также очищение вертикальных стенок реактора в зависимости от времени.

**Библиографический список**


1. *Барабаш В.М., Абиев Р.Ш., Кулов Н.Н. Обзор работ по теории и практике перемешивания // Теоретические основы химической технологии том 52 № 4. 2018. – С.367-383.*
2. *Брагинский Л. Н. Перемешивание в жидких средах: Физические основы и инженерные методы расчета / Л. Н. Брагинский, В. И. Бегачев, В. М. Барабаш.- Л.: Химия, 1984.- 336 с.*
3. *Мудров А.Г., Марданов Р.Ш. Обзор исследований пространственных механизмов с вращательными шарнирами // Теория механизмов и машин, 2015, № 2. – С. 62–71.*
4. *Мудров А. Г. Конструкции и модель смешения в аппаратах с мешалкой // Известия КГАСУ, 2018, № 1 (43). – С. 226–233.*
5. *Тошов Б.Р., Умиров Ф.Э., Кушимов Ф., Кушимов У.Ф., Хамроев Ш.Г., Расулов Ш.К. Шарнирная муфта // Патент на полезную модель № UZ FAP 01273. Рег. Ташкент 29.12.2017г. 3 с.*


УДК 539.3: 624.07

# ДЕФОРМИРОВАНИЕ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПЛАСТИН ИЗ ОРТОТРОПНЫХ РАЗНОСОПРОТИВЛЯЮЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ

**Трещев А.А., Кудрявцев А.Д., Селезнев И.Р.**
*Тульский государственный университет*

*Представлен вариант использования нового потенциала деформаций для ортотропных материалов, деформационные характеристики которых зависят от вида напряженного состояния, при построении модели поперечного изгиба трехслойных пластин. Разработанная модель позволяет получить более точные результаты расчета конструкций по сравнению с данными, основанными, на известных ранее, уравнениях состояния.*

В работах [1 – 3] на основе анализа многочисленных экспериментальных данных по деформированию анизотропных материалов, механические характеристики, которых зависят от вида напряженного состояния [4 – 8] были предложены нелинейные потенциальные соотношения между деформациями и напряжениями для ортотропных материалов. При ограничении энергетических зависимостей квазилинейным уровнем имеем:

$$W_1 = A_1\sigma_{11}^2 + A_2\sigma_{22}^2 +$$
$$A_3\sigma_{33}^2 + A_4\sigma_{11}\sigma_{22} + A_5\sigma_{22}\sigma_{33} +$$
$$+A_6\sigma_{33}\sigma_{11} + A_7\tau_{12}\tau_{21} + A_8\tau_{23}\tau_{32} + A_9\tau_{31}\tau_{13} \qquad (1)$$

Параметры $A_k(\alpha_{ij})$ являются функциями, зависящими от комбинаций нормированных напряжений [9 – 11]:

$$\alpha_{ij} = \sigma_{ij} / S\,; \qquad (i, j = 1,2,3), \qquad (2)$$

где $S = \sqrt{\sigma_{ij}\sigma_{ij}} = \sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 + \sigma_{33}^2 + 2\tau_{12}^2 + 2\tau_{23}^2 + 2\tau_{13}^2}$ .

При этом справедливо условие нормировки [1 – 3, 9 – 11]:

$$\alpha_{ij}\alpha_{ij} = \alpha_{11}^2 + \alpha_{22}^2 + \alpha_{33}^2 + 2\alpha_{12}^2 + 2\alpha_{23}^2 + 2\alpha_{13}^2 = 1\,. \qquad (3)$$

С учетом зависимостей $A_k(\alpha_{ij})$ потенциал (1) расписывается до следующего уровня:

$$W_1 = 0{,}5(A_{1111} + \widetilde{A}_{1111}\alpha_{11})\sigma_{11}^2 + 0{,}5(A_{2222} + \widetilde{A}_{2222}\alpha_{22})\sigma_{22}^2 +$$
$$+0{,}5(A_{3333} + \widetilde{A}_{3333}\alpha_{33})\sigma_{33}^2 + [A_{1122} + \widetilde{A}_{1122}(\alpha_{11} + \alpha_{22})]\sigma_{11}\sigma_{22} +$$
$$+[A_{2233} + \widetilde{A}_{2233}(\alpha_{22} + \alpha_{33})]\sigma_{22}\sigma_{33} +$$
$$[A_{3311} + \widetilde{A}_{3311}(\alpha_{33} + \alpha_{11})]\sigma_{33}\sigma_{11} +$$
$$+ A_{1212}\tau_{12}^2 + A_{2323}\tau_{23}^2 + A_{3131}\tau_{31}^2 \qquad (4)$$

Следствием принятых энергетических соотношений (4) являются уравнения связи компонентов тензоров деформаций и напряжений в главных осях анизотропии:

$$e_{kk} = \{(A_{kkkk} + \widetilde{A}_{kkkk}\alpha_{kk}) + 0{,}5\widetilde{A}_{kkkk}\alpha_{kk}[\alpha_{mm}^2 + \alpha_{nn}^2 + 2(\alpha_{km}^2 + \alpha_{mn}^2 +$$
$$+\alpha_{nk}^2)] -$$

$$
0{,}5(\tilde{A}_{mmmm}\alpha_{mm}^3 + \tilde{A}_{nnnn}\alpha_{nn}^3) + (1-\alpha_{kk})[\tilde{A}_{kkmm}\alpha_{mm}(\alpha_{mm}^2 + \alpha_{nn}^2 +
+ \alpha_{nk}^2)) + \tilde{A}_{kknn}\alpha_{nn}] - \tilde{A}_{mmnn}\alpha_{mm}\alpha_{nn}(\alpha_{mm} + \alpha_{nn})\}\sigma_{kk} + [A_{kkmm} +
+ \tilde{A}_{kkmm}(\alpha_{kk} + \alpha_{mm})]\sigma_{mm} + [A_{kknn} + \tilde{A}_{kknn}(\alpha_{kk} + \alpha_{nn})]\sigma_{nn}; \qquad (5)
$$

$$
\gamma_{km} = [A_{kmkm} - (\tilde{A}_{kkkk}\alpha_{kk}^3 + \tilde{A}_{mmmm}\alpha_{mm}^3 + \tilde{A}_{nnnn}\alpha_{nn}^3) -
- 2\tilde{A}_{kkmm}\alpha_{kk}\alpha_{mm}(\alpha_{kk} + \alpha_{mm}) - 2\tilde{A}_{mmnn}\alpha_{mm}\alpha_{nn}(\alpha_{mm} + \alpha_{nn}) -
- 2\tilde{A}_{kknn}\alpha_{kk}\alpha_{nn}(\alpha_{kk} + \alpha_{nn})]\tau_{km}; \qquad (k \to m \to n = 1 \to 2 \to 3).
$$

Константы уравнений состояния (5) определяются из опытов на одноосное растяжение и одноосное сжатие вдоль главных осей ортотропии, а также – на сдвиг в главных плоскостях ортотропии [15]:

$$
A_{kkkk} = (1/E_k^+ + 1/E_k^-)/2; \;\; \tilde{A}_{kkkk} = (1/E_k^+ - 1/E_k^-)/2; \;\; A_{ijij} = 1/G_{ij};
$$

$$
A_{iijj} = -(\nu_{ij}^+/E_j^+ + \nu_{ij}^-/E_j^-)/2; \qquad \tilde{A}_{iijj} = -(\nu_{ij}^+/E_j^+ - \nu_{ij}^-/E_j^-)/2;
$$

$$
\nu_{ij}^+/E_j^+ = \nu_{ji}^+/E_i^+; \;\; \nu_{ij}^-/E_j^- = \nu_{ji}^-/E_i^-; \;\; (i, j, k = 1,2,3). \qquad (6)
$$

Далее рассматривается деформирование прямоугольных ортотропных трехслойных пластин с учетом деформационной анизотропии. При этом принимаются для всего пакета традиционные технические гипотезы типа Тимошенко.

Тогда уравнения связи тензоров деформаций и напряжений (5) упрощаются до следующего уровня:

$$
\begin{Bmatrix} e_{11} \\ e_{22} \\ e_{13} \\ e_{23} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & 0 & 0 & 0 \\ C_{1122} & C_{2222} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{1313} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{2323} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{1212} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}, \qquad (7)
$$

Уравнения связи деформаций с перемещениями с учетом упрощающих гипотез в декартовой системе координат и в геометрически нелинейной постановке принимают вид:

$$e_{11}=u_1,_1+(w,_1)^2/2-x_3\psi_2,_1;$$
$$e_{22}=u_2,_2+(w,_2)^2/2-x_3\psi_1,_2;$$
$$\gamma_{12}=u_1,_2+u_2,_1+w,_1 w,_2-x_3(\psi_1,_1+\psi_2,_2);$$
$$\gamma_{13}=\psi_2+w,_1;\ \gamma_{23}=\psi_1+w,_2, \qquad (8)$$

где $\psi_1$, $\psi_2$ – углы поворота сечения относительно оси $x_1$ и $x_2$, соответственно;

$u_k$, $w$ – перемещения и прогибы срединной поверхности пластины.

Учитывая, что рассматриваема задача обладает двоякой анизотропией, геометрической и физической нелинейностью, сформулируем разрешающие уравнения и получим их решения в рамках двухшагового метода последовательных возмущений параметров [16]. Тогда дифференциальные уравнения равновесия для пластины в приращениях имеют вид [16]:

$$\delta N_{11},_1+\delta N_{12},_2=0;$$

$$\delta N_{22},_2+\delta N_{12},_1=0;$$

$$\delta M_{11},_1+\delta M_{12},_2-\delta Q_1=0;$$

$$\delta M_{22},_2+\delta M_{12},_1-\delta Q_2=0; \qquad (9)$$
$$\delta Q_1,_1+\delta Q_2,_2+\delta N_{11},_1 w,_{11}+\delta N_{22},_2 w,_{22}+\delta w,_{11} N_{11},_1+\delta w,_{22} N_{22},_2+$$
$$+\delta N_{12},_2 w,_{12}+\delta N_{12},_1 w,_{12}+\delta w,_{12} N_{12},_2+N_{12},_1 \delta w,_{12}=-\delta q,$$

где через $\delta$ обозначены приращения соответствующих функций.

Тогда для приращений деформаций имеем:

$$\delta e_{11}=\delta u_1,_1+w,_1\cdot\delta w,_1-x_3(\delta\psi_2,_1);$$

$$\delta e_{22}=\delta u_2,_2+w,_2\,\delta w,_2-x_3(\delta\psi_1,_2);$$

$$\delta\gamma_{12} = \delta u_1,_2 + \delta u_2,_1 + w,_1 \delta w,_2 + w,_2 \delta w,_1 + \delta w,_1 \delta w,_2 -$$
$$x_3(\delta\psi_1,_1 + \delta\psi_2,_2);$$

$$\delta\gamma_{13} = \delta\psi_2 + \delta w,_1; \ \delta\gamma_{23} = \delta\psi_1 + \delta w,_2, \tag{10}$$

а для выражений приращений деформаций через приращения напряжений, учитывая разложение в ряд Тейлора до членов не выше первого порядка малости:

$$\delta e_{11} = \frac{\partial e_{11}}{\partial\sigma_{11}}\delta\sigma_{11} + \frac{\partial e_{11}}{\partial\sigma_{22}}\delta\sigma_{22} + \frac{\partial e_{11}}{\partial\sigma_{12}}\delta\sigma_{12} + \frac{\partial e_{11}}{\partial\sigma_{13}}\delta\sigma_{13} + \frac{\partial e_{11}}{\partial\sigma_{23}}\delta\sigma_{23};$$
$$\delta e_{22} = \frac{\partial e_{22}}{\partial\sigma_{11}}\delta\sigma_{11} + \frac{\partial e_{22}}{\partial\sigma_{22}}\delta\sigma_{22} + \frac{\partial e_{22}}{\partial\sigma_{12}}\delta\sigma_{12} + \frac{\partial e_{22}}{\partial\sigma_{13}}\delta\sigma_{13} + \frac{\partial e_{22}}{\partial\sigma_{23}}\delta\sigma_{23};$$
$$\delta e_{12} = \frac{\partial e_{12}}{\partial\sigma_{11}}\delta\sigma_{11} + \frac{\partial e_{12}}{\partial\sigma_{22}}\delta\sigma_{22} + \frac{\partial e_{12}}{\partial\sigma_{12}}\delta\sigma_{12} + \frac{\partial e_{12}}{\partial\sigma_{13}}\delta\sigma_{13} + \frac{\partial e_{12}}{\partial\sigma_{23}}\delta\sigma_{23};$$
$$\delta e_{13} = \frac{\partial e_{13}}{\partial\sigma_{11}}\delta\sigma_{11} + \frac{\partial e_{13}}{\partial\sigma_{22}}\delta\sigma_{22} + \frac{\partial e_{13}}{\partial\sigma_{12}}\delta\sigma_{12} + \frac{\partial e_{13}}{\partial\sigma_{13}}\delta\sigma_{13} + \frac{\partial e_{13}}{\partial\sigma_{23}}\delta\sigma_{23}$$
$$\delta e_{23} = \frac{\partial e_{23}}{\partial\sigma_{11}}\delta\sigma_{11} + \frac{\partial e_{23}}{\partial\sigma_{22}}\delta\sigma_{22} + \frac{\partial e_{23}}{\partial\sigma_{12}}\delta\sigma_{12} + \frac{\partial e_{23}}{\partial\sigma_{13}}\delta\sigma_{13} + \frac{\partial e_{23}}{\partial\sigma_{23}}\delta\sigma_{23} \tag{11}$$

Обозначая $P_{ijkm} = \partial e_{ij} / \partial\sigma_{kl}$ и обращая уравнения (11), получим:

$$\{\delta\sigma\} = \left[C_{ijkm}\right]\{\delta e\}, \tag{12}$$

где $\left[C_{ijkm}\right]^{-1} = \left[P_{ijkm}\right]$.

Приращения внутренних усилий и моментов определяются интегрированием выражения для приращений напряжений по толщине пластины:

$$\delta N_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} \delta\sigma_{ij} dx_3; \qquad \delta Q_k = \int_{-h/2}^{h/2} \delta\tau_{k3} dx_3;$$

$$\delta M_{ij} = \int\limits_{-h/2}^{h/2} \delta\sigma_{ij} x_3 dx_3 \tag{13}$$

Рассматривая соотношения (9) – (13) с учетом (5) и (6), получим линеаризованную систему разрешающих дифференциальных уравнений в приращениях перемещений в виде:

$$\begin{aligned}
&\delta u_1,_{11} D_{1111} + \delta u_1,_{22} D_{1212}/2 + \delta u_2,_{12} D_{1122} + \delta u_2,_{12} D_{1212}/2 - \\
&-\delta\psi_1,_{12} G_{1122} - \delta\psi_1,_{12} G_{1212} - \delta\psi_2,_{11} G_{1111} - \delta\psi_2,_{22} G_{1212} = \\
&= F_1(\delta w,\ \delta u_1,\ \delta u_2,\ \delta\psi_1,\ \delta\psi_2,\ w,\ u_1,\ u_2,\ \psi_1,\ \psi_2);\\
&\delta u_1,_{22} D_{2222} + \delta u_1,_{11} D_{1212}/2 + \delta u_2,_{12} D_{1122} + \delta u_2,_{12} D_{1212}/2 - \\
&-\delta\psi_1,_{22} G_{2222} - \delta\psi_1,_{11} G_{1212} - \delta\psi_2,_{12} G_{1122} - \delta\psi_2,_{12} G_{1212} = \\
&= F_2(\delta w,\ \delta u_1,\ \delta u_2,\ \delta\psi_1,\ \delta\psi_2,\ w,\ u_1,\ u_2,\ \psi_1,\ \psi_2);\\
&-\delta w,_1 D_{1313} + \delta u_1,_{11} G_{1111} + \delta u_1,_{22} G_{1212}/2 + \delta u_2,_{12} G_{1122} + \\
&+\delta u_2,_{12} G_{1212}/2 - \delta\psi_1,_{12} K_{1122} - \delta\psi_1,_{12} K_{1212} - \\
&-\delta\psi_2,_{11} K_{1111} - \delta\psi_2,_{22} K_{1212} - \delta\psi_2 D_{1313}/2 = \\
&= F_3(\delta w,\ \delta u_1,\ \delta u_2,\ \delta\psi_1,\ \delta\psi_2,\ w,\ u_1,\ u_2,\ \psi_1,\ \psi_2);\\
&-\delta w,_2 D_{1313} + \delta u_1,_{22} G_{2222} + \delta u_1,_{11} G_{1212}/2 + \delta u_2,_{12} G_{1122} + \\
&+\delta u_2,_{12} G_{1212}/2 - \delta\psi_2,_{12} K_{1122} - \delta\psi_2,_{12} K_{1212} - \\
&-\delta\psi_1,_{22} K_{2222} - \delta\psi_1,_{11} K_{1212} - \delta\psi_1 D_{1313}/2 = \\
&= F_4(\delta w,\ \delta u_1,\ \delta u_2,\ \delta\psi_1,\ \delta\psi_2,\ w,\ u_1,\ u_2,\ \psi_1,\ \psi_2);\\
&\delta w,_{11} D_{1313} + \delta w,_{22} D_{2323} + \frac{1}{2}\delta\psi_1,_2 D_{2323} + \frac{1}{2}\delta\psi_2,_1 D_{1313} - q = \\
&= F_5(\delta w,\ \delta u_1,\ \delta u_2,\ \delta\psi_1,\ \delta\psi_2,\ w,\ u_1,\ u_2,\ \psi_1,\ \psi_2),
\end{aligned} \tag{14}$$

где $D_{ijkm}(x_1, x_2) = \int_{-h/2}^{h/2} C_{ijkm}(x_1, x_2, x_3)\, dx_3$;

$G_{ijkm}(x_1, x_2) = \int_{-h/2}^{h/2} C_{ijkm}(x_1, x_2, x_3)\, x_3 dx_3$;

$K_{ijkm}(x_1, x_2) = \int_{-h/2}^{h/2} C_{ijkm}(x_1, x_2, x_3)\, x_3^2 dx_3$.

Для полноты системы разрешающих уравнений (14) необходимо задать граничные условия. В частности для жесткого опирания они примут вид $u_k = 0$; $\psi_k = 0$; $w = 0$ и соответственно в приращениях $\delta u_k = 0$; $\delta\psi_k = 0$; $\delta w = 0$, а для шарнирного закрепления $u_k = 0$; $M_{kk} = 0$; $w = 0$ и соответственно в приращениях $\delta u_k = 0$; $\delta M_{kk} = 0$; $\delta w = 0$.

Решение линеаризованных уравнений осуществлялось конечно-разностным методом повышенной точности. Для получения надежных результатов оценивались размеры шага сетки и принята сетка с 40×40 узловыми точками (с учетом симметрии задачи для четвертой части пластины). По толщине внешних и внутреннего слоев пластина разбивалась соответственно на 5 и 20 точек соответственно, что весьма достаточно. Соотношения между толщиной и характерным продольным размером принимались $a/h = 6{,}67$. В результате был разработан пакет прикладных программ для решения поставленной задачи в системе MATLAB 2011.

Полученные результаты решения задач иллюстрируют влияние деформационной анизотропии материала, а также поперечного сдвига. Приводится сравнение с решениями, полученными на основе различных моделей теории деформирования ортотропных разносопротивляющихся материалов, известных ранее (модели С.А. Амбарцумяна, Р.М. Джонса - Д.А.Р. Нельсона), классической теории ортотропии и предложенных соотношений.

При анализе полученных результатов расчета трехслойных прямоугольных пластин, составленных из ортотропных разносопротивляющихся материалов, проведено исследование влияния граничных условий, а также сочетаний модулей упругости на параметры напряженно-деформированного состояния. При изменении одного из параметров упругости остальные константы фиксировались. Разносопротивляемость во всех направлениях полагалась одинаковой.

Пластина составлена из следующих материалов: внешние слои - стеклопластик, внутренний слой - графитокомпозит ATJ-S. Интегрирование по толщине пластины проводилось методом Симпсона.

Было проведено сравнение полученных результатов с решением, основанным на гипотезах Кирхгофа-Лява. Установлено, что неучет влияния поперечного сдвига может привести к погрешностям в определении основных параметров НДС: максимального прогиба – до 13%, а напряжений – до 47%.

Для сравнения результатов расчета с использованием различных моделей теории упругости разносопротивляющихся материалов рассмотрена прямоугольная пластина в условиях жесткого и шарнирного опирания по контуру. Сравнение производилось с расчетами по моделям С.А. Амбарцумяна и Р.М. Джонса - Д.А.Р. Нельсона. По результатам расчета можно сделать вывод о том, что расчет по этим моделям приводит к погрешности при определении максимальных прогибов до 9% при жестком опирании по контуру и до 13% при шарнирном, а также – к занижению значения напряжений при расчете по модели Р.М. Джонса - Д.А.Р. Нельсона на величину до 12%, а по модели С.А.Амбарцумяна на величину до 20%.

Также полученные решения сравнивались с результатами, вытекающими из классической теории анизотропных пластин при осредненных механических характеристиках.

Классическое решение, не учитывающее свойства разносопротивляемости материалов, может привести к погрешностям в определении максимальных напряжений в некоторых случаях до 63%. Отклонения в максимальных прогибах – до 22% в большую или меньшую сторону в зависимости от соотношений основных параметров упругости, при этом характер изменения жесткости ортотропных пластин, в отличие от изотропных, трудно предсказать заранее.

Установлено, что свойства разносопротивляемости материалов пластин могут привести к отклонениям максимальных прогибов, изгибающих моментов и напряжений, причем на величину этой разницы определенное влияние оказывают граничные условия. Так при жестком закреплении по контуру пластины эти отклонения больше, чем для шарнирного опирания.

### Библиографический список

*1. Трещев, А.А. Потенциальная зависимость между деформациями и напряжениями для ортотропных физически нелинейных материалов / А.А. Трещев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОГУ. – 2017. – № 4-1 (324). – С. 71 – 74.*

*2. Трещев, А.А. Удельная дополнительная работа деформирования ортотропных физически нелинейных материалов / А.А. Трещев, Ю.А. Монастырев, В.Д. Чибрикина // Социально-*

*экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: 13-я Международная конференция по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. – Тула: ТулГУ, 2017. – Т. 2. - С. 208 – 212.*

*3. Трещев, А.А. Нелинейные определяющие соотношения для ортотропных разносопротивляющихся материалов / А.А.Трещев // Сборник материалов XVIII Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительства, строительной индустрии и промышленности». – Тула: ТулГУ. – 2017. – С. 180 – 184.*

*4. Schmueser, D.W. Nonlinear Stress-Strain and Strength Response of Axisymmetric Bimodulus Composite Material Shells / D.W.Schmueser // AIAA Journal. – 1983. – Vol. 21. – №12. – P. 1742 – 1747.*

*5. Reddy, L.N. On the Behavior of Plates Laminated of Bimodulus Composite Materials / L.N.Reddy, C.W.Bert // ZAMM. – 1982. – Vol. 62. – № 6. – P. 213 – 219.*

*6. Jones, R.M. A Nonsymmetric Compliance Matrix Approach to Nonlinear Multimodulus Ortotropic Materials / R.M.Jones // AIAA Journal. – 1977. – Vol. 15. – № 10. – P. 1436 – 1443.*

*7. Jones, R.M. Modeling Nonlinear Deformation of Carbon-Carbon Composite Material / R.M. Jones // AIAA Journal. – 1980. – Vol. 18. - № 8. – P. 995 – 1001.*

*8. Jones, R.M. Bucling of Stiffened Multilayered Circular Shells with Different Ortotropic Moduli in Tension and Compression / R.M. Jones // AIAA Journal. – 1971. – Vol. 9. – № 5. – P. 917 – 923.*

*9. Трещев, А.А. Теория деформирования и прочности материалов с изначальной или наведенной чувствительностью к виду напряженного состояния. Определяющие соотношения / А.А. Трещев // Москва – Тула: РААСН – ТулГУ, 2016. – 328 с.*

*10. Трещев, А.А. Анизотропные пластины и оболочки из разносопротив-ляющихся материалов / А.А. Трещев // Москва – Тула: РААСН – ТулГУ, 2007. – 160 с.*

*11. Трещев, А.А. Определяющие соотношения для нелинейных анизотропных материалов, чувствительных к виду напряженного состояния / А.А.Трещев, Д.А.Ромашин // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – Н.Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2011. – №4. Часть 4. – С. 1740-1742.*

*12. Розе, А.В. Трехармированные тканые материалы / А.В. Розе, И.Г. Жигун, М.Н. Душин // Механика полимеров. – 1970. – №3. – с. 471–476.*

*13. Jones, R.M., Theoretical-experimental correlation of material models for non-linear deformation of graphite / R.M.Jones, D.A.R.Nelson // AIAA Journal. – 1976. – Vol. 14 – №10. – P. 1427–1435.*

*14. Jones, R.M. Stress-Strain Relations for Materials with Different Moduli in Tension and Compression / R.M. Jones // AIAA Journal. – 1977. – Vol. 15. – №1. – P. 16–25.*

*15. Трещев, А.А. Описание деформирования ортотропных разносопротивляющихся материалов / А.А. Трещев, Ю.А. Монастырев, В.Д. Чибрикина, Ю.А. Завьялова, М.А.Лапшина // Строительная механика и конструкции. - Воронеж: ВГТУ. – 2019. - №1(20). – С. 7-13.*

*17. Петров, В.В. Методы расчета балок, пластин и призматических оболочек из нелинейно-деформируемого материала / В.В. Петров, И.В. Кривошеин, П.В. Селяев. – Саранск: МордГУ, 2009. – 164 с.*