

УДК 539.3

С. М. ВЕРЕЩАКА; В. В. ДАНИЛЬЦЕВ

ПРОЧНОСТЬ БАНДАЖНОГО И МУФТОВОГО СОЕДИНЕНИЙ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ТРУБ

В работе предложена экспериментальная теоретическая методика расчета на прочность бандажных и муфтовых соединений стеклопластиковых труб. Рассмотрены три варианта бандажных соединений, имеющих конструктивные отличия. В первом классическом варианте толщина труб в месте их стыка принимается постоянной. Во втором варианте принимается соединение в ус, когда толщина трубы линейно уменьшается с внешней стороны к торцам соединяемых труб. Второй вариант бандажного соединения оказался больше рациональным, исходя из условий прочности. Уменьшая толщину стенки трубы в месте стыка и тем самым уменьшая ее жесткость, можно добиться условий оптимального перераспределения усилий в рассмотренных соединениях. Сравнение результатов расчета на прочность предложенной методики с экспериментальными данными доказывает ее эффективность. Отмечается, что разрушение муфтового соединения возможно из-за низкой предельной прочности клеевого слоя при деформациях сдвига и трансверсального отрыва. Чтобы обеспечить возможность перераспределения нагрузок между с трубой и муфтой при внутреннем давлении, нужно создать надежное сцепление и обеспечить их общее деформирование за счет повышения адгезионных свойств клеевого слоя. Эти условия можно выполнить, принимая конструктивные решения в плане изменения формы муфты и способов подготовки поверхности концов труб.

Ключевые слова: бандажное соединение, муфтовое соединение, фланцевое соединение, стеклопластиковые трубы, модифицированный критерий прочности.

Введение. Стеклопластиковые трубы на эпоксидном связующем способны выдерживать давление до 240 атм. Максимальная температура эксплуатации достигает 130°C. Стеклопластиковые трубы на основе эпоксидных смол имеют множество преимуществ. Волокно, пропитанное эпоксидной смолой, не подвержено коррозии и поэтому не требует изоляции (внутренней или внешней), химических ингибиторов, катодной и анодной защиты и защиты от коррозии. Еще одним преимуществом является увеличение срока службы насосов и другого встроенного в трубопровод оборудования из-за полного отсутствия в потоке частиц ржавчины. Низкая теплопроводность таких труб уменьшает потери тепла из системы трубопроводов, вследствие чего во многих случаях исчезает необходимость в изоляции.

Как отмечено в работе [1] большая часть случаев разрушения конструкций из композиционных материалов связана с низкой прочностью механических и адгезионных (клеевых) соединений их отдельных элементов. Трубы и соединительные детали из стеклопластика изготавливаются под стыковые соединения следующих типов: фланцевые, бугельные, бандажные или муфтовые клеевые, раструбные, резьбовые.

К наиболее распространенным видам соединений относятся:

1 Раструбно-шиповое соединение с двойным кольцевым уплотнением. Обеспечивает быструю и надежную сборку труб и фасонных элементов. Два эластичных кольцевых уплотнения круглого сечения, устанавливаемые в параллельные окружные канавки на концах труб, обеспечивают герметичность стыка в напорных и безнапорных трубопроводах;

2 Фланцевое соединение. Используется для соединения элементов стеклопластикового трубопровода с металлическими трубопроводами и арматурой. Присоединительные размеры стеклопластиковых фланцев выполняются по ГОСТ 12815-80;

3 Клеевое стыковое соединение (бандажное или муфтовое) – выполняется путем послойного нанесения на гладкие концы труб армирующих стекло материалов, пропитанных полиэфирным или эпоксидным

связующим.

Анализ эффективности различных типов соединений проводится в работах [1, 2]. К основным преимуществам адгезионных соединений по сравнению с их механическими аналогами следует отнести: меньшую концентрацию напряжений, снижение массы соединения, малая вероятность распространения трещин. Основным недостатком клеевых соединений – низкая прочность клеевого шва при деформациях сдвига и трансверсального отрыва. Подробно вопросы адгезии – механика соединений, свойства клеев и технология склеивания, рассмотрены в [3].

Ввиду отсутствия типовых методик для расчета на прочность клеевых соединений труб из стеклопластиковых материалов, решение теоретических и экспериментальных задач, которые могут возникнуть при их создании, представляется актуальной проблемой. Различные критерии прочности соединения слоев при наличии расслоений, виды и модели разрушения, а также экспериментальные методы определения сопротивления композитов расслоению рассматриваются в [4 – 8]. Структурный подход к оценке макропрочности композита состоит в определении зависимости характеристик макроразрушения композита, так называемых характерных прочностей [9], от характеристик прочности структурных элементов и параметров макроструктуры композита. При этом характеристики прочности структурного элемента определяются экспериментально или теоретически в результате расчета его совместной работы структуры и исходных элементов.

1 Модифицированный критерий прочности композита слоистой структуры с концентраторами напряжений на границе раздела слоев. Наиболее общая формулировка критерия прочности анизотропных тел имеет вид

$$\left(R_{ij}\sigma_{ij}\right)^{\alpha} + \left(R_{ijkl}\sigma_{ij}\sigma_{kl}\right)^{\beta} + \left(R_{ijklmn}\sigma_{ij}\sigma_{kl}\sigma_{mn}\right)^{\gamma} + \dots = 1, \\ i, j, k, l = 1, 2, 3, \quad (1)$$

где R_{ij} , R_{ijkl} , R_{ijklmn} – матричные обозначения тензоров поверхности прочности второго, четвертого, шестого

и последующих четных рангов.

В инженерной практике более удобным в плане практического применения оказался критерий прочности следующей тензорно-полиномиальной формы:

$$R_{ij}\sigma_{ij} + R_{ijkl}\sigma_{ij}\sigma_{kl} + R_{ijklmn}\sigma_{ij}\sigma_{kl}\sigma_{mn} + \dots = 1, \quad (2)$$

$i, j, k, l, m, n = 1, 2, 3,$

который легко получить из (1), принимая $\alpha, \beta, \gamma, \dots = 1$. Большинство известных полиномиальных критериев прочности являются, как правило, частным случаем критерия (2).

Используя критерий прочности (2) в форме

$$R_{ij}\sigma_{ij} + R_{ijkl}\sigma_{ij}\sigma_{kl} + R_{ijklmn}\sigma_{ij}\sigma_{kl}\sigma_{mn} = 1, \quad (3)$$

$i, j, k, l, m, n = 1, 2, 3,$

можно рассмотреть условия разрушения слоистого композита в целом. Предположения о независимости пути нагружения, о линейно-упругом поведении материала и об отсутствии межслоевых взаимодействий позволили уменьшить число тензоров прочности в уравнении (3) для ортотропного композита при плоском напряженном состоянии до десяти. Критерий прочности слоистого композита (3) для практического применения оказался достаточно сложным, так как предполагает проведение сложных экспериментов для нахождения коэффициентов тензоров поверхности прочности.

В большинстве случаев разрушение слоистого композита начинается с разрушения одного слоя или связей между ними. Поэтому при построении предельных поверхностей считается, что разрушение локализовано в одном слое и критерий прочности следует составлять именно для этого слоя.

Аппроксимация предельной поверхности прочности ортотропного слоя полиномом второй степени рассмотрена в [9]. Уравнение (3) приводится к виду

$$R_{ij}\sigma_{ij} + R_{ijkl}\sigma_{ij}\sigma_{kl} = 1, \quad (4)$$

$i, j, k, l, m, n = 1, 2, 3,$

где R_{ij}, R_{ijkl} – тензоры поверхности прочности слоя второго и четвертого порядков.

В случае плоского напряженного состояния уравнение (4) изображает предельную поверхность (эллипсоид) в трехмерном пространстве напряжений

$$R_{11}\sigma_{11} + R_{22}\sigma_{22} + 2R_{12}\sigma_{12} + R_{1111}\sigma_{11}^2 + R_{2222}\sigma_{22}^2 + 4R_{1212}\sigma_{12}^2 + 2R_{1122}\sigma_{11}\sigma_{22} + 4R_{1112}\sigma_{11}\sigma_{12} + 4R_{2212}\sigma_{22}\sigma_{12} = 1. \quad (5)$$

Коэффициенты уравнения (5) определяются с использованием экспериментально установленных предельных характеристик прочности $\sigma_{ij}^-, \sigma_{ij}^+$ ($i, j = 1, 2$).

Индекс «+» означает, что данная компонента – предельное напряжение при растяжении, индексом «-» обозначено предельное напряжение при сжатии. Для компонент тензоров поверхности прочности (5) в [9] предложены следующие соотношения:

$$R_{11} = \frac{\sigma_{11}^- - \sigma_{11}^+}{\sigma_{11}^- \sigma_{11}^+}; \quad R_{22} = \frac{\sigma_{22}^- - \sigma_{22}^+}{\sigma_{22}^- \sigma_{22}^+}; \quad R_{12} = \frac{\sigma_{12}^- - \sigma_{12}^+}{\sigma_{12}^- \sigma_{12}^+};$$

$$R_{1111} = \frac{1}{\sigma_{11}^- \sigma_{11}^+}; \quad R_{2222} = \frac{1}{\sigma_{22}^- \sigma_{22}^+}; \quad 4R_{1212} = \frac{1}{\sigma_{12}^- \sigma_{12}^+};$$

$$2R_{1122} = \frac{R_{11} - R_{22}}{\sigma_{12}^-} + R_{1111} + R_{2222} - \frac{1}{(\sigma_{12}^-)^2}. \quad (6)$$

В (5) – (6) тензоры прочности учитывают возможное различие характеристик прочности материала при растяжении и сжатии. Следует отметить, что прочность материала не зависит от знака предельных значений касательных напряжений: $\sigma_{ij}^- = \sigma_{ij}^+$. Для ортотропного материала в осях симметрии справедливо тождество: $R_{1112} = R_{2212} = 0$. Знание величин $-\sigma_{ij}^-, \sigma_{ij}^+$ ($i, j = 1, 2$), которые удастся определить экспериментальным путем, недостаточно для определения компонент тензоров прочности типа R_{1122} , что, в свою очередь, обуславливает необходимость в проведении тщательно планируемых экспериментов для получения и обоснования указанных эмпирических зависимостей. Большая часть методов построения предельных поверхностей основана на представлении армированного материала как набора анизотропных слоев. Поэтому изучение физико-механических свойств отдельных слоев при нагружении представляется актуальной задачей. При помощи теории слоистых сред можно перейти от усредненных напряжений и деформаций композита к локальным напряжениям и деформациям в любом слое. Следует отметить, что, исключая единичные работы, во всех подходах не учитываются напряжения и деформации поперечного сдвига $\sigma_{i3}^-, \sigma_{i3}^+$ ($i, j = 1, 2$), и трансверсального отрыва или сжатия $\sigma_{33}^-, \sigma_{33}^+$. Значительное различие предельных характеристик несущего и клеевого слоев обуславливает выбор той или иной модели дискретно-структурной теории пластин и оболочек. Становится очевидным, что расслоение следует рассматривать не как отдельный вид разрушения, а как фактор, определяющий вид дискретно-структурной модели многослойной конструкции. Таким образом, для оценки степени влияния ослабленного межфазного контакта слоев критерий (5) следует записывать в модифицированном виде

$$R_{11}\sigma_{11} + R_{22}\sigma_{22} + R_{33}\sigma_{33} + R_{1111}\sigma_{11}^2 + R_{2222}\sigma_{22}^2 + R_{3333}\sigma_{33}^2 + 4R_{1212}\sigma_{12}^2 + 4R_{1313}\sigma_{13}^2 + 4R_{2323}\sigma_{23}^2 + 2R_{1122}\sigma_{11}\sigma_{22} + 2R_{1133}\sigma_{11}\sigma_{33} + 2R_{2233}\sigma_{22}\sigma_{33} = 1, \quad (7)$$

где к тензорам поверхности прочности (6) следует по аналогии добавить дополнительные компоненты:

$$R_{33} = \frac{\sigma_{33}^- - \sigma_{33}^+}{\sigma_{33}^- \sigma_{33}^+}; \quad R_{3333} = \frac{1}{\sigma_{33}^- \sigma_{33}^+};$$

$$4R_{1313} = \frac{1}{\sigma_{13}^- \sigma_{13}^+}; \quad 4R_{2323} = \frac{1}{\sigma_{23}^- \sigma_{23}^+};$$

$$2R_{1133} = \frac{R_{11} - R_{33}}{\sigma_{13}^-} + R_{1111} + R_{3333} - \frac{1}{(\sigma_{13}^-)^2};$$

$$2R_{2233} = \frac{R_{22} - R_{33}}{\sigma_{23}^-} + R_{2222} + R_{3333} - \frac{1}{(\sigma_{23}^-)^2}. \quad (8)$$

При этом считается, что межслойная прочность материала на сдвиг не зависит от знака поперечных касательных напряжений, то есть $\sigma_{13}^- = \sigma_{13}^+$; $\sigma_{23}^- = \sigma_{23}^+$.

Для использования модифицированного критерия

рия (7), (8) необходимо экспериментально определить предельные характеристики слоя на поперечный сдвиг и трансверсальное сжатие или отрыв.

2 Расчет на прочность бандажного соединения.

На рис. 1 показан общий вид бандажного соединения стеклопластиковых труб ($L = 240$ мм; $L_1 = 140$ мм; $D = 113$ мм). Механические характеристики труб представлены в табл. 1, бандажа – в табл. 3. Здесь рассматривается 2 варианта бандажного соединения. В первом классическом варианте толщина труб в месте их стыка принимается постоянной. Во втором варианте принимается соединение в ус (рис. 1), когда толщина трубы линейно уменьшается с наружной стороны к торцам соединяемых труб.

Стеклопластиковая труба включает 16 однонаправленных армированных слоев с заданной схемой укладки: $[0_4^- / -75^\circ / 0_2^- / -75^\circ / 75^\circ / 0_2^+ / -75^\circ / 0_4^+]$. Мо-

дули упругости – E_6 , G_6 , коэффициент Пуассона ν_6 , алюмоборосиликатных лент, набранных из ровинга E-600 (изготовлено в КНР), соответственно равны $E_6 = 55000$ МПа, $G_6 = 22000$ МПа, $\nu_6 = 0,25$. Матрица стеклопластика – эпоксидный полимер со следующими параметрами упругости: $E_m = 3550$ МПа, $G_m = 1270$ МПа, $\nu_m = 0,4$. В каждом монослое толщиной 0,25 мм объем, занимаемый лентами, составляет 70 % общего объема.

Стеклопластиковая труба изготавливалась методом намотки на разборную цилиндрическую оправку. Связующая композиция включала 100 массовых частей (мас.ч.) эпоксидной смолы Epicot 828, предварительно прогретой до температуры 70 °С. В приготовленный объем эпоксидной смолы добавляли 2 мас.ч. ускорителя УП-606/2 и 80 мас. ч. отвердителя МТНРА (изготовлено в КНР).

Таблица 1 – Экспериментально-теоретические значения упругих характеристик стеклопластиковой трубы

№ тип-размера	Результаты эксперимента		Экспериментально – теоретические значения			
	E_r^{\ominus} , МПа	S , %	E_{ij} , МПа	G_{ij} , МПа	ν_{ij}	ν_{ji}
1	$E_{\theta}^{\ominus} = 36050$	0,91	$E_z = 23800$ $E_{\theta} = 35500$	$G_{\theta z} = 7340$ $G_{rz} = 4870$	$\nu_{z\theta} = 0,069$ $\nu_{zr} = 0,399$	$\nu_{\theta z} = 0,107$ $\nu_{rz} = 0,415$
2	$E_r^{\ominus} = 24100$	0,92	$E_r = 22900$	$G_{r\theta} = 6760$	$\nu_{\theta r} = 0,406$	$\nu_{r\theta} = 0,272$

Примечание: E_z , E_{θ} , E_r – модули упругости 1-го рода в продольном, окружном и радиальном направлениях;

$G_{\theta z}$, G_{rz} , $G_{r\theta}$ – модули сдвига; $\nu_{z\theta} = \nu_{\theta z}$, $\nu_{\theta r} = \nu_{r\theta}$, $\nu_{rz} = \nu_{zr}$ – коэффициенты Пуассона.

Таблица 2 – Экспериментальные значения предельных напряжений стеклопластиков

σ_{θ}^+ , МПа	$\pm a_{\sigma_{cp}}$, МПа	σ_z^+ , МПа	$\pm a_{\sigma_{cp}}$, МПа	σ_{θ}^- , МПа	$\pm a_{\sigma_{cp}}$, МПа	σ_z^+ , МПа	$\pm a_{\sigma_{cp}}$, МПа
410	5	240	6	360	7	190	5

Таблица 3 – Физико-механические характеристики бандажа

Схема армирования	E_{ii} , МПа	G_{ii} , МПа	ν_{ij}	ν_{ji}
$[(0^\circ/90^\circ)_6]_S$	$E_z = 20260$	$G_{\theta z} = 4254$	$\nu_{z\theta} = 0,15$	$\nu_{\theta z} = 0,15$
	$E_{\theta} = 20260$	$G_{rz} = 2947$	$\nu_{zr} = 0,39$	$\nu_{rz} = 0,16$
	$E_r = 9989$	$G_{r\theta} = 2947$	$\nu_{\theta r} = 0,39$	$\nu_{r\theta} = 0,16$

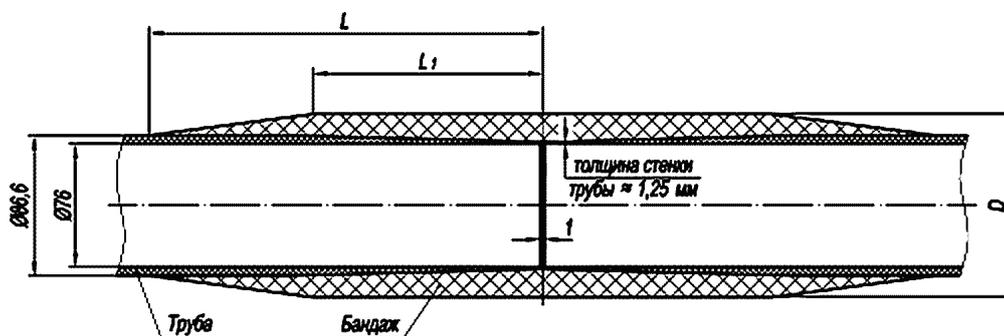


Рисунок 1 – Схема бандажного соединения стеклопластиковых труб

Остальные экспериментально-теоретические значения механические характеристика стеклопластика (табл. 2) определялись интегрально для всего пакета слоев по методике работы [10]. Для определения предельных напряжений образцы каждой серии доводили

до разрушения при испытании на растяжение (ГОСТ 25.601 – 80), сжатие (ГОСТ 25.602 – 80). Считая, что определенные значения предельных напряжений представляют собой нормально распределенную генеральную совокупность параметров, в табл. 2 приведе-

ны доверительные интервалы среднего значения предельных напряжений $\pm a_{\sigma_{cp}}$ при доверительной вероятности $1 - \alpha = 0,95$.

Как отмечается в работах [11] разброс экспериментальных значений предельных разрушающих напряжений поперечного сдвига и обжатия достаточно большой, что в первую очередь связано с особенностью строения армированных пластиков, трудоемкостью и сложностью проведения эксперимента. Поэтому для проведения дальнейших исследований были приняты средние значения предельных напряжений:

$$\sigma_{33}^- = 90 \text{ МПа}; \quad \sigma_{33}^+ = 16 \text{ МПа};$$

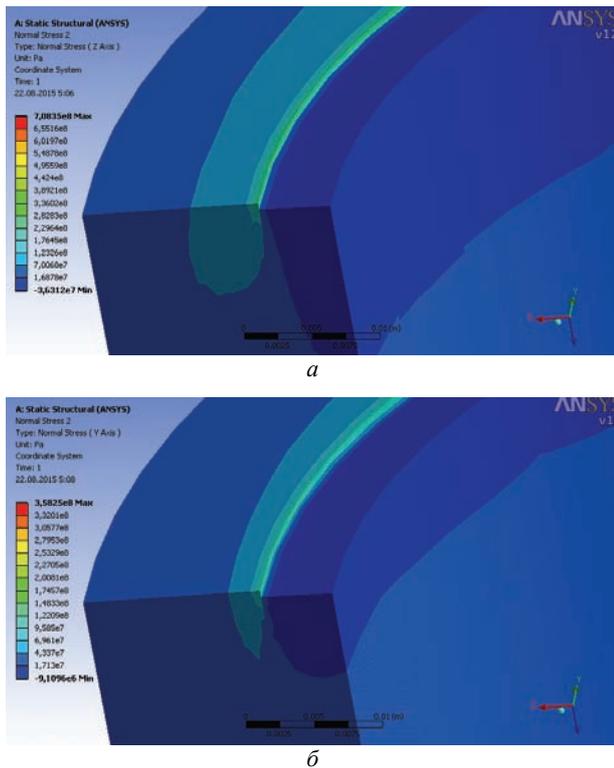
$$\sigma_{13}^- = \sigma_{13}^+ = \sigma_{23}^- = \sigma_{23}^+ = 30 \text{ МПа}; \quad \sigma_{12}^- = \sigma_{12}^+ = 50 \text{ МПа}.$$


Рисунок 2 – Распределение нормальных напряжений: *a* – тангенциальных – σ_{θ} ; *б* – осевых – σ_z

Расчет и анализ напряженно-деформированного состояния исследуемых соединений проводится на основе результатов решения осесимметричной задачи теории упругости для неоднородного тела в пакете ANSYS. При этом деформирование как бандажного, так и муфтового соединений сопровождается значительными деформациями изгиба. Исследование сходимости решения показало, что для прочностного расчета данных соединений достаточно использовать сетку с характерным размером элемента 0,075 – 0,1 толщины слоя. Наиболее опасными, определяющими начало расслоения конструкции, являются межслойные напряжения поперечного сдвига и трансверсального отрыва. Максимальные значения этих напряжений возникают в зоне контакта торцов соединяемых труб и бандажа. Поэтому для повышения прочности бандажных соединений, в первую очередь, необходимо увеличивать межслойную прочность стеклопласти-

ка на отрыв.

Пусть стеклопластиковая труба нагружена внутренним давлением 17 МПа. Напряженное состояние 1 варианта бандажного соединения представлено на рис. 2–4.

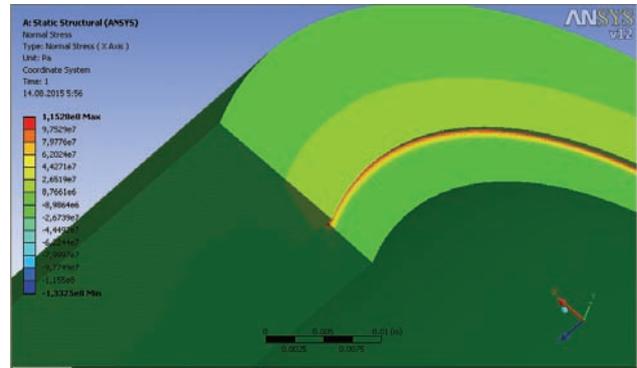


Рисунок 3 – Распределение трансверсальных (радиальных) напряжений σ_r .

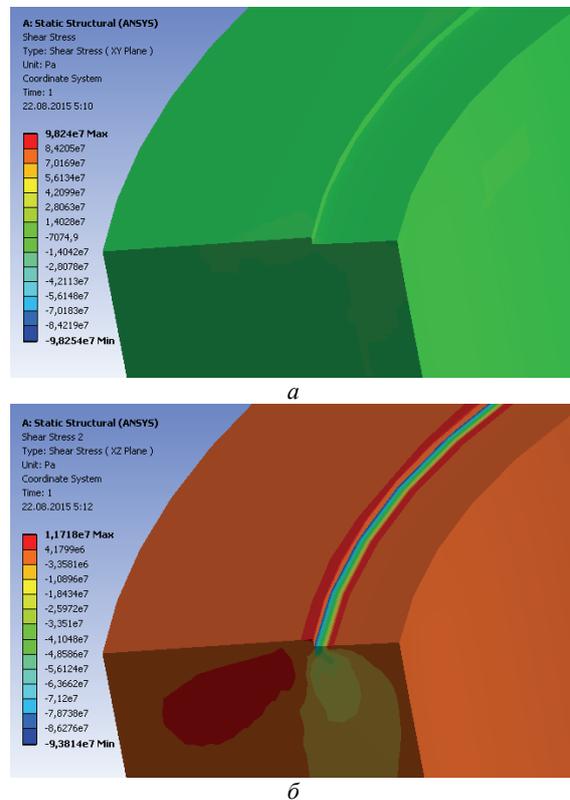


Рисунок 4 – Распределение касательных напряжений поперечного сдвига: *a* – $\tau_{r\theta}$; *б* – τ_{rz}

Напряженное состояние 2 варианта бандажного соединения представлено на рис. 5 – 7.

Анализ результатов, проведенного численного эксперимента, позволяет отметить следующее. При применении второго варианта нормальные радиальные напряжения в зоне соединения труб примерно равны $\sigma_r = 21$ МПа, для первого классического варианта бандажного соединения значение этих напряжений составляет $\sigma_r = 86$ МПа. Так же уменьшается величина нормальных осевых напряжений в центре бандажа с $\sigma_z = 123$ МПа (1 вариант) до $\sigma_z = 68$ МПа (2 вариант). При этом в стеклопластиковой трубе эти на-

пряжения увеличиваются с $\sigma_z = 75$ МПа (1 вариант) до $\sigma_z = 90$ МПа (2 вариант). Такая же картина имеет место и для нормальных окружных напряжений с $\sigma_\theta = 174$ МПа (1 вариант) до $\sigma_\theta = 105$ МПа (2 вариант) в бандаже и с $\sigma_\theta = 50$ МПа (1 вариант) до $\sigma_\theta = 70$ МПа (2 вариант) в трубе. Следует также отметить уменьшение касательных напряжений с $\tau_{rz} = 20$ МПа (1 вариант) до $\tau_{rz} = 12$ МПа (2 вариант) в опасной зоне.

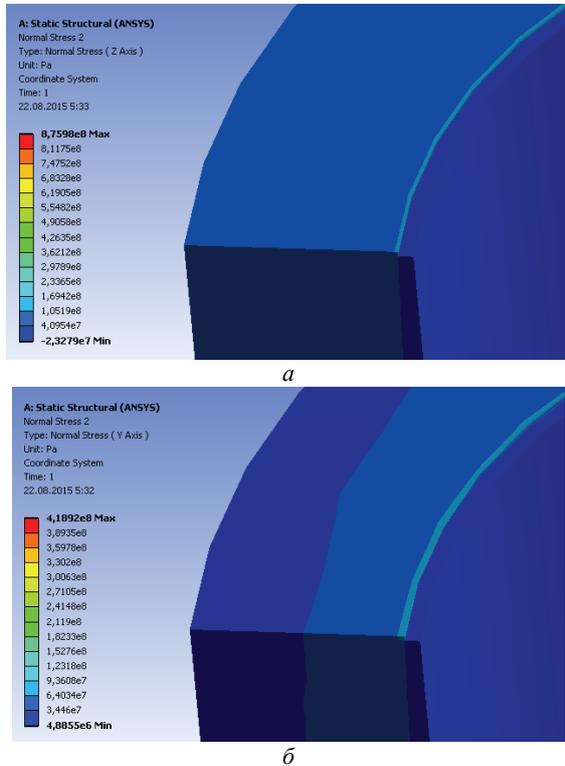


Рисунок 5 – Распределение нормальных напряжений: *a* – тангенциальных – σ_θ ; *б* – осевых – σ_z

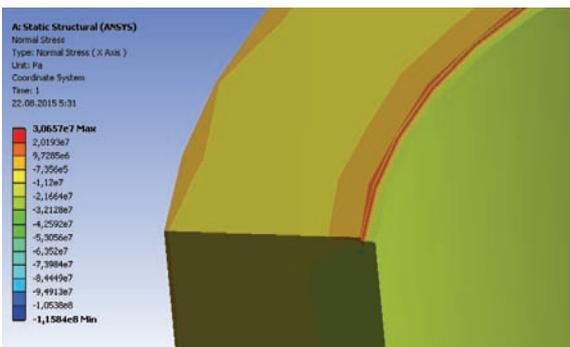


Рисунок 6 – Распределение радиальных напряжений σ_r

Для расчета на прочность принимаются максимальные напряжения второго варианта бандажного соединения, которые возникают в точках поверхности контакта труба – бандаж (клеевая прослойка) в месте соединения труб:

$$\sigma_z = 64 \text{ МПа}; \quad \sigma_\theta = 105 \text{ МПа}; \quad \sigma_r = 20 \text{ МПа};$$

$$\tau_{rz} = 11 \text{ МПа}; \quad \tau_{r\theta} = 12 \text{ МПа}; \quad \tau_{z\theta} = 1 \text{ МПа}.$$

Для оценки несущей способности рассматриваемой стеклопластиковой оболочки можно использовать модифицированный критерий прочности (7), который включает трансверсальные напряжения и учитывает

влияния ослабленного межфазного контакта слоев. Следует отметить, что при переходе к цилиндрической системе координат выполняются тождества:

$$\sigma_{11} = \sigma_z; \quad \sigma_{22} = \sigma_\theta; \quad \sigma_{33} = \sigma_r;$$

$$\tau_{31} = \tau_{rz}; \quad \tau_{21} = \tau_{r\theta}; \quad \tau_{32} = \tau_{r\theta}.$$

Для оценки несущей способности рассмотренных соединений экспериментально определялись следующие значения пределов прочности бандажа из стеклопластика:

$$\sigma_{11}^+ = \sigma_{22}^+ = 200 \text{ МПа}; \quad \sigma_{11}^- = \sigma_{22}^- = -180 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{33}^- = -90 \text{ МПа}; \quad \sigma_{33}^+ = 60 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{12}^- = \sigma_{12}^+ = 50 \text{ МПа}; \quad \sigma_{13}^- = \sigma_{13}^+ = \sigma_{23}^- = \sigma_{23}^+ = 24 \text{ МПа}.$$

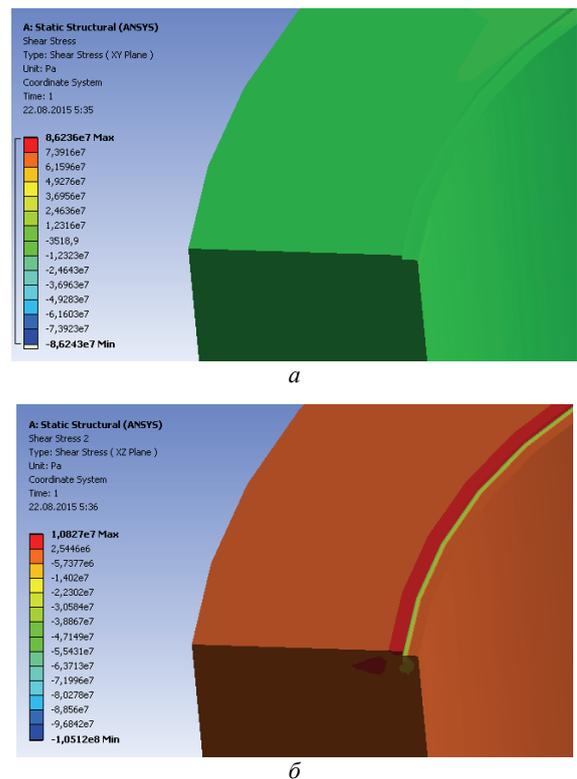


Рисунок 7 – Распределение касательных напряжений поперечного сдвига: *a* – $\tau_{r\theta}$; *б* – τ_{rz}

Пределы прочности трубы из стеклопластика представлены в табл. 2. Значения коэффициентов критерия прочности (6), (8) представлены в табл. 4.

Анализируя коэффициенты табл. 4, следует отметить, что наиболее опасным видом разрушения являются деформации поперечного сдвига и трансверсального отрыва. Теоретическое значение разрушающего гидростатического давления $q_T = 17,35$ МПа, что несколько выше экспериментально полученного разрушающего давления $q_{\text{с}}^* = 17,0$ МПа. Экспериментальные исследования проводились на предприятии ООО «Стеклопластиковые трубы» г. Харьков. Соединяемые трубы помещались в экспериментальный стенд, где торцы жестко закреплялись специальными захватами. Для создания в трубе внутреннего давления в нее закачивается вода при помощи плунжерного насоса. Параметры нагружения контролировали высокоточным манометром.

3. Расчет на прочность муфтового соединения. На рис. 8 приведена схема и размеры муфтового соединения стеклопластиковых труб ($L = 240$ мм, $L_1 = 140$ мм, $D = 113$ мм). Механические характеристики трубы и муфты одинаковые и приведены в табл. 1. Здесь d – внутренний диаметр трубы, δ_T – толщина стенки трубы, δ_T^{TP} – толщина стенки торца

трубы, C – длина проточки под клеевой шов, d – внутренний диаметр муфты, δ_M – толщина стенки муфты, δ_M^{TP} – толщина стенки торца муфты, $\delta_M^B = \delta_M^B$, δ_M^B – толщина выточки муфты. Геометрические размеры муфтового соединения, внутреннее расчетное давление q , площадь клеевого соединения $S_{кл}$ представлены в виде табл. 5.

Таблица 4 – Значения тензоров поверхности прочности стеклопластика

$R_{11},$ 1/МПа	$R_{22},$ 1/МПа	$R_{33},$ 1/МПа	$R_{1111},$ 1/(МПа) ²	$R_{2222},$ 1/(МПа) ²	$R_{3333},$ 1/(МПа) ²	$R_{1212},$ 1/(МПа) ²	$R_{1313},$ 1/(МПа) ²	$R_{2323},$ 1/(МПа) ²
$-5,6 \cdot 10^{-4}$	$-5,6 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^{-3}$	$2,78 \cdot 10^{-4}$	$2,78 \cdot 10^{-4}$	$1,85 \cdot 10^{-4}$	$0,4 \cdot 10^{-3}$	$0,17 \cdot 10^{-2}$	$0,17 \cdot 10^{-2}$

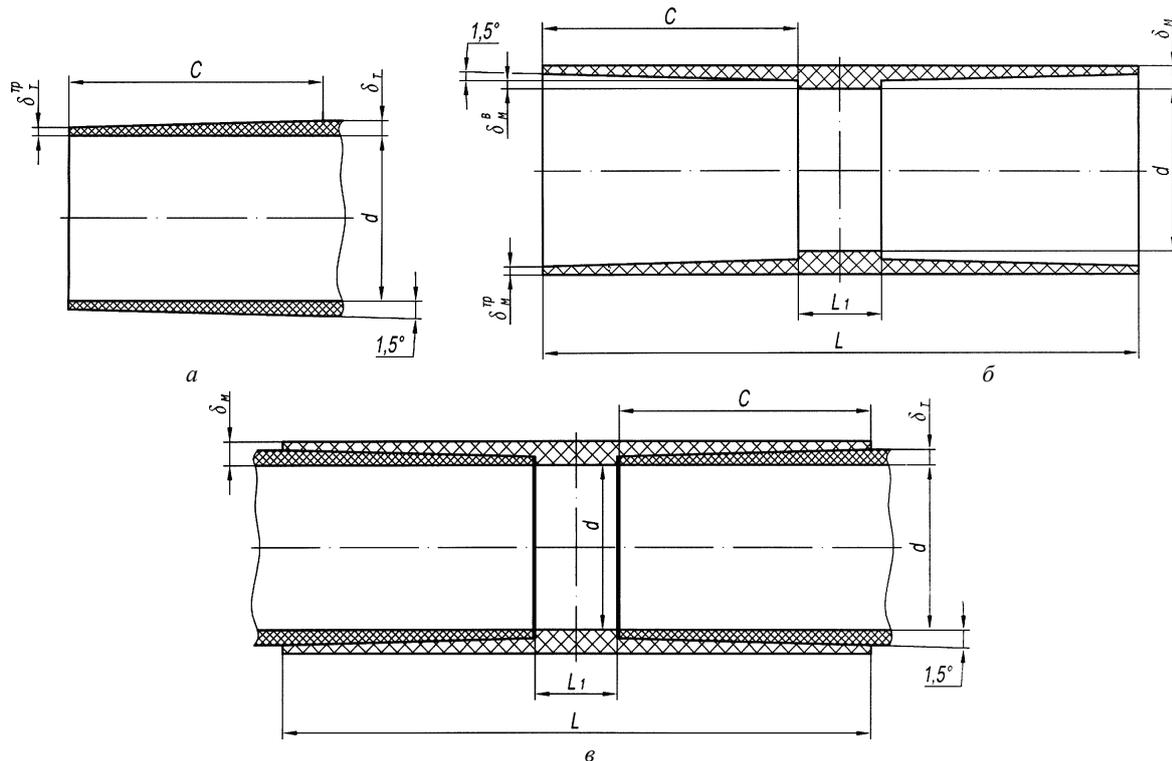


Рисунок 8 – Схема муфтового соединения стеклопластиковых труб: а – муфта; б – труба; в – собранное соединение

Таблица 5 – Параметры муфтового соединения

№ п/п	Труба							
	q , МПа	d , мм	δ_T , мм	Масса* 1 п/м, кг	δ_T^{TP} , мм	α , гр.	C_1 , мм	C , мм
1	8	76	8,5	4,287	4,832	1,5	140,12	140,08
№ п/п	Муфта							
	d , мм	δ_M , мм	δ_M^{TP} , мм	L_1 , мм	L , мм	Масса* заготовки, кг	$S_{кл}$, см ²	
1	83	11,04	6,37	5	285,15	1,767	393,25	

Масса* – расчетная масса при плотности $\gamma = 1,9 \text{ г/см}^3$.

Таблица 6 – Значения тензоров поверхности прочности стеклопластика

$R_{11},$ 1/МПа	$R_{22},$ 1/МПа	$R_{33},$ 1/МПа	$R_{1111},$ 1/(МПа) ²	$R_{2222},$ 1/(МПа) ²	$R_{3333},$ 1/(МПа) ²	$R_{1212},$ 1/(МПа) ²	$R_{1313},$ 1/(МПа) ²	$R_{2323},$ 1/(МПа) ²
$-1,1 \cdot 10^{-3}$	$-1,1 \cdot 10^{-3}$	$5,6 \cdot 10^{-3}$	$5,6 \cdot 10^{-4}$	$6,8 \cdot 10^{-6}$	$1,85 \cdot 10^{-4}$	$0,4 \cdot 10^{-3}$	$0,17 \cdot 10^{-2}$	$0,17 \cdot 10^{-2}$

Труба с муфтовым соединением нагружена внутренним давлением $q = 8$ МПа. Напряженное состояние муфты представлены на рис. 9 – 10. Для численного решения рассматриваемой задачи в системе ANSYS была построена осесимметричная геометри-

ческая модель фланца с учетом заданной схемы армирования и анизотропии слоев. Дискретизация модели проводилась с использованием четырехугольных восьмиузловых конечных элементов PLANE183. Размер конечных элементов выбирался на основе иссле-

дований сходимости получаемого решения.

Максимальные напряжения в муфте рассматриваемого соединения возникают в точках внутренней поверхности на расстоянии C от торцов соединяемых труб:

$$\begin{aligned}\sigma_z &= 17 \text{ МПа}; \quad \sigma_\theta = 29 \text{ МПа}; \quad \sigma_r = 8,6 \text{ МПа}; \\ \tau_{rz} &= 12 \text{ МПа}; \quad \tau_{r\theta} = 1,8 \text{ МПа}; \quad \tau_{z\theta} = 2,1 \text{ МПа}.\end{aligned}$$

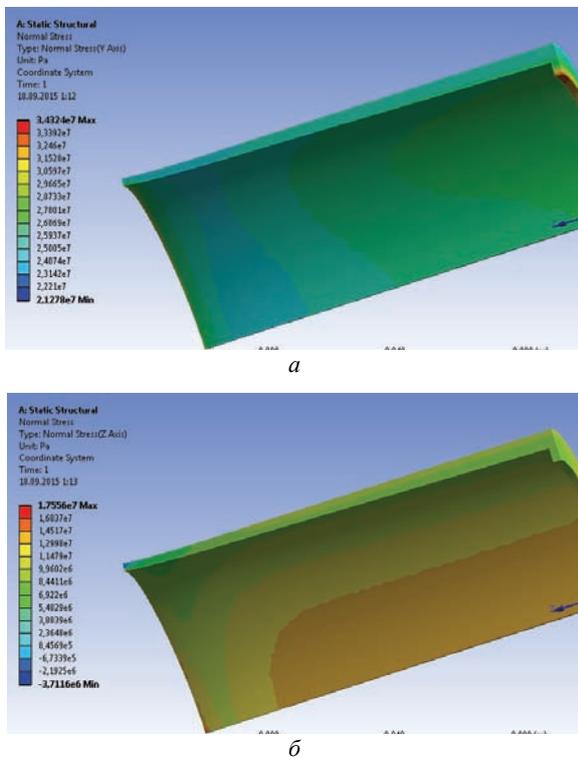


Рисунок 9 – Распределение нормальных напряжений: a – тангенциальных – σ_θ ; b – осевых – σ_z

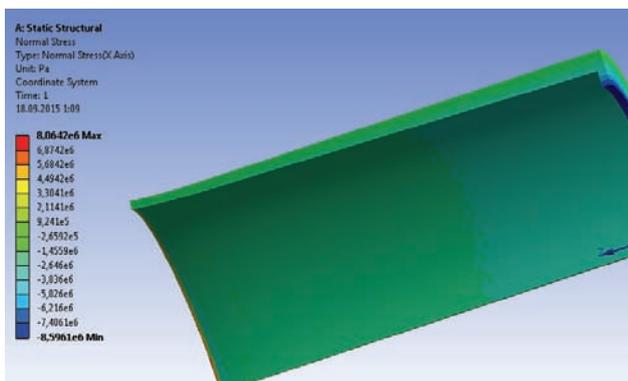


Рисунок 10 – Распределение радиальных напряжений σ_r .

Принимая во внимание технологию изготовления муфтового клевого соединения, когда на подготовленные торцы труб на эпоксидном клею крепится муфта, основным фактором определяющим прочность такого соединения становятся адгезионные свойства клевого шва. Поэтому предельные значения нормальных напряжений стеклопластиковой муфты принимались по табл. 6, а предельные напряжения поперечного сдвига и трансверсального отрыва согласно данным работы [2]:

$$\sigma_{11}^+ = 240 \text{ МПа}; \quad \sigma_{22}^+ = 410 \text{ МПа}; \quad \sigma_{11}^- = -190 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{22}^- = -360 \text{ МПа}; \quad \sigma_{33}^- = -90 \text{ МПа}; \quad \sigma_{33}^+ = 60 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{12}^- = \sigma_{12}^+ = 50 \text{ МПа}; \quad \sigma_{13}^- = \sigma_{13}^+ = \sigma_{23}^- = \sigma_{23}^+ = 14 \text{ МПа};$$

Значения коэффициентов критерия прочности (2.6), (2.8) представлены в табл. 6.

Анализируя коэффициенты табл. 5, следует отметить, что наиболее опасным видом разрушения являются деформации поперечного сдвига и трансверсального отрыва. Уже при значении предела прочности напряжений при деформациях поперечного сдвига $\sigma_{13}^- = \sigma_{13}^+ = \sigma_{23}^- = \sigma_{23}^+ = 12,5$ МПа происходит разрушение клевого слоя муфта-труба.

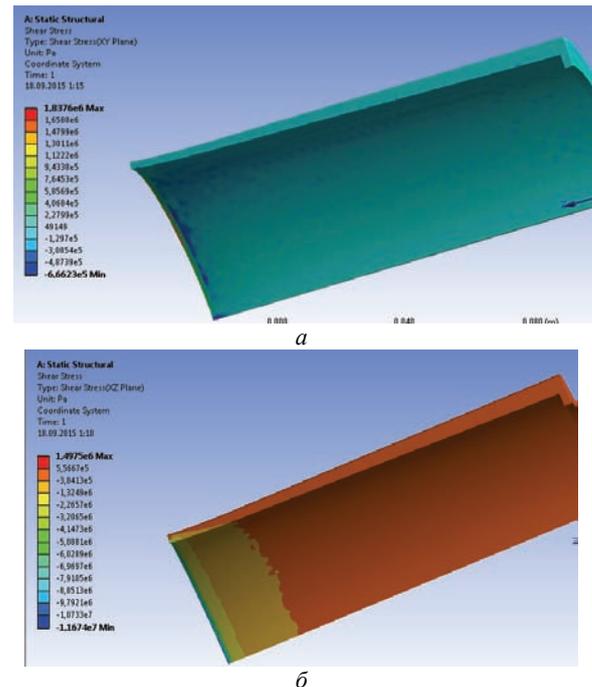


Рисунок 11 – Распределение касательных напряжений поперечного сдвига: a – $\tau_{r\theta}$; b – τ_{rz}

Выводы. В работе предложена экспериментально-теоретическая методика расчета на прочность бандажных и муфтовых соединений стеклопластиковых труб. Рассмотрены три варианта бандажных соединений, которые имеют конструктивные отличия. В первом классическом варианте толщина труб в месте их стыка принимается постоянной. Во втором варианте принимается соединение в ус, когда толщина трубы линейно уменьшается с наружной стороны к торцам соединяемых труб. Второй вариант бандажного соединения оказался более рациональным, исходя из условий прочности. Уменьшая толщину стенки трубы в месте стыка и тем самым уменьшая ее жесткость, можно добиться условий оптимального перераспределения усилий в рассматриваемых соединениях.

Сравнение результатов расчета на прочность по предложенной методике с экспериментальными данными доказывает ее эффективность. Отмечается, что разрушение муфтового соединения возможно из-за низкой предельной прочности клевого слоя при деформациях сдвига и трансверсального отрыва. Чтобы обеспечить возможность перераспределения нагрузок

между соединяемыми трубами и муфтой при внутреннем давлении, нужно создать надежное сцепление обеспечить их совместное деформирование за счет повышения адгезионных свойств клевого слоя. Эти условия можно выполнить, принимая конструктивные решения в плане изменения формы муфты и способов подготовки поверхности концов соединяемых труб.

Список литературы: 1. Карпов Я.С. Соединение деталей и агрегатов из композиционных материалов / Я.С. Карпов. – Х.: Национальный аэрокосмический университет «ХАИ», 2006. – 359 с. 2. Справочник по композитным материалам: В 2-х кн. Кн. 2. / Под ред. Дж. Любина, Б. Э. Геллера. – М.: Машиностроение, 1988. – 448 с. 3. Поцус А.В. Клей, адгезия, технология склеивания / Пер. с англ. Под ред. Г.В. Комарова. – СПб: Профессия, 2007. – 376 с. 4. Васильев В. В. Механика конструкций из композиционных материалов / В. В. Васильев. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с. 5. Захаров В.В. Влияние трения на процесс расслоения разнородных материалов / В. В. Захаров, Л. В. Никитин // Механика композитных материалов. – 1983. – № 1. – С. 20–25. 6. Кобелев В. Н. Расчет трехслойных конструкций / В. Н. Кобелев, Л. М. Коварский, С. И. Тимофеев. – М.: Машиностроение, 1984. – 304 с. 7. Кристенсен Р. Введение в механику композитов / Р. Кристенсен. – М.: Мир, 1982. – 334 с. 8. Серенсен С. В. Несущая способность тонкостенных конструкций из армированных пластиков с дефектами / С.В. Серенсен, Г. П. Зайцев. – К.: Наукова думка, 1982. – 295 с. 9. Малмейстер А. К. Сопротивление полимерных и композитных материалов / А. К. Малмейстер, В. П. Тамуж, Г. А. Тетерс. – Рига: Зинатне, 1980. – 572 с. 10. Верещака С.М. Нелинейное деформирование и устойчивость многослойных элементов конструкций с дефектами

структуры / С.М. Верещака. – Сумы: Изд-во СумГУ, 2009. – 286 с. 11. Композиционные материалы: Справочник // В.В.Васильев, Ю.М.Тарнопольский. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.

Bibliography (transliterated): 1. Karpov Ya.S. Soedinenie detalej i agregatov iz kompozicionnyh materialov. Ya.S. Karpov. Kharkiv: Nacional'nyj aerokosmicheskij universitet "KhAI", 2006. 359. Print. 2. Spravochnik po kompozitnym materialam: V 2-h kn. Kн. 2. Pod red. Dzh. Lyubina, B. E. Gellera. Moscow: Mashinostroenie, 1988. 448. Print. 3. Pocius A.V. Klei, adgeziya, tehnologiya skleivaniya. Per. s angl. Pod red. G.V. Komarova. Sankt-Peterburg: Professiya, 2007. 376. Print. 4. Vasil'ev V. V. Mehanika konstrukcij iz kompozicionnyh materialov. V. V. Vasil'ev. Moscow: Mashinostroenie, 1988. 272. Print. 5. Zaharov V.V. Vliyanie treniya na process rassloeniya raznorodnyh materialov. V. V. Zaharov, L. V. Nikitin. Mehanika kompozitnyh materialov. 1983. No 1. 20–25. Print. 6. Kobelev V. N. Raschet trehslojnyh konstrukcij. V. N. Kobelev, L. M. Kovarskij, S. I. Timofeev. Moscow: Mashinostroenie, 1984. 304. Print. 7. Kristensen R. Vvedenie v mehaniku kompozitov / R. Kristensen. Moscow: Mir, 1982. 334. Print. 8. Serensen S. V. Nesuschaya sposobnost' tonkostennyh konstrukcij iz armirovannyh plastikov s defektami. S.V. Serensen, G. P. Zajcev. Kyiv: Naukova dumka, 1982. 295. Print. 9. Malmejster A. K. Soprotivlenie polimernyh i kompozitnyh materialov. A. K. Malmejster, V. P. Tamuzh, G. A. Teters. Riga: Zinatne, 1980. 572. Print. 10. Vereschaka S.M. Nelinejnoe deformirovanie i ustojchivost' mnogoslajnyh elementov konstrukcij s defektami struktury. S.M. Vereschaka. Sumy: Izd-vo SumGU, 2009. 286. Print. 11. Kompozicionnye materialy: Spravochnik. V.V.Vasil'ev, Yu.M.Tarnopol'skij. Moscow: Mashinostroenie, 1990. 512. Print.

Поступила (received) 25.03. 2015.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Верещака Сергей Михайлович – профессор кафедри опору матеріалів і машинобудівництва Сумського державного університету, доктор технічних наук, e-mail: vereshakasergey@mail.ru

Vereshchaka Sergei Mikhailovitch – Professor of the Department of Mechanical Engineering and Material Strength of Sumy State University, Doctor of Technical Sciences, e-mail: vereshakasergey@mail.ru

Данильцев Виктор Владимирович – директор ООО «Стеклопластиковые трубы», e-mail: tsp2109@gmail.com

Daniltsev Viktor Vladimirovitch – Director of "Fibergalsspipes" LTD, e-mail: tsp2109@gmail.com