

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЖЕСТКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
МАТЕРИАЛОВ КОМПОЗИТНЫХ ОПОР-ОБОЛОЧЕК  
УЛЬТРАКОМПАКТНЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ  
ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ**

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

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный  
университет (Сибстрин), ООО «ЭЛЕКТРОМАШ»,  
ООО «Сибсертификация»*

**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  $\approx 89^\circ$ . 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 более чем в два раза 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.

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

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



#### **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 twice the modulus of elasticity in compression.

Key words: 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 [7,8,9] 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  $xy, yx, xz$ ;  $\nu_{xy}, \nu_{xz}, \nu_{yz}$  – 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 рисунке 1:  $L_0$  – длина,  $h_0$  – ширина,  $\delta_0$  – 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.

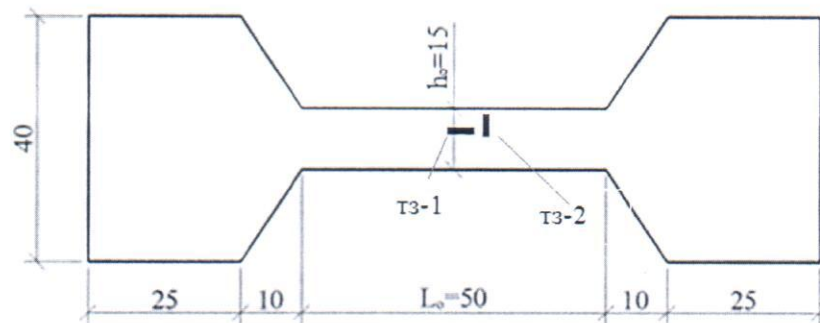


Рисунок 1 – Образец-лопатка для испытаний на растяжение, размеры в мм

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.

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  $\varepsilon_1$  определяется как среднее арифметическое показаний двух датчиков, наклеенных на гранях рабочей части образца в продольном направлении. Деформации  $\varepsilon_2$  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,  $\sigma_m$  – 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 (таблица 1). На рисунке 2 (фото) представлены образцы изготовленные из фрагментов, вырезанных из оболочки. На фото образцы-лопатки, образцы-арки и образцы, склеенные из двух арок.

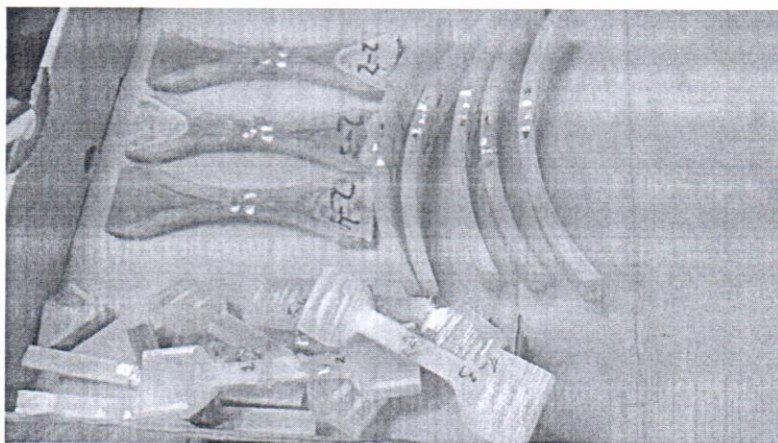


Рисунок 2 – Образцы для испытаний, вырезанные из оболочки макета опоры

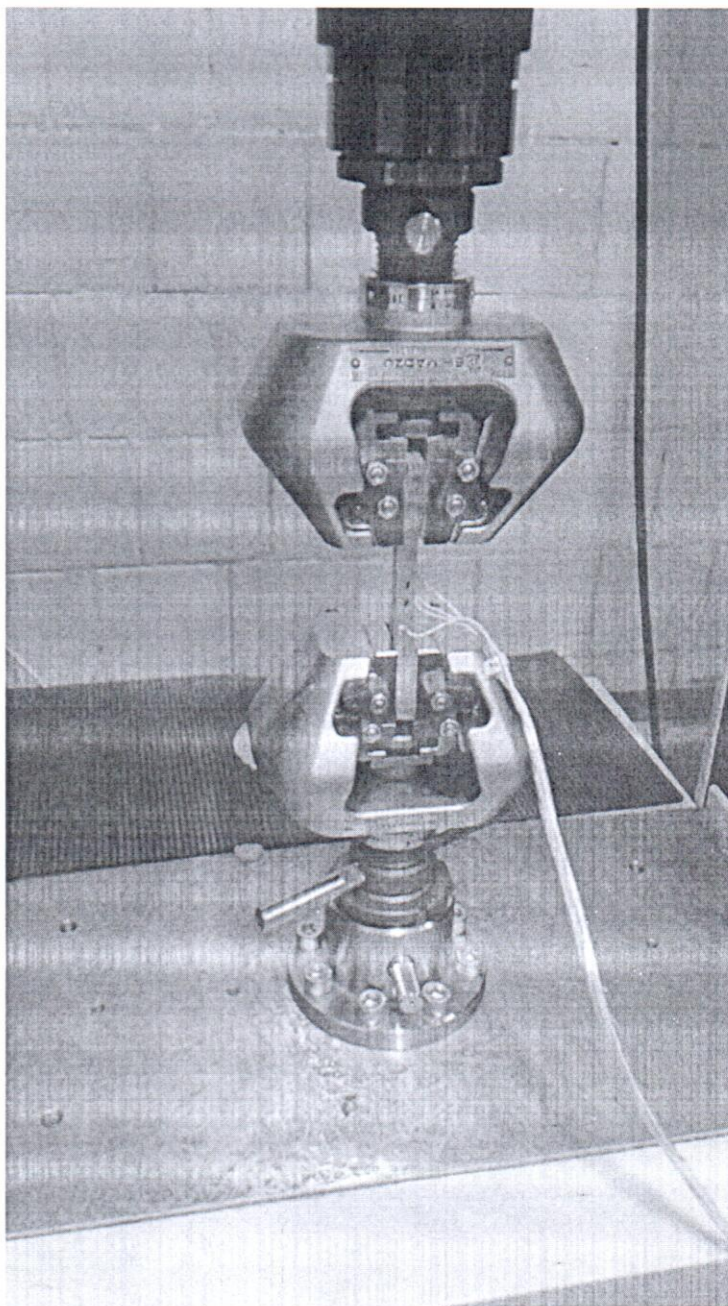


Рисунок 3 – Установка для испытаний ЭБСА.565511.601.00.00 ПА

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.

Таблица 1

## Геометрические размеры образцов

Образец №	$h_0$ , мм	$\delta_0$ , 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 (рисунок 4) и в таблице 2.

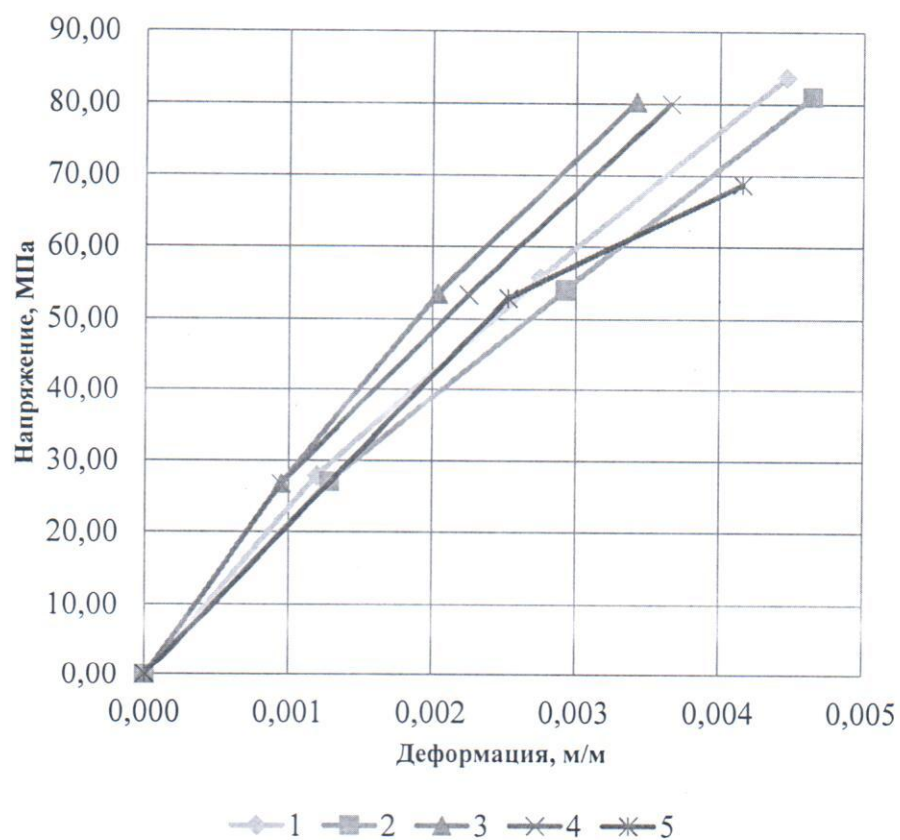


Рисунок 4 – Зависимости «напряжения-деформации» для образцов 1-5

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.

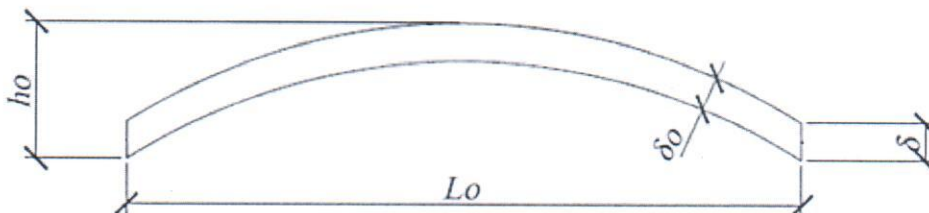


Рисунок 5 – Образец-арка для испытаний

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.

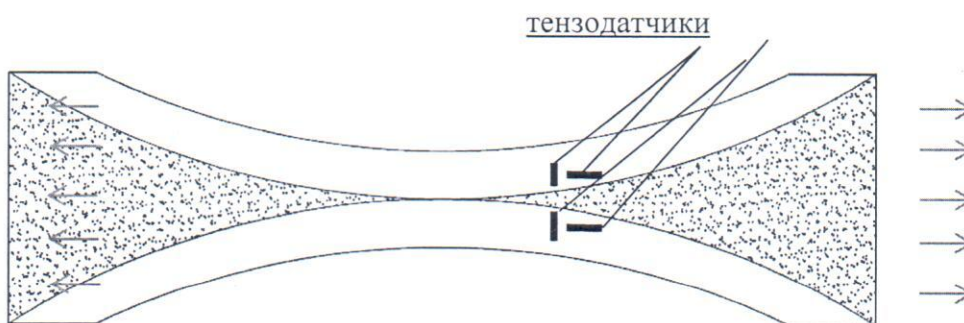


Рисунок 6 – образец, склеенный из двух арок.

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  $\delta_0$  – толщина образца (см. Рис. 6)

На каждой ступени фиксируются значения нагрузки и показания датчиков. Деформация растяжения или сжатия в продольном направлении  $\epsilon_1$  определяется как среднее арифметическое показаний датчиков, наклеенных на гранях рабочей части образца в продольном направлении. Деформации  $\epsilon_2$  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) а

Таблица 3

Геометрические размеры образцов

Образец №	$h_0$ , мм	$\delta_0$ , 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

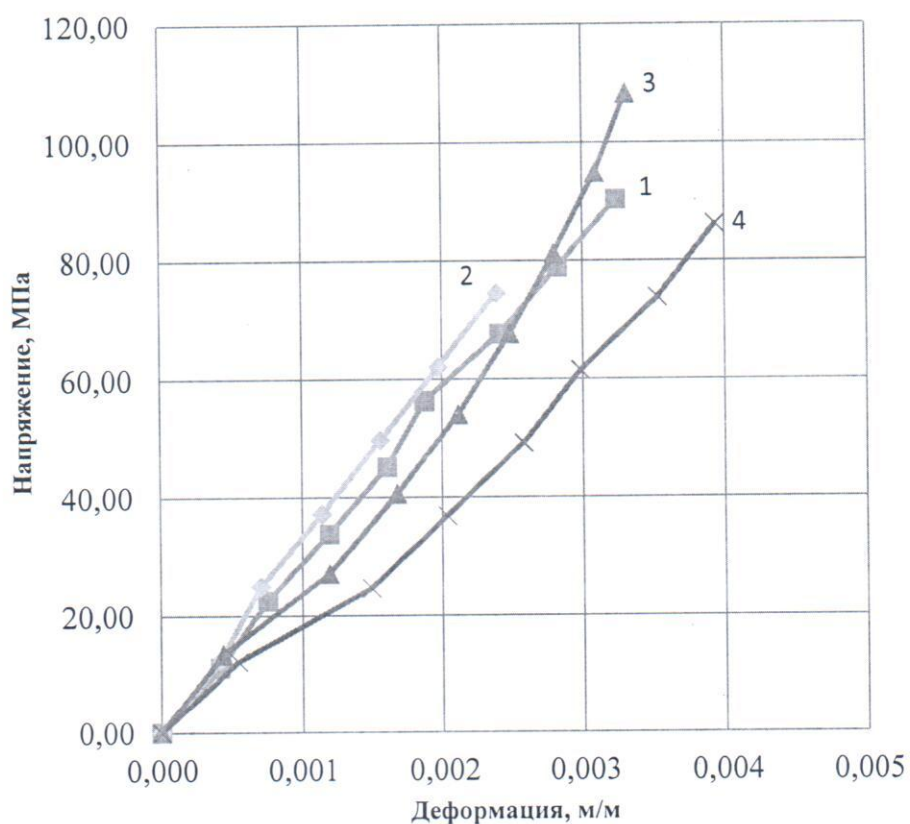


Рисунок 7 – Зависимости «напряжения-деформации», для образцов 1-4

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



### 3. Определение трансверсальных модулей упругости на сжатие в кольцевом направлении

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. Среднее значение, полученное в экспериментах, равно 26,43 ГПа (таблица 4). Проведены испытания на сжатие арок шириной  $b = 30$  мм. Схема нагружения и наклейки датчиков изображена на рис. 8. Датчики регистрируют деформации  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  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  $e$  – плечо силы  $N$ , которое определяется экспериментально. При нагружении центральное сечение получает вертикальное (рис. 7) перемещение. Таким образом, в соответствии со схемой приложения нагрузки относительно центра сечения плечо оказывается равным  $e$ :

$$e = h_0 - \frac{\delta + \delta_0}{2} + w,$$

где  $w$  – вертикальное перемещение центрального сечения арки.

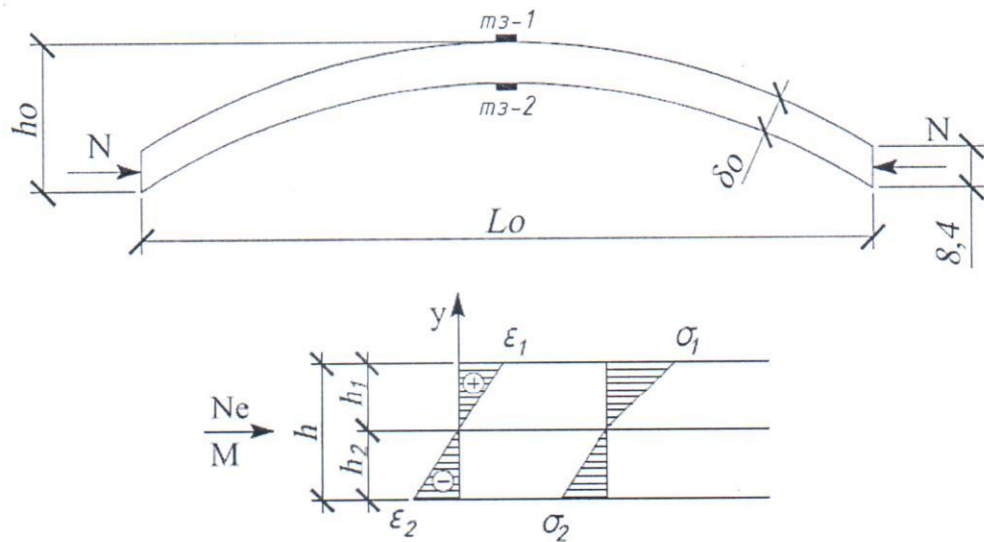


Рисунок 8 – распределение деформаций и напряжений в центральном сечении арки

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

$$\left\{ \begin{array}{l} N = b \int_{-h_2}^{h_1} \sigma(y) dy, \\ M = b \int_{-h_2}^{h_1} \sigma(y) y dy; \end{array} \right. \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} N = b \int_{-h_2}^{h_1} \sigma(y) dy, \\ M = b \int_{-h_2}^{h_1} \sigma(y) y dy; \end{array} \right. \quad (10)$$

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_1 = E_1 \cdot \varepsilon_1, \\ \sigma_2 = E_2 \cdot \varepsilon_2; \end{array} \right. \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_1 = E_1 \cdot \varepsilon_1, \\ \sigma_2 = E_2 \cdot \varepsilon_2; \end{array} \right. \quad (12)$$

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:

$$\left\{ \begin{array}{l} N = b \int_{-\varepsilon_2}^{\varepsilon_1} \frac{h_1}{\varepsilon_1} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon, \\ M = b \int_{-\varepsilon_2}^{\varepsilon_1} \left( \frac{h_1}{\varepsilon_1} \right)^2 \sigma(\varepsilon) \varepsilon d\varepsilon; \end{array} \right. \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} N = b \int_{-\varepsilon_2}^{\varepsilon_1} \frac{h_1}{\varepsilon_1} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon, \\ M = b \int_{-\varepsilon_2}^{\varepsilon_1} \left( \frac{h_1}{\varepsilon_1} \right)^2 \sigma(\varepsilon) \varepsilon d\varepsilon; \end{array} \right. \quad (15)$$

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

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

$$\left\{ \begin{array}{l} N = \frac{bh_1}{\varepsilon_1} \left[ -\frac{E_2 \varepsilon_2^2}{2} + \frac{E_1 \varepsilon_1^2}{2} \right], \\ M = b \left( \frac{h_1}{\varepsilon_1} \right)^2 \left[ -\frac{E_2 \varepsilon_2^3}{3} + \frac{E_1 \varepsilon_1^3}{3} \right]; \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} N = \frac{bh_1}{\varepsilon_1} \left[ -\frac{E_2 \varepsilon_2^2}{2} + \frac{E_1 \varepsilon_1^2}{2} \right], \\ M = b \left( \frac{h_1}{\varepsilon_1} \right)^2 \left[ -\frac{E_2 \varepsilon_2^3}{3} + \frac{E_1 \varepsilon_1^3}{3} \right]; \end{array} \right.$$

Таким образом, получим систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} N = \frac{bh_1}{2\varepsilon_1} [E_1 \varepsilon_1^2 - E_2 \varepsilon_2^2], \\ M = \frac{b}{3} \left( \frac{h_1}{\varepsilon_1} \right)^2 [E_1 \varepsilon_1^3 - E_2 \varepsilon_2^3]; \end{array} \right. \quad (16)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} N = \frac{bh_1}{2\varepsilon_1} [E_1 \varepsilon_1^2 - E_2 \varepsilon_2^2], \\ M = \frac{b}{3} \left( \frac{h_1}{\varepsilon_1} \right)^2 [E_1 \varepsilon_1^3 - E_2 \varepsilon_2^3]; \end{array} \right. \quad (17)$$



Деформации  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ , модуль упругости на растяжение  $E_1$  и прогиб арки в центральном сечении  $w$  определяются из эксперимента. Система уравнений (16), (17) относительно неизвестных  $h_1$  и  $E_2$  решается с использованием ПК MathCad 15.0. Таким образом, определяется модуль упругости на сжатие  $E_2$ .

Деформации  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  измеряются датчиками, расположенными вдоль арки. Датчики, расположенные в поперечном направлении, измеряют поперечные деформации  $\varepsilon_3$ , затем вычисляется коэффициент Пуассона как отношение продольных и поперечных деформаций.

Испытания проведены на четырех 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. Средний расчетный модуль упругости на сжатие оказался равным 12,40 ГПа, то есть более чем в два раза выше.

Таблица 5

Геометрические размеры образцов

№ Образца	$h_0$ , мм	$\delta_0$ , мм	$L_0$ , мм	$\delta$ , мм	Плечо силы, мм
1	30,2	7,2	150,6	8,4	22,4
2	30,1	6,8	150,6	8,4	22,5
3	30,2	6,8	150,5	8,4	22,6
4	30,3	6,9	150,4	8,4	22,65

Таблица 6

Деформации в образцах при различных ступенях нагружения

Образец №	№ тз	Сжимающая сила, Н.								
		0,00	400,00	800,00	1200,00	1600,00	2000,00	2400,00	2800,00	3200,00
		Изгибающий момент, Н*м.								
		0,00	9,00	18,00	27,00	36,00	45,00	54,00	63,00	72,00
1	1	0,00	-0,00129	-0,00258	-0,00362	0,00801	0,00646	-0,00775	-0,00930	-0,01033
	2	0,00	0,00103	0,00180	0,00284	0,00413	0,00516	0,00645	0,00773	0,00851
2	1	0,00	-0,00129	-0,00232	-0,00361	-0,00464	-0,00593	-0,00722	-0,00877	-0,01006
	2	0,00	0,00102	0,00205	0,00307	0,00384	0,00486	0,00614	0,00741	0,00869
3	1	0,00	-0,00129	-0,00257	-0,00386	-0,00514	-0,00643	-0,00771	-0,00951	-0,01157
	2	0,00	0,00103	0,00206	0,00309	0,00412	0,00515	0,00644	0,00799	0,00953
4	1	0,00	-	-0,00207	-0,00310	-0,00413	-0,00543	-0,00672	-0,00801	-0,00956
	2	0,00	-	0,00155	0,00258	0,00336	0,00439	0,00542	0,00671	0,00774

Результаты расчета модуля упругости на сжатие

№ Образца	$h_1$ , мм	$E_2$ , ГПа
1	4,2	12,1
2	4,3	12,5
3	4,1	12,3
4	4,6	12,0

### Заключение

Предложена экспериментально-аналитическая методика определения трансверсальных модулей упругости стеклопластика в конической оболочке опоры линий электропередач. Установлено, что трансверсальный модуль упругости на растяжение более чем в два раза превышает трансверсальный модуль упругости на сжатие.

*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.*

### Список использованных источников

1. Положение о технической политике ОАО «ФСК ЕЭС», М., 2011 г. – 199 с.
2. Основные положения (Концепция) технической политики в электроэнергетике России на период до 2030 г. «РАО ЕЭС», 2008 г. – 90 с.
3. Patent NO.: US 6,397,545 B1  
Jerome P. Fanucci, James J. Gorman, Date of Patent: Jun. 4, 2002.
4. Patent Number 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. Сопротивление полимерных и композитных материалов. / А.К. Малмейстер, В.П. Тамуж, Г.А. Тетере. – 3-е изд. – Рига: Зинатне, 1980. – 572 с.
7. Композиционные материалы: Справочник / В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др.; Под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.
8. Тарнопольский Ю.М. Конструкционная прочность и деформативности стеклопластиков / Ю.М. Тарнопольский, А.М. Скудра. - Изд-во «Зинатне», Рига. – 1966. - 260 с.
9. Чигарев А.В. ANSYS для инженеров: Справ. пособие. / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. - М.: Машиностроение-1, 2004. – 512с.



10. Трофимов Н.Н. Основы создания полимерных композитов / Н.Н. Трофимов, М.З.Канович. - М.: Наука, 1999. - 540с.

*АДИЩЕВ Владимир Васильевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: adishch@mail.ru, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

*ЗУБКОВ Александр Сергеевич, канд. техн. наук, E-mail: zas@fenix-88.ru, технический директор ООО «ЭЛЕКТРОМАШ»*

*ИВАНОВ Андрей Игоревич, аспирант; E-mail: ai722@yandex.ru, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

*МАЛЬЦЕВ Виктор Васильевич, аспирант; E-mail: malcevviktor91@yandex.ru, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

*ПАНИЧЕВ Александр Юрьевич, канд. техн. наук, доцент E-mail: panichev2008@yandex.ru, директор ООО «Сибсертификация»*

*Adishchev Vladimir Vasilievich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: adishch@mail.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia*

*Zubkov Alexandr Sergeevich, candidate of technical sciences, E-mail: zas@fenix-88.ru, Electromash, technical director.*

*Ivanov Andrey Igorevich, post-graduate student; E-mail: ai722@yandex.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia*

*Maltsev Viktor Vasilievich, post-graduate student; E-mail: malcevviktor91@yandex.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia*

*Panichev Aleksandr Yurevich, candidate of technical sciences; E-mail: panichev2008@yandex.ru, Sibsertifikaciya, director of company.*


#### REFERENCES

1. Regulation on technical policy of OJSC «FGC UES», M., 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 Number 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. Malmeyer A.K. Resistance polymeric and composite materials. / A.K. Malmeyer, V.P. Tamuzs, G.A. Teteria. - 3rd Ed. - Riga: Zinatne, 1980. - 572 p.
7. Composite Materials: A Guide / V.V. Vasiliev, V.D. Protasov, V.V. Bolotin et al. - Under the total. Ed. V.V. Vasiliev, Y.M. Tarnopolsky. - M.: Engineering, 1990. - 512 p.
8. Tarnopolsky Y.M. Structural strength and deformability fiberglass plastics / Y.M. Tarnopolsky, A.M. Skudra. - Publishing house "Zinatne", Riga. - 1966. - 260 p.

9. Chigarev A.V. ANSYS for engineers: Ref. allowance. / A.V. Chigarev, A.S. Kravchuk, A.F. Smalyuk. - М.: Engineering 1, 2004. – 512 p.
10. Trofimov N.N. Bases of creation of polymer composites / N.N. Trofimov, M.Z. Kanovich. - М.: Nauka, 1999. – 540 p.

**Авторы:**

Д-р техн. наук, проф.

В.В. Адищев 


Канд. техн. наук

А.С. Зубков 

Аспирант

А.И.Иванов 

Аспирант

В.В.Мальцев 

Канд.техн.наук, доцент

А.Ю.Паничев 