

**Об особенностях расчета на прочность ремонтного
металлокомпозитного фланцевого соединения для тонкостенных
агрегатов сельскохозяйственных машин**

М.В. Астахов, д-р техн. наук, профессор
(Калужский филиал ФГБОУ ВПО «Московский государственный техниче-
ский университет им. Н.Э. Баумана»,
8(960) 518–26–73, mvastahov@gmail.com)

И.И. Сорокина, ст. преподаватель
(Калужский филиал ФГБОУ ВПО «Московский государственный техниче-
ский университет им. Н.Э. Баумана»,
8(910)707–77–34, sorokina-i@yandex.ru)

Аннотация. Подчеркнута актуальность применения конструкций из полимерных композитных материалов (ПКМ) в сельскохозяйственном машиностроении. Предложен проектировочный расчет стыка металл-композит при помощи крепежных элементов специальной формы на примере бункера, заполненного сыпучим грузом. Даны рекомендации по применению предлагаемой методики в инженерных расчетах первого приближения.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, расчет на прочность, металлокомпозитное соединение, крепежный элемент, ремонт.

Применение полимерных композитных материалов (ПКМ) в ремонте и/или модернизации сельскохозяйственной техники отвечает требованиям приоритетного Национального проекта «Развитие агропромышленного комплекса РФ» как по исследованию новых, более эффективных материалов, так и по энергетической и экологической безопасности.

В [1] показаны возможности применения композитных материалов и подобрано наиболее рациональное по механическим характеристикам, технологии и себестоимости изготовления сочетание компонентов ПКМ: стеклоткань Т-10 ГОСТ 19170-73; связующее – эпоксидная смола ЭД – 6 ГОСТ 10587-84, отвердитель – полиэтиленполиамин, пластификатор – дибутилфталат, растворитель – ацетон ГОСТ 2768-84. На основе [2] можно утверждать, что наиболее эффективно применение ПКМ в модернизации тонкостенных агрегатов сельхозмашин, в частности, бункеров, силосопроводов, желобов и т.д. Технология изготовления изделия типа бункер или силосопровод из ПКМ основана или на «мокром» способе выкладки стеклоткани, или выкладке на основе препрегов, дальнейшей вакуумной полимеризации на мастер-модели, и давно известна [3].

Наиболее сложный вопрос – расчет на прочность стыка между модернизированным композитным агрегатом машины и ее стальным основанием. В [4] предлагается осуществлять подобный стык с помощью металлокомпозитного фланца, представляющего собой клеештифтовое соединение композитных и стальных частей конструкции на основе стальных крепежных элементов (КЭ) копьеобразной формы, а также изложена методика его проектирования.

Рассмотрим напряженное состояние композитного бункера, имеющего во всех планах прямоугольную форму (l – длина, p – ширина и $2h$ – высота), прикрепленного по фланцу к стальному основанию (рис. 1) с помощью КЭ.

Бункер 2, заполненный сыпучим грузом 5, находится под действием силы $G = G_{\tilde{A}} + G_{\tilde{A}}$, приложенной в центре масс (ЦМ), где $G_{\tilde{A}}$ – сила тяжести бункера, $G_{\tilde{A}}$ – сила тяжести сыпучего груза.

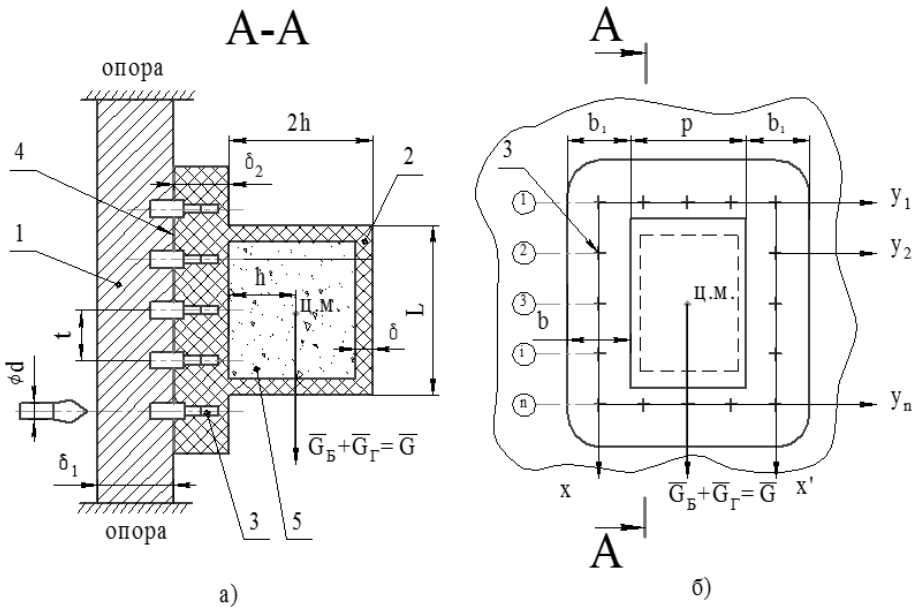


Рис. 1. Крепление композитного бункера 2, заполненного сыпучим грузом 5, к стальному основанию 1 с помощью крепежных элементов (КЭ) 3 и слоя эпоксидного клея 4

Исходя из принципа независимости действия сил, рассмотрим срез

КЭ по оси x (рис.1б), условно выделив полосу фланца шириной b . Согласно [5,6], соединение типа «нахлестка» можно рассчитать на срез на основе расчетно-силовой (РС) схемы (рис.2).

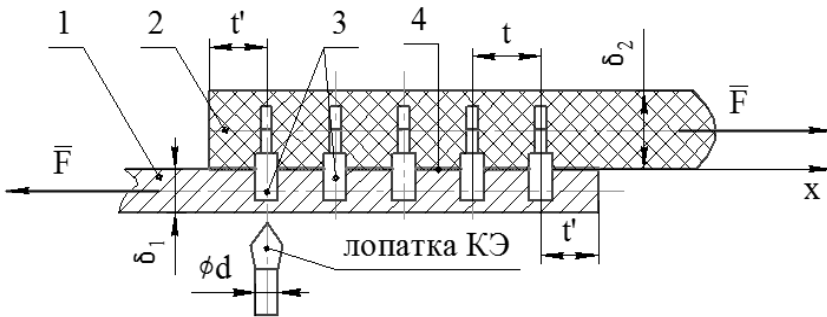


Рис. 2. РС схема среза КЭ соединения «сталь-композит», 1 – стальная пластина, 2 – деталь из ПКМ, 3 – КЭ, 4 – эпоксидный клей

При этом условие прочности на срез [5] для указанного соединения (рис.2) будет

$$\tau_{\tilde{n}\delta} = \frac{KQ_{\tilde{n}\delta}}{K_p A} \leq \tau_{adm}, \dots\dots\dots (1)$$

где $Q = \frac{F}{n_x}$; n_x – число КЭ в ряду по оси x ; A – площадь поверхности среза КЭ ($A = 0,25n_x \cdot \pi d^2$); d – диаметр срезаемой части КЭ; $(\tau_{adm})_{\tilde{n}\delta}$ – допускаемое напряжение материала КЭ на срез; K – коэффициент перенапряжения КЭ [4]; K_δ назовем коэффициентом положения КЭ.

Согласно [6], максимального значения ($K_\delta = 1,4$) коэффициент положения достигает в том случае, когда плоскости копьеобразных лопаток КЭ находятся под углом 45° к оси, совпадающей с линией действия силы \overline{F} (оси x). При расчете необходимо учитывать податливость КЭ, которую обозначим $C_1 = C_2 = \dots = C_i = \dots = C_n$, где n количество, а i - номер КЭ в продольном ряду (на рис.1, 2 – в ряду по оси x $n = 5$).

$$C_i = \frac{C_i}{A_{\hat{E}\hat{Y}}}, \dots\dots\dots (2)$$

где C_i – коэффициент податливости КЭ (зависит от его формы, в частности из [4] для КЭ на рис.1,2 $C_i \approx 0,3 \frac{i i^3}{\hat{E}\hat{I}}$), $A_{\hat{E}\hat{Y}}$ – площадь поперечного сечения цилиндрической части КЭ ($A_{\hat{E}\hat{Y}} = \hat{A}$).

Коэффициент перенапряжения $K = \frac{Q_{max}}{F}$, где Q_{max} – максимальная расчетная перерезывающая сила, которая выбирается из найденных значений Q_i для всех КЭ. При определении Q_i для каждого КЭ используем метод сил, для которого основная система, полученная из РС, приведена на рис.3, причем она распространена на n КЭ.

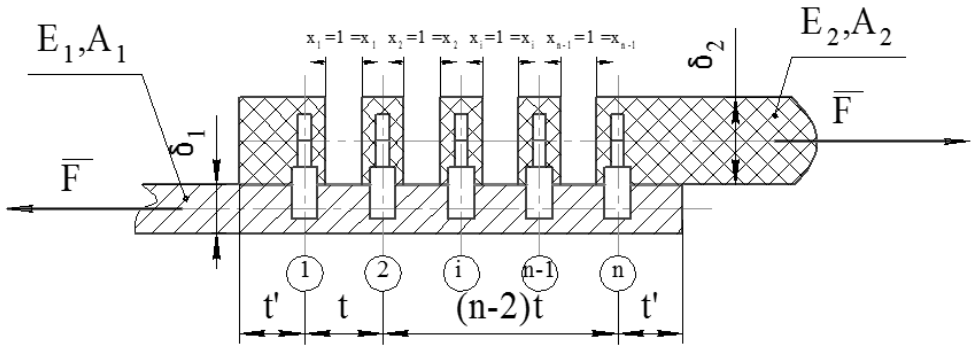


Рис. 3. Основная система (ОС) метода сил для n крепежных элементов (КЭ)

Разрезая $(n - 1)$ замкнутый контур, получим $3(n - 1)$ раз статически неопределимую систему, при этом внутренние поперечные силы Q_i и изгибающие моменты M_i учтем податливостью связей (КЭ) и самих деталей 1 и 2. Тогда основополагающими значениями при подсчете неизвестных в системе канонических уравнений метода сил будут внутренние продольные силы N_i . ОС станет $(n - 1)$ раз статически неопределимой (учитываются только продольные $X_{1 \div (n-1)} = 1$).

Коэффициенты при неизвестных $X_1 \div X_{(n-1)}$ в канонических уравнениях метода сил определяются по формуле:

$$\delta_{ij} = \sum_{i,j=1}^{n-1} \int \frac{N_i N_j}{E_i A_i} ds + \sum_i^{i+1} C_i, \dots \dots \dots (3)$$

где первое слагаемое будет приближенно определяться на основе способа Верещагина, а второе – на основе [7]. Следует заметить, что на самом деле податливости $C_1 \div C_n$ не будут равны друг другу, несмотря на то, что все КЭ имеют одинаковую геометрию. При срезе всех КЭ (см. рис. 1б), следует учитывать податливость КЭ, расположенных по осям $y_1 \div y_n$, путем их суммирования с податливостью КЭ, расположенных по оси x , как бы сосредотачивая все КЭ на полосе композитного фланца шириной b_1 (см. рис.1б).

Получим следующие податливости: $C_1 = kC$; $C_{2 \div (n-1)} = 2C$; $C_n = kC$, где $2, k$ – числа КЭ в поперечных рядах (по осям $y_{1 \div n}$).

Тогда, для $(n - 1)$ раз статически неопределимой системы (n КЭ в продольном ряду по оси x) канонические уравнения будут иметь вид:

$$\begin{cases} \ddot{I} X_1 + (-2C) X_2 + 0 \cdot X_3 + \dots + 0 \cdot X_{n-1} = -F \ddot{I}_1; \\ (-2C) X_1 + C_2 X_2 + (-2C) X_3 + \dots + 0 \cdot F \ddot{I}_{n-1} = - \ddot{I}_1; \\ \dots \dots \dots \\ 0 \cdot X_1 + 0 \cdot X_2 + \dots + (-2C) X_{n-2} + C_{n-1} X_{n-1} = - (\ddot{I}_1 + \ddot{I}_2), \end{cases} \quad (4)$$

где $\ddot{I}_1 = \frac{t}{E_1 A_1}$, $\ddot{I}_2 = \frac{t}{E_2 A_2}$ – податливость детали 1 и 2 соответственно на участке между связями; E_1, E_2 – модули Юнга материала деталей; $A_1 = 2\delta_1 b_1$, $A_2 = 2\delta_2 b_2$ – площади поперечных сечений деталей (b_1, b_2 – ширина деталей на рис. 2); t – шаг КЭ в продольном ряду (по оси x); $\ddot{I} = \ddot{I}_1 + \ddot{I}_2 + (k + 2)C$.

Система канонических уравнений (4) является универсальной для расчета фланцевых соединений типа рис.1 на срез с любым количеством КЭ в случае $F = G$. Решая последнюю, например, способом Гаусса с использованием процедуры Халецкого можно найти неизвестные $X_1 \div X_n$, а с их помощью - перерезывающие силы, действующие на КЭ, и провести расчет на прочность по наиболее нагруженному КЭ. Так $Q_1 = X_1$; $Q_2 = X_2 - X_1$; $Q_3 = X_3 - X_2$; ... $Q_n = F - X_{n-1}$. Для максимального $Q_i = Q_{\max}$ находим коэффициент перенапряжения K .

Простейшей математической моделью, исследующей напряженное состояние соединений на рис. 1, 2, может служить система алгебраических выражений [5]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{\tilde{n}\tilde{\delta}} = \frac{KQ_{\tilde{n}\tilde{\delta}}}{K_p A} \leq \tau_{adm}, \\ \sigma_{\tilde{n}\tilde{i}} = \frac{N_1}{\delta_1 \cdot d} \leq (\sigma_{adm})_{\tilde{n}\tilde{i}}, \\ \sigma_{\tilde{n}\tilde{i}} = 325 - 25 \cdot \frac{d}{\delta_2} \leq (\sigma_{adm})_{\tilde{n}\tilde{i}}, \\ \sigma_{\tilde{\delta}z} = \frac{N_z}{\delta_z (b_z - m_z d_z)} \leq (\sigma_{adm})_{pz}, \\ \sigma_{\tilde{\delta} max} = -0,23, 245 \cdot 344, 43 + 58, 25 \cdot 3 - 6, 69 \cdot 3, \\ \tau_K = \frac{F_K}{A_K} \leq \tau_{Kadm}, \end{array} \right. \dots\dots\dots (5)$$

где $Q_{\tilde{n}\tilde{\delta}} = \frac{G}{n}$ – перерезывающая сила, приходящаяся в среднем на один КЭ,

n – число КЭ по оси x во фланцевом соединении; коэффициент $K_{\delta} = 1,4$ для расположения лопаток КЭ, согласно рис.2 [6]; K – коэффициент перенапряжения; A – площадь поверхности среза КЭ; $(\tau_{adm})_{\tilde{n}\tilde{\delta}}$ – допускаемое напряжение материала КЭ на срез; N_1 – продольная сила в

стальной детали 1 ($N_1 = \frac{G}{u}$); u – общее число КЭ; δ_1 – толщина стальной

детали; $(\sigma_{adm})_{\tilde{n}\tilde{i}}$ – допускаемое напряжение смятия стальной детали;

$\sigma_{\tilde{n}\tilde{i}}$ [МПа] – напряжение смятия детали из ПКМ; δ_2 [мм] – толщина де-

тали (торца фланца) из ПКМ; d [мм] – диаметр КЭ; $(\sigma_{adm})_{\tilde{n}\tilde{i}}$ [МПа] –

допускаемое напряжение смятия детали из ПКМ; N_z – продольная внутренняя сила растяжения ($N_z = G$); b_z, δ_z – ширина и толщина соединяемых

деталей; m_z – число КЭ в одном поперечном ряду; $[\sigma_{adm}]_{pz}$ – допустимое напряжение при растяжении (сжатии) материала деталей; Z – номер исследуемой детали (1 – стальная деталь, 2 – деталь из ПКМ); τ_K – касательные напряжения в слое клея; F_K – сдвигающая детали сила; A_K – площадь склеивания; τ_{Kadm} – допускаемое напряжение клея на срез (пример расчета τ_K показан в [7]); $a, [i i]$ – ширина лопатки КЭ; $l_{\zeta} []$ – глубина внедрения КЭ в ПКМ; $F_{\hat{a}max} [H]$ – нормальная к поверхности детали сила, при достижении которой происходит вырыв КЭ из ПКМ.

Математическое моделирование и статистическая обработка его результатов показали, что $F_{\hat{a}max}$ подчиняется неравенству

$$G \frac{h}{l \cdot k_1} \leq F_{\hat{a}max},$$

где k_1 – число КЭ в поперечном ряду по оси y_1 .

Литература

1. Астахов, М.В. Возможности применения композитных материалов при модернизации и ремонте сельскохозяйственной техники [Текст] / М.В. Астахов, И.И. Сорокина // Труды ГОСНИТИ. – 2015. – Т.118. – С.201-205.
2. Астахов, М.В. Перспективы применения полимерных композитных материалов с добавлением нанокристаллических порошков оксида алюминия в конструировании и ремонте сельскохозяйственной техники [Текст] / М.В. Астахов, И.И. Сорокина // Технология металлов. – 2012. – № 12. – С. 18-20.
3. Справочник по композиционным материалам: В 2-х кн. Кн.2 / под ред. Дж. Любина; пер. с англ. А.Б. Геллера и др.; Под ред. Б.Э. Геллера. – М.: Машиностроение, 1988. – 584 с. ил.
4. Астахов, М.В. Расчет на прочность металл-композитных соединений с дискретными связями [Текст] / М.В. Астахов, И.И. Сорокина // Конструкции из композиционных материалов. – 2014. – вып.4(136). – С.8-14.
5. Астахов, М.В. К расчету на прочность металло-композитных соединений, применяемых при модернизации или ремонте сельскохозяйственной техники [Текст] / М.В. Астахов, И.И. Сорокина // Труды ГОСНИТИ. – 2015. – Т.119. – С.193-198.
6. Астахов, М.В. Проектирование и экспериментальное исследование соединения сталь-композит [Текст] / М.В. Астахов, И.И. Сорокина, П.И. Хотеев // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2011. – спец. выпуск «Перспективные конструкционные материалы и технологии». – С. 220-226.

7. Астахов, М.В. Сравнительный анализ расчета и статических испытаний металло-композитного соединения с дискретными связями [Текст] / М.В. Астахов, И.И. Сорокина / Известия вузов. Машиностроение. – 2014. – №10(655). – С.9-16.

Features of strength calculation of metal-composite flange connections used in the repair of thin-walled units of agricultural equipment

M.V. Astahov, doctor techn. Sciences, Professor
(Kaluga Branch VPO «Moscow State Technical University . Bauman», 8 (960)
518-26-73, mvastahov@gmail.com)

I.I. Sorokin, Senior Lecturer
(Kaluga Branch VPO «Moscow State Technical University . Bauman», 8 (910)
707-77-34, sorokina-i@yandex.ru)

Annotation. Relevance of application of the polymeric composite materials (PCM) in agricultural mechanical engineering designs is highlighted. Calculation of a metal-composite joint with using special fasteners on the example of the bunker filled with fine-grained substance is offered. As a result the recommendations about application of the offered mathematical model in the engineering calculation in the first approximation are made.

Keywords: polymeric composite materials, strength analysis, metal-composite joint, fastener, repair.

References

1. Astakhov, M.V. Possibilities of use of composite materials at modernization and repair of agricultural machinery [Text] / M.V. Astakhov, I.I. Sorokina // Proceedings GOSNITI. – 2015. – V.118. – P. 201-205. (Russian).

2. Sorokina, I.I. Use prospect of polymer composite materials with adding nanocrystalline powders of aluminium oxide when designing and repairing agriculture equipment [Text] / I.I. Sorokina, M.V. Astakhov // Metall technology – 2012. – Issue12. – P.18-20. (Russian).

3. Handbook of composites In 2 vol. V.2 / edited by J. Lubin; translated by. A. B. Geller and others; ed. by B. E. Geller. – M.: Machine building, 1988. – 584 p. (Russian).

4. Astakhov, M.V. Calculations of strength of metal-composite connections with discrete joints [Text] / M.V. Astakhov, I.I. Sorokina // Constructions from composite materials. - 2014. – issue 4(136). – P.8-14. (Russian).

5. Astakhov, M.V. The calculation of the strength of metal-composite joints used for the improvement or repair of agricultural machinery [Text] / M.V. Astakhov, I.I. Sorokina // Proceedings GOSNITI. – 2015. – V.119. – P. 193-198. (Russian).

6. Astakhov, M.V. Design and experimental testing of steel to composite bonds [Text] / M.V. Astakhov, I.I. Sorokina, P.I. Khoteev // Moscow State Technical University n.a. Bauman Bulletin. Ser. “Mechanical Engineering”. – 2011. – Special issue “Promising construction materials and technologies”. – P. 220-226. (Russian).

7. Astakhov, M.V. Comparative analysis of the calculations and statistical testing of a metal to composite bond with discrete bonds [Text] / M.V. Astakhov, I.I. Sorokina // Higher Level Institution News. Mechanical engineering. – 2014. – Issue 10(655). – P. 9-16.