Учёные записки
Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета
№ IV-1 (20)
2014

Сокачев А. В., Марьин Б. Н., Сысоев О. Е., Шпорт Р. В.
A. V. Sokachev, B. N. Maryin, O. E. Sysoyev, R. V. Shport

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТОНКОСТЕННЫХ КОМПОЗИТОВ ЗАМКНУТОГО КОНТУРА В ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ И АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

PRACTICAL APPLICATION OF THEORETICAL STUDIES OF THIN-WALLED COMPOSITE ELEMENTS WITH A CLOSED CROSS-SECTION BOUNDARY IN HIGH-STRENGTH CIVIL ENGINEERING AND AVIATION STRUCTURES

Сокачев Алексей Валентинович – генеральный директор ЗАО "СТРОЙСТАЛЬ" (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681005, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Павловского, д. 19, корп. 2; 89098640475. E-mail: stroistal55@ mail.ru.
Mr. Aleksey V. Sokachev – Director General, Ltd. “STROYSTAL” (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681005, Komsomolsk-on-Amur, 19/2 Pavlovskogo Str.; +7-909-8640475. E-mail: stroistal55@ mail.ru.

Марьин Борис Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Машиностроение и металлургия» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; 89141778755. E-mail: marymsb@knastu.ru.
Mr. Boris N. Maryin – Dr.habil. of Engineering, Professor, Department of Foundry Machinery and Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenina Av.; +7 (9141) 778755. E-mail: maryinsb@knastu.ru.

Сысоев Олег Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, декан факультета кадастра и строительства Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; +7(4217)241-141. E-mail: fks@knastu.ru
Mr. Oleg Ye. Sysoyev – Dr.habil. of Engineering, Professor, Head of the Department of Cadastre and Civil Engineering, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenina Av.; +7 (4217) 241-141. E-mail: fks@knastu.ru.

Шпорт Роман Вячеславович – кандидат технических наук, заместитель первого вице-президента по производству ЗАО «Гражданские самолеты Сухого» (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: R_Shport@scac.ru
Mr. Roman V. Shport – PhD in Engineering, Deputy First Vice-President, CJSC Sukhoi Civil Aircraft (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenina Av. E-mail: R_Shport@scac.ru.

Аннотация. Рассмотрена задача определения осевых перемещений при расчете композитного стержня с многозамкнутым контуром поперечного сечения.

Summary. The paper deals with the task of determining axial displacements during calculation of a composite rod with multi-closed cross-section boundary.

Ключевые слова: композиционные стержни, деформация контура сечения, депланация сечения.

Key words: composite rods, cross-section boundary deformation, cross-section distortion.

УДК 629.7:539.4

В настоящее время композиционные материалы находят все более широкое применение в изготовлении тонкостенных строительных конструкций, в частности труб или других стержневых элементов, тонкостенных оболочек, длина которых значительно превышает раз-

меры поперечного сечения. Композиционные стержни изготавливаются намоткой или выкладкой однонаправленной или тканой ленты под различными углами к продольной оси стержня и используются в качестве элементов конструкций ферм, подкосов, лонжеронов, винтов летательных аппаратов, карданных валов автомобилей и т.д. [1, 2].

Тонкостенные оболочки обеспечивают сочетание высокой прочности и жесткости при относительно небольшой массе. При изготовлении изделий широкое применение получили тонкостенные оболочки, представляющие собой удлиненные цилиндрические и конические конструкции. В большинстве случаев конструкции подкрепляются стальной арматурой, а ответственные конструкции – арматурой из углепластиков или комбинированной [2, 3].

В зависимости от типа сечения стержни разделяются на системы с открытым, закрытым или многократно замкнутым (многозамкнутым) контуром поперечного сечения.

Рассмотрим балочную систему, подкрепленную композитными оболочками. Предполагается, что оболочки воспринимают изгибающие моменты, поперечные силы и крутящие моменты, работая как тонкостенные балки. Балочная (стержневая) теория справедлива для удлиненных оболочек регулярной конструкции, т.е. для оболочек, длина которых значительно больше размеров поперечного сечения, причем отсутствуют вырезы и резкое изменение жесткости изделия и дополнительных элементов по длине [4, 5].

Типовая расчетная модель стержня (см. рис. 1) представляет собой цилиндрическую оболочку, образованную из слоев композита с углами армирования $\pm\varphi(i = 1,2,3,\dots)$ и толщинами h_i, причем длина этой оболочки значительно больше размеров ее сечения, а последние значительно больше толщины стенки.

Введем систему координат *x, y, z* с началом в произвольной точке 0. В общем случае в сечении стержня действуют осевая сила *N*, перерезывающие силы Q_x и Q_y, изгибающие моменты M_x и M_y и крутящий момент M_z.

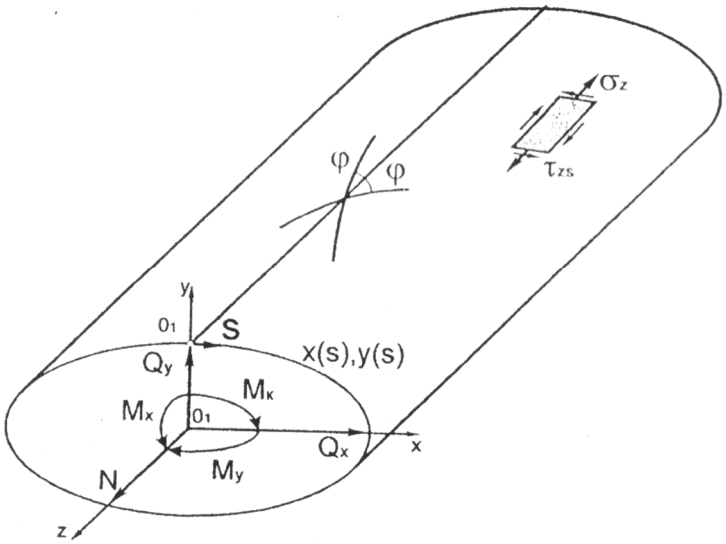

Рис. 1. Расчетная схема композитного стержня

Кривая, которая получается при пересечении срединной поверхности (поверхность, делящая толщину стержня пополам) плоскостью, перпендикулярной оси стержня, называется контуром поперечного сечения. Положение любой точки М стержня характеризуется криволинейной координатой *S*, отсчитываемой по контуру поперечного сечения от некой начальной образующей, и продольной координатой *Z*. Контур поперечного сечения задается параметрическими уравнениями $x(s)$, $y(s)$ или явными $y = y(x)$.

В теории изгиба и кручения тонкостенных стержней, как правило, не учитывается деформация контура сечения в своей плоскости, т.е. $e_s = 0$. Жесткий в своей плоскости контур может лишь поступательно смещаться вдоль осей *x, y, z* и поворачиваться относительно осей

на углы θ_x, θ_y, θ_z (закон плоских сечений). Положительные направления перемещений и углов поворота соответствуют направлениям сил и моментов, показанных на рис. 1. Для получения распределения упругих деформаций по контуру сечения введем радиус-вектор ρ точки М (см. рис. 2). Тогда имеют место следующие геометрические соотношения:

$$x = \rho \cdot sin\alpha; \qquad y = \rho \cdot cos\alpha; \qquad (1)$$
$$sin\beta = -\frac{dy}{ds} = -\dot{y}; \qquad cos\beta = -\frac{dx}{ds} = \dot{x};$$

Упругие деформации произвольной точки М контура сечения в направлении осей *x, y* можно записать в виде (см. рис. 3)

$$u_x = u(z) + u_x(\theta);$$
$$u_y = v(z) + u_y(\theta),$$

где $u(z)$, $v(z)$ – упругие деформации полюса (точка *O*) вдоль осей *x, y*;

$u_x(\theta)$, $u_y(\theta)$ – упругие деформации, зависящие от угла поворота сечения $\theta_z(z)$.

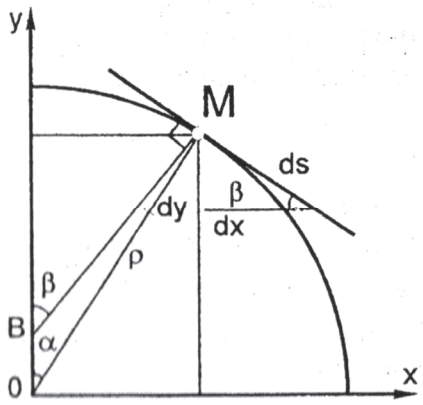

Рис. 2. Геометрические параметры контура поперечного сечения

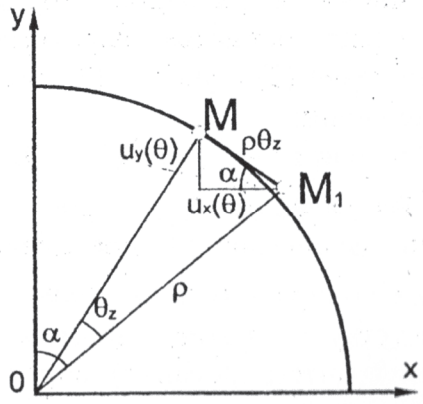

Рис. 3. Смещение точки контура при повороте сечения

Из рис. 3 с учетом равенств (1) получим:

$$u_x = u + \rho \cdot \theta_z \cdot cos\alpha = u + \theta_z\, y;$$
$$u_y = v - \rho \cdot \theta_z \cdot sin\alpha = v - \theta_z\, x.$$

В дальнейшем потребуются также выражения для контурных упругих деформаций u_s по касательной к контуру (см. рис. 4).

Из рис.4 получим

$$u_s = u_x \cdot \cos\beta - u_y \cdot \sin\beta;$$
$$r = x \cdot \sin\beta + y \cos\beta.$$

С учетом соотношений (1) получим

$$u_s = u_x\dot{x} + u_y\dot{y} = u\dot{x} + v\dot{y} + (y\dot{x} - x\dot{y})\,\theta_z = u\dot{x} + v\dot{y} + r\theta_z.$$

Деформация стенки стержня определяется двумя компонентами: относительной деформацией в осевом направлении (ε_z) и деформацией сдвига (γ_{zs})

$$\varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}; \qquad \gamma_{zs} = \frac{\partial u_s}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial s}. \qquad (2)$$

Предполагаем, что продольная деформация ε_z распределяется по сечению по закону плоскости, т.е. она линейно зависит от координат *x, y* (см. рис. 1):

$$\varepsilon_z = w' + \theta'_x y + \theta'_y x. \qquad (3)$$

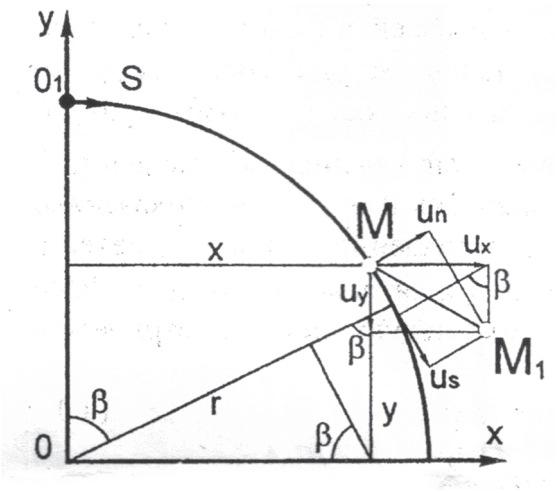

Рис. 4. Составляющие смещения точки контура

Штрихом здесь и далее будем обозначать производную по z.

Соотношение (3) аналогично закону плоских сечений теории изгиба балок, однако, поскольку оно записывается для относительных деформаций, в балочной теории тонкостенных стержней сечения не обязательно остаются плоскими. Действительно, интегрируя первое соотношение (2) с учетом (3), получим следующее распределение упругих деформаций:

$$u_z = w(z) + \theta_x(z)y + \theta_y(z)x + f(x,y). \qquad (4)$$

Из равенства (4) и рис. 1 можно заключить, что w определяет поступательное продольное смещение сечения, а θ_x и θ_y являются его углами поворота относительно осей x и y. Три первых слагаемых в (4) соответствуют закону плоских сечений, а последнее (произвольная функция интегрирования) определяет отклонение от плоскости. Такое отклонение называется депланацией сечения.

Данная теория может использоваться при проектировании строительных конструкций, летательных аппаратов, автомобилей и т.п., так как композиционные материалы являются прочными, легкими и коррозионностойкими в эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Немировский, Ю. В. О некоторых особенностях уравнений оболочек, армированных волокнами постоянного поперечного сечения / Ю. В. Немировский, А. П. Янковский // Механика композиционных материалов и конструкций. – 1997. – Т. 3. – № 2. – С. 15-39.
2. Янковский, А. П. Идентификация структур армирования композиционных конструкций на основе результатов теплофизических экспериментов об установившихся колебаниях температуры / А. П. Янковский // Инженерно-физический журнал. – 2011. – Т. 84. – № 2. – С. 324-333.
3. Смердов, А. А. Оптимизация характеристик демпфирования многослойных композиционных материалов / А. А. Смердов // Авиационная промышленность. – 2006. – № 2. – С. 12-18.
4. Немировский, Ю. В. Равнонапряженное армирование металлокомпозитных пластин волокнами постоянного поперечного сечения в условиях установившейся ползучести / Ю. В. Немировский, А. П. Янковский // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2008. – Т. 44. – № 1. – С. 11-35.
5. Лейзерович, Г. С. О взаимодействии форм изгибных колебаний тонких круговых цилиндрических оболочек с разными параметрами волнообразования / Г. С. Лейзерович, В. С. Симонов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2012. – № IV-1(12). – С. 9-12.