

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2023, Том 10, № 3 / 2023, Vol. 10, Iss. 3 <https://t-s.today/issue-3-2023.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/13SATS323.pdf>

DOI: 10.15862/13SATS323 (<https://doi.org/10.15862/13SATS323>)

2.1.9. Строительная механика (технические науки)

Анализ напряженно-деформированного состояния клеевого соединения полимерного изолятора контактной сети железных дорог с металлическим оконцевателем при кручении

Жаринов М.Ю., Марасанов А.И.

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Марасанов Александр Игоревич, e-mail: marasanovai@yandex.ru

Аннотация. На основе рассмотрения упрощенной модели представлено аналитическое решение задачи об оценке напряженно-деформированного состояния клеевого соединения полимерного изолятора контактной сети железных дорог с металлическим оконцевателем при кручении. Полимерный изолятор выполнен из однонаправленного стеклопластика на основе эпоксидной смолы при соотношении связующего и заполнителя 0,3:0,7. Решение получено на основе рассмотрения условий равновесия бесконечно малого элемента клеевого соединения. Исследовано влияние на изменение напряженно-деформированного состояния клеевого соединения таких параметров как толщина слоя клея, длина клеевого соединения, а также модуль сдвига металлического оконцевателя. Показано, что наибольшие касательные напряжения в клеевом слое возникают в месте входа стеклопластикового стержня в стальной оконцеватель, причем длина зоны относительно больших касательных напряжений в клеевом слое является малой величиной по сравнению с длиной клеевого соединения. При исследовании влияния толщины слоя клея на

наибольшие касательные напряжения в клеевом слое получено, что при принятых параметрах клеевого соединения увеличение толщины клеевого слоя в десять раз приводит к уменьшению наибольших касательных напряжений в клеевом слое примерно в три раза. Увеличение же длины клеевого соединения при прочих равных условиях оказывает малозаметное влияние на наибольшие касательные напряжения в клеевом слое. К такому же выводу можно прийти при варьировании величиной модуля сдвига металлического оконцевателя. Так, замена стального оконцевателя на медный или алюминиевый оконцеватель практически не меняет значения наибольших касательных напряжений в клеевом слое.

Ключевые слова: стеклопластиковый стержень; металлический оконцеватель; толщина слоя клея; длина клеевого соединения; наибольшие касательные напряжения в клеевом слое; модуль сдвига; сдвиговая деформация; крутящий момент; контактная сеть железных дорог; напряженно-деформированное состояние в клеевом соединении

Stress-strain state analysis of the polymer insulator adhesive bonding of a railway overhead system with a metal insulation displacement contact under torsion

Mikhail Yu. Zharinov, Alexander I. Marasanov

Russian University of Transport, Moscow, Russia

Corresponding author: Alexander I. Marasanov, e-mail: marasanovai@yandex.ru

Abstract. Based on consideration of a simplified model, an analytical solution to the problem of adhesive bonding stress-strain state estimation of a polymer insulator of the railway overhead system with a metal insulation displacement contact under torsion is presented. The polymer insulator is made of unidirectional epoxy resin-based fibreglass with the ratio of binder and filler 0.3:0.7. The solution is obtained by considering the adhesive bonding incremental element equilibrium. The influence of such parameters as the thickness of the adhesive layer, the adhesive bonding length, and the modulator of shearing of the metal insulation displacement contact on the adhesive bonding stress-strain state change has been investigated. It is shown that the greatest tangential stresses in the adhesive layer occur at the point of entry of the fibreglass rod into the steel termination, and the length of the zone of relatively large tangential stresses in the adhesive layer is a small value compared to the length of the adhesive bonding. During the research of influence of glue layer

thickness on the greatest tangential stresses in a glue layer it is received, that at accepted parameters of a glue bonding increase of thickness of a glue layer in ten times leads to reduction of the greatest tangential stresses in a glue layer approximately in three times. An increase in the length of the adhesive bonding, all other things being equal, has little noticeable effect on the greatest tangential stresses in the adhesive layer. The same conclusion can be reached by varying the shear modulus of the metal termination. Thus, replacement of steel insulation displacement contact with copper or aluminium insulation displacement contact practically does not change the value of the greatest tangential stresses in the adhesive layer.

Keywords: fibreglass rod; metal insulation displacement contact; glue layer thickness; glue bonding length; greatest tangential stresses in the glue layer; shear modulus; shear deformation; torsion torque; railway overhead system; stress-strain state in the glue bonding

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

Известно, что вопросы, связанные с расчетом клеевых соединений при различных видах воздействий, широко освещены в литературе. Так, расчет клеевого соединения металлического оконцевателя со стеклопластиковым стержнем при растяжении на основе аналитического решения рассмотрен в книге [1]. В предположении о вязкоупругих свойствах материала клея получены графики изменения касательных напряжений в клеевом слое по длине клеевого соединения в начальный момент времени и при неограниченном увеличении времени. Проведено численное решение данной задачи без учета вязкоупругих свойств материала клея методом конечных элементов. В работе [2] проведено численное исследование клеевых соединений композитной и металлической пластин. Исследовано напряженно-деформированное состояние элементов соединения при варьировании ряда параметров, а именно углов укладки слоев композиционного материала и их толщины, изменении характеристик жесткости клеевого слоя и т. д. В статье [3] описывается метод расчета касательных напряжений в клеевом слое с учетом пластических свойств последнего. Расчет проводится методом последовательных приближений. В работе [4] представлен метод расчета клеевых соединений, на основе которого дается оценка напряженно-деформированного состояния конструкции из многослойного композиционного материала. В статье [5] исследуется зависимость прочности клеевого соединения полос при сдвиге от жесткости материала полос и их толщины для различных типов соединений. Приводятся графики изменения касательных напряжений в клеевом слое по длине клеевого соединения. В работе [6] на основе двумерной модели Фолькерсена дано решение задачи о напряженном состоянии клеевого соединения прямоугольных пластин разной ширины. Проведено сравнение полученных результатов с расчетами, выполненными при помощи метода конечных элементов. В статье [7] рассмотрено аналитическое решение задачи об оценке напряженно-деформированного состояния трехслойной балки. Соединительный слой имитируется двухпараметрическим упругим основанием. Для несущих слоев принята модель балки Тимошенко. В статье [8] исследуется распределение напряжений в склеенных прямоугольных накладках при плоском напряженном состоянии. В работе [9] для клеевых соединений композитов внахлест, а также для композитных слоев с симметричной укладкой получено аналитическое решение с учетом поперечных деформаций и больших перемещений в клеевом слое, на основе которого найдены напряжения в клеевом слое. Полученные результаты сравниваются с результатами численного решения на основе метода конечных элементов.

Статьи [10; 11] также посвящены расчету нахлесточных клеевых соединений. Работа [12] фокусируется на оценке несущей способности однополосных клеевых соединений при растяжении, основанной на предварительном аналитическом анализе и последующем численном нелинейно упругом конечно-элементном анализе. Отметим, что расчету однополосных клеевых соединений посвящена также работа [13]. В статье [14] представлена методика расчета клеевого соединения металлической рубашки с композитным валом. Получено распределение касательных напряжений в клеевом слое при совместном действии нормальной силы и крутящего момента. В статье [15] на основе метода конечных элементов дается оценка напряженно-деформированного состояния механических и клеевых соединений авиационных конструкций. В работе [16] приведены результаты экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния симметричных клеевых соединений в листовых конструкциях. Исследована зависимость несущей способности от длины клеевого соединения. Исследованию несимметричных клеевых соединений в сэндвич-панелях посвящена статья [17]. В работе [18] рассматривается расчет клеевого соединения деталей из композитных материалов на основе аналитического решения. Оценка температурных напряжений в клеевых соединениях проведена в работе [19].

В представленной работе на основе рассмотрения упрощенной модели представлено аналитическое решение задачи об оценке напряженного состояния клеевого соединения стеклопластикового стержня с металлическим оконцевателем при кручении.

Общие замечания

General remarks

Анализ напряженно-деформированного состояния клеевого соединения стеклопластикового стержня с металлическим оконцевателем при кручении, являющийся на первый взгляд не особенно трудным, при более детальном рассмотрении оказывается непростой задачей. Дело в том, что, во-первых, для оценки напряженно-деформированного состояния в элементах соединения необходимо решать задачу теории упругости, что может быть связано с математическими сложностями. Эти сложности, как правило, преодолеваются на основе использования современных численных методов строительной механики. Во-вторых, возникает некоторая неопределенность при задании геометрических характеристик соединения, а также механических характеристик материала. Например, толщина клеевого слоя, как правило, равна долям миллиметра. Эта величина сопоставима со значениями неровностей поверхностей соединяемых деталей. Так круглое поперечное сечение

стержня из однонаправленного стеклопластика на самом деле имеет очертание в форме эллипса [1]. Если радиус стеклопластикового стержня равен 11 мм, то разность полуосей эллипса находится в диапазоне 0,1–0,2 мм. Внутренняя поверхность металлического оконцевателя после сверления также приобретает неровности. Отсюда следует, что толщина слоя клея является переменной по поверхности контакта стеклопластикового стержня и металлического оконцевателя.

Отметим также, что условия затвердевания и условия работы слоя клея в реальном клеевом соединении значительно отличаются от условий изготовления и условий экспериментального исследования образцов материала клея. Отсюда следует, что использование такой механической характеристики как модуль сдвига клея, найденной на основе опытов с образцами клея, при расчете клеевого соединения едва ли можно считать полностью обоснованным.

На основании изложенного выше можно сделать вывод о целесообразности применения упрощенной расчетной модели для исследования работы клеевого соединения стержня из однонаправленного стеклопластика с металлическим оконцевателем при кручении. Результаты проведенного таким образом аналитического анализа напряженно-деформированного состояния клеевого соединения целесообразно сравнивать в последующем с результатами соответствующего экспериментального исследования.

Постановка задачи и результаты

Research objective and results

Рассмотрим расчет клеевого соединения в предположении о том, что:

1. Тангенциальные перемещения в клеевом слое v меняются по толщине по линейному закону.
2. В металлическом оконцевателе, стеклопластиковом стержне и клеевом слое возникают только касательные напряжения, создающие крутящий момент относительно продольной оси соединения.
3. В металлическом оконцевателе и стеклопластиковом стержне касательные напряжения распределяются вдоль радиуса по линейному закону.
4. Для материалов металлического оконцевателя, стержня из однонаправленного стеклопластика и клея справедлив закон Гука.

Вырежем из соединения металлического оконцевателя и стеклопластикового стержня участок длиной dx (рис. 1).

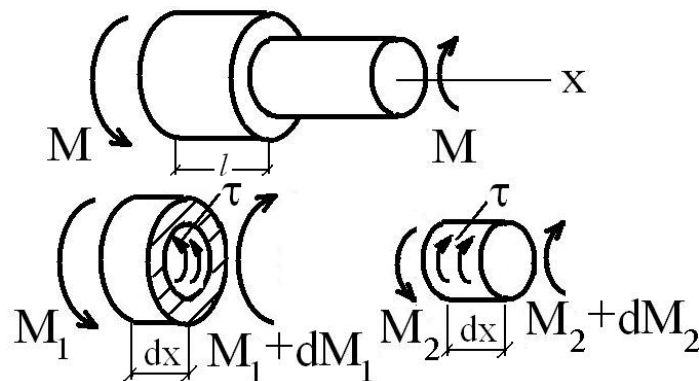


Рисунок 1. Клеевое соединение и его элементы (составлено авторами)

Figure 1. Adhesive bonding and its elements (compiled by the authors)

Из первой гипотезы имеем:

$$v = (v_1 + v_2)/2 + h^{-1} \times (v_1 - v_2) \times (r - R - 0,5h), \quad (1)$$

где v_1 , v_2 — тангенциальные перемещения внутренней кромки металлического оконцевателя и внешнего слоя стеклопластикового стержня; h — толщина клеевого слоя; R — радиус поперечного сечения стержня из однонаправленного стеклопластика, который в силу малости величины h ($h \ll R$) считается равным внутреннему радиусу поперечного сечения металлического оконцевателя; r — расстояние от продольной оси клеевого соединения до рассматриваемой точки в клеевом слое.

Из (1) следует, что сдвиговая деформация в клеевом слое равна:

$$\gamma = dv/dr = (v_1 - v_2)/h.$$

Продифференцируем обе части этого равенства по x :

$$d\gamma/dx = [dv_1/dx - dv_2/dx]/h. \quad (2)$$

На основании третьей и четвертой гипотез запишем:

$$\gamma_i = r \times d\phi_i/dx, \quad \tau_i = G_i \times r \times d\phi_i/dx.$$

Здесь γ_i , ϕ_i , τ_i , G_i — сдвиговая деформация, угол закручивания, касательное напряжение и модуль сдвига для металлического оконцевателя ($i = 1$) и стеклопластикового стержня ($i = 2$).

Крутящие моменты в металлическом оконцевателе и стержне из однонаправленного стеклопластика определяются интегралами:

$$M_i = \int \tau_i \times r \times dA, \quad dA = r \times dr \times d\theta, \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi.$$

Здесь интегрирование осуществляется по площади поперечного сечения металлического оконцевателя ($i = 1$) или стеклопластикового стержня ($i = 2$).

После подстановки сюда выражений для τ_i получим:

$$M_i = G_i \times J_{\rho i} \times d\varphi_i/dx \quad (3)$$

причем $J_{\rho i}$ — полярный момент инерции поперечного сечения металлического оконцевателя или стержня из однонаправленного стеклопластика.

Перемещения v_i определяются следующим образом:

$$v_i = R_i \times \varphi_i. \quad (4)$$

Из соотношений (2) и (4) имеем:

$$d\gamma/dx = [d\varphi_1/dx - d\varphi_2/dx] \times R/h.$$

Выражая производные $d\varphi_i/dx$ из равенств (3), запишем:

$$d\gamma/dx = [M_1/(G_1 \times J_{\rho 1}) - M_2/(G_2 \times J_{\rho 2})] \times R/h.$$

Для клеевого слоя на основании четвертой гипотезы (см. выше) является справедливым соотношение $\tau = G \times \gamma$.

Здесь G — модуль сдвига клея.

Тогда:

$$G^{-1} \times d\tau/dx = [M_1/(G_1 \times J_{\rho 1}) - M_2/(G_2 \times J_{\rho 2})] \times R/h. \quad (5)$$

Рассматривая равновесие элемента dx металлического оконцевателя и стеклопластикового стержня $\sum m_x = 0$ (рис. 1), получим:

$$M = M_1 + M_2, dM_1/dx = 2 \times \pi \times R^2 \times \tau, dM_2/dx = -2 \times \pi \times R^2 \times \tau. \quad (6)$$

С учетом зависимостей (6) уравнение (5) примет вид:

$$d^2 M_2/dx^2 - k \times M_2 = -\beta \times M, \quad (7)$$

где $k = 2 \times \pi \times G \times R^3 / (h \times G_1 \times J_{\rho 1}) \times [1 + G_1 \times J_{\rho 1} / (G_2 \times J_{\rho 2})]$, $\beta = 2 \times \pi \times G \times R^3 / (h \times G_1 \times J_{\rho 1})$.

Решение уравнения (7) записывается следующим образом:

$$M_2 = C_1 \times \exp(k^{0,5} \times x) + C_2 \times \exp(-k^{0,5} \times x) + M/(1 + \alpha). \quad (8)$$

Здесь $\alpha = G_1 \times J_{\rho 1} / (G_2 \times J_{\rho 2})$, C_1 и C_2 — произвольные постоянные.

Решение (8) должно удовлетворять граничным условиям:

$$\begin{aligned} x = 0, \quad M_2 &= 0, \\ x = l, \quad M_2 &= M. \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь l — длина клеевого соединения (рис. 1).

Из граничных условий (9) следует:

$$\begin{aligned} C_1 + C_2 + M/(1 + \alpha) &= 0, \\ C_1 \times \exp(k^{0,5} \times l) + C_2 \times \exp(-k^{0,5} \times l) + M/(1 + \alpha) &= M. \end{aligned} \quad (10)$$

Решая систему уравнений (10), найдем постоянные C_1 и C_2 :

$$C_1 = [1 - (1 - \exp(-k^{0,5} \times l)) / (1 + \alpha)] \times M / (2 \times \operatorname{sh}(k^{0,5} \times l)),$$

$$C_2 = [-1 + (1 - \exp(k^{0,5} \times l)) / (1 + \alpha)] \times M / (2 \times \operatorname{sh}(k^{0,5} \times l)).$$

Тогда выражение (8) принимает вид:

$$M_2 = M / (2 \times \operatorname{sh}(k^{0,5} \times l)) \times \{ [1 - (1 - \exp(-k^{0,5} \times l)) / (1 + \alpha)] \times \exp(k^{0,5} \times x) + [-1 + (1 - \exp(k^{0,5} \times l)) / (1 + \alpha)] \times \exp(-k^{0,5} \times x) \} + M / (1 + \alpha). \quad (11)$$

Продифференцируем это выражение один раз по x :

$$dM_2/dx = k^{0,5} \times (C_1 \times \exp(k^{0,5} \times x) - C_2 \times \exp(-k^{0,5} \times x)).$$

С учетом последнего равенства (6) имеем:

$$\tau = k^{0,5} / (2 \times \pi \times R^2) \times (-C_1 \times \exp(k^{0,5} \times x) + C_2 \times \exp(-k^{0,5} \times x)).$$

Или

$$\tau = k^{0,5} / (2 \times \pi \times R^2) \times \{ -[1 - (1 - \exp(-k^{0,5} \times l)) / (1 + \alpha)] \times M / (2 \times \operatorname{sh}(k^{0,5} \times l)) \times \exp(k^{0,5} \times x) + [-1 + (1 - \exp(k^{0,5} \times l)) / (1 + \alpha)] \times M / (2 \times \operatorname{sh}(k^{0,5} \times l)) \times \exp(-k^{0,5} \times x) \}.$$

Рассмотрим клеевое соединение стального оконцевателя со стеклопластиковым стержнем, которое имеет следующие характеристики: $G_1 = 8 \times 10^4$ МПа, $G_2 = 3,8 \times 10^3$ МПа, $G = 1,2 \times 10^3$ МПа, $R = 11$ мм, $l = 100$ мм, $M = 1$ Н×м. Внешний радиус стального оконцевателя принят равным 16 мм.

При исследовании распределения касательных напряжений в клеевом слое по длине клеевого соединения при различных значениях толщины клеевого слоя h получено, что наибольшие значения касательные напряжения в клеевом слое принимают в окрестности входа стержня из однонаправленного стеклопластика в металлический оконцеватель (при $92 \text{ мм} \leq x \leq 100 \text{ мм}$), а точнее, в том месте, где стеклопластиковый стержень входит в металлический оконцеватель, о чем свидетельствуют данные таблицы 1. На рисунке 2 приведены зависимости касательных напряжений в клеевом слое от координаты сечения клеевого соединения x , полученные на основе данных таблицы 1. Из таблицы 1 и рисунка 2 можно видеть что длина зоны больших касательных напряжений достаточно мала и при принятых геометрических и механических характеристиках не достигает 10 мм. На остальной части клеевого соединения касательные напряжения в клеевом слое принимают пренебрежимо малые значения. Некоторый всплеск касательных напряжений в клеевом слое наблюдается в начале клеевого соединения при $0 \text{ мм} \leq x \leq 8 \text{ мм}$, что следует из данных таблицы 2 и рисунка 3, на котором представлены графики соответствующих зависимостей касательных напряжений, построенные на базе данных таблицы 2. Однако в этой области клеевого соединения касательные напряжения в клеевом

слое значительно меньше соответствующих касательных напряжений в окрестности входа стеклопластикового стержня в металлический оконцеватель.

Таблица 1 / Table 1

Величины касательных напряжений в клеевом слое при различных значениях толщины клеевого слоя h в окрестности входа стержня из однонаправленного стеклопластика в металлический оконцеватель ($92 \text{ мм} \leq x \leq 100 \text{ мм}$)

Tangential stresses magnitudes in the adhesive layer at different values of the adhesive layer thickness h in the vicinity of the entrance of the unidirectional fibreglass rod into the metal insulation displacement contact ($92 \text{ мм} \leq x \leq 100 \text{ мм}$)

Значение координаты x сечения клеевого соединения, мм <i>X-coordinate value of the adhesive bonding cross-section, mm</i>	Касательное напряжение в клеевом слое при значении толщины клеевого слоя $h = 0,1 \text{ мм}$, МПа <i>Tangential stress in the adhesive layer at the adhesive layer thickness value $h = 0,1 \text{ mm}$, MPa</i>	Касательное напряжение в клеевом слое при значении толщины клеевого слоя $h = 0,3 \text{ мм}$, МПа <i>Tangential stress in the adhesive layer at the adhesive layer thickness value $h = 0,3 \text{ mm}$, MPa</i>	Касательное напряжение в клеевом слое при значении толщины клеевого слоя $h = 1 \text{ мм}$, МПа <i>Tangential stress in the adhesive layer at the adhesive layer thickness value $h = 1 \text{ mm}$, MPa</i>
92	0	0,006	0,029
93	0,001	0,010	0,041
94	0,002	0,019	0,057
95	0,006	0,036	0,080
96	0,019	0,067	0,113
97	0,055	0,125	0,159
98	0,162	0,233	0,224
99	0,476	0,434	0,315
100	1,4	0,808	0,443

Составлено авторами / Compiled by the authors

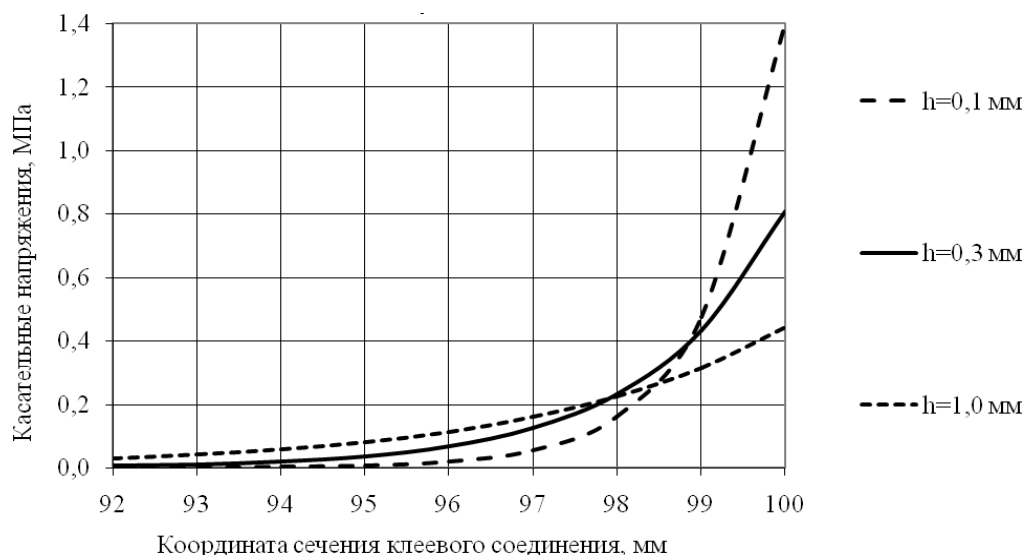


Рисунок 2. Изменение касательных напряжений в клеевом слое по длине клеевого соединения в окрестности входа стержня из однонаправленного стеклопластика в металлический оконцеватель (составлено авторами)

Figure 2. Variation of tangential stresses in the adhesive layer along the length of the adhesive bonding in the vicinity of the entrance of the unidirectional fibreglass rod into the metal insulation displacement contact (compiled by the authors)

Таблица 2 / Table 2

Величины касательных напряжений в клеевом слое при различных значениях толщины клеевого слоя h в начале клеевого соединения ($0 \text{ мм} \leq x \leq 8 \text{ мм}$)

Magnitudes of tangential stresses in the adhesive layer at different values of the adhesive layer thickness h at the beginning of the adhesive bonding ($0 \text{ мм} \leq x \leq 8 \text{ мм}$) (compiled by the authors)

Значение координаты x сечения клеевого соединения, мм Value of the x -coordinate of the glue bonding cross-section, mm	Касательное напряжение в клеевом слое при значении толщины клеевого слоя $h = 0,1 \text{ мм}$, МПа Tangential stress in the adhesive layer at the value of adhesive layer thickness $h = 0,1 \text{ мм}$, MPa	Касательное напряжение в клеевом слое при значении толщины клеевого слоя $h = 0,3 \text{ мм}$, МПа Tangential stress in the adhesive layer at the value of adhesive layer thickness $h = 0,3 \text{ мм}$, MPa	Касательное напряжение в клеевом слое при значении толщины клеевого слоя $h = 1 \text{ мм}$, МПа Tangential stress in the adhesive layer at the value of adhesive layer thickness $h = 1 \text{ мм}$, MPa
0	0,019	0,011	0,006
1	0,007	0,006	0,004
2	0,002	0,003	0,003
3	0,001	0,002	0,002
4	0	0,001	0,002
5	0	0	0,001
6	0	0	0,001
7	0	0	0,001
8	0	0	0

Составлено авторами / Compiled by the authors

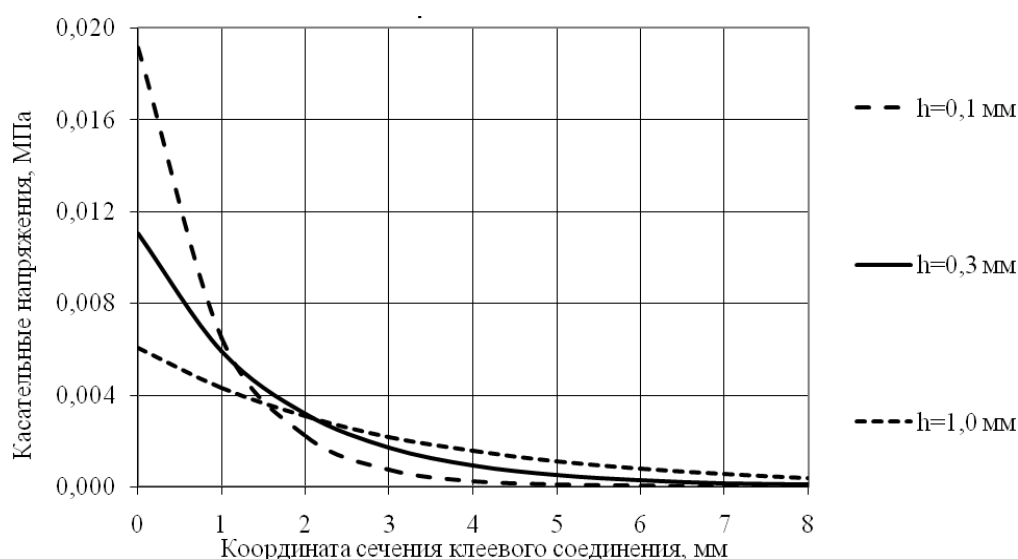


Рисунок 3. Изменение касательных напряжений в клеевом слое по длине клеевого соединения в начале клеевого соединения (составлено авторами)

Figure 3. Variation of tangential stresses in the glue layer along the length of the glue bonding at the beginning of the glue bonding (compiled by the authors)

Величины наибольшего касательного напряжения в клеевом слое при различных значениях толщины клеевого слоя h представлены в таблице 3. График зависимости наибольшего касательного напряжения от величины h , построенный на основе данных указанной таблицы, показан на рисунке 4.

Ожидаемым является увеличение наибольших касательных напряжений в клеевом слое при уменьшении толщины клеевого слоя, которое носит нелинейный характер.

Таблица 3 / Table 3

Значения наибольших касательных напряжений
в клеевом слое в зависимости от толщины клеевого слоя h

Values of the greatest tangential stresses in the
glue layer depending on the thickness of the glue layer h

Значение толщины клеевого слоя, мм <i>Adhesive layer thickness value, mm</i>	Наибольшее касательное напряжение в клеевом слое, МПа <i>Highest tangential stress in the adhesive layer, MPa</i>
0,1	1,400
0,2	0,990
0,3	0,808
0,4	0,700
0,5	0,626
0,6	0,572
0,7	0,529
0,8	0,495
0,9	0,467
1,0	0,443

Составлено авторами / Compiled by the authors

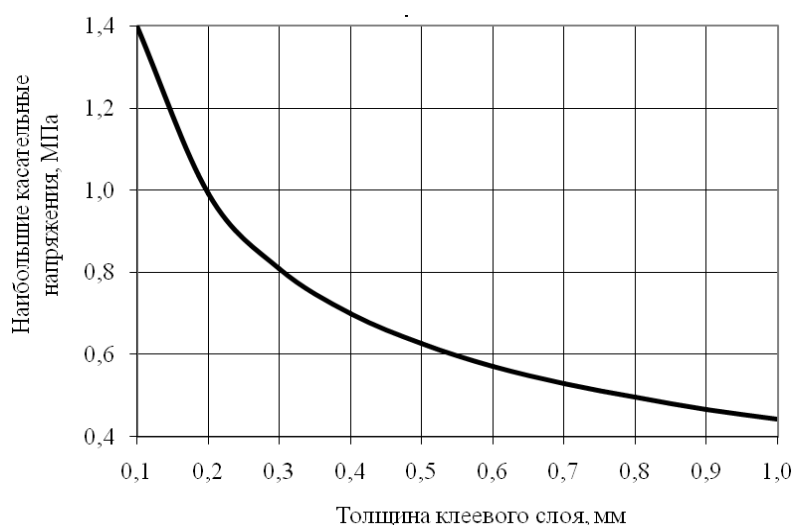


Рисунок 4. Зависимость наибольших касательных напряжений в клеевом слое от толщины слоя клея h (составлено авторами)

Figure 4. Dependence of the greatest tangential stresses in the glue layer on the thickness of the glue layer h (compiled by the authors)

Отметим, что уменьшение толщины клеевого слоя в десять раз при принятых параметрах клеевого соединения приводит к увеличению наибольшего касательного напряжения в клеевом слое приблизительно в три раза.

Величины наибольшего касательного напряжения в клеевом слое при различных значениях параметра l/R , характеризующего отношение

длины клеевого соединения l к радиусу стеклопластикового стержня R , полученные для каждого рассмотренного значения толщины клеевого слоя, приведены в таблице 4.

Таблица 4 / Table 4

Значения наибольших касательных напряжений в клеевом слое в зависимости от параметра l/R при различных значениях толщины клеевого слоя h
Values of the greatest tangential stresses in the adhesive layer depending on the parameter l/R at different values of the adhesive layer thickness h

Значение параметра l/R Value of the parameter l/R	Наибольшее касательное напряжение в клеевом слое при значении толщины клеевого слоя $h = 0,1$ мм, МПа Greatest tangential stress in the adhesive layer at the value of adhesive layer thickness $h = 0,1$ mm, MPa	Наибольшее касательное напряжение в клеевом слое при значении толщины клеевого слоя $h = 0,3$ мм, МПа Greatest tangential stress in the adhesive layer at the value of adhesive layer thickness $h = 0,3$ mm, MPa	Наибольшее касательное напряжение в клеевом слое при значении толщины клеевого слоя $h = 1$ мм, МПа Greatest tangential stress in the adhesive layer at the value of adhesive layer thickness $h = 1$ mm, MPa
0,25	1,409	0,867	0,608
0,50	1,400	0,811	0,466
0,75	1,400	0,808	0,447
1,00	1,400	0,808	0,443
2,00	1,400	0,808	0,443
3,00	1,400	0,808	0,443
4,00	1,400	0,808	0,443
5,00	1,400	0,808	0,443

Составлено авторами / Compiled by the authors

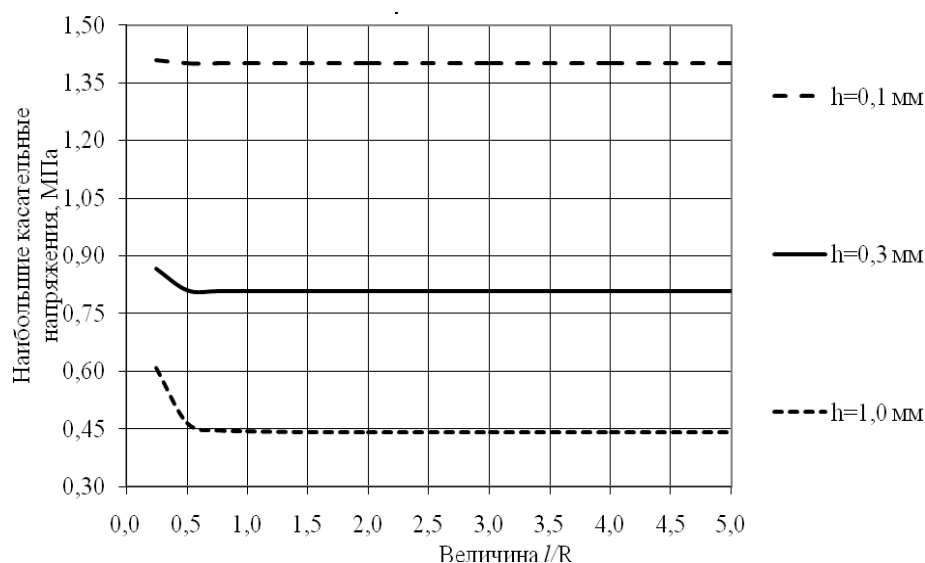


Рисунок 5. Зависимости наибольших касательных напряжений в клеевом слое от отношения длины клеевого соединения l к радиусу стеклопластикового стержня R (составлено авторами)

Figure 5. Dependences of the greatest tangential stresses in the glue layer on the ratio of the length of the glue bonding l to the radius of the fiberglass rod R (compiled by the authors)

График соответствующей зависимости, построенный на основе данных этой таблицы, показан на рисунке 5. Из рисунка 5 можно видеть,

что в основном изменение наибольших касательных напряжений в клеевом слое в зависимости от величины l/R происходит при $l/R < 0,5$. Если же величина $l/R \geq 0,5$, то тогда наибольшие касательные напряжения в клеевом слое остаются практически неизменными, т. е. почти не зависят от значения длины клеевого соединения.

Таблица 5 / Table 5

Значения наибольших касательных напряжений в клеевом слое в зависимости от величины модуля сдвига металлического оконцевателя G_1 при различных значениях толщины клеевого слоя h

Values of the greatest tangential stresses in the adhesive layer depending on the value of the shear modulus of the metal termination G_1 at different values of the adhesive layer thickness h

Материал оконцевателя <i>Insulation displacement contact material</i>	Модуль сдвига G_1 , МПа <i>Shear modulus G_1, MPa</i>	Наибольшее касательное напряжение в клеевом слое при значении толщины клеевого слоя $h = 0,1$ мм, МПа <i>Greatest tangential stress in the adhesive layer at the value of adhesive layer thickness $h = 0,1$ mm, MPa</i>	Наибольшее касательное напряжение в клеевом слое при значении толщины клеевого слоя $h = 0,3$ мм, МПа <i>Greatest tangential stress in the adhesive layer at the value of adhesive layer thickness $h = 0,3$ mm, MPa</i>	Наибольшее касательное напряжение в клеевом слое при значении толщины клеевого слоя $h = 1$ мм, МПа <i>Greatest tangential stress in the adhesive layer at the value of adhesive layer thickness $h = 1$ mm, MPa</i>
Алюминий <i>Aluminum</i>	26 000	1,381	0,797	0,437
Медь <i>Copper</i>	40 000	1,391	0,803	0,440
Сталь <i>Steel</i>	80 000	1,400	0,808	0,443

Составлено авторами / Compiled by the authors

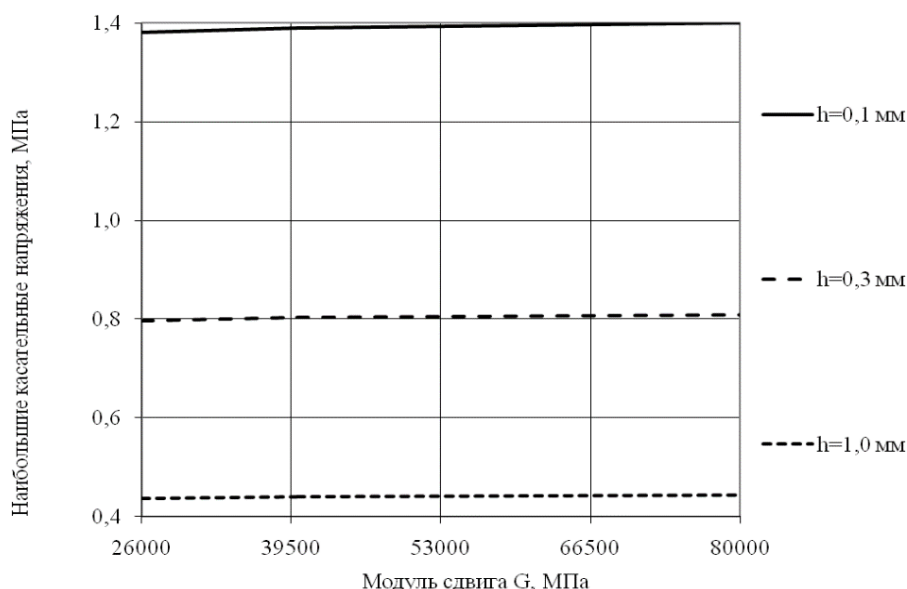


Рисунок 6. Зависимости наибольших касательных напряжений в клеевом слое от величины модуля сдвига G_1 металлического оконцевателя (составлено авторами)

Figure 6. Dependences of the greatest tangential stresses in the glue layer on the value of shear modulus G_1 of the metal termination (compiled by the authors)

Величины наибольшего касательного напряжения в клеевом слое при различных значениях модуля сдвига G_1 металлического оконцевателя приведены в таблице 5. На рисунке 6 графически представлены соответствующие зависимости наибольших касательных напряжений, полученные по данным таблицы 5.

Были рассмотрены следующие варианты материала металлического оконцевателя: алюминий, медь, сталь. Из представленных данных следует, что изменение модуля сдвига G_1 металлического оконцевателя приблизительно в 2–3 раза при прочих равных условиях мало влияет на величину наибольших касательных напряжений в клеевом слое.

Заключение

Conclusion

В заключение, на основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Исследование распределения касательных напряжений в клеевом слое по длине клеевого соединения показало, что наибольшие касательные напряжения в клеевом слое возникают в месте входа стеклопластикового стержня в стальной оконцеватель. При этом зона относительно больших касательных напряжений в клеевом слое невелика и при длине клеевого соединения $l = 100$ мм не превышает 10 мм.
2. Зависимость наибольших касательных напряжений в клеевом слое от толщины клеевого слоя является нелинейной, причем при принятых характеристиках клеевого соединения увеличение толщины клеевого слоя в 10 раз приводит к уменьшению наибольших касательных напряжений в клеевом слое приблизительно в 3 раза.
3. При отношении длины клеевого соединения l к радиусу стеклопластикового стержня R , большем или равным 0,5, наибольшие касательные напряжения в клеевом слое практически не зависят от длины клеевого соединения.
4. Изменение модуля сдвига металлического оконцевателя, а именно, замена стального оконцевателя на алюминиевый или медный оконцеватель, оказывает малозаметное влияние на величину наибольших касательных напряжений в клеевом слое.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полимерные материалы в устройствах контактной сети / А.М. Лукьянов, Ю.Н. Шумилов, З.С. Бакалов [и др.]. — М.: Транспорт, 1988. — 224 с.
2. **Алесковский, С.Л.** Расчет и проектирование клеевых соединений композитов / С.Л. Алесковский, В.Л. Зыонг // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. — 2017. — Т 2. — С. 520–524. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29434278>. — EDN YUCWID. (дата обращения: 26.07.2023).
3. **Хватан, А.М.** Расчет клеевого соединения с учетом пластичности клея / А.М. Хватан // Ученые записки ЦАГИ. — 1979. — Т 10. — № 4. — С. 140–143. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23817609>. — EDN SBCCIY. (дата обращения: 26.07.2023).
4. **Рогов, Н.В.** К вопросу использования метода расчета клеевых соединений / Н.В. Рогов, Д.Н. Жертиев // Комплексные проблемы техносферной безопасности: Материалы VII Международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Воронеж, 24–25 февраля 2022 года / Отв. редактор И.Г. Дроздов. Том Часть I Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2022. — С. 351–355. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50325981>. — EDN JVOPMT. (дата обращения: 26.07.2023).
5. **Калинин, А.А.** Расчет клеевого соединения с учетом пластичности клея / А.А. Калинин, А.В. Сивуха // Вестник Витебского государственного технологического университета. — 2011. — № 1. — С. 52–58. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20259976>. — EDN RBJBUL. (дата обращения: 26.07.2023).
6. **Куреннов, С.С.** Расчет напряженного состояния клеевого соединения прямоугольных пластинок разной ширины / С.С. Куреннов, Е.В. Танчик // Вестник Московского авиационного института. — 2015. — Т 22. — № 2. — С. 162–189. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23485896>. — EDN TTYMMX. (дата обращения: 26.07.2023).
7. **Куреннов, С.С.** Двухпараметрическая модель упругого основания в расчете напряженного состояния клеевого соединения / С.С. Куреннов // Труды МАИ. — 2013. — № 66. — С. 3. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20359619>. — EDN RDNTUR. (дата обращения: 26.07.2023).
8. **Mathias, J.D.** On the bidirectional stress distribution in rectangular bonded composite patches / J.D. Mathias, M. Gr'diac, X. Balandraud. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2006.02.016> // International Journal of Solids and Structures. — 2006. — Т 43. — № 22-23. — С. 6921–6947. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020768306000485>. — EDN KETPQZ. (дата обращения: 26.07.2023).
9. **Luo, Q.** Analytical solutions for adhesive composite joints considering large deflection and transverse shear deformation in adherends / Q. Luo, L. Tong. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2008.07.001> // International Journal of Solids and Structures. — 2008. — Т 45. — № 22-23. — С. 5914–5935. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020768308002709>. — EDN KEUFZZ. (дата обращения: 26.07.2023).
10. **Luo, Q.** Fully-coupled nonlinear analysis of single lap adhesive joints / Q. Luo, L. Tong. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2006.07.009> // International Journal of Solids and Structures. — 2007. — Т 44. — № 7-8. — С. 2349–2370. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020768306002745>. — EDN JEHDWM. (дата обращения: 26.07.2023).
11. **Hart-Smith, L.J.** Adhesive-Bonded Single-Lap Joints / **L.J. Hart-Smith**. — Хэмптон NASA, 1973. — 114 с. — URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740005083> (дата обращения: 11.08.2023).
12. **Sandu, M.** Strength of adhesively bonded single-strapped joints loaded in tension / M. Sandu, A. Sandu, D. Constantinescu // Proceedings of the Romanian Academy — Series A: Mathematics, Physics, Technical Sciences, Information Science. — 2010. — Т 11. — № 4. — С. 371–379. — URL: https://www.researchgate.net/publication/268420117_Strength_of_adhesively_bonded_single-strapped_joints_loaded_in_tension. (дата обращения: 11.08.2023).
13. **Shahin, K.** Analysis of deformations and stresses in balanced and unbalanced adhesively bonded single-strap joints / K. Shahin, F. Taheri. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.09.014> // Composite Structures. — 2007. — Т 81. — № 4. — С. 511–524. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263822306003850>. — EDN KULBYD. (дата обращения: 11.08.2023).

14. **Крикано́в, А.А.** Крепление облицовки к композитному валу / А.А. Криканов, А.Ф. Разин // Механика композиционных материалов и конструкций. — 1998. — Т 4. — № 1. — С. 29–40. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15128995>. — EDN MTBTSF. (дата обращения: 11.08.2023).
15. **Бегеев, Т.К.** Исследование контактного взаимодействия в механических и клеевых соединениях / Т.К. Бегеев, В.И. Гришин, В.Б. Литвинов // Ученые записки ЦАГИ. — 1992. — Т 23. — № 1. — С. 104–108. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13007499>. — EDN KYQSQF. (дата обращения: 11.08.2023).
16. **Бойтемиров, Ф.А.** Экспериментальное исследование работы несимметричных соединений листовых конструкций / Ф.А. Бойтемиров // Научное обозрение. — 2016. — № 20. — С. 10–14. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30503294>. — EDN ZRNCED. (дата обращения: 11.08.2023).
17. **Tong, L.** Effect of joint flexibility in adhesively bonded composite panel-to-flange joints / L. Tong, A. Sheppard, D. Kelly, P. Chalkley. — DOI [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(97\)00044-9](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(97)00044-9) // Composites Part B: Engineering. — 2004. — Т 29. — № 3. — С. 287–298. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836897000449>. (дата обращения: 11.08.2023).
18. **Кульков, А.А.** Методика расчета клеевых соединений деталей из композиционных материалов / А.А. Кульков, В.В. Федоров // Клеи. Герметики. Технологии. — 2007. — № 2. — С. 30–32. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12176519>. — EDN KGLYAN. (дата обращения: 11.08.2023).
19. **Chen, W.T.** Thermal Stress in Bonded Joints / W.T. Chen, C.W. Nelson. — DOI <https://doi.org/10.1147/rd.232.0179> // IBM Journal of Research and Development. — 1979. — Т 23. — № 2. — С. 179–188. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5390832>. (дата обращения: 11.08.2023).

Сведения об авторах:

Жаринов Михаил Юрьевич — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Строительная механика», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия, e-mail: zharinovmiit@yandex.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=174441

Марасанов Александр Игоревич — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Строительная механика», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия, e-mail: marasanovai@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8672-8822>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=6938

Статья получена: 18.08.2023. Принята к публикации: 08.12.2023. Опубликовано онлайн: 24.12.2023.

REFERENCES

1. Luk'yanov A.M., Shumilov Yu.N., Bakalov Z.S. et al. Polimernyye materialy v ustroystvakh kontaktnoy seti [Polymer materials in contact network devices]. Moscow: Transport; 1988. (In Russ.).
2. Aleskovskiy S.L., Zyong V.L. [Calculation and design of adhesive joints of composites]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona = Transport infrastructure of the Siberian region*. 2017; 2: 520–524. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29434278> (accessed 26th July 2023). (In Russ.).
3. Khvatan A.M. [Calculation of adhesive joints taking into account the plasticity of the glue]. *Uchenye Zapiski TSAGI*. 1979; 10(4): 140–143. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23817609> (accessed 26th July 2023). (In Russ.).
4. Rogov N.V., Zherdev D.N. On The Issue of Using the Method of Calculation of Adhesive Joints. In: [Complex problems of technosphere safety: Materials of the VII International Scientific and Practical Conference. In 2 parts, Voronezh, February 24–25, 2022]. Voronezh: Voronezh State Technical University; 2022. p. 351–355. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50325981> (accessed 26th July 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
5. Kalinin A.A., Siwucha A.V. To The Calculation of Glue Connection. *Vestnik of Vitebsk State Technological University*. 2011; (1): 52–58. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20259976> (accessed 26th July 2023). (In Russ., abstract in Eng.).

6. Kurennov S.S., Tanchik E.V. Calculation of the Stress State of a Glue Joint of Rectangular Plates with Different Widths. *Aerospace MAI Journal*. 2015; 22(2): 162–189. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23485896> (accessed 26th July 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
7. Kurennov S.S. [Two-parameter model of an elastic base in calculating the stress state of an adhesive joint]. *Trudy MAI*. 2013; (66): 3. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20359619> (accessed 26th July 2023). (In Russ.).
8. Mathias J.D., Gr'diac M., Balandraud X. On the bidirectional stress distribution in rectangular bonded composite patches. *International Journal of Solids and Structures*. 2006; 43(22-23): 6921–6947. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2006.02.016>.
9. Luo Q., Tong L. Analytical solutions for adhesive composite joints considering large deflection and transverse shear deformation in adherends. *International Journal of Solids and Structures*. 2008; 45(22-23): 5914–5935. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2008.07.001>.
10. Luo Q., Tong L. Fully-coupled nonlinear analysis of single lap adhesive joints. *International Journal of Solids and Structures*. 2007; 44(7-8): 2349–2370. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2006.07.009>.
11. Hart-Smith L.J. Adhesive-Bonded Single-Lap Joints. Hampton, Virginia: NASA; 1973. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740005083> (accessed 11th August 2023). (In Eng.).
12. Sandu M., Sandu A., Constantinescu D. Strength of adhesively bonded single-strapped joints loaded in tension. *Proceedings of the Romanian Academy — Series A: Mathematics, Physics, Technical Sciences, Information Science*. 2010; 11(4): 371–379. Available at: https://www.researchgate.net/publication/268420117_Strength_of_adhesively_bonded_single-strapped_joints_loaded_in_tension (accessed 11th August 2023). (In Eng.).
13. Shahin K., Taheri F. Analysis of deformations and stresses in balanced and unbalanced adhesively bonded single-strap joints. *Composite Structures*. 2007; 81(4): 511–524. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.09.014>.
14. Krikanov A.A., Razin A.F. [Attaching the cladding to the composite shaft]. *Mekhanika Kompozitsionnykh Materialov i Konstruktsii*. 1998; 4(1): 29–40. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15128995> (accessed 11th August 2023). (In Russ.).
15. Begeyev T.K., Grishin V.I., Litvinov V.B. [Study of contact interaction in mechanical and adhesive joints]. *Uchenye Zapiski TSAGI*. 1992; 23(1): 104–108. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13007499> (accessed 11th August 2023). (In Russ.).
16. Boytemirov F.A. Experimental Study of The Operation of Unbalanced Connections of Plate Systems. *Nauchnoye obozreniye*. 2016; (20): 10–14. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30503294> (accessed 11th August 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
17. Tong L., Sheppard A., Kelly D., Chalkley P. Effect of joint flexibility in adhesively bonded composite panel-to-flange joints. *Composites Part B: Engineering*. 2004; 29(3): 287–298. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(97\)00044-9](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(97)00044-9).
18. Kul'kov A.A., Fedorov V.V. Metodika rascheta kleyevykh soyedineniy detaley iz kompozitsionnykh materialov. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*. 2007; (2): 30–32. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12176519> (accessed 11th August 2023). (In Russ.).
19. Chen W.T., Nelson C.W. Thermal Stress in Bonded Joints. *IBM Journal of Research and Development*. 1979; 23(2): 179–188. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1147/rd.232.0179>.

Information about the authors:

Mikhail Yu. Zharinov — Russian University of Transport, Moscow, Russia, e-mail: zharinovmiit@yandex.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=174441

Alexander I. Marasanov — Russian University of Transport, Moscow, Russia,
e-mail: marasanovai@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8672-8822>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=6938

Submitted: 18th August 2023. Revised: 8th December 2023. Published online: 24th December 2023.