

УДК 539.3

А. В. ЯРОВАЯ, доктор физико-математических наук, А. А. ПОДДУБНЫЙ, аспирант, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ИЗГИБ ТРЕХСЛОЙНОЙ БАЛКИ, ЧАСТИЧНО ОПЕРТОЙ НА УПРУГОЕ ОСНОВАНИЕ

Рассмотрен изгиб упругой трехслойной балки, частично опертой на упругое основание Винклера. Для описания кинематики несимметричного по толщине пакета балки приняты гипотезы ломаной нормали. Получена система уравнений равновесия и ее общее аналитическое решение в перемещениях. Проведен численный анализ решения.

Слоистые, в том числе трехслойные, элементы конструкций широко используются в промышленном и гражданском строительстве, транспортном машиностроении, при строительстве и восстановлении искусственных сооружений на железных и автомобильных дорогах. В связи с этим актуальной является проблема их расчета при различных внешних воздействиях и условиях опирания.

Трехслойные конструкции состоят из двух относительно тонких внешних слоев (называемых несущими) из высокопрочных материалов, связанных слоем заполнителя, толщина которого значительно больше, а прочностные характеристики и плотность, как правило, значительно ниже. Поэтому при использовании соответствующих материалов несущих слоев и заполнителя эти конструкции обладают хорошими вибропоглощающими характеристиками, имеют необходимые звуко- и теплоизоляционные свойства, требуемую свето- и радиопрозрачность и могут быть классифицированы как металлические, пластмассовые и комбинированные, а по степени заполнения – сплошные и дискретные.

Практическое применение трехслойной конструкции определяется структурой ее сечения, что позволяет разделять их на симметричные и несимметричные. Если несущие слои имеют одинаковую толщину и изготовлены из одинаковых материалов, то конструкцию считают симметричной. У несимметричных конструкций несущие слои имеют неодинаковую толщину, изготовлены из разных материалов, т. е. асимметрия может быть геометрической и физической. Применение несимметричных по структуре трехслойных конструкций связано не только с требованиями получения конструкции минимальной массы, но и с функциональными свойствами, например, по обеспечению минимальной теплопроводности, радиопрозрачности и др.

Таким образом, исходя из массы несущего слоя и заполнителя конструкции подразделяются на трехслойные с сотовым заполнителем, из композиционных материалов на основе борволокна и алюминиевой матрицы, эпоксидного графитопла-

стика, бериллиевых и алюминиевых сплавов. По экономической эффективности тонкостенные конструкции располагаются в такой последовательности: трехслойные конструкции с несущими слоями и заполнителем из алюминиевых сплавов и стеклопластиков, подкрепленные конструкции из эпоксидного боропластика и углепластика, из композиционных материалов на основе борволокна и алюминиевой матрицы [1].

На практике часто используются подкрепленные тонкостенные конструкции из композитных материалов. Перспективная конструктивная схема подкрепленной конструкции представляет собой систему из совместно отформованных и связанных без использования дополнительных механических элементов (заклепок, винтов и т. д.) листов обшивки и тонкостенных профилей. Применение такой конструктивной схемы позволяет получать заметный выигрыш в массе (порядка 20 % при замене алюминиевых сплавов на углепластик) при сохранении традиционных методов проектирования и сборки.

Если элементы подкрепляющего набора одинаковы и часто расположены, их можно приближенно заменить системой условных сплошных слоев (рисунок 1). Подкрепленная конструкция приводится к условной гладкой. Если же элементы набора неодинаковы или расположены редко, необходимо решать задачу о сопряжении отдельных ребер между собой и с обшивкой [2].



Рисунок 1 – Замена подкрепленной системы (а) условной слоистой системой (б)

В строительстве и восстановлении мостов при установке пролетных строений используется способ их наводки или накатки. Пролетное строение частично опирается на одну из опор и с помощью домкратов надвигается в заданный пролет до его полной установки на расчетные отметки. Расчетная схема такой конструкции может быть представлена в виде неоднородной балки, лежащей

полностью, а затем частично на упругом основании. По мере надвигки пролетного строения длина участка опирания балки уменьшается.

Статическое деформирование трехслойных элементов конструкций исследовано в работах [3–6]. Изгиб трехслойной балки, полностью опертой на упругое основание, рассмотрен в работах [7, 8]. Здесь исследован изгиб подобной балки, частично опертой на упругое основание.

Для постановки и решения краевых задач использован вариационный метод Лагранжа и аппарат обобщенных функций. Решение соответствующей системы дифференциальных уравнений с разрывными коэффициентами проведено методом «сшивания» решений, полученных в областях их непрерывности.

Постановка задачи. Рассматривается несимметричная по толщине упругая трехслойная балка с жестким наполнителем (рисунок 2).

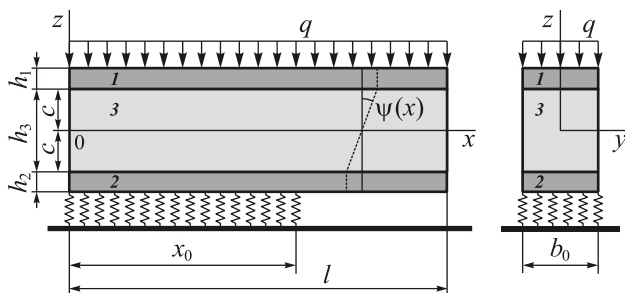


Рисунок 2 – Расчетная схема трехслойной балки, частично опертой на упругое основание

Система координат x, y, z связывается со срединной плоскостью наполнителя. Для описания кинематики пакета используется гипотеза «ломаной» нормали: в тонких несущих слоях 1, 2 справедливы гипотезы Кирхгофа, в несжимаемом по толщине сравнительно толстом наполнителе 3 нормаль остается прямолинейной, не изменяет своей длины, но поворачивается на некоторый дополнительный угол $\psi(x)$. Деформации считаются малыми. На внешний слой 1 балки действует распределенная поперечная нагрузка постоянной интенсивности q . Частично балка опирается на упругое основание Винклера, в результате на нижний слой действует реакция

$$q_r = -\kappa w H(x_0 - x), \quad (1)$$

где κ – коэффициент жесткости упругого основания; $w(x)$ – прогиб балки; $H_0(x)$ – функция нулевого порядка из семейства функций Хевисайда

$$H_0(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0; \\ 0, & x < 0. \end{cases}$$

Так как материалы всех слоев несжимаемы в поперечном направлении, то прогиб во всех точках поперечного сечения балки одинаков. На торцах предполагается наличие жестких диафрагм,

препятствующих относительно сдвигу слоев, но не мешающих деформированию из своей плоскости. Через $u(x)$ обозначено продольное перемещение срединной плоскости наполнителя, h_k – толщина k -го слоя ($k = 1, 2, 3$), при этом толщина наполнителя $h_3 = 2c$.

Введенные геометрические гипотезы позволяют выразить продольные перемещения в слоях $u^{(k)}$ через три искомые функции $u(x)$, $\psi(x)$ и $w(x)$:

$$\begin{aligned} u^{(1)} &= u + c\psi - zw_{,x} & (c \leq z \leq c + h_1), \\ u^{(3)} &= u + z\psi - zw_{,x} & (-c \leq z \leq c), \\ u^{(2)} &= u - c\psi - zw_{,x} & (-c - h_2 \leq z \leq -c), \end{aligned} \quad (2)$$

где запятая в нижнем индексе обозначает операцию дифференцирования по следующей за ней координате; z – координата рассматриваемого волокна.

Компоненты тензора деформаций в слоях $\epsilon_{ij}^{(k)}$ ($i, j = x, z$) следуют из соотношений Коши и перемещений (2). В слоях балки вводятся внутренние силы и моменты:

$$\begin{aligned} N^{(k)} &= b_0 \int_{h_k} \sigma_x^{(k)} dz, & M^{(k)} &= b_0 \int_{h_k} \sigma_x^{(k)} z dz, \\ Q^{(3)} &= b_0 \int_{h_3} \sigma_{xz}^{(3)} dz, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\sigma_x^{(k)}$, $\sigma_{xz}^{(3)}$ – компоненты тензора напряжений; b_0 – ширина поперечного сечения балки.

Уравнения равновесия трехслойной балки в усилиях (3) и силовые граничные условия следуют из принципа возможных перемещений Лагранжа:

$$\delta A = \delta W, \quad (4)$$

где δA и δW – вариации работ внешних сил и внутренних напряжений;

$$\begin{aligned} \delta A &= \iint_S (q + q_r) \delta w dS = b_0 \int_0^l (q + q_r) \delta w dx, \\ \delta W &= \iint_S \sum_{k=1}^3 \int_{h_k} (\sigma_x^{(k)} \delta \epsilon_x^{(k)} + 2\sigma_{xz}^{(3)} \delta \epsilon_{xz}^{(3)} \delta_{k3}) dz dS = \\ &= b_0 \int_0^l \left[\sum_{k=1}^3 \int_{h_k} \sigma_x^{(k)} \delta \epsilon_x^{(k)} dz + 2 \int_{h_3} \sigma_{xz}^{(3)} \delta \epsilon_{xz}^{(3)} dz \right] dx. \end{aligned}$$

Уравнение (4) должно выполняться при любых значениях δu , $\delta \psi$ и δw . Этого можно добиться, только приравняв нулю коэффициенты при указанных вариациях. В результате получаем систему обыкновенных дифференциальных уравнений равновесия частично опертой трехслойной балки в усилиях:

$$\begin{cases} N_{,x} + b_0 p = 0, \\ H_{,x} - Q = 0, \\ M_{,xx} + b_0(q + q_R H(x_0 - x)) = 0. \end{cases} \quad (5)$$

При этом должны выполняться следующие силовые граничные условия:

$$\begin{aligned} x = 0: N = N_0, M = M_0, M_{,x} = Q_0, H = 0, \\ x = l: N = N_l, M = M_l, M_{,x} = Q_l, H = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Применяя соотношения (2), (3), выразим внутренние усилия и моменты через искомые функции $u(x)$, $\psi(x)$, $w(x)$. Подставив в уравнения системы (5) внутренние усилия и моменты (3), выраженные через искомые перемещения последними соотношениями, получим систему уравнений равновесия рассматриваемой трехслойной балки в перемещениях:

$$\begin{aligned} a_1 u_{,xx} + a_6 \psi_{,xx} - a_7 w_{,xxx} &= 0, \\ a_6 u_{,xx} + a_2 \psi_{,xx} - a_3 w_{,xxx} - a_5 \psi &= 0, \\ a_7 u_{,xxx} + a_3 \psi_{,xxx} - a_4 w_{,xxxx} - \kappa w H(x_0 - x) &= -q, \end{aligned} \quad (7)$$

где коэффициенты a_i выражаются через толщины и модули упругости материалов слоев.

Аналогичную процедуру можно проделать и с граничными условиями (6).

Система обыкновенных дифференциальных уравнений (7) имеет разрывный коэффициент, обусловленный наличием функции Хевисайда в реакции основания (1).

Решение краевой задачи. В соответствии с предлагаемой процедурой решения рассмотрим систему уравнений (7) в двух зонах: I – область опирания на упругое основание ($x < x_0$), II – область без основания ($x > x_0$).

В первой из них функция Хевисайда обращается в единицу. Искомые перемещения в этой области пометим индексом «1» внизу. Система (7) здесь принимает вид

$$\begin{aligned} a_1 u_{1,xx} + a_6 \psi_{1,xx} - a_7 w_{1,xxx} &= -p, \\ a_6 u_{1,xx} + a_2 \psi_{1,xx} - a_3 w_{1,xxx} - a_5 \psi_1 &= 0, \\ a_7 u_{1,xxx} + a_3 \psi_{1,xxx} - a_4 w_{1,xxxx} - \kappa w_1 &= -q. \end{aligned} \quad (8)$$

Продифференцируем два раза первое уравнение в (8) и подставим в него $\psi_{,xxx}$ из второго уравнения. После приведения имеем неоднородное линейное дифференциальное уравнение шестого порядка с постоянными коэффициентами относительно прогиба:

$$w_{1,xxxxxx} + \alpha_1 w_{1,xxxx} + \alpha_6 w_{1,xx} + \alpha_7 w_1 = f(x), \quad (9)$$

где $f(x) = a_2 q + \alpha_5 q_{,xx} + \alpha_3 p_{,x} + a_4 p_{,xxx}$, коэффициенты α_i выражены через a_i и κ .

Решение уравнения (9) можно представить в виде суммы общего решения соответствующего

однородного уравнения $w_0(x)$ и частного решения неоднородного уравнения $w_p(x)$. Для нахождения $w_0(x)$ выпишем характеристическое уравнение, соответствующее однородному уравнению (9):

$$\lambda^6 + \alpha_1 \lambda^4 + \alpha_2 \lambda^2 + \alpha_3 = 0. \quad (10)$$

Это бикубическое уравнение с действительными коэффициентами. Пусть $\lambda_2 = \xi$, тогда (10) примет вид

$$\xi^3 + \alpha_1 \xi^2 + \alpha_2 \xi + \alpha_3 = 0. \quad (11)$$

Дискриминант уравнения (11)

$$D = -4m_1^3 - 27m_2^2, \quad (12)$$

$$m_1 = \alpha_2 - \frac{\alpha_1^2}{3}, \quad m_2 = \frac{2\alpha_1^3}{27} - \frac{\alpha_1 \alpha_2}{3} + \alpha_3.$$

Определить аналитически знак дискриминанта в общем случае не представляется возможным. Поэтому в рамках принятой модели проведем численный анализ (12) для реальных геометрических и механических параметров материалов слоев в зависимости от жесткости упругого основания. Если принять в качестве материала несущих слоев сплав Д16Т, наполнитель – политетрафторэтилен (ПТФЭ), толщины несущих слоев $h_1 = h_2 = 0,02$, наполнителя – $h_3 = 2c = 0,2$, то получим, что дискриминант (12) равен нулю при значениях $\kappa_1 = 31$, $\kappa_2 = 640$ (МПа/м). Соответствующий график показан на рисунке 3.

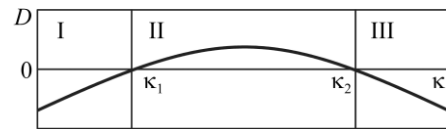


Рисунок 3 – Изменение дискриминанта D в зависимости от жесткости основания κ

Следовательно, в областях I и III дискриминант отрицателен, поэтому уравнение (10) имеет два комплексно-сопряженных и один действительный корень. Если значение дискриминанта находится в области II, то все три корня действительные.

Необходимо отметить, что границы областей зависят от материалов и геометрических параметров слоев балки, однако наибольшее влияние на них оказывает жесткость упругого основания. Поэтому выделим три типа оснований в зависимости от значения их жесткости:

$0 < \kappa < \kappa_1$ – легкие основания;

$\kappa_1 < \kappa < \kappa_2$ – основания средней жесткости;

$\kappa > \kappa_2$ – основания высокой жесткости.

Вид аналитических решений задач о деформировании рассматриваемой трехслойной балки в указанных областях будет различаться, поэтому в дальнейшем примем основание *средней жестко-*

сти. В этом случае решение уравнения (9) будет следующим [5, 6]:

$$w_1(x) = C_{11}e^{\lambda_1 x} + C_{21}e^{-\lambda_1 x} + C_{31}e^{\lambda_3 x} + C_{41}e^{-\lambda_3 x} + C_{51}e^{\lambda_5 x} + C_{61}e^{-\lambda_5 x} + \frac{q}{\kappa}, \quad (13)$$

где C_{11}, \dots, C_{61} – константы интегрирования.

Относительный сдвиг в заполнителе и продольное перемещение выразим через прогиб из оставшихся уравнений системы (8):

$$\psi_1 = b_1 w_{1,xxx} + b_2 \int w_1 dx + b_3 \int q dx + C_{71},$$

$$u_1 = b_5 \psi_1 + b_6 w_{1,x} + C_{81} x + C_{91}, \quad (14)$$

где C_{71}, C_{81}, C_{91} – константы интегрирования; причем $C_{71} = 0$ при постоянной поверхностной нагрузке; коэффициенты b_i выражены через a_i и κ .

В результате, используя решения (13), (14), получаем остальные искомые перемещения:

$$\psi_1(x) = C_{11}a_{01}e^{\lambda_1 x} - C_{21}a_{01}e^{-\lambda_1 x} + C_{31}a_{12}e^{\lambda_3 x} - C_{41}a_{12}e^{-\lambda_3 x} + C_{51}a_{13}e^{\lambda_5 x} - C_{61}a_{13}e^{-\lambda_5 x} + b_2 \frac{q_0}{\kappa} x + b_3 q_0 x,$$

$$u_1(x) = C_{11}a_{21}e^{\lambda_1 x} - C_{21}a_{21}e^{-\lambda_1 x} + C_{31}a_{22}e^{\lambda_3 x} - C_{41}a_{22}e^{-\lambda_3 x} + C_{51}a_{23}e^{\lambda_5 x} - C_{61}a_{23}e^{-\lambda_5 x} + b_5 q_0 \left(\frac{b_2}{\kappa} + b_3 \right) x + C_{81} x + C_{91}, \quad (15)$$

где

$$a_{01} = b_1 \lambda_1^3 + \frac{b_2}{\lambda_1}, \quad a_{12} = b_1 \lambda_3^3 + \frac{b_2}{\lambda_3}, \quad a_{13} = b_1 \lambda_5^3 + \frac{b_2}{\lambda_5},$$

$$a_{21} = b_5 a_{11} + b_6 \lambda_1, \quad a_{22} = b_5 a_{12} + b_6 \lambda_3,$$

$$a_{23} = b_5 a_{13} + b_6 \lambda_5.$$

Теперь рассмотрим систему уравнений (7) в области II – без опирания на основание. Здесь функция Хевисайда равна нулю ($x \geq x_0$), реакция основания отсутствует. Искомые перемещения в этой области пометим индексом «2» внизу. Система (7) преобразуется к виду:

$$a_1 u_{2,xx} + a_6 \psi_{2,xx} - a_7 w_{2,xxx} = 0,$$

$$a_6 u_{2,xx} + a_2 \psi_{2,xx} - a_3 w_{2,xxx} - a_5 \psi_2 = 0,$$

$$a_7 u_{2,xxx} + a_3 \psi_{2,xxx} - a_4 w_{2,xxxx} = -q. \quad (16)$$

Аналитическое решение системы (16) совпадает по виду с решением, приведенным в [2] для трехслойной балки, не опертой на упругое основание. В нашем случае

$$\psi_2 = C_{22} \text{sh}(\beta_2 x) + C_{32} \text{ch}(\beta_2 x) - \frac{\gamma_{12}}{\beta_2^2} (qx + C_{12}),$$

$$w_2(x) = \frac{1}{\alpha_{22}} \left[\frac{\alpha_{12}}{\beta_2} \times \right.$$

$$\left. \times \left[C_{22} \text{ch}(\beta_2 x) + C_{32} \text{sh}(\beta_2 x) - \frac{\gamma_{12}}{\beta_2} \left(\frac{1}{2} qx + C_{12} \right) x \right] + a_1 q \frac{x^4}{24} + \frac{a_1 C_{12}}{6} x^3 \right] + \frac{C_{42}}{2} x^2 + C_{52} x + C_{62},$$

$$u_2(x) = \gamma_{32} \times$$

$$\left(C_{22} \text{sh}(\beta_2 x) + C_{32} \text{ch}(\beta_2 x) - \frac{\gamma_{12}}{\beta_2^2} (qx + C_{12}) \right) + \frac{1}{\alpha_{22}} \left[a_7 q \frac{x^3}{6} + \frac{a_7}{2} C_{12} x^2 \right] + C_{72} x + C_{82}, \quad (17)$$

где C_{12}, \dots, C_{82} – константы интегрирования,

$$\gamma_{12} = \frac{a_1 \alpha_{12}}{\alpha_{22} \alpha_{32} - \alpha_{12}^2}, \quad \gamma_{22} = \frac{a_6 \alpha_{22} - a_7 \alpha_{12}}{\alpha_{22} \alpha_{32} - \alpha_{12}^2},$$

$$\gamma_{32} = \frac{a_3 a_7 - a_4 a_6}{\alpha_{22}},$$

$$\alpha_{22} \alpha_{32} - \alpha_{12}^2 \neq 0, \quad \alpha_{12} = a_1 a_3 - a_6 a_7,$$

$$\alpha_{22} = a_1 a_4 - a_7^2, \quad \alpha_{32} = a_1 a_2 - a_6^2.$$

Объединяя (15), (17), получим искомое решение краевой задачи:

$$\psi(x) = \psi_1(x) + (\psi_2(x) - \psi_1(x))H(x - x_0),$$

$$u(x) = u_1(x) + (u_2(x) - u_1(x))H(x - x_0),$$

$$w(x) = w_1(x) + (w_2(x) - w_1(x))H(x - x_0). \quad (18)$$

Константы интегрирования $C_{11}, \dots, C_{91}, C_{12}, \dots, C_{82}$ определяются из 8 граничных условий на торцах балки и дополнительных 8 условий равенства перемещений и их производных в точке нерегулярности $x = x_0$ ($C_{71} = 0$). При этом предполагается наличие на торцах балки жестких диафрагм, препятствующих относительному сдвигу слоев. В случае жесткой заделки торцов балки граничные условия следующие:

$$x = 0, l: u_{(1,2)} = \psi_{(1,2)} = w_{(1,2)} = w_{(1,2),x} = 0. \quad (19)$$

Для шарнирно опертой по обоим торцам балки должны выполняться условия:

$$x = 0, l: u_{(1,2)} = \psi_{(1,2)} = w_{(1,2)} = M_{(1,2)} = 0. \quad (20)$$

При численной реализации решений (18), (17), (15) интенсивность распределенной нагрузки и относительные толщины слоев в трехслойном пакете Д16Т-фторопласт-Д16Т принимались следующие: $h_1 = 0,02, h_2 = 0,02, h_3 = 0,09; q = 2$ МПа. Модули упругости материалов слоев (МПа): $G_1 = G_2 = 0,267 \cdot 10^5; G_3 = 90; K_1 = K_2 = 0,8 \cdot 10^5; K_3 = 4700$; коэффициент жесткости упругого основания $\kappa = 100$ МПа/м.

На рисунке 4 показано изменение прогиба вдоль оси балки: 1 – $\kappa = 0$ (упругое основание отсутствует); 2 – опирание по всей нижней поверхности балки; 3 – оперта левая половина нижнего слоя. С увеличением зоны опирания перемещения уменьшаются: полное опирание приводит к уменьшению прогиба на 24 %, частичное – на 10 %.

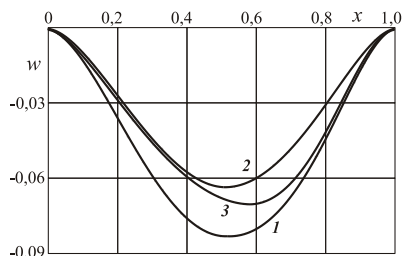


Рисунок 4 – Прогиб трехслойной балки

На рисунке 5 приведен относительный сдвиг в заполнителе: 1 – $\kappa = 0$ (упругое основание отсутствует); 2 – опирание по всей нижней поверхности балки; 3 – оперта левая половина нижнего слоя. Здесь изменение области опирания балки сказывается в меньшей степени, чем у прогибов.

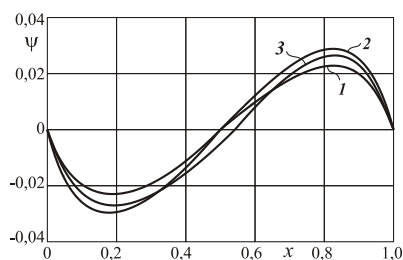


Рисунок 5 – Изменение сдвига вдоль оси балки

Получено 26.03.2011

A. V. Yarovaya, A. A. Poddubny. The bending of three-layer beam partially supported on the elastic foundation.

We consider the deformation of an elastic three-layer beam partially supported on elastic foundation of Winkler. To describe the kinematics of asymmetric in thickness of package accepted hypothesis rod broken normal. A system of equilibrium equations and its general analytical solution in displacements. The numerical analysis of solutions.

Выводы. Приведенная методика и решение краевой задачи позволяют проводить анализ напряженно-деформированного состояния при изгибе частично опертой трехслойной балки в зависимости от прочностных и геометрических параметров слоев, жесткости упругого основания.

Список литературы

- 1 **Кобелев, В. Н.** Расчет трехслойных конструкций : справ. / В. Н. Кобелев, Л. М. Коварский, С. И. Тимофеев; под общ. ред. В. Н. Кобелева. – М. : Машиностроение, 1984. – 304 с.
- 2 **Васильев, В. В.** Механика конструкций из композиционных материалов / В. В. Васильев; ред. кол. : Н. Н. Малинин (пред.) [и др.]. – М. : Машиностроение, 1988. – 272 с.
- 3 **Старовойтов, Э. И.** Вязкоупругопластические слоистые пластины и оболочки / Э. И. Старовойтов. – Гомель : БелГУТ, 2002. – 344 с.
- 4 **Плескачевский, Ю. М.** Деформирование металлополимерных систем / Ю. М. Плескачевский, Э. И. Старовойтов, А. В. Яровая. – Минск : Бел. наука, 2004. – 386 с.
- 5 **Cheng, Zhenqiang.** Theory for multilayered anisotropic plates with weakened interfaces / Cheng Zhenqiang, A. K. Jemah, F. W. Williams // Trans. ASME. J. Appl. Mech. – 1996. – 63. – No. 4. – P. 1019–1026.
- 6 **Ebsioglu, J. K.** On the theory on sandwich panels in the reference state / J. K. Ebsioglu // Internat. J. Eng-ng Sci. – 1966. – No. 6. – P. 166–194.
- 7 **Старовойтов, С. А.** Напряженно-деформированное состояние трехслойного стержня на упругом основании / С. А. Старовойтов // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2004. – № 1 (10). – С. 25–28.
- 8 **Старовойтов, Э. И.** Деформирование трехслойных элементов конструкций на упругом основании / Э. И. Старовойтов, А. В. Яровая, Д. В. Леоненко. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 379 с.