

Проведенные исследования показали, что гидравлические потери у тонкостенных фитилей из МР больше, чем у образцов, исследованных ранее [3] и зависят от микроструктуры пористой среды, степень неоднородности которой количественно оценивается параметром функции плотности распределения пор по размерам  $\alpha$ .

За характерный размер пористой среды предложено принять приведенный гидравлический диаметр  $d_{гг}$ , который полностью определяет гидравлические потери фитилей.

#### Библиографический список

1. Развитие исследований по теории фильтрации в СССР (1917-1968) - М.: Наука, 1969. - 545 с.
2. Жижкин А.М. Упругий пористый материал МР в тепловых трубах // Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов: Сб. науч. тр. - Куйбышев: КуАИ, 1986. - С.45-50.
3. Белоусов А.И., Изжеуров Е.А., Сетин А.Д. Исследование гидродинамических и фильтровальных характеристик пористого материала МР // Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов: Сб. науч. тр. - Куйбышев: КуАИ, 1975. - Вып.2.-С.70-79.
4. Жижкин А.М., Изжеуров Е.А., Онуфриенко А.И. Изготовление цилиндрических фитилей тепловых труб из пористого материала МР // Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов: Сб. науч. тр. - Куйбышев: КуАИ, 1985. - С.20-24.
5. Белов С.В. Пористые металлы в машиностроении. - М.: Машиностроение, 1981. - 247 с.

УДК 593.3

Г.Г.Карташов, В.А.Юдин

#### ВЫБОР ФУНКЦИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ И ПОПЕРЕЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ТОЛЩИНЕ СЛОИСТЫХ АНИЗОТРОПНЫХ ПЛАСТИН И ОБОЛОЧЕК

При построении теории анизотропных слоистых оболочек методом гипотез одним из основных является вопрос о выборе функций, характеризующих распределение поперечных напряжений  $\sigma_{\mu}(\xi)$  и перемещений  $f_{\mu}(\xi)$  по толщине пакета. Этот выбор во многом определяет эффектив-

ность данной теории и диапазон возможного ее применения. Для выбора законов изменения поперечных напряжений можно использовать решения трехмерных задач теории упругости для слоистых анизотропных оболочек [1-3].

Распределение касательных напряжений может быть выбрано кусочно-линейным или постоянным [3], в виде параболы для пакета [1,2] или слоя [4] либо на основе использования гипотезы о недеформируемой нормали для всего пакета в целом [5]. Однако для ортотропных оболочек этот путь оказывается непригодным, поскольку выражения для  $\sigma_{xz}$  не допускают разложения на произведение двух сомножителей, один из которых зависит от координат в поверхности, а второй - по толщине.

Кратко рассмотрим некоторые из возможных подходов.

Подставляя в два первых уравнения равновесия элемента пологой оболочки выражения напряжений и пренебрегая  $\sigma_{zz}$ , получаем зависимости, из которых видно, что характер распределения поперечных касательных напряжений зависит от соотношения компонентов деформированного состояния, структуры пакета и распределения тангенциальных перемещений по толщине.

Если распределение тангенциальных перемещений соответствует гипотезе ломаной линии [3], то для участков оболочки, где преобладают изгибные деформации, функции  $\varphi_i$  имеют следующий вид:

$$\varphi_i(z) = 0,5 \int_{-h}^z \left[ D_i + \sum_{p=i,j} \varepsilon_{p3}^{(0)} \delta_p F_p \right] (\alpha_i - z) - \sum_{p=i,j} \bar{\varepsilon}_{p3}^{(0)} \alpha_p F_p \Big] dz.$$

Коэффициенты  $\alpha_p$ ,  $\beta_p$  приведены в [3]. Коэффициенты  $\alpha_i$  введены с целью удовлетворения граничным условиям на поверхности оболочки  $\varphi_i(h) = 0$ . Величины  $\bar{\varepsilon}_{p3}^{(0)}$  характеризуют относительные углы поворота в слое с координатой  $z = 0$ , вызванные поперечными сдвигами.

Для участков оболочки с малыми деформациями сдвига гипотеза ломаной переходит в гипотезу прямой недеформированной нормали для всего пакета.

С целью лучшего описания распределения касательных напряжений при коротковолновом напряженном состоянии целесообразно функцию  $\varphi_i$  выбирать в виде параболы для каждого  $k$ -го слоя [4]:

$$\varphi_i^{(k)}(z) = \kappa_k \left\{ D_i^{(k)} (\alpha_i^{(k)} s_{\kappa} + r_{\kappa}) + \sum_{j=1}^{k-1} D_i^{(j)} (\alpha_i^{(j)} s_j + r_j) \right\} dz. \quad (I)$$

Здесь  $S_K = 2(z - z_K)$ ,  $r_K = z_K^2 - z^2$ ,  $S_j = 2(z_{j+1} - z_j)$ ,  $r_j = z_j^2 - z_{j+1}^2$ ;

параметры  $\lambda_i$  определяются из условий сопряжения на контактных поверхностях  $z = z_{K+1}$ , дополненных допущением о пропорциональности возникающих напряжений отношению модулей сдвига смежных слоев. Коэффициенты  $K_i$  введены в (I) с целью удовлетворения интегральным характеристикам и равны

$$K_i = \left( \sum_{k=1}^n \int_{z_k}^{z_{k+1}} \varphi_i^{(k)} dz \right)^{-1} \int_{-h}^h \varphi_i(z) dz.$$

Один из возможных подходов к выбору функций распределения поперечных нормальных напряжений по толщине пакета  $\varphi_3$  основан на использовании третьего уравнения теории упругости. Подставляя в него получаемые ранее выражения для поперечных касательных напряжений, интегрируя по толщине и учитывая принятые допущения, получим функцию  $\varphi_3$  в виде

$$\varphi_3(z) = -0.5 \int_{-h}^z (\varphi_1 + \varphi_2) dz + \varphi^*, \quad (2)$$

где  $\varphi^*$  находят из граничных условий на внешних поверхностях оболочки  $\varphi_3(\pm h) = 0$ .

Закон распределения поперечных напряжений  $\sigma_{\mu 3}$  можно получить с помощью уравнения равновесия теории упругости, построив итерационный процесс по следующей схеме:

- а) задаем вид функций  $f_{\mu}^{(0)}$  и  $\varphi_{\mu}^{(0)}$ ;
- б) определяем все напряжения и дополнительно из уравнений равновесия теории упругости напряжения  $\sigma_{\mu 3}^{(0)}$ ;
- в) определяем расхождение между напряжениями  $\sigma_{\mu 3}^{(0)}$ , найденными из уравнений теории упругости и по теории оболочек;
- г) уточняем значения функций  $\varphi_{\mu}^{(1)} = \varphi_{\mu}^{(0)} + \Delta \varphi_{\mu}(\sigma_{\mu 3}^{(0)}, \sigma_{ii}^{(0)})$  и  $f_{\mu}^{(1)} = f_{\mu}^{(0)} + \Delta f_{\mu}(\sigma_{\mu 3}^{(0)}, \sigma_{ii}^{(0)})$ .

Рассмотрим некоторые возможные способы выбора функций перемещений  $f_i(z)$ .

Подставив в соотношения Коши с учетом пологости оболочки закон Гука для материала с одной плоскостью упругой симметрии, получим формулу для тангенциальных перемещений:

$$U_i(\alpha_s, z) = U_i(\alpha_s) - z u_{3,L} + \int_0^z (A_{\varphi\varphi}^{-1} \varphi_i \rho_i + A_{45}^{-1} \varphi_j \rho_j) dz.$$

Из этой зависимости можно найти выражения  $f_i$  для двух предельных случаев, когда пренебрежимо малы тангенциальные деформации или деформации поперечного сдвига. При использовании интегральных характеристик пакета применяются несколько упрощенные функции

$$f_i(z) = z + 0,5 \int_0^z \left\{ A_{\varphi\varphi}^{-1} \int_{-h}^z (A_{ii} + A_{12} + 2A_{66}) (a_i - z) dz + A_{45}^{-1} \int_{-h}^z [3A_{ij} + A_{j6}(z)] (a_i - z) dz \right\} dz.$$

Закон изменения тангенциальных перемещений может быть выбран исходя из гипотезы ломаной линии [3].

Предполагая, что углы поворота от сдвига и обжатия обратно пропорциональны соответствующим жесткостям,  $f_i(z)$  представим так:

$$f_i(z) = A_i^* \left\{ z + \hat{A}_{ii} \int_0^z [A_{\rho\rho}^{-1}(z) + A_{33}^{-1}(z)] dz \right\},$$

где  $A_i^*$  - эффективная жесткость пакета при изгибе;  $A_{\rho\rho}$  и  $A_{33}$  - модули упругости при сдвиге и срыве.

Для случая, когда преобладающими являются деформации сдвига, естественно положить, что углы поворота нормального до деформации элемента будут обратно пропорциональны модулям упругости при сдвиге соответствующих слоев. Тогда

$$f_i(z) = A_{\rho\rho}^{(s)} \int_0^z A_{\rho\rho}^{-1}(z) dz,$$

что соответствует гипотезе типа ломаной линии.

Закон распределения нормальных перемещений по толщине можно выбрать из следующих соображений.

Исходя из закона Гука для материала с одной плоскостью упругой симметрии, с учетом третьего уравнения равновесия и соотношений Коши для оболочек, а также принимая, что преобладающими являются изгибные и крутильные деформации, найдем функцию  $f_3(z)$ :

$$f_3(z) = \int_0^z [(a_{33} + \sum_{i=1,2,6} \gamma_{i3} a_{i3}) \varphi_3 - (f_1 + f_2) / 6 \sum_{i=1,2,6} \gamma_{i3}] dz.$$

В случае справедливости гипотезы прямой недеформируемой нормали  $f_i = z$ ;  $a_{i3} = 0$ ;

$$f_3(z) = \int_0^z [a_{33} \varphi_3(z) - \frac{z}{3} (\gamma_{13}(z) + \gamma_{23}(z) + \gamma_{63}(z))] dz.$$

Предполагая, что нормальные поперечные деформации в слоях пропорциональны модулям упругости при отрыве, функцию  $f_3(z)$  выбираем в виде

$$f_3(z) = A_{33}^* \int_0^z A_{33}^{-1}(z) dz,$$

где  $A_{33}^*$  - либо модуль упругости при отрыве срединного слоя, либо эффективная жесткость пакета.

Рассмотренные здесь подходы к выбору функций  $\varphi_{\mu}$  и  $f_{\mu}$  обеспечивают непрерывность перемещений и поперечных касательных и нормальных напряжений, а также выполнение граничных условий на наружных поверхностях оболочки.

Распределение относительных напряжений  $\bar{\varphi}_i = 4G_{j3} A_{33}^{-1} D_j h^{-2}$ , соответствующее гипотезе прямой нормали, приведено на рис. 1. Для симметричных относительно срединной плоскости пластин максимум наблюдается при  $z = 0$ . При нарушении симметрии он смещается в сторону более жесткой половины и располагается в плоскости  $\bar{z}_j = z_j$ . Для двухслойной пластины, состоящей из слоев одинаковой толщины, максимум напряжений при изменении степени неоднородности  $D_j$  от 0 до  $\infty$  располагается в интервале  $\bar{z} = -0,5 \dots 0,5$ . С увеличением степени неоднородности значение  $\bar{\varphi}_i^{max}$  возрастает. При этом введение более жесткого слоя повышает уровень относительных напряжений и в остальных слоях. Отметим, что такое распределение в большей степени соответствует длинноволновому напряженному состоянию, когда преобладают изгибные деформации. Оно является обобщением на случай неоднородных анизотропных пакетов известного параболического закона [1-3].

Распределение касательных напряжений при послойной параболической аппроксимации представлено на рис. 2. Видно, что при повышении не-

однородности пакета возрастает и неоднородность напряженного состояния. Снижение свойств внутреннего слоя приводит к росту напряжений в наружных слоях. Если пренебречь жесткостью внутреннего слоя, то наружные слои ведут себя независимо и напряжения по толщине каждого из них распределяются по параболе. При уменьшении толщины наружных слоев максимум  $\varphi_j$ , возрастая, смещается во внутренний слой. Распределение поперечных напряжений при таком подходе лучшим образом описывает коротковолновое напряженное состояние.

Таким образом, рационально выбранные функции  $\varphi_j$  позволяют описать распределение поперечных касательных напряжений для анизотропных пластин при таких видах напряженного состояния. Целесообразность применения различных подходов подтверждается качественным совпадением  $\sigma_{yz}(z)$  с точным решением для длинных [7-II] и коротких [7,II] плит.

Распределение поперечных нормальных напряжений для пакетов различной структуры, соответствующее (2), приведено на рис. 3. для однородной пластины наибольшие значения  $\varphi_j$  достигаются при  $\bar{z} = \pm 0,578$ .

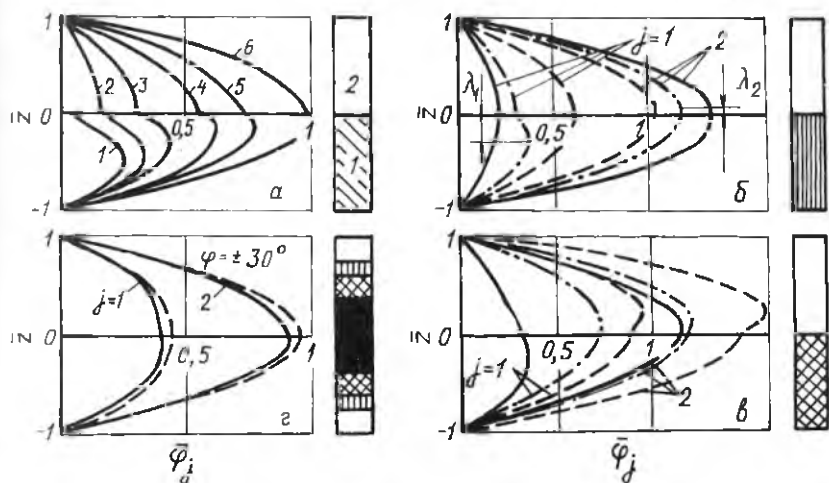


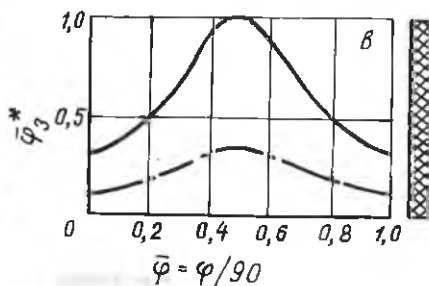
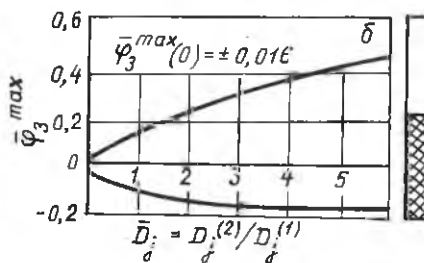
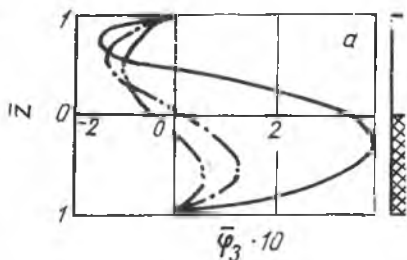
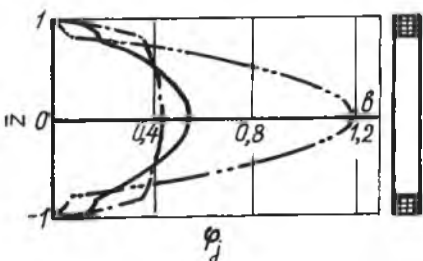
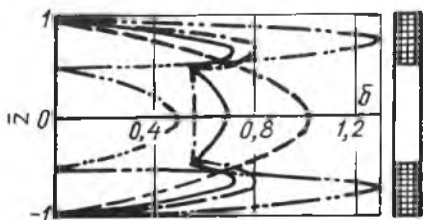
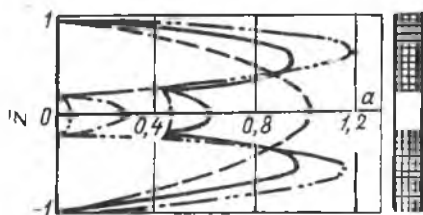
рис. 1. Распределение относительных напряжений  $\bar{\sigma}_j$  при параболической аппроксимации двухслойного (а, б, в) и многослойного (г) пакетов:  $\alpha = \bar{\sigma}_j = 0,1(2); 0,2(3); 0,4(4); 0,6(5); 1(6)$ ;

$\delta$  — — — ( $0^\circ$  углепластик/ $0^\circ$  стеклопластик);

— — — ( $0^\circ$  у); - - - ( $0^\circ$  с);

$\lambda$  — — — ( $0^\circ$  у /  $0^\circ$  с), - - - ( $+30^\circ$  у /  $0^\circ$  с), - - - ( $30^\circ$  у /  $0^\circ$  с);

2 — — — ( $0^\circ$  с /  $\varphi_j$  /  $0^\circ$  у) с



Р и с.2. Распределение относительных поперечных касательных напряжений при послонной параболической аппроксимации:

а -  $\bar{D}_j = D_j^{(2)}/D_j^{(1)} = 1$ ,

( $\bar{G}_{j3} = G_{j3}^{(2)}/G_{j3}^{(1)} = 0,1$ ) — — — ;

I(I) - - - - ; I(0) — · — — ;

0, I(0) — · — — ;  $\delta - 0, I(0, I) — — ;$

I(I) - - - - ; 0(0, I) — · — — ;

0, I(0) — · — — ; в - 0, I(0, I) — — ;

0, I(I) — · — — ; I(0, I) — · — —

Рис.3. Распределение относительных поперечных нормальных напряжений  $\varphi_3$  по толщине пакета (а), зависимость их максимума от степени неоднородности пакета ( $\delta$ ) и от угла армирования ( $\beta$ ): а -  $\bar{D}_j = 5$

— — — ; I — — — ; 0,4 — — —

$\delta - D_j^{(2)}/D_j^{(1)} = const$ ; б - ( $\varphi = \alpha$ ) — — —

( $\varphi = \delta$ ) — — —

Увеличение степени неоднородности материала  $\bar{D}$  приводит к росту  $\bar{\sigma}_3^{max}$ . В этом случае максимум  $\bar{\sigma}_3$  наблюдается в менее жесткой половине пакета. Наибольшее относительное напряжение  $\bar{\sigma}_3$  в другой половине при  $\bar{D} \gg 1$  стабилизируется. Для существенно анизотропных материалов уровень  $\bar{\sigma}_3$  несколько выше, чем для умеренно анизотропных. Изменение угла армирования приводит к изменению  $\bar{\sigma}_3$  ( $\bar{\sigma}_3$ )<sup>\*</sup>. Максимальные значения  $\bar{\sigma}_3^*$  возникают при  $\varphi = 45^\circ$  и равны для стеклопластика 0,33.

#### Библиографический список

1. Амбарцумян С.А. Теория анизотропных пластин. Прочность, устойчивость и колебания.- М.: Наука, 1967.- 268 с.
2. Амбарцумян С.А. Общая теория анизотропных оболочек.- М.: Наука, 1974.- 448 с.
3. Григоренко Я.М., Василенко А.Т. Методы расчета оболочек. Т.4. Теория оболочек переменной жесткости.- Киев: Наук.думка, 1981.-544 с.
4. Карташов Г.Г., Степаненко Н.Д. К уточненной теории анизотропных многослойных оболочек // Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов: Сб.науч.тр.- Куйбышев, 1978.- Вып.5.- С.123-130.
5. Рассказов А.О. К теории многослойных ортотропных пологих оболочек // Прикладная механика.- 1976.- Т.12, №11.- С.50-56.
6. Карташов Г.Г. Влияние различных факторов на вибрационные характеристики лопаток газотурбинных двигателей из композитных материалов // Механика композитных материалов.- 1981, №3.- С.486-493.
7. Богданович А.Э., Ярве Э.В. Анализ напряжений в многослойных балках при поперечном динамическом изгибе // Механика композитных материалов.- 1983, №5.- С.824-837.
8. Григолюк Э.И., Селезов И.Т. Механика твердых деформируемых тел. Т.5. Неклассические теории колебаний стержней, пластин и оболочек.- М.: ВИНТИ АН СССР, 1973.- 272 с.
9. Нур А.К. Свободные колебания многослойных композиционных пластин // Ракетная техника и космонавтика.- М.: Мир, 1973.- Т.II, №7.- С.176-177.
10. Hiraghima K., Nagishi Y. Study on Dynamic Characteristics (Free Vibration and Dispersion Relation) of Several Plate Theories // Proc. Jap. Soc. Civ. Eng.- 1983.- N333.- P.21-34.



II. Seide P. An Improved Approximate Theory for the Bending of Laminated Plates // Mech. Today. Oxford e.n. - 1980. - Vol. 5. - p. 451-456.

УДК 629.7.036.017.1

В.А.Кочуров, Н.И.Епишев, В.П.Кажаев

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА  
ДИАГНОСТИКИ ПРИ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЯХ

В процессе стендовых испытаний ГТД отклонения контролируемых параметров от заданных значений могут быть вызваны как конструктивно-технологическими факторами, так и появлением неисправностей в проточной части, аналогичных эксплуатационным. Часто встречающейся неисправностью при испытаниях, особенно длительных, является загрязнение проточной части [1]. Ему, как правило, подвергаются направляющие лопатки первых и средних ступеней.

В статье рассматривается возможность определения места неисправности проточной части, возникшей при стендовых испытаниях, с использованием метода диагностики по ограниченному числу измеряемых параметров, разработанного авторами для применения в условиях эксплуатации [2]. При стендовых испытаниях измеренется большее количество термодинамических параметров, чем в эксплуатации, поэтому имеется возможность, варьируя их составом и числом при постановке диагноза, определить достаточный их набор для однозначного выявления неисправного узла.

Теоретической основой метода является математическая модель, составленная в предположении, что при неисправности узла происходит изменение двух его параметров состояния. У турбины наблюдается смещение характеристики КПД на величину ( $\sigma_{\eta}$ ) и изменение пропускной способности ( $\sigma_A$ ), у компрессора - смещение характеристики КПД ( $\sigma_{\eta}$ ) и напорной характеристики ( $\sigma_A$ ) [2].

Вероятность того, что данный комплекс измеряемых параметров вызван неисправностью  $i$ -го узла проточной части, определялась по урав-