

С. Г. Сидорин

АРМИРОВАННЫЕ НИТЯМИ НАКОПИТЕЛИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ*Ключевые слова: армированный композитный маховик, нитевая модель композита.*

В работе выполняется расчет параметров тонкостенных накопителей механической энергии (маховиков), армированных высокопрочными нитями методом непрерывной намотки. Армирование выполняется по так называемым псевдогеодезическим траекториям, при которых межслоевые напряжения отсутствуют. Математическая модель композиционного материала принимается как гетерогенная структура, состоящая из высокопрочных непрерывных армирующих нитей (лент) высокой жесткости и относительно низкопрочной матрицы (связующего). Используются соотношения безмоментных оболочек, теории гибкой нити, построенной на основе сетевого анализа. Определяются формы меридианов оболочек, углы траекторий армирования, величины осевых распорных усилий. Исследуется технологическая возможность армирования оболочки методом непрерывной намотки, при котором лента в процессе намотки не соскальзывает с оправки. Рассчитывается удельная массовая энергоёмкость маховиков. Сравниваются полученные значения энергоёмкости с энергоёмкостью равнонапряженных маховиков при равных параметрах получено, что маховики с псевдогеодезическим армированием менее энергоёмки. Однако, поскольку ограничение по прочности связующего на них не распространяется они имеют более широкий диапазон существования форм меридианов, чем равнопрочные маховики.

S. G. Sidorin

THREAD-REINFORCED MECHANICAL ENERGY STORAGE*Key words: reinforced composite flywheel, filament model of the composite.*

The parameters of thin-walled mechanical energy storage devices (flywheels) reinforced with high-strength threads using the continuous winding method are being calculated. Reinforcement is performed along so-called pseudo-geodesic trajectories, in which there are no interlayer stresses. The mathematical model of a composite material is accepted as a heterogeneous structure consisting of high-strength continuous reinforcing threads (tapes) of high rigidity and a relatively low-strength matrix (binder). The ratios of moment-free shells and the flexible thread theory, built on the basis of network analysis, are used. The shapes of the meridians of the shells, the angles of the reinforcement trajectories, and the magnitude of the axial thrust forces are determined. The technological possibility of reinforcing the shell using the continuous winding method is being investigated, in which the tape does not slip off the mandrel during the winding process. The specific mass energy intensity of flywheels is calculated. The obtained energy intensity values are compared with the energy intensity of equally stressed flywheels with equal parameters, and it is found that flywheels with pseudo-geodesic reinforcement are less energy-intensive. However, since the limitation on the strength of the binder does not apply to them, they have a wider range of existence of meridian shapes than flywheels of equal strength.

Композиционные материалы широко применяются в различных высокотехнологичных конструкциях. Исследования в области использования композиционных материалов ведутся в направлениях создания математических моделей композитов [1-5], оценке работы композиционных материалов в различных конструкциях и методов их расчета [6-8], а также задачи оптимального проектирования [9-11]. Опыт использования композиционных материалов показал, что особенно удачно свойства композиционных материалов реализуются в тонкостенных, оболочечных элементах конструкций [12,13]. В высоконагруженных тонкостенных элементах конструкций целесообразно использовать композиционные материалы, армированные высокопрочными нитями по методу непрерывной намотки [14].

В работе математическая модель композиционного материала как гетерогенной структуры, состоящей из высокопрочных армирующих нитей (лент) высокой жесткости и относительно низкопрочной матрицы (связующего) строится на основе сетевого анализа, теории безмоментных оболочек и теории гибкой нити [15].

Выполняется расчет параметров тонкостенных накопителей механической энергии (маховиков), армированных высокопрочными нитями методом не-

прерывной намотки по так называемым псевдогеодезическим траекториям, при которых межслоевые напряжения отсутствуют. Определяются формы меридианов оболочек, углы траекторий армирования, величины осевых распорных усилий и технологическая возможность изготовления методом непрерывной намотки.

Система разрешающих уравнений тонкой волокнистой оболочки вращения при кососимметричной нагрузке имеют вид [16]

$$\begin{aligned} \frac{d(T_1 r)}{dr} - T_2 + \frac{q_1 r}{\cos \gamma} &= 0, \\ \frac{d(S r)}{dr} + S + \frac{q_2 r}{\cos \gamma} &= 0, \\ T_1 r + T_2 R_1 \sin \gamma - q_n r R_1 &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где r – радиус параллельного сечения оболочки, q_1, q_2, q_n – нагрузки, приходящиеся на единицу площади сечения соответственно по направлению меридиана, параллели и нормали оболочки, γ – угол между нормалью к поверхности оболочки и осью вращения оболочки, R_1 – первый главный радиус кривизны оболочки (радиус кривизны меридиана $\frac{1}{R_1} = \frac{d \sin \gamma}{dr}$), T_1, T_2, S – безмоментные усилия, приходящиеся на элемент оболочки (рис. 1). Через натяжение t и угол

траектории намотки нитей φ они могут быть выражены следующими формулами:

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{1}{2\pi r} \sum_{i=1}^m n_i t_i \cos \varphi_i, \\ T_2 &= \frac{1}{2\pi r} \sum_{i=1}^m n_i t_i \sin \varphi_i \operatorname{tg} \varphi_i, \\ S &= \frac{1}{2\pi r} \sum_{i=1}^m n_i t_i \sin \varphi_i, \end{aligned} \quad (2)$$

где m – число моноотропных слоев намотки, образующих оболочку,
 n_i – число нитей в сечении i – го моноотропного слоя оболочки.

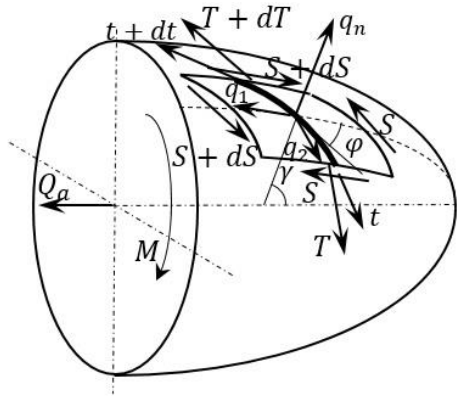


Рис. 1 – Расчетная схема армированной оболочки

Fig. 1 – Calculation diagram of a reinforced shell

Нагрузки q_1, q_2, q_n включают в себя поверхностную нагрузку на оболочку и массовую инерциальную нагрузку самой оболочки (рис. 1).

Уравнения равновесия отсеченной части оболочки имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{1}{r \sin \gamma} \left[\int_{r_a}^r (q_n + q_1 \operatorname{tg} \gamma) r dr + \frac{Q_a}{2\pi} \right] \\ S &= \frac{1}{r^2} \left(\int_{r_a}^r \frac{q_2}{\cos \varphi} r^2 dr + \frac{M_a}{2\pi} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

где r_a – радиус полюсного отверстия оболочки ($\sin \gamma(r_a) = 1$),
 Q_a и M_a – осевое усилие и крутящий момент в сечении r_a оболочки.

При осесимметричной нагрузке $M_a = 0$ и $q_2 = 0$. Следовательно $S = 0$, а первое уравнение принимает вид

$$T_1 = \frac{1}{r \sin \varphi} \left(\int_{r_a}^r p r dr + \frac{Q_a}{2\pi} \right). \quad (4)$$

Рассмотрим оболочку, состоящую из $\frac{m}{2}$ сетевых слоев одного семейства, намотанных из одного материала при одинаковом технологическом натяжении

нитей. В этом случае $\frac{m}{2}$ сетевых слоев можно представить в виде одного сетевого слоя, т. е.: $m = 2$, $n_1 = n_2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m n_i = \frac{n}{2}$, $\varphi_i = \varphi_1 = -\varphi_{i+1} = -\varphi_2 = \varphi$, где n – число нитей в сечении отсеченной части оболочки и при условии $S = 0$ из третьего уравнения системы (2) получим $t_1 = t_2 = t$.

Первые два уравнения системы (2) примут вид:

$$T_1 = \frac{nt}{2\pi r} \cos \varphi, \quad T_2 = \frac{nt \sin \varphi \operatorname{tg} \varphi}{2\pi r}, \quad (5)$$

а третье уравнение системы (2) будет тождественно равно нулю.

Применительно к моноотропным слоям сетевой намотки третье уравнение системы (2) примет вид:

$$S_1 = -S_2 = \frac{nt}{4\pi r} \sin \varphi. \quad (6)$$

Используя уравнения (5) и (6), приведем уравнения (1) к виду:

$$\begin{aligned} q_n &= \frac{nt}{2\pi r \cos \varphi} \left[\sin^2 \varphi \frac{\sin \gamma}{r} + \cos^2 \varphi \frac{d \sin \gamma}{dr} \right], \\ q_1 &= \frac{n \cos \gamma}{2\pi r \cos \varphi} \left[\frac{t}{r} \sin \varphi \frac{d(r \sin \varphi)}{dr} - \cos^2 \varphi \frac{dt}{dr} \right], \\ q_{2,1} &= -q_{1,2} = -\frac{n \cos \gamma}{4\pi r^2} \cdot \frac{d(tr \sin \varphi)}{dr}. \end{aligned} \quad (7)$$

Рассмотрим тонкостенный накопитель механической энергии, армированный высокопрочными нитями под действием собственной центробежной нагрузки F , внутренним давлением p и осевой силой Q_a , распределенной по контуру полюсного отверстия.

Выразим нагрузки q_n и q_1 через центробежную нагрузку F элемента оболочки единичной площади и внутреннее давление p :

$$\begin{aligned} q_n &= p + F \sin \gamma = p + \frac{A \sin \gamma}{2\pi \cos \varphi}, \\ q_1 &= -F \cos \gamma = -\frac{A \cos \gamma}{2\pi \cos \varphi}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $A = \rho \omega^2 S_n n$, ρ – плотность материала армирующей нити, ω – угловая скорость вращения, S_n – площадь сечения нити.

С учетом (8) система (7) приведем к виду:

$$\begin{aligned} \frac{2\pi r \cos \varphi}{nt} p + \frac{r \sin \gamma}{nt} A &= \sin^2 \varphi \frac{\sin \gamma}{r} + \cos^2 \varphi \frac{d \sin \gamma}{dr}, \\ A &= \frac{\sin \varphi}{r^2} \frac{d(ntr \sin \varphi)}{dr} - \frac{d(nt)}{r dr}, \\ q &= -\frac{\cos \gamma}{2\pi r^2} \frac{d(ntr \sin \varphi)}{dr}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $q = q_{2,1} = -q_{1,2}$ – межслоевые усилия в маховике.

Рассмотрим вариант намотки армирующих нитей по траекториям, обеспечивающим отсутствие межслоевых касательных усилий во вращающемся маховике, т. е. $q(r) = 0$.

Из третьего уравнения (8) получим:

$$ntr \sin \varphi = C_1 ntr R = \text{const}$$

или

$$\bar{t}\bar{r}\sin\varphi = \frac{ntr}{nt_R R}\sin\varphi = C_1, \quad (10)$$

а из второго уравнения системы получим

$$nt = -\frac{Ar^2}{2} + C_4 nt_R$$

или

$$\bar{t} = \frac{nt}{nt_R} = -\frac{AR^2}{2nt_R}\bar{r}^2 + C_4. \quad (11)$$

Задавая $p = p(r)$ и обозначая

$$2\pi \int_{r_a}^r p r dr + Q_a = \psi, \quad (12)$$

из уравнений (4) и (5) получим

$$\sin\gamma = \frac{\psi}{nt \cos\varphi}. \quad (13)$$

Условие не соскальзывания с оболочки армирующей нити в процессе её намотки выражается неравенством $|\operatorname{tg}\theta| \leq k$, где k – коэффициент трения нити о поверхность оболочки, а выражение для $\operatorname{tg}\theta$ через параметры оболочки в общем случае имеет вид [17]

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{\cos\gamma}{\sin^2\varphi \frac{\sin\gamma}{r} + \cos^2\varphi \frac{d\sin\gamma}{dr} r dr}.$$

Для $q(r) = 0$ оно принимает вид

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{\sin\varphi}{\operatorname{tg}\gamma + \frac{2\pi p \cos\varphi}{A \cos\gamma}}. \quad (14)$$

Исследуем случай $q = 0, p = 0$.

Имеем из (12) – (14):

$$\psi = Q_a = Q_R = \text{const},$$

$$\sin\gamma = \frac{Q_R}{nt \cos\varphi}, \quad \operatorname{tg}\theta = \frac{\sin\varphi}{\operatorname{tg}\gamma}.$$

Обозначим

$$\frac{AR^2}{nt_R} = C_3, \quad \frac{Q_R}{nt_R} = C_2.$$

Тогда (10) – (13) примут вид:

$$\sin\varphi = \frac{C_1}{\bar{t}\bar{r}}, \quad \sin\gamma = \frac{C_2}{\bar{t} \cos\varphi}, \quad \bar{t} = -\frac{C_3}{2}\bar{r}^2 + C_4.$$

При $\bar{r} = \bar{R} = 1$ имеем:

$$\bar{t}_R = 1, \quad \sin\gamma_R = 1,$$

$$C_1 = \sin\varphi_R, \quad C_2 = \cos\varphi_R,$$

$$C_1^2 + C_2^2 = 1, \quad C_4 = 1 + \frac{C_3}{2}.$$

Границы изменения параметров C_1, C_2, C_3 :

$$1 \geq C_1 \geq 0, \quad 0 \leq C_2 \leq 1, \quad 0 \leq C_3 \leq \infty.$$

Таким образом, система разрешающих уравнений:

$$\sin\varphi = \frac{C_1}{\bar{t}\bar{r}}, \quad \sin\gamma = \frac{C_2}{\bar{t} \cos\varphi},$$

$$\bar{t} = 1 + \frac{C_3}{2} - \frac{C_3}{2}\bar{r}^2, \quad \operatorname{tg}\theta = \frac{\sin\varphi}{\operatorname{tg}\theta}. \quad (15)$$

Меридиан оболочки определяется соотношениями:

$$z = \int_r^1 \operatorname{tg}\gamma dr = C_2 \int_r^1 \frac{r dr}{\sqrt{t^2 r^2 - C_2^2 r^2 - C_1^2}} =$$

$$= \frac{C_2}{C_3} \int_r^1 \frac{2r dr}{\sqrt{(r_c^2 - r^2)(r_b^2 - r^2)(r^2 - r_a^2)}}, \quad (16)$$

где $r_b = R = 1, [r_c \geq r_b \geq r \geq r_a]$,

$$r_c^2 = \frac{4 + C_3}{2C_3} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{16(1 - C_2^2)}{(4 + C_3)^2}} \right),$$

$$r_a^2 = \frac{4 + C_3}{2C_3} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{16(1 - C_2^2)}{(4 + C_3)^2}} \right),$$

или

$$r_c^2 = \frac{4 + C_3}{C_3} - r_a^2.$$

Параметр существует в границах: $\infty \geq C_3 \geq (1 - C_2^2)$ при $0 \leq r_a \leq 1$ и $1 \leq r_c \leq \frac{4}{1 - C_2^2}$.

Вес оболочки выражается формулой:

$$G = \rho g n S_H R \int_{r_a}^1 \frac{dr}{\cos\varphi \cos\gamma} =$$

$$= \rho g n S_H R \int_{r_a}^1 \frac{tr dr}{\sqrt{t^2 r^2 - C_2^2 r^2 - C_1^2}} \quad (17)$$

$$= \frac{\rho g n S_H R}{C_3} \int_{r_a}^1 \frac{2 \left(1 + \frac{C_3}{2} - \frac{C_3}{2} r^2 \right) r dr}{\sqrt{(r_c^2 - r^2)(1 - r^2)(r^2 - r_a^2)}}$$

Кинетическая энергия оболочки равна

$$T = \frac{AR^3}{2} \int_{r_a}^1 \frac{r^2 dr}{\cos\varphi \cos\gamma} =$$

$$\frac{AR^3}{2C_3} \int_{r_a}^1 \frac{2 \left(1 + \frac{C_3}{2} - \frac{C_3}{2} r^2 \right) r^3 dr}{\sqrt{(r_c^2 - r^2)(1 - r^2)(r^2 - r_a^2)}}. \quad (18)$$

Удельная кинетическая энергия оболочки

$$\bar{u} = \frac{2\rho g T}{[\sigma_H] G} = \frac{C_3}{\bar{t}_a} \frac{\int_{r_a}^1 \frac{2 \left(1 + \frac{C_3}{2} - \frac{C_3}{2} r^2 \right) r^3 dr}{\sqrt{(r_c^2 - r^2)(1 - r^2)(r^2 - r_a^2)}}}{\int_{r_a}^1 \frac{2 \left(1 + \frac{C_3}{2} - \frac{C_3}{2} r^2 \right) r dr}{\sqrt{(r_c^2 - r^2)(1 - r^2)(r^2 - r_a^2)}}},$$

где $\bar{t}_a = \frac{t_a}{t_R}$.

При $1 \leq r \leq r_a, t_{max} = t_a = S_H[\sigma_H]$.

Интегралы (16), (17), (18) сводятся к эллиптическим интегралам первого и второго рода.

Тогда имеем:

$$z = \frac{2C_3}{C_3 \sqrt{r_c^2 - r_a^2}} \left[F\left(\frac{\pi}{2}, K\right) - F(\lambda, K) \right],$$

$$G = \rho g n S_H R \left[\frac{2 + C_3 - C_3 r_c^2}{C_3 \sqrt{r_c^2 - r_a^2}} F\left(\frac{\pi}{2}, K\right) \right.$$

$$\left. + \sqrt{r_c^2 - r_a^2} E\left(\frac{\pi}{2}, K\right) \right],$$

$$T = AR^3 \left\{ \frac{F\left(\frac{\pi}{2}, K\right)}{\sqrt{r_c^2 - r_a^2}} \left[\frac{(2 + C_3)r_c^2}{2C_3} - \frac{r_a^2(2r_c^2 - r_a^2)}{2} - \frac{2 + K^2(1 - r_a^2)^2}{6K^4} \right] + \sqrt{1 - r_a^2} E\left(\frac{\pi}{2}, K\right) \left[r_a^2 - \frac{2 + C_3}{2C_3} - \frac{(1 + K^2)(1 - r_a^2)}{3K^3} \right] \right\},$$

$$[r_c \geq 1 \geq r \geq r_a \geq 0],$$

$$\lambda = \arcsin \sqrt{\frac{r^2 - r_a^2}{1 - r_a^2}}, \quad K = \sqrt{\frac{1 - r_a^2}{r_c^2 - r_a^2}}$$

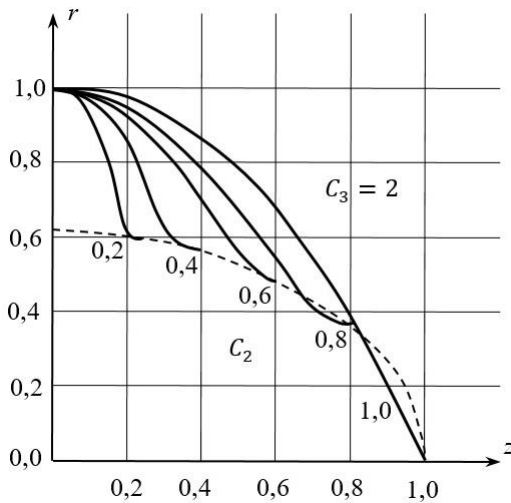


Рис. 2 – Формы меридианов поверхностей

Fig. 2 – Shapes of meridian surfaces

На рисунке 2 приведены расчетные формы меридианов поверхностей маховика $z = z(r, r_a, C_2)$, а на рисунке 3 – график относительной массовой энергоёмкости $\bar{u} = \bar{u}(C_2, C_3)$.

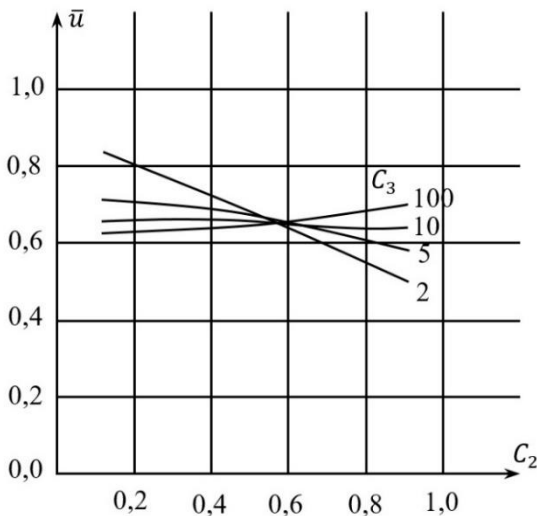


Рис. 3 – Относительная массовая энергоёмкость

Fig. 3 – Relative mass energy intensity

Возможность намотки таких оболочек ограничивается предельным значением угла трения нити о поверхность оболочки

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\sin \varphi}{\operatorname{tgy} + \frac{2\pi p \cos \varphi}{A \cos \gamma}} \leq k.$$

Максимальное значение угла θ находится из условия $d(\operatorname{tg} \theta)/dr = 0$.

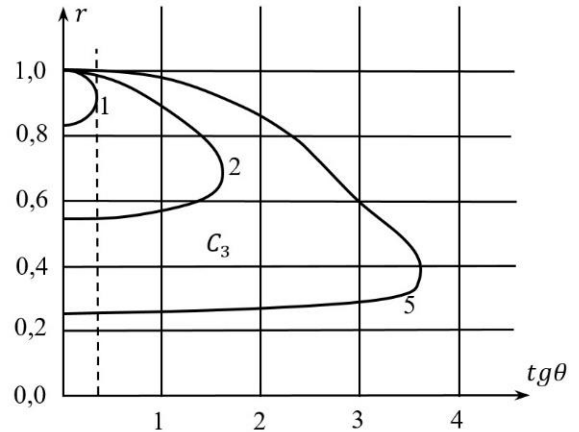


Рис. 4 – Тангенс угла трения

Fig. 4 – Tangent of friction angle

На рис. 4 дана зависимость $\operatorname{tg} \theta = \operatorname{tg} \theta(r, C_2, C_3)$, где вертикальной пунктирной линией ограничен уровень $\operatorname{tg} \theta = 0,3$.

Оценивая энергетические показатели маховиков с армированием по траекториям, у которых межслоевые усилия равны нулю ($q = 0$) с энергоёмкостью равнонапряжённых маховиков [18] при равных параметрах r_a и C_2 видно, что маховики с $q = 0$ менее энергоёмки. Однако ограничение $|q| \leq [\tau_{св}] \frac{n}{n_c}$ (n_c – количество нитей в сечении зоны моноотропного слоя сети, имеющего максимальное количество нитей из всех сетевых слоев, образующих оболочку) по прочности связующего на них не распространяется и поэтому такие маховики имеют более широкий диапазон существования форм меридианов, чем равнопрочные маховики.

Литература

1. А.М. Скудра, Ф.Я. Булавс *Структурная теория армированных пластиков*. Зинатне, Рига, 1978. 192 с.
2. В.В. Болотин, *Проблемы прочности*, 2, 13-20 (1971).
3. В.В. Болотин, *Механика композитных материалов*, 3, 405-420 (1981).
4. Г.Г. Портнов, А.И. Бейль, *Механика полимеров*, 2, 231-244 (1977).
5. H.T. Nahn, *Composite Technology Review*, 5, 1, 26-29 (1983).
6. К.Е. Перепелкин, *Структура и свойства волокон*. Химия, Москва, 1985. 324 с.
7. J.D.H. Huges, *Carbon*, 2, 5, 551-556 (1984).
8. И.Г. Жигун, А.В. Поляков, *Свойства пространственно-армированных пластиков*. Зинатне, Рига, 1978. 232 с.
9. Ю.В. Боков, В.В. Васильев, *Механика композитных материалов*, 5, 846-854 (1981).
10. В.В. Васильев, В.А. Поляков, Г.Г. Портнов, *Механика композитных материалов*, 2, 301-306 (1982).

11. С.Г. Сидорин, *Вестник технологического университета*, **23**, 2, 73-77 (2020).
12. В.И. Альперин, Н.В. Корольков, А.В. Мотовкин, *Конструкционные стеклопластики*. Химия, Москва, 1979. 360 с.
13. В.В. Васильев *Механика конструкций из композиционных материалов*. Машиностроение, Москва, 1988. 831 с.
14. Д.В. Россато, К.С. Грове, *Намотка стеклонитью*. Машиностроение, Москва, 1969. 309 с.
15. В.Л. Сегал, С.Б. Череватский, *Труды Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластин*. Наука, Москва, 1966. 280 с.
16. В.В. Новожилов *Теория тонких оболочек*. Судпромгиз, Ленинград, 1951. 344 с.
17. И.Ф. Образцов, В.В. Васильев, В.А. Бунаков *Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов*. Машиностроение, Москва, 1977. 144 с.
18. С.Г. Сидорин, *Вестник технологического университета*, **23**, 2, 64-68 (2020).

References

1. A.M. Skudra, F.J. Bulavs *Structural theory of reinforced plastics*. Zinatne, Riga, 1978. 192 p.
2. V.V. Bolotin, *Problems of Strength*, 2, 13-20 (1971) .
3. V.V. Bolotin, *Mechanics of composite materials*, 3, 405-420 (1981) .
4. G.G. Portnov, A.I. Beil, *Mechanics of polymers*, 2, 231-244 (1977) .

5. H.T. Hahn, *Composite Technology Review*, **5**, 1, 26-29 (1983).
6. K.E. Perepelkin, *Structure and properties of fibers*. Chemistry, Moscow, 1985. 324 p.
7. J.D.H. Huges, *Carbon*, **2**, 5, 551-556 (1984).
8. I.G. Zhigun, A.V. Polyakov, *Properties of spatially reinforced plastics*. Zinatne, Riga, 1978. 232 p.
9. Y.V. Bokov, V.V. Vasiliev, *Mechanics of Composite Materials*, 5, 846-854 (1981) .
10. V.V. Vasiliev, V.A. Polyakov, G.G. Portnov, *Mechanics of Composite Materials*, 2, 301-306 (1982).
11. S.G. Sidorin, *Herald of Technological University*, **23**, 2, 73-77 (2020).
12. V.I. Alperin, N.V. Korolkov, A.V. Motovkin, *Structural fiberglass plastics*. Chemistry, Moscow, 1979. 360 p.
13. V.V. Vasiliev, *Mechanics of Structures from Composite Materials*. Mashinostroenie, Moscow, 1988. 831 с.
14. D.V. Rossato, K.S. Grove, *Winding of Glass Fibers*. Mashinostroenie, Moscow, 1969. 309 p.
15. V.L. Segal, S.B. Cherevatsky, *Proceedings of the All-Union Conference on the Theory of Shells and Plates*. Nauka, Moscow, 1966. 280 p.
16. V.V. Novozhilov, *Theory of thin shells*. Sudpromgiz, Leningrad, 1951. 344 p.
17. I.F. Obratsov, V.V. Vasiliev, V.A. Bunakov *Optimal Reinforcement of Shells of Rotation from Composite Materials*. Mashinostroenie, Moscow, 1977. 144 p.
18. S.G. Sidorin, *Herald of Technological University*, **23**, 2, 64-68 (2020).

© С. Г. Сидорин – к.т.н., доцент кафедры Основы конструирования и прикладная механика, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия, tmsm@kstu.ru.

© S. G. Sidorin – PhD, Associate professor of the department of Fundamentals of Design and Applied Mechanics, Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia, tmsm@kstu.ru.

Все статьи номера поступили в редакцию журнала в период с 10.12.24 по 09.01.25.