

2. Разработка моделей биомеханических систем, включающих эндопротез и тела позвонков.

3. Разработка программного обеспечения для формирования специализированной системы автоматизированного анализа и синтеза элементов биомеханических систем.

Список литературы: 1. *Веретельник Ю.В.* Модели элементов биомеханических систем: решение прямых и обратных задач // *Механіка та машинобудування*. Науково-технічний журнал. – Харків: НТУ «ХПИ», 2004. – № 2. – С.63-67. 2. *Ткачук Н.А., Веретельник Ю.В.* К вопросу анализа и синтеза элементов биомеханических систем // *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Динаміка і міцність машин. – Харків: НТУ «ХПИ», 2004. – № 31. – С.149-152. 3. *Ткачук М.А., Радченко В.А., Веретельник Ю.В.* Узагальнений параметричний опис складних біомеханічних. Стаття опублікована в цьому сборнику. 4. *Tobias Pitzen, Fred H. Geisler, Dieter Matthis.* The influence of cancellous bone density on load sharing in human lumbar spine: a comparison between an intact and a surgically altered motion segment // *Eur. Spine J.* (2001). – 10: 23-29. 5. *V.K. Goel, Y.E. Kim, T.-H. Lim, J.N.Wienstein.* An analytical investigation of the mechanics of spinal instrumentation // *Spine vol. 13*, 9:1003-1011. 6. *Tony M. Keaveny, Elise F. Morgan, Glen L. Niebur, Oscar C. Yah.* Biomechanics of trabecular bone // *Annu. Rev. Biomed. Eng.* 2001. – 3: 307-33. 7. *Choi K, Goldstein S.A.* A comparison of the fatigue behavior of human trabecular and cortical bone tissue // *J. Biomech.* 1992. – 25: 1371–81. 8. *Michael A.K. Liebschner, David L. Koppehdahl, William S. Rosenberg, Tony M. Keaveny* Finite element modeling of the human thoracolumbar spine // *Spine vol. 28*, 6:559-565.

Поступила в редколлегию 25.04.2005.

УДК 539.3

С.М.ВЕРЕЩАКА, канд.техн.наук, НТУ «ХПИ»

К ИССЛЕДОВАНИЮ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ИЗГИБЕ ДВУХСЛОЙНЫХ ПЛАСТИН ИЗ СТЕКЛОПЛАСТИКА С МЕЖФАЗНЫМИ ДЕФЕКТАМИ СТРУКТУРЫ

Пропонується варіант геометрично нелінійної дискретно-структурної теорії багатосарових конструкцій досліджується напружено-деформований стан анізотропних елементів з міжфазними дефектами структури матеріалу. Рівняння рівноваги та геометричні співвідношення отримані з урахуванням впливу деформацій поперечного зсуву та обтиснення. Результати теоретичних досліджень порівнюються з експериментальними даними.

On the basis of the geometric nonlinear discrete - structural theory of multy-layer plates and shells the intense – deformed status of anisotropic elements with defects in structure of material is investigated. At the conclusion of the equations of balance and geometrical parity the influence of deformations of cross shift and cross-pressure is taken into account. The results of theoretical researches are compared with experimental data.

Значительное различие физико-механических характеристик отдельных компонент структуры слоистых тонкостенных элементов конструкций стало причиной создания адекватных дискретно-структурных теорий для расчета

такого класса задач.

Контактная задача механики многослойных пластинок и оболочек рассматривается в [1-5], где на основе дискретного подхода построены функционалы и получены системы уравнений для решения таких задач при условии неидеального контакта слоев. Метод решения нелинейных задач о контакте между двумя оболочками разной формы и эквидистантными слоями предложен в книге [6]. Подробный анализ последних результатов и направлений развития дискретно-структурной теории слоистых пластин и оболочек можно найти в обзоре [7].

В данной работе предлагается вариант геометрически нелинейной дискретно-структурной теории слоистых элементов конструкции и исследуется характер изменения контактных напряжений при изгибе двухслойных пластин из стеклопластика с межфазными дефектами структуры материала. При выводе уравнений равновесия и геометрических соотношения учитывается влияние деформаций поперечного сдвига и обжатия. Результаты теоретических исследований сравниваются с экспериментальными данными.

Постановка задачи. В соответствии с дискретно-структурной теорией математическая модель рассматриваемой здесь многослойной оболочки состоит из n тонких анизотропных слоев. Объем n жестких слоев равен $V = \sum_{i=1}^n V_i$. Каждый слой недеформированной оболочки отнесен к ортогональной криволинейной системе координат α^i ($i = 1, 2$), $z^{(k)}$. Координата $z^{(k)}$ направлена по общей нормали $\vec{m}^{(k)}$ к срединной поверхности $S^{(k)}$ и эквидистантной поверхности $S_z^{(k)}$ k -го слоя. Индекс « z » при введении других символов означает, что соответствующие величины относятся к точке $(\alpha^1, \alpha^2, z^{(k)})$ эквидистантной поверхности $S_z^{(k)}$.

Вектор полного перемещения $\vec{u}_z^{(k)}$ точки k -го жесткого слоя согласно уточненной теории оболочек Тимошенко можно представить в виде

$$\vec{u}_z^{(k)} = \vec{u}^{(k)} + z^{(k)} \vec{\gamma}^{(k)} + \varphi^{(k)}(z) \vec{\psi}^{(k)}, \quad (1)$$

где $\vec{u}_z^{(k)}$ – вектор перемещения точек срединной поверхности $S^{(k)}$; $\vec{\gamma}^{(k)}$ – вектор-функция углов поворота и обжатия волокон по направлению нормали к недеформированной срединной поверхности $S^{(k)}$ в процессе деформации; $\varphi^{(k)}(z)$ – нелинейная непрерывная функция распределения тангенциальных перемещений по толщине k -го слоя, анализ и аппроксимация которой приведены в [8]; $\vec{\psi}^{(k)}(\alpha_1^{(k)}, \alpha_2^{(k)})$ – вектор-функция сдвига. Ковариантные компоненты векторов $\vec{u}^{(k)}$, $\vec{\gamma}^{(k)}$, $\vec{\psi}^{(k)}$ записываются при помощи следующих выражений

$$\vec{u}^{(k)} = \vec{r}^{(k)i} u_i^{(k)} + \vec{m}^{(k)} w^{(k)}; \quad \vec{\gamma}^{(k)} = \vec{r}^{(k)i} \gamma_i^{(k)} + \vec{m}^{(k)} \gamma^{(k)}; \quad \vec{\psi}^{(k)} = \vec{r}^{(k)i} \psi_i^{(k)}. \quad (2)$$

Компоненты тензора конечных деформаций в точке $(\alpha^1, \alpha^2, z^{(k)})$ определяются как полуразности соответствующих компонент метрических тензоров

до, и после деформации

$$2\mathbf{e}_{ij}^{(k)z} = \mathbf{g}_{ij}^{(k)*} - \mathbf{g}_{ij}^{(k)}, \quad 2\mathbf{e}_{i3}^{(k)z} = \mathbf{g}_{i3}^{(k)*} - \mathbf{g}_{i3}^{(k)}, \quad 2\mathbf{e}_{33}^{(k)z} = \mathbf{g}_{33}^{(k)*} - 1, \quad (3)$$

Считая, что в направлении нормали к срединным поверхностям отдельно взятых слоев оболочки осевые линии общей и локальных систем координат совмещаются и также совмещаются локальные координатные поверхности со срединными поверхностями слоев, вариационное уравнение принципа Рейснера для многослойной оболочки запишется

$$\delta R = \sum_{k=1}^n \delta R^{(k)} = \sum_{k=1}^n \delta A_R^{(k)} - \sum_{k=1}^n \iiint_V \delta (\sigma_{\alpha\beta}^{\alpha\beta} \varepsilon_{\alpha\beta}^{(k)} - F^{(k)}) dV = 0 \quad (\alpha, \beta = 1, 2, 3). \quad (4)$$

Нумерация слоев начинается со стороны отрицательных значений координаты z от единицы до n . При этом $F^{(k)}$ – удельная дополнительная работа деформации k -го слоя, $\sigma_{(k)}^{\alpha\beta}$, $\varepsilon_{\alpha\beta}^{(k)}$ – компоненты тензора напряжений и тензора деформаций.

Если по сопряженным лицевым поверхностям k -го слоя выполняются условия контакта:

$$\mathbf{u}_{\beta}^{(k, k-1)} = \mathbf{u}_{\beta}^{(k-1, k)}, \quad X_{(k, k-1)}^{\beta} = X_{(k-1, k)}^{\beta}, \quad (5)$$

или в векторной форме –

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{u}}_{\bar{z}}^{(k)}(\alpha_i^{(k)}, -h^{(k)}/2) &= \bar{\mathbf{u}}_{\bar{z}}^{(k-1)}(\alpha_i^{(k-1)}, h^{(k-1)}/2), \\ \bar{X}_{(k)}(\alpha_i^{(k)}, -h^{(k)}/2) &= \bar{X}_{(k-1)}(\alpha_i^{(k-1)}, h^{(k-1)}/2) \quad (i = 1, 2), \end{aligned} \quad (6)$$

вариацию элементарной работы внешних сил δA_R можно представить в виде

$$\begin{aligned} \delta A_R &= \sum_{k=1}^n \delta A_R^{(k)} = \sum_{k=1}^n \iint_{S_{(k)}} (\bar{X}_{(k)} \delta \bar{\mathbf{u}}^{(k)} + M_{(k)}^i \bar{r}_i^{(k)} \delta \bar{\gamma}^{(k)} + B_{(k)}^i \bar{r}_i^{(k)} \delta \bar{\psi}^{(k)} + M_{(k)}^3 \delta \varepsilon_{33}^{(k)z}) dS + \\ &+ \sum_{k=1}^n \int_{l_1^{(k)}} (\bar{\Phi}_{(k)}^S \delta \bar{\mathbf{u}}^{(k)} + \bar{G}_{(k)}^S \delta \bar{\gamma}^{(k)} + \bar{L}_{(k)}^S \delta \bar{\psi}^{(k)}) dl + \sum_{k=1}^n \int_{l_2^{(k)}} (\bar{\Phi}_{(k)} \delta \bar{\mathbf{u}}^{(k)} + G_{(k)} \delta \bar{\gamma}^{(k)} + \bar{L}_{(k)} \delta \bar{\psi}^{(k)} + \\ &+ (\bar{\mathbf{u}}^{(k)} - \bar{\mathbf{u}}_S^{(k)}) \delta \bar{\Phi}_{(k)} + (\bar{\gamma}^{(k)} - \bar{\gamma}_S^{(k)}) \delta \bar{G}_{(k)} + (\bar{\psi}^{(k)} - \bar{\psi}_S^{(k)}) \delta \bar{L}_{(k)}) dl. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь $S_{(k)}$ – срединная поверхность k -го слоя; $l_1^{(k)}$, $l_2^{(k)}$ – части контура $l^{(k)}$. Векторы внешних усилий $\bar{X}_{(k)}$, моментов $\bar{M}_{(k)}$ и дополнительных моментов $\bar{B}_{(k)}$, которые входят в уравнение (7), определяются равенствами:

$$\begin{aligned} \bar{X}_{(k)} &= \bar{X}_{(k)}^+ - \bar{X}_{(k)}^- + \int_{-h^{(k)}/2}^{h^{(k)}/2} \bar{P}^{(k)} dz, \quad \bar{M}_{(k)} = \frac{h^{(k)}}{2} (\bar{X}_{(k)}^+ - \bar{X}_{(k)}^-) + \int_{-h^{(k)}/2}^{h^{(k)}/2} \bar{P}^{(k)} z dz, \\ \bar{B}_{(k)} &= \varphi^{(k)} \left(\frac{h^{(k)}}{2} \right) (\bar{X}_{(k)}^+ - \bar{X}_{(k)}^-) + \int_{-h^{(k)}/2}^{h^{(k)}/2} \bar{P}^{(k)} \varphi^{(k)}(z) dz, \end{aligned} \quad (8)$$

где векторы $\bar{X}_{(k)}^+$, $\bar{X}_{(k)}^-$ включают контравариантные компоненты тензора

контактных напряжений $\sigma_{(k)}^{i3+}$, $\sigma_{(k)}^{i3-}$ ($i = 1, 2, 3$) :

$$\bar{X}_{(k)}^+ = \sigma_{(k)}^{i3+} \bar{\rho}_i^{(k)*} + \sigma_{(k)}^{33+} \bar{m}^{(k)*}, \quad \bar{X}_{(k)}^- = \sigma_{(k)}^{i3-} \bar{\rho}_i^{(k)*} + \sigma_{(k)}^{33-} \bar{m}^{(k)*} \quad (i = 1, 2). \quad (9)$$

Индексы «+» и «-» указывают на верхнюю и нижнюю лицевые поверхности k -го слоя. Аналогичную запись имеют векторы внешней нагрузки $\bar{q}_{(n)}^+$, $\bar{q}_{(1)}^-$:

$$\bar{q}_{(n)}^+ = q_{(n)}^{i3+} \bar{\rho}_i^{(n)*} + q_{(n)}^{33+} \bar{m}^{(n)*}, \quad \bar{q}_{(1)}^- = q_{(1)}^{i3-} \bar{\rho}_i^{(1)*} + q_{(1)}^{33-} \bar{m}^{(1)*} \quad (i = 1, 2). \quad (10)$$

Вектор $\bar{P}^{(k)}$ учитывает влияние собственного веса. Контравариантные компоненты $M_{(k)}^i$, $M_{(k)}^3$ вектор-момента $\bar{M}_{(k)}$ относительно базисных векторов $\bar{r}_i^{(k)*}$ и $\bar{m}^{(k)*}$ находятся согласно равенства

$$\bar{M}_{(k)} = M_{(k)}^i \bar{r}_i^{(k)*} + \bar{m}^{(k)*} M_{(k)}^3. \quad (11)$$

Кроме этого, элементарная работа (7) k -го слоя оболочки характеризуется главным вектором $\bar{\Phi}_{(k)}^S$, главным моментом $\bar{G}_{(k)}^S$, дополнительным главным моментом $\bar{L}_{(k)}^S$, которые возникают от действия заданных внешних контурных сил на $I_1^{(k)}$, а также главным вектором $\bar{\Phi}_{(k)}$, главным моментом $\bar{G}_{(k)}$, дополнительным главным моментом $\bar{L}_{(k)}$, связанных с напряжениями в точках контура $I_2^{(k)}$ из-за заданного смещения точек контура $\bar{u}_S^{(k)}$.

Второе слагаемое уравнения (4) следует представить в виде

$$\delta\Pi_R = \sum_{k=1}^n (\delta\Pi_{1R}^{(k)} + \delta\Pi_{2R}^{(k)}) = \sum_{k=1}^n \iiint_{V^{(k)}} \sigma_{(k)}^{\alpha\beta} \delta\eta_{\alpha\beta}^{(k)} dV - \sum_{k=1}^n \iiint_{V^{(k)}} (\partial F^{(k)} / \partial \sigma_{(k)}^{\alpha\beta} - \eta_{\alpha\beta}^{(k)}) \delta\sigma_{(k)}^{\alpha\beta} dV, \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned} \delta\Pi_{1R}^{(k)} &= \iiint_{V^{(k)}} \sigma_{(k)}^{\alpha\beta} \delta\eta_{\alpha\beta}^{(k)} dV = \iiint_{V^{(k)}} (\sigma_{(k)}^{ij} \delta\varepsilon_{ij}^{(k)\#} + 2\sigma_{(k)}^{i3} \delta\varepsilon_{i3}^{(k)\#} + \sigma_{(k)}^{33} \delta\varepsilon_{33}^{(k)\#}) dV, \\ \delta\Pi_{2R}^{(k)} &= -\iiint_{V^{(k)}} \delta W_{(k)}^f dV = -\iiint_{V^{(k)}} \{ (\partial F^{(k)} / \partial \sigma_{(k)}^{ij} - \varepsilon_{ij}^{(k)\#}) \delta\sigma_{(k)}^{ij} + (\partial F^{(k)} / \partial \sigma_{(k)}^{i3} - 2\varepsilon_{i3}^{(k)\#}) \times \\ &\quad \times \delta\sigma_{(k)}^{i3} + (\partial F^{(k)} / \partial \sigma_{(k)}^{33} - \varepsilon_{33}^{(k)\#}) \delta\sigma_{(k)}^{33} \} dV \quad (i, j = 1, 2). \end{aligned}$$

Подставив геометрические соотношения (3) в (4), (7), (12), на основе вариационного принципа Рейсснера несложно получить для каждого отдельно взятого слоя оболочки систему уравнений равновесия, физические соотношения, статические и кинематические граничные условия. Применение обобщенного закона Гука, нелинейной теории среднего изгиба оболочки [9] значительно упрощает вывод уравнений равновесия и граничных условий. Переход к физическим компонентам, используемых в данной работе тензоров, вывод уравнений равновесия и граничных условий можно найти в работе [10].

Для оболочки вращения, которая включает в себя n слоев с соосными

поверхностями вращения, разрешающая система уравнений в частных производных имеет вид

$$\frac{\partial \bar{Y}^{(k)}}{A_{(k)} \partial \alpha_1^{(k)}} = D_0^{(k)} \bar{Y}^{(k)} + D_1^{(k)} \frac{\partial \bar{Y}^{(k)}}{B_{(k)} \partial \alpha_2^{(k)}} + D_2^{(k)} \frac{\partial^2 \bar{Y}^{(k)}}{B_{(k)}^2 \partial \alpha_2^{(k)2}} + \bar{f}^{(k)}, \quad k=1,2..n, \quad (13)$$

где

$$\bar{Y}^{(k)} = \{T_{11}^{(k)}, T_{12}^{(k)}, Q_1^{(k)}, M_{11}^{(k)}, M_{12}^{(k)}, L_{11}^{(k)}, L_{12}^{(k)}, u_1^{(k)}, u_2^{(k)}, w^{(k)}, \gamma_1^{(k)}, \gamma_2^{(k)}, \psi_1^{(k)}, \psi_2^{(k)}\}^T, \\ \bar{f}^{(k)} = \{f_1^{(k)}, f_2^{(k)}, \dots, f_{14}^{(k)}\}, \quad D_0^{(k)}, D_1^{(k)}, D_2^{(k)} - \text{квадратные матрицы 14-го порядка.}$$

В качестве основных неизвестных функций принимаются величины, которые определяют граничные условия на боковом контуре k -го слоя оболочки. Из-за ограниченного объема статьи показать разрешающую систему уравнений, физические и геометрические соотношения в развернутой форме не представляется возможным.

Кинематические и статические условия контакта (5) лицевых поверхностей k -го слоя и сопряженных с ними поверхностями $k+1$ и $k-1$ -го слоя, согласно с введенными ранее обозначениями принимают вид:

$$2u_i^{(k)} = u_i^{(k+1)} + u_i^{(k-1)} - \frac{h^{(k+1)}}{2} \gamma_i^{(k+1)} + \frac{h^{(k-1)}}{2} \gamma_i^{(k-1)} - \varphi^{(k+1)} \left(\frac{h^{(k+1)}}{2} \right) \psi_i^{(k+1)} + \varphi^{(k-1)} \left(\frac{h^{(k-1)}}{2} \right) \psi_i^{(k-1)}, \\ (i=1,2); \quad 2w^{(k)} = w^{(k+1)} + w^{(k-1)} - \frac{h^{(k+1)}}{2} \gamma^{(k+1)} + \frac{h^{(k-1)}}{2} \gamma^{(k-1)}; \quad (14)$$

$$\sigma_{i3}^{(k)+} = \sigma_{i3}^{(k+1)-}, \quad \sigma_{i3}^{(k)-} = \sigma_{i3}^{(k-1)+}, \quad (i=1,2); \\ \sigma_{33}^{(k)+} = \sigma_{33}^{(k+1)-}, \quad \sigma_{33}^{(k)-} = \sigma_{33}^{(k-1)+}. \quad (15)$$

Учитывая кинематические соотношения (14) при построении разрешающей системы уравнений (13) для всего пакета слоев элемента и выполняя статические условия контакта по лицевым сопряженным поверхностям (15) на основе метода штрафных функций [11], можно составить алгоритм решения контактной задачи дискретно-структурной теории многослойных оболочек.

Если между k и $k+1$ слоями оболочки допустить отсутствие кинематических связей, то на участках сопряжения этих слоев $S_z^{(k, k+1)}$ могут возникать неизвестные векторы усилий $\bar{q}_{(k)}$, $\bar{q}_{(k+1)}$ контактного взаимодействия. Согласно 3-му закону Ньютона имеет место зависимость: $\bar{q}_{(k)} = -\bar{q}_{(k+1)}$. Для учета влияния усилий контактного взаимодействия слоев в вариационное уравнение принципа Рейсснера (4) необходимо ввести слагаемое, учитывающее работу сил контактного взаимодействия на векторе перемещения каждого слоя участка сопряженной поверхности

$$A_q = \sum_{m=k}^{k+1} \iint_{S_z^{(k, k-1)}} \bar{q}_{(m)} \bar{u}_z^{(m)} dS. \quad (16)$$

Усилия контактного взаимодействия $\bar{q}_{(k)} = q_{(k)}^i \bar{r}_i^{(k)} + q_{(k)}^3 \bar{m}^{(k)}$ возникают

при выполнении условия

$$(\bar{u}_z^{(k)} - \bar{u}_z^{(k+1)}) < 0 \quad (17)$$

в зонах сопряжения жестких слоев. В случае, когда неравенство (17) не выполняется при перемещении точек области $S_z^{(k, k+1)}$ в процессе деформации, контактное давление $\bar{q}_{(k)}$ в уравнениях (13) принимает значение $\bar{q}_{(k)} = 0$. Решая систему уравнений (13) несложно с заданной точностью найти значение контактного давления на основе итерационного метода, предложенного в [6].

Пример расчета. Для тестовых примеров исследовались пластины круглой форме в плане диаметром 0,16 м регулярной структуры из стеклопластика. Рассматриваемые пластины выполнялись из 4 – х слоев стеклоткани TG 430 – С (100) (производитель – Латвия). В качестве связующего использовалась полиэфирная ортофталевая смола с пониженной эмиссией стирола Cricstic 2 – 446 PA (производитель – Великобритания).

Физико-механические характеристики пластинок из стеклопластика определялись в следующей последовательности. Вначале, согласно ГОСТ 25.601 – 80, определяется модуль упругости и коэффициент Пуассона при растяжении образцов из стеклопластика. Проведенные механические испытания позволяют утверждать, что материал рассматриваемых пластинок можно классифицировать как трансверсально изотропный ($E_{11} = E_{22} = 1,5 \cdot 10^4$ МПа, $\nu_{12} = \nu_{21} = 0,12$). Остальные физико-механические характеристика стеклопластика определялись интегрально для всего пакета слоев пластинки на основе зависимостей работы [8], когда модули упругости 1-го рода, коэффициенты Пуассона волокон и матрицы соответственно равны: $E_B = 7,0 \cdot 10^4$ МПа; $E_M = 3,5 \cdot 10^3$ МПа; $\nu_B = 0,22$; $\nu_M = 0,35$.

Прогибы пластинки измерялись при помощи индикаторов часового типа с точностью до 0,01 мм. Для измерения деформаций использовались тензорезисторы КФ4П1-3-200. Наклейка тензорезисторов осуществлялась согласно инструкции по наклейке АЖВ2.782.001 ТО. Для измерения выходных сигналов тензорезисторов и представления отчетов в цифровом виде использовалась измерительная система СИИТ-3.

Математическая модель расчета представляет собой двухслойную пластину, составленную из двух жестких трансропных слоев толщиной $h_{(1)} = h_{(2)} = 1,0 \cdot 10^{-3}$ м. При этом считается, что область межфазного контакта жестких слоев является весьма податливой, то есть допускается их «проскальзывание» друг относительно друга.

Результаты исследований изгиба пластинки при действии равномерного давления $q = 0,025$ Мпа представлены на рисунке 1-2. Относительная погрешность теоретического значения прогиба в центре пластины при сравнении с экспериментальными данными составила менее 3 %: $w_z = 0,2 \cdot 10^{-2}$ м – для жестко защемленного контура; $w_s = 0,2 \cdot 10^{-2}$ м – для свободно опертого контура.

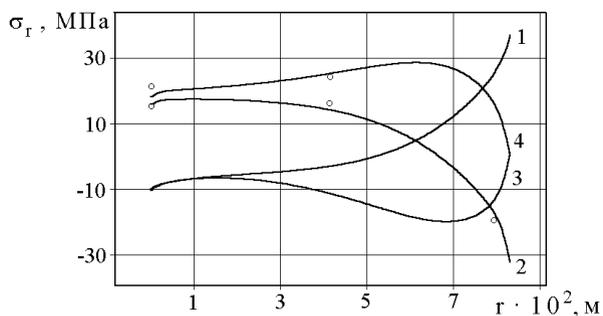


Рисунок 1 – Радиальные напряжения на лицевых поверхностях круглой пластины (1,2 – жестко защемленный контур; 3,4 – свободно опертый контур; \circ – данные эксперимента)

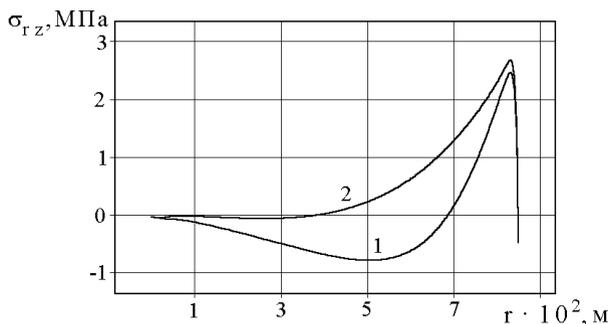


Рисунок 2 – Напряжения поперечного сдвига вдоль сопряженной поверхности контактирующих слоев круглой пластинки (1 –свободно опертый контур; 2 – жестко защемленный контур)

Выводы. Представленный вариант нелинейной дискретно-структурной теории адекватно отражает работу реальных конструкций. Получена удовлетворительное соответствие теоретических и экспериментальных данных. Величина контактных напряжений поперечного сдвига увеличивается в 4-5 раз в зоне опирания контура, что приводит к разрушению межфазного клеевого слоя. Таким образом, предлагаемая модель расчета позволяет определить зону контакта, величину контактного давления, изменение характера напряженного состояния на границе контакта.

Список литературы: 1. Лазько В.А. Напряженно-деформированное состояние слоистых анизотропных оболочек при наличии зон неидеального контакта слоев. 1. Вариационный принцип теории упругих слоистых анизотропных систем при наличии зон неидеального контакта // Механика композитных материалов. – 1981. – № 5. – С. 832-836. 2. Лазько В.А. Напряженно-деформированное состояние слоистых анизотропных оболочек при наличии зон неидеального контакта слоев. 11. Обобщенные уравнения ортотропных слоистых оболочек при разрывных перемещениях на границе раздела // Механика композитных материалов. – 1982. – № 1. – С. 77-84. 3. Пелех Б.Л., Лазько В.А. Слоистые анизотропные

пластины и оболочки с концентраторами напряжений. – К.: Наукова думка, 1982. – 296 с. **4.** *Паймушин В.И.* Обобщенный вариационный принцип Рейсснера в нелинейной механике пространственных составных тел с приложениями к теории многослойных оболочек // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1987. – № 2. – С. 171-180. **5.** *Паймушин В.И.* Нелинейная теория среднего изгиба трехслойных оболочек с дефектами в виде участков непрочлея // Прикладная механика. – 1987. – Т. 23, № 11. – С. 32-38. **6.** *Кантор Б. Я.* Контактные задачи нелинейной теории оболочек вращения / Отв. ред. Подгорный А.Н.; АН УССР. Ин-т пробл. машиностроения. – Киев: Наук. думка, 1990. – 136 с. **7.** *Пискунов В.Г., Расказов А.О.* Развитие теории слоистых пластин и оболочек // Прикладная механика. – 2002. – Т. 38, № 2. – С. 22-56. **8.** *Болотин В.В., Новичков Ю.Н.* Механика многослойных конструкций. – М.: Машиностроение, 1980. – 375 с. **9.** *Галимов К.З.* Уравнения равновесия и движения тонких оболочек по нелинейной теории типа Тимошенко // Теория оболочек с учетом поперечного сдвига / Под ред. К.З.Галимова. – Издательство Казанского университета, 1977. – С. 36 – 95. **10.** *Верещака С.М.* К дискретно-структурной теории многослойных оболочек с дефектами структуры // Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Тематичний випуск: Динамика и прочность машин. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2004. – № 31. – С. 39 – 46. **11.** *Васильев Ф.П.* Методы решения экстремальных задач. – М.: Наука, 1981. – 400 с.

Поступила в редколлегию 27.06.2005.

УДК 539.3

А.Ю.ВАСИЛЬЕВ, НТУ «ХПИ»

К ВОПРОСУ О ДЕФОРМИРОВАНИИ КОРПУСОВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПРИ ДЕЙСТВИИ УДАРНЫХ НАГРУЗОК

Запропоновано методіку дослідження корпусів транспортних засобів при дії ударних навантажень. Описані методи заміни процесів силовим еквівалентом. Також застосовано до поставленої задачі описані підходи Ейлера, Лагранжа, Лагранж-Ейлера, та метод структурно-рідинного скріплення.

A theoretical method to research of transport vehicles under the percussion action is offered. The methods of force-equivalent loading is described. Lagrange Formulation, Euler Formulation, Arbitrary Lagrangian-Eulerian Formulation and method of Fluid-Structure Interaction is described too. Possibility of applying these methods to analyzing frame of transport vehicles are given

Введение

Любое транспортное средство в течение своей эксплуатации неоднократно подвергается действию ударных нагрузок [1]. Подобные нагрузки характерны большей опасностью по сравнению со статическими нагрузками подобной величины [2]. Данная статья посвящена обзору методов анализа динамического поведения объектов под действием ударных нагрузок разной природы применительно к исследованию корпусов транспортных средств.

В зависимости от природы динамического воздействия и необходимой точности моделирование может происходить при помощи различных подходов:

1. Для многих процессов достаточную точность может обеспечить замена ударного процесса на обычное силовое воздействие. То есть приложении к конкретным точкам конструкции системы сил, меняющихся по определенно-