

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЖЕСТКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ КОМПОЗИТНЫХ ОПОР-ОБОЛОЧЕК УЛЬТРАКОМПАКТНЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ¹

Адищев В.В.¹, Зубков А.С.², Иванов А.И.¹, Мальцев В.В.¹, Паничев А.Ю.³

¹Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин), г. Новосибирск, Россия

²ООО «ЭЛЕКТРОМАШ», г. Москва, Россия

³ООО «Сибсертификация», г. Новосибирск, Россия

АННОТАЦИЯ

Предлагается методика определения модулей упругости на растяжение и сжатие стеклопластика – композиционного материала оболочек опор воздушных линий электропередач. Опора представляет собой тонкую коническую оболочку с углом конусности $\approx 89^\circ$. Оболочка формируется с помощью косослойной продольно-поперечной намотки. Как показали расчеты, стеклопластиковые опоры с большим коэффициентом запаса удовлетворяют ограничениям по несущей способности, но требованиям по перемещениям удовлетворить сложно из-за недостаточной жесткости стеклопластика. Требуется экспериментальное определение характеристик жесткости материала, из которого изготовлена конструкция. При этом конструктивные особенности и технологические особенности изготовления требуют, чтобы образцы были вырезаны именно из оболочки опоры. Материал считается трансверсально-ортотропным. Экспериментально доказано, что модули упругости на сжатие и растяжение различны. Предложена экспериментально-аналитическая методика определения модулей упругости и коэффициентов Пуассона для главных направлений ортотропии. В меридиональном направлении модули определяются экспериментально. Для определения модулей упругости в кольцевом направлении используется методика численного определения модуля упругости на сжатие на основе экспериментальных данных. Приведен пример экспериментально – аналитического определения модулей упругости материала, оболочки макета опоры линии электропередач. Показано, что модуль упругости на растяжение превышает модуль упругости на сжатие.

Ключевые слова: опора воздушной линии электропередач; тонкая коническая оболочка; стеклопластик; разномодульный трансверсально-ортотропный материал; модули упругости на растяжение и сжатие; экспериментально-аналитическая методика

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» (мероприятие 1.4 Программы), заявка 2014-14-582-0002-025, по проекту «Разработка опор из композитных материалов и технических решений для ультракомпактных высоковольтных линий (УКВЛ) на различные классы напряжений (35 кВ, 110 кВ)», соглашение № 14.582.21.0001, уникальный идентификатор RFMEFI58214X0001.

DETERMINATION OF STIFFNESS CHARACTERISTICS COMPOSITE MATERIALS SHELLS SUPPORTS ULTRA HIGH-VOLTAGE POWER LINES

Adishchev V.V.¹, Zubkov A.S.², Ivanov A.I.¹, Maltsev V.V.¹, Panichev A.Y.³

¹*Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin),
Novosibirsk, Russia*

²*ELECTROMASH, Moscow, Russia*

³*Sibsertifikaciya, Novosibirsk, Russia*

ABSTRACT

The paper proposes a method of determining the modulus of elasticity in tension and compression fiberglass - composite shells overhead power line poles. The support is a thin conical shell with a cone angle $\approx 89^\circ$. Calculations showed that the fiberglass support with a large safety factor satisfy the constraints on the bearing capacity, but satisfy the requirements for displacement of difficult due to non-sufficient rigidity of fiberglass. Are needed the experimental determination of the stiffness characteristics of the material of construction of the structure. In this design features and processing features of manufacturing require that the samples were cut from the shell is the support. The material is considered to be transversely isotropic. Is experimentally proved that the modulus of elasticity in compression and tension are different. Experimental and analytical method for determination of elastic modules and Poisson's ratio has been proposed for the principal directions orthotropy. In the meridional direction of the modules are determined experimentally. To determine the elastic modulus in the circumferential direction using a technique of numerical determining compressive modulus based on experimental data. An example was given experimentally - analytical determination of elastic modules of the material shell layout power line support. It is shown that the tensile modulus of more than the modulus of elasticity in compression.

Keywords: overhead power lines; thin conical shell; fiberglass; multimodulus transversely orthotropic material; elastic modules in tension and compression; experimental and analytical procedure

ВВЕДЕНИЕ

Проблема расчета оболочек опор линий высоковольтных электропередач, изготовленных из композиционных материалов, становится достаточно актуальной. Наиболее дешевый композиционный материал стеклопластик составляет серьезную конкуренцию металлам и железобетону [1-5]. Исследования показали, что основные трудности при проектировании композитных опор заключаются в том, что несущая способность опор при различных сочетаниях расчетных нагрузок вполне обеспечивается [6], но удовлетворить строгим ограничениям по жесткости (допускаемым перемещениям) сложно в силу того, что модули упругости стеклопластика не высоки по сравнению с традиционными материалами. Для расчета перемещений оболочек-опор требуются достоверные данные по жесткостным характеристикам (модули упругости, коэффициенты Пуассона). У ориентированных стеклопластиков [7-9] механические свойства в различных направлениях различны, то есть эти материалы можно считать материалами, обладающими конструкционной анизотропией. При этом, как правило, ориентированные конструкционные стеклопластики обладают симметрией механических свойств. Следовательно, их можно считать

трансверсально-ортотропными. Опора линии электропередач представляет собой тонкую коническую оболочку из композиционного материала. При отсутствии локальных сосредоточенных нагрузок напряжения на площадках, параллельных срединной поверхности оболочки, можно считать пренебрежимо малыми.

1. ЖЕСТКОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Математическое моделирование механической реакции конструкций опоры на статические нагрузки основано на методе конечных элементов в вариационной постановке [10].

Расчет конструкции сводится к решению краевых задач для системы уравнений теории упругости [10]. Задача решается в трехмерной постановке. Полная система уравнений, описывающих стационарный процесс нагружения, включает уравнения равновесия

$$[\Phi]^T \{\sigma\} = \{G_v\}, \quad (1)$$

геометрические уравнения (соотношения Коши)

$$\{\varepsilon\} = [\Phi]\{U\}, \quad (2)$$

и определяющие (физические) уравнения

$$\{\varepsilon\} = [D]\{\sigma\}, \quad (3)$$

$\{U\} = \{u, v, w\}^T$ – вектор перемещений; $\{\sigma\} = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}\}^T$ – вектор напряжений; $\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}\}^T$ – вектор деформаций; $[\Phi]^T$ – матрица дифференциальных операторов

$$[\Phi]^T = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 & 0 & \partial/\partial y & 0 & \partial/\partial z \\ 0 & \partial/\partial y & 0 & \partial/\partial x & \partial/\partial z & 0 \\ 0 & 0 & \partial/\partial z & 0 & \partial/\partial y & \partial/\partial x \end{bmatrix} \quad (4)$$

$\{G_v\} = \{X, Y, Z\}^T$ – вектор-функция объемных сил; $[D]$ – матрица упругой податливости, определяющая механические характеристики материала. Для ортотропного материала

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{xy}}{E_y} & -\frac{\nu_{xz}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{yz}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xz}}{E_x} & -\frac{\nu_{yz}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xz}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

где E_x , E_y , E_z – модули Юнга в направлении главных осей; G_{xy} , G_{yx} , G_{xz} – модули сдвига для плоскостей xy , yx , xz ; ν_{xy} , ν_{xz} , ν_{yz} – коэффициенты Пуассона.

При нагружении образца поперек направления армирования стекловолокнами напряжения в связующем материале и арматуре одинаковы, а доля деформаций составляющих материалов, подсчитанных с таким допущением, в общей деформации композитного материала пропорциональна объемному содержанию каждого составляющего. Поэтому модуль E_z может быть определен по правилу смесей [11]. Модули сдвига при известных модулях E_x , E_y , E_z и коэффициентах Пуассона также определяются по формулам теории упругости [11]. Таким образом, основной задачей является задача определения трансверсальных модулей упругости E_x , E_y и соответствующих коэффициентов Пуассона. Технологии производства стеклопластиков достаточно сложны, а расчетные формулы для определения модулей упругости [11] пригодны лишь для армированных материалов с идеальной структурой. Поэтому для использования в расчетах необходимо определять эти характеристики экспериментально, испытывая на растяжение и сжатие образцы, вырезанные из реальных оболочек-опор. Образцы, вырезанные в направлении образующей оболочки, можно испытывать по стандартным схемам нагружения, так как кривизна поверхностей образцов в поперечном направлении незначительно влияет на напряженно-деформированное состояние в образце. Можно считать, что при растяжении и сжатии реализуется одномерное напряженное состояние. Но для определения модуля упругости в направлении образующей (кольцевом) такая схема не может быть реализована. Наличие кривизны поверхности приводит к возникновению изгибных напряжений, и, следовательно, к реализации в сечениях образцов напряжений разных знаков. При этом существенно различными оказываются модули упругости стеклопластиков при сжатии и растяжении. Такой вывод будет сделан ниже на основе проведенных экспериментов.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРАНСВЕРСАЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ УПРУГОСТИ ПРИ СЖАТИИ И РАСТЯЖЕНИИ В НАПРАВЛЕНИИ ОБРАЗУЮЩЕЙ ОБОЛОЧКИ-ОПОРЫ

Для получения характеристик ортотропного композита оболочки в направлении образующей (вертикальном направлении) применяются образцы-лопатки, вырезанные из оболочек в вертикальном направлении. Размеры рабочей центральной части лопатки показаны на рис.1: L_0 – длина, h_0 – ширина, δ_0 – толщина оболочки), h_0 составляет $1,5 \div 2\delta_0$. Уширения лопаток должны быть обработаны так, чтобы поверхности их были плоскопараллельными. В центральной части рабочего участка образца-лопатки тензодатчики наклеиваются в продольном (датчик тз-1) и поперечном (датчик тз-2) направлениях (рис.1). На противоположной грани датчики наклеиваются аналогично.

Образцы закрепляют в зажимы испытательной машины по меткам, определяющим положение кромок зажимов таким образом, чтобы продольные оси зажимов и ось образца совпадали между собой и направлениям движения подвижного зажима. Зажимы равномерно затягивают, чтобы исключалось скольжение образца в процессе испытания, но при этом не происходило его разрушения в месте закрепления.

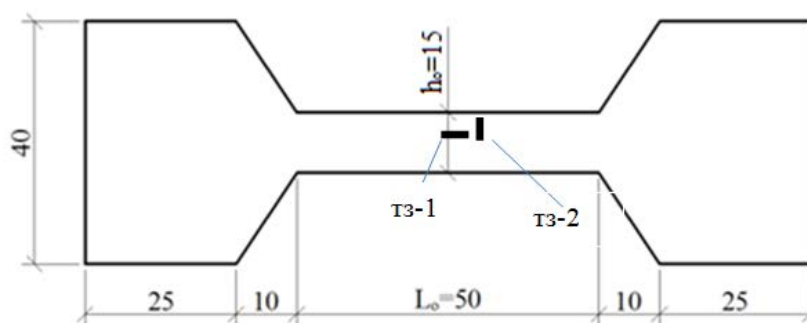


Рис.1. Образец-лопатка для испытаний на растяжение, размеры в мм.

Растягивающая или сжимающая нагрузка N , прикладываемая к образцу, изменяется ступенчато. Напряжения, возникающие в рабочей части образца, вычисляются по формуле

$$\sigma = \frac{N}{h_0 \delta_0} \quad (6)$$

На каждой ступени фиксируются значения нагрузки и показания четырех датчиков. Деформация растяжения или сжатия в продольном направлении ε_1 определяется как среднее арифметическое показаний двух датчиков, наклеенных на грани рабочей части образца в продольном направлении. Деформации ε_2 в поперечных направлениях определяются как средние арифметические показаний датчиков, наклеенных на противоположных гранях в поперечных направлениях.

Для определения модуля упругости при растяжении или сжатии композита строится диаграмма зависимости напряжений от деформаций в продольном направлении. На диаграмме выделяется участок, соответствующий линейной зависимости напряжений от деформаций. Модуль упругости определяется по формуле

$$E_x = \frac{\sigma_m - \sigma_0}{\varepsilon_m - \varepsilon_0} \quad (7)$$

Индекс «0» присваивается значениям напряжений и деформаций в начальном участке выделенного участка диаграммы. Индекс « m » соответствует переходу линейной зависимости в нелинейную, σ_m – условный предел текучести материала. Коэффициенты Пуассона вычисляются по формуле

$$\nu_{12} = \left| \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right| \quad (8)$$

Для проведения испытаний была использована коническая стеклопластиковая оболочка макета опоры. Были вырезаны и обработаны пять образцов-лопаток в меридиональном направлении (табл.1). На рис.2 (фото) представлены образцы, изготовленные из фрагментов, вырезанных из оболочки. На фото образцы-лопатки, образцы-арки и образцы, склеенные из двух арок.

Испытания проводились на установке для механических испытаний ЭБСА.565511.601.00.00 ПА (рис.3).

Первая серия испытаний проведена на образцах-лопатках, геометрические размеры указаны в таблице 1.



Рис.2. Образцы для испытаний, вырезанные из оболочки макета опоры.



Рис.3. Установка для испытаний ЭБСА.565511.601.00.00 ПА.

Таблица 1.

Геометрические размеры образцов.

Образец №	h_0 , мм	δ_0 , мм	L_0 , мм
1	10,1	7,1	53,1
2	10,0	7,4	53,0
3	10,1	7,4	52,5
4	10,0	7,5	52,5
5	10,8	7,0	51,0

Результаты испытаний представлены на графиках (рис.4) и в таблице 2.

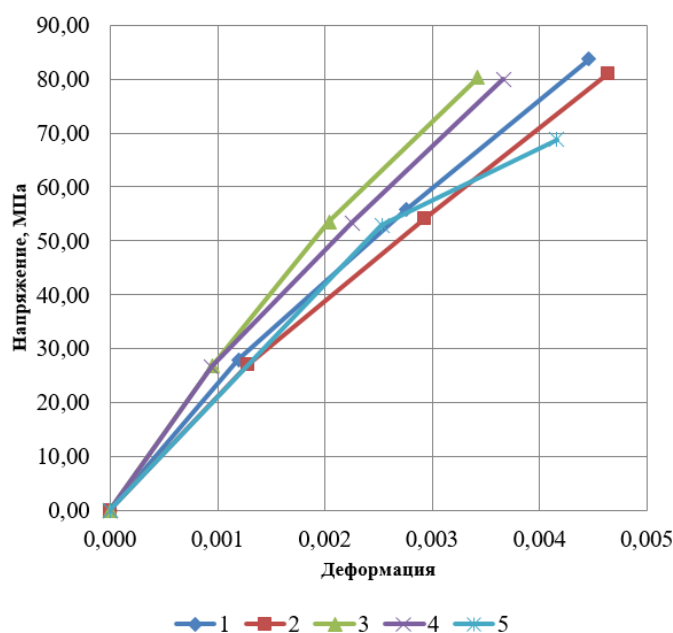


Рис.4. Зависимости «напряжения-деформации» для образцов 1-5.

Таблица 2.

Характеристики, определенные по результатам эксперимента.

Параметр	№ Образца					Среднее по образцам
	1	2	3	4	5	
Коэффициент Пуассона	0,29	0,34	0,33	0,28	0,26	0,30
Модуль упругости, ГПа	23,35	21,09	28,28	28,21	20,92	24,37

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРАНСВЕРСАЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ УПРУГОСТИ НА РАСТЯЖЕНИЕ В КОЛЬЦЕВОМ НАПРАВЛЕНИИ

Для определения модулей упругости в кольцевом (горизонтальном) направлении на растяжение вырезаются дуговые элементы-арки (рис.5) из стеклопластиковой оболочки макета опоры шириной, равной толщине оболочки.

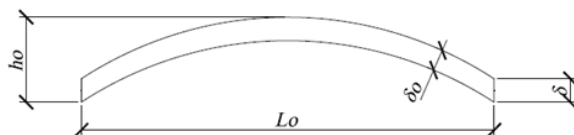


Рис.5. Образец-арка для испытаний.

Изготавливаются образцы, склеенные из двух арок (рис.5), пространство между арками заполняется полимерным компаундом. Уширения образцов обрабатываются так, чтобы поверхности их были плоскопараллельными. На противоположных гранях центральной растягиваемой части образца наклеиваются тензодатчики в продольном и поперечном направлениях.

Наклеивается 8 датчиков – 4 на верхней грани и четыре на нижней противоположной грани.

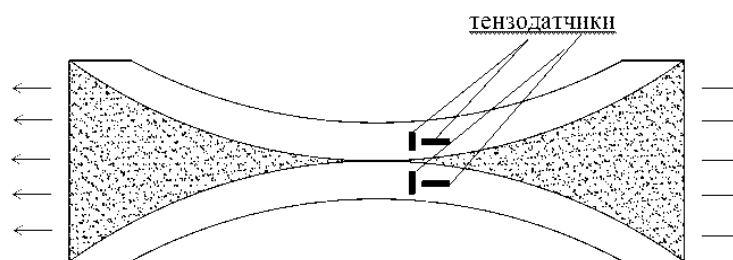


Рис.6. Образец, склеенный из двух арок.

Растягивающая или сжимающая нагрузка N , прикладываемая к образцу, изменяется ступенчато. Напряжения, возникающие в рабочей части образца, вычисляются по формуле

$$\sigma = \frac{N}{2\delta_0\delta_0} \quad (8)$$

где δ_0 – толщина образца (см. рис.6)

На каждой ступени фиксируются значения нагрузки и показания датчиков. Деформация растяжения или сжатия в продольном направлении ε_1 определяется как среднее арифметическое показаний датчиков, наклеенных на гранях рабочей части образца в продольном направлении. Деформации ε_2 в поперечных направлениях определяются как средние арифметические показаний датчиков, наклеенных на гранях в поперечном направлении.

Модуль упругости при растяжении определяется на основе построенной диаграммы зависимости напряжений от деформаций аналогично случаю, рассмотренному выше. Испытания проведены на четырех образцах (таблица 3).

Таблица 3.

Геометрические размеры образцов.

Образец №	h_0 , мм	δ_0 , мм	L_0 , мм
1	17,4	10,2	147,6
2	15,8	10,2	146,8
3	14,5	10,2	150,4
4	15,5	10,5	149,3

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРАНСВЕРСАЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ УПРУГОСТИ НА СЖАТИЕ В КОЛЬЦЕВОМ НАПРАВЛЕНИИ

Идея метода состоит в том, что для определения модуля упругости на сжатие в кольцевом направлении используются результаты определения модуля упругости на растяжение в кольцевом направлении, полученные при испытаниях образцов, склеенных из арок. На рис.7 и в таблице 4 приведены результаты этих испытаний. Среднее значение модуля упругости на растяжение E_1 , полученное в экспериментах, равно 26,43 ГПа (табл.4).

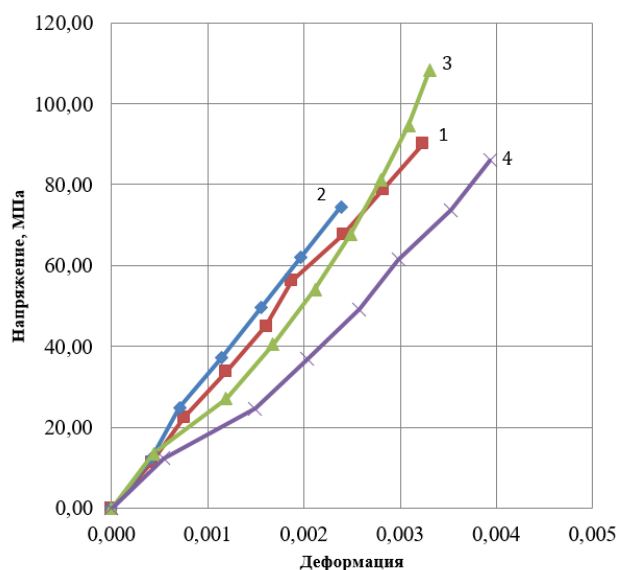


Рис.7. Зависимости «напряжения-деформации», для образцов 1-4.

Таблица 4.

Характеристики, определенные по результатам эксперимента.

Параметр	№ Образца				Среднее по образцам
	1	2	3	4	
Коэффициент Пуассона	0,25	0,28	0,35	0,50	0,35
Модуль упругости, ГПа	28,08	31,49	25,57	20,59	26,43

Далее проводятся испытания на сжатие арок шириной $b=30$ мм. Схема нагружения и наклейки датчиков изображена на рис.8.

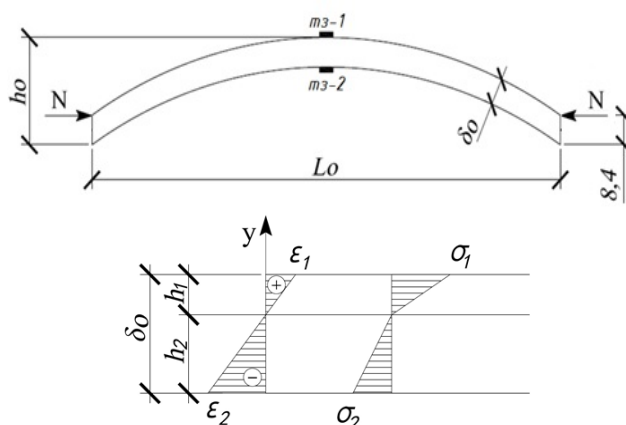


Рис.8. Распределение деформаций и напряжений в центральном сечении арки.

Датчики регистрируют деформации ϵ_1, ϵ_2 на противоположных гранях в центральном сечении, возникающие при действии сжимающих усилий N . Изгибающий момент в центральном сечении определяется из условия приложения сжимающей нагрузки N в центре торца образца-арки. В центральном сечении

действует изгибающий момент $M=Ne$, где e – расчетный эксцентриситет приложения силы N , который определяется экспериментально. В соответствии со схемой приложения нагрузки эксцентриситет относительно центра сечения равен e_0

$$e_0 = h_0 - \delta - \frac{\delta_0}{2}.$$

Будем считать в соответствии с гипотезой прямых нормалей, что деформации распределяются по сечению линейно. В силу того, что материал считается разномодульным на растяжение и сжатие, эпюра распределения напряжений отличается от эпюры деформаций.

На рис.8 изображены эпюры распределения деформаций и напряжений в центральном сечении. Уравнения равновесия центрального сечения образца-арки имеют вид

$$\begin{cases} N = b \int_{-h_2}^{h_1} \sigma(y) dy, & (9) \\ M = b \int_{-h_2}^{h_1} \sigma(y) y dy; & (10) \end{cases}$$

Напряжения распределены по закону Гука $\sigma(y) = E \cdot \varepsilon(y)$, следовательно

$$\begin{cases} \sigma_1 = E_1 \cdot \varepsilon_1, & (11) \\ \sigma_2 = E_2 \cdot \varepsilon_2; & (12) \end{cases}$$

где E_1, E_2 – модули упругости на растяжение и сжатие. Модуль упругости на растяжение E_1 определен на предыдущем этапе испытаний, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – деформации крайних волокон в зоне растяжения и сжатия соответственно.

Из гипотезы плоских сечений следует

$$-\frac{h_2}{\varepsilon_2} = \frac{h_1}{\varepsilon_1} = \frac{y}{\varepsilon}, \text{ или } y = \frac{h_1}{\varepsilon_1} \varepsilon. \quad (13)$$

Делая замену переменных в системе (9), (10) с учетом (13), получим

$$\begin{cases} N = b \int_{\varepsilon_2}^{\varepsilon_1} \frac{h_1}{\varepsilon_1} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon, & (14) \\ -Ne = b \int_{\varepsilon_2}^{\varepsilon_1} \left(\frac{h_1}{\varepsilon_1} \right)^2 \sigma(\varepsilon) \varepsilon d\varepsilon; & (15) \end{cases}$$

Подставляя (3), (4) в (6), (7), получим

$$\begin{cases} N = \frac{bh_1}{\varepsilon_1} \left[\int_{\varepsilon_2}^0 E_2 \varepsilon d\varepsilon + \int_0^{\varepsilon_1} E_1 \varepsilon d\varepsilon \right], \\ -Ne = b \left(\frac{h_1}{\varepsilon_1} \right)^2 \left[\int_{\varepsilon_2}^0 E_2 \varepsilon^2 d\varepsilon + \int_0^{\varepsilon_1} E_1 \varepsilon^2 d\varepsilon \right]; \\ N = \frac{bh_1}{\varepsilon_1} \left[-\frac{E_2 \varepsilon_2^2}{2} + \frac{E_1 \varepsilon_1^2}{2} \right], \\ -Ne = b \left(\frac{h_1}{\varepsilon_1} \right)^2 \left[-\frac{E_2 \varepsilon_2^3}{3} + \frac{E_1 \varepsilon_1^3}{3} \right]; \end{cases}$$

Таким образом, получим систему уравнений

$$\begin{cases} N = \frac{bh_1}{2\varepsilon_1} [E_1\varepsilon_1^2 - E_2\varepsilon_2^2], & (16) \end{cases}$$

$$\begin{cases} -Ne = \frac{b}{3} \left(\frac{h_1}{\varepsilon_1} \right)^2 [E_1\varepsilon_1^3 - E_2\varepsilon_2^3]; & (17) \end{cases}$$

Уравнения равновесия (16), (17) образуют замкнутую алгебраическую систему вместе с кинематическими соотношениями

$$-\frac{h_2}{\varepsilon_2} = \frac{h_1}{\varepsilon_1}, \quad h_1 + h_2 = \delta_0. \quad (18)$$

Система (16), (17), (18) относительно неизвестных h_1, h_2, e, E_2 решается достаточно просто. Из соотношений (18) следует

$$\frac{h_1}{\varepsilon_1} = \frac{\delta_0}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}, \quad \text{или} \quad h_1 = \frac{\varepsilon_1 \delta_0}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}. \quad (19)$$

Деформации $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ определяются из эксперимента, положение нейтральной оси определяется величиной h_1 (растянутая зона сечения).

Из уравнения (16) после преобразований получим

$$\frac{E_2}{E_1} = \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^2 \left(1 - \frac{2N}{bh_1 E_1 \varepsilon_1} \right), \quad (20)$$

где h_1, h_2 определяются формулами (19), (20).

Из уравнения (17) следует формула для вычисления эксцентриситета e и соответственно перемещения центрального сечения

$$e = -\frac{bE_1 h_1^2 \varepsilon_1}{3N} \left[1 + \frac{E_2}{E_1} \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^3 \right], \quad (21)$$

Деформации $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ измеряются датчиками, расположенными вдоль арки. Датчики, расположенные в поперечном направлении, измеряют поперечные деформации ε_3 , затем вычисляется коэффициент Пуассона как отношение продольных и поперечных деформаций.

Испытания проведены на пяти образцах, размеры которых указаны в таблице 5. Результаты измерения деформаций представлены в таблице 5. В таблице 6 представлены расчетные значения модуля упругости на сжатие. Модуль упругости на растяжение в расчетах принят равным значению 26,43 ГПа, полученному в экспериментах на растяжение.

Таблица 5.

Геометрические размеры образцов.

№ Образца	h_0 , мм	δ_0 , мм	L_0 , мм	δ , мм	Плечо силы, мм
1	30,2	7,2	150,6	8,4	22,40
2	30,1	6,8	150,6	8,4	22,50
3	30,2	6,8	150,5	8,4	22,60
4	30,3	6,9	150,4	8,4	22,65
5	30,5	6,6	150,7	8,4	23,00

Таблица 6.

Деформации в образцах при различных степенях нагружения.

Образец №	№ тз	Сжимающая сила, Н.							
		-400	-800	-1200	-1600	-2000	-2400	-2800	-3200
1	1	0,00103	0,00180	0,00284	0,0041	0,0052	0,0065	0,0077	0,00851
	2	-0,0013	-0,0026	-0,0036	-0,0080	-0,0065	-0,0078	-0,0093	-0,0103
2	1	0,0010	0,0021	0,0031	0,0038	0,0049	0,0061	0,0074	0,0087
	2	-0,0013	-0,0023	-0,0036	-0,0046	-0,0059	-0,0072	-0,0088	-0,0101
3	1	0,0010	0,0021	0,0031	0,0041	0,0052	0,0064	0,0080	0,0095
	2	-0,0013	-0,0026	-0,0039	-0,0051	-0,0064	-0,0077	-0,0095	-0,0116
4	1	-	0,0016	0,0026	0,0034	0,0044	0,0054	0,0067	0,0077
	2	-	-0,0021	-0,0031	-0,0041	-0,0054	-0,0067	-0,0080	-0,0096
5	1	0,0010	0,0021	0,0031	0,0044	0,0054	0,0067	0,0080	0,0093
	2	-0,0013	-0,0026	-0,0039	-0,0052	-0,0065	-0,0077	-0,0090	-0,0106

В таблице 7 приведены результаты расчета по формулам (19)-(22). Разброс определенных значений модуля упругости на сжатие оказался не более 10%, погрешность при определении высоты сжатой зоны 10%. Эксцентриситет e_0 приложения сжимающей нагрузки, вычисленный по геометрическим характеристикам образцов, изменяется в интервале от 18,2 мм до 18,8 мм. Эксцентриситет e , полученный при решении уравнения равновесия, изменяется в интервале от 15,0 мм до 17,8 мм. Различие объясняется тем, что при нагружении происходит смятие малой области приложения нагрузки и поворот торцевых сечений.

Таблица 7.

Результаты обработки экспериментальных данных.

№ Образца	Геометрические и жесткостные характеристики					
	$\frac{h_1, \text{ мм}}{h_2, \text{ мм}}$	h_1 / h_2	$\frac{E_2, \text{ ГПа}}{E_1, \text{ ГПа}}$	E_2/E_1	$\frac{e_0, \text{ мм}}{e, \text{ мм}}$	e_0 / e
1	$\frac{3,1}{4,1}$	0,76	$\frac{20,4}{26,4}$	0,77	$\frac{18,2}{17,8}$	1,02
2	$\frac{3,1}{3,7}$	0,84	$\frac{24,7}{26,4}$	0,93	$\frac{18,3}{16,7}$	1,06
3	$\frac{3,1}{3,7}$	0,81	$\frac{22,9}{26,4}$	0,87	$\frac{18,4}{17,2}$	1,07
4	$\frac{3,1}{3,8}$	0,81	$\frac{23,7}{26,4}$	0,90	$\frac{18,5}{15,0}$	1,23
5	$\frac{3,0}{3,6}$	0,83	$\frac{24,4}{26,4}$	0,92	$\frac{18,8}{16,7}$	1,12
Среднее по образцам	$\frac{3,1}{3,8}$	0,81	$\frac{23,2}{26,4}$	0,87	$\frac{18,4}{16,7}$	1,10

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена экспериментально-аналитическая методика определения трансверсальных модулей упругости стеклопластика в конической оболочке опоры линий электропередач. Установлено, что трансверсальный модуль упругости на растяжение превышает трансверсальный модуль упругости на сжатие. Погрешность исходных данных по жесткостным характеристикам, не превышающая 10%, вполне приемлема при расчетах композитных конструкций. Таким образом, доказана приемлемость предложенной методики. Методика может быть применена для определения трансверсальных модулей упругости ортотропных материалов цилиндрических и конических оболочек, изготовленных по любой технологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Положение о технической политике ОАО «ФСК ЕЭС»*. – М., 2011. – 199 с.
2. *Основные положения (Концепция) технической политики в электроэнергетике России на период до 2030 г.* «РАО ЕЭС», 2008. – 90 с.
3. Patent No.: US 6,397,545 B1. Jerome P. Fanucci, James J. Gorman, Date of Patent: Jun. 4, 2002.
4. Patent No.: US 5,704,187. Gregory Sander, John Franklin Boozer, Robert Ashley Pollard, John Richard Lewis, Date of Patent Jan. 6, 1998.
5. Patent No.: US 7,866,121 B2. Dimos Polyzois, Nibong Ungkurapinans, Date of Patent: Jan. 11, 2011.
6. Малмейстер А.К., Тамуж В.П., Тетере Г.А. *Сопротивление полимерных и композитных материалов*. – Рига: Зинатне, 1980. – 572 с.
7. Васильев В.В., Протасов В.Д., Болотин В.В. и др. *Композиционные материалы: Справочник*. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.
8. Тарнопольский Ю.М., Скудра А.М. *Конструкционная прочность и деформативности стеклопластиков*. – Рига: Зинатне, 1966. – 260 с.
9. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. *ANSYS для инженеров: Справочное пособие*. – М.: Машиностроение, 2004. – 512 с.
10. Трофимов Н.Н., Канович М.З. *Основы создания полимерных композитов*. – М.: Наука, 1999. – 540 с.

REFERENCES

1. *Regulation on technical policy of OJSC «FGC UES»*, Moscow, 2011, 199 p.
2. *Summary of Significant (Concept) technical policy in the electric power industry of Russia till 2030*. OJSC "RAO UES", 2008, 90 p.
3. Patent No.: US 6,397,545 B1. Jerome P. Fanucci, James J. Gorman, Date of Patent: Jun. 4, 2002.
4. Patent No.: US 5,704,187. Gregory Sander, John Franklin Boozer, Robert Ashley Pollard, John Richard Lewis, Date of Patent Jan. 6, 1998.
5. Patent No.: US 7,866,121 B2. Dimos Polyzois, Nibong Ungkurapinans, Date of Patent: Jan. 11, 2011.
6. Malmeyster A.K., Tamuzs V.P., Teteria G.A. *Soprotivlenie polimernykh i kompozitnykh materialov [Resistance polymeric and composite materials]*. Riga, Zinatne, 1980, 572 p.

7. Vasiliev V.V., Protasov V.D., Bolotin V.V. et al. *Kompozitsionnye materialy: Spravochnik [Composite Materials: A Guide]*. Moskva, Mashinostroyeniye, 1990, 512 p.
8. Tarnopolsky Y.M., Skudra A.M. *Konstruksionnaia prochnost' i deformativnosti stekloplastikov [Structural strength and deformability fiberglass plastics]*. Riga, Zinatne, 1966, 260 p.
9. Chigarev A.V., Kravchuk A.S., Smalyuk A.F. *ANSYS dlia inzhenerov: Spravochnoe posobie [ANSYS for engineers: Ref. allowance]*. Moskva, Mashinostroyeniye, 2004, 512 p.
10. Trofimov N.N., Kanovich M.Z. *Osnovy sozdaniia polimernykh kompozitov [Bases of creation of polymer composites]*. Moskva, Nauka, 1999, 540 p.

Поступила в редакцию 25 августа 2016 года

Сведения об авторах:

Адищев Владимир Васильевич – д.т.н., проф., Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), г. Новосибирск, Россия; e-mail: adishch@mail.ru

Зубков Александр Сергеевич – к.т.н., техн. дир., ООО «ЭЛЕКТРОМАШ», г. Москва, Россия; e-mail: zas@fenix-88.ru

Иванов Андрей Игоревич – асп., Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), г. Новосибирск, Россия; e-mail: ai722@yandex.ru

Мальцев Виктор Васильевич – асп., Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), г. Новосибирск, Россия; e-mail: malcevviktor91@yandex.ru

Паничев Александр Юрьевич – к.т.н., доц., дир., ООО «Сибсертификация», г. Новосибирск, Россия; e-mail: panichev2008@yandex.ru