материала и могут различаться в полтора раза.

Следует заметить, что были выполнены заводские испытания тонкостенной конструкции указанной геометрии, изготовленной из стали 25 ХГСА, температура отжига которой $T_2 = 480^0 C$. Разрушение произошло при давлении 25,56 МПа, что отличается менее чем на 2% от значения, полученного в расчете для этой температуры отжига по критерию Сдобырева (4), и от усредненного по трем критериям значения.

Выводы. Разработана методика численного определения разрушающей нагрузки тонкостенных элементов конструкций в виде оболочек вращения, работающих в условиях возрастающего давления. Методика основана на использовании соотношений геометрически линейной теории тонких оболочек, теории процессов деформирования по траекториям малой кривизны и известных из литературы критериев прочности. Работоспособность методики показана на конкретном примере. Показано, что величина разрушающей нагрузки существенно зависит от температуры отжига материала исследуемой оболочки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. К.: Наукова думка, 1988. – 102с.
2. Сдобырев В.П. Длительная прочность сплава ЭИ 437Б при сложном напряженном состоянии// Изв. АН СССР, ОТН. – 1958, №4. –С. 92-97.

3. Шевченко Ю.Н., Бабешко М.Е., Терехов Р.Г. Термовязкоупругопластические процессы сложного деформирования элементов конструкций. – К.: Наук. думка, 1992. – 328с.
4. Шевченко Ю.Н., Савченко В.Г. Механика связанных полей в элементах конструкций. Т.2. Термовязкопластичность. – К.: Наук. думка, 1987. – 264 с.
5. Новожилов В.В. Теория тонких оболочек. – Л.: Судпромгиз, 1962. – 432 с.
6. Шевченко Ю.Н., Бабешко М.Е., Пискун В.В., Прохоренко И.В., Савченко В.Г. Решение осесимметричной задачи термопластичности для тонкостенных и толстостенных тел вращения на ЕС ЭВМ. – К.: Наук. думка, 1980. – 196 с.
7. Шевченко Ю.Н., Бабешко М.Е., Прохоренко И.В. Методика решения осесимметричной задачи термовязкопластичности для тонких слоистых оболочек ЕС ЭВМ. – К.: Наук. думка, 1981. – 68 с.
8. Шевченко Ю.Н., Савченко В.Г., Ищенко Д.А., Павлычко В.М. Расчеты и испытания на прочность. Метод и пакет прикладных программ расчета на ЭВМ нестационарной теплопроводности и упругопластического напряженно-деформированного состояния элементов конструкций типа тел вращения при осесимметричных силовых и тепловых нагрузках. Рекомендации Р54 – 284 – 90. – М.: ВНИИНМАШ Госстандарта СССР, 1990. - 56с.
9. Григоренко Я.М., Василенко А.Т. Теория оболочек переменной жесткости. – К.: Наук. думка, 1981. – 544 с. – (Методы расчета оболочек: В 5-ти т.; Т.4).
10. Демина Н.И., Волков А.К., Застольская З.К. Влияние формы концентратора напряжения на механические свойства тонколистовой стали 25ХГСА при двухосном растяжении.//Пробл. прочности, 1980, №3. – С.51-53.
11. Безухов Н.И., Бажанов В.Л., Гольденблат И.И. и др. Расчеты на прочность, устойчивость и колебаний в условиях высоких температур. – М.: Машиностроение, 1965. – 568с.

Поступила в редколлегию 29.01.2013

УДК 539.3

ЗЕЛЕНСКИЙ В.С., к.физ.-мат.н.
БЫСТРОВ В.М., к.физ.-мат.н.
ДЕКРЕТ В. А. к.физ.-мат.н.

Институт Механики НАН Украины

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СЛОИСТОЙ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ НА ВЕЛИЧИНУ КРИТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ

Введение. В работах [4,5] исследовано влияние геометрических параметров на критическую нагрузку для изотропных и анизотропных пластин. В работе [3] рассмотрена устойчивость матричного композитного материала регулярной структуры, находящегося под действием одноосной нагрузки.

В настоящей работе с использованием общих уравнений трехмерной линеаризованной теории устойчивости деформируемых тел (ТЛТУДТ) [1] (математическая модель) и модели кусочно-однородной среды (механическая модель) в пространственной постановке исследуются влияние геометрических параметров на величину критической нагрузки слоистой прямоугольной пластины. Указанный подход является наиболее строгим и позволяет оценить точность результатов, полученных с применением различных приближенных теорий и расчетных схем.