

УДК 620.22: 620.17

Сравнительный анализ расчета и статических испытаний металло-композитного соединения с дискретными связями

М.В. Астахов, И.И. Сорокина

Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, 248000, Калуга, Российская Федерация, Баженова ул., д. 2.

Comparative analysis of calculation and static tests of a metal-composite joint with discrete bonds

M.V. Astakhov, I.I. Sorokina

Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, Bazhenova str., 2, 248000, Kaluga, Russian Federation.

@ e-mail: mvastahov@gmail.com, Sorokina-I@yandex.ru

i Приведено сравнение результатов статических испытаний металло-композитного соединения сталь-композит с результатами теоретических расчетов на прочность, выполненных известными методами строительной механики с целью создания достаточно простых инженерных подходов для проектирования изучаемых соединений. Рассмотрена прочность соединений, состоящих из стальных листовых деталей, которые с помощью крепежных элементов копьеобразной формы и дополнительных клеевых слоев соединены с деталями из полимерных композиционных материалов. На основании экспериментальных данных предложен достаточно простой проекторно-вочный алгоритм для оценки прочности рассматриваемых соединений. Приведен пример сравнительного расчета соединения сталь-композит, которое подвергалось статическим испытаниям до разрушения.

Ключевые слова: расчет на прочность, металло-композитное соединение, крепежный элемент.

i To create fairly simple engineering approaches to the design of steel-composite joints, the results of static tests are compared with the results of strength analysis made by known theoretical methods of structural mechanics. The strength of joints consisting of steel sheet parts connected with polymer composite parts by V-fasteners and using additional adhesive layers is studied. On the basis of the experimental data, a sufficiently simple design algorithm for evaluating the strength of the joints under study is developed. An example of the comparative calculation of the steel-composite joint, which has been subjected to static tests to failure, is presented.

Keywords: strength analysis, metal-composite joint, fastener.

Широкое применение полимерных композиционных (композитных) материалов (ПКМ) в машиностроении обусловлено резким снижением металлоемкости и, как следствие, массы изделия, увеличением коррозионной стойкости и ремонтпригодности, а следовательно, значительным уменьшением энергоемкости производства и улучшением его экологично-

сти, связанным с тепловым загрязнением тропосферы.

Полная замена металлических, чаще всего стальных, элементов машин на композиционные на данном этапе развития инженерного дела невозможно из-за сложной технологии изготовления стыковочных элементов разных агрегатов. Поэтому разработка методов проек-

тирования и изготовления стальных, соединяющих композитные агрегаты, узлов является актуальной задачей [1, 2].

Цель работы — исследование соединений деталей, изготовленных из ПКМ, со стальными элементами конструкций [3–6].

Для применения полученных теоретических и экспериментальных результатов на практике необходим простой, но достаточно эффективный метод расчета разработанного нового соединения сталь-композит на прочность.

Поскольку изучаемое соединение при эксплуатации, как правило, находится в сложном напряженном состоянии, рассмотрим на основе принципа независимости действия сил несколько простых состояний данного соединения.

Разрыв соединения сталь-композит под действием растягивающей силы F (рис. 1). Исследования, проведенные в работе [5] для рассматриваемого случая нагружения, позволили вывести эмпирическую форму для максимальной разрушающей силы F_{\max} , H ,

$$F_{\max} = -923,245 + 344,43a + 58,25l_3 - 6,69al_3, \quad (1)$$

где a — ширина лопатки КЭ, мм; l_3 — глубина (заглубления) внедрения КЭ в ПКМ, мм.

Выражение (1) справедливо при следующих ограничениях:

- ширина лопатки КЭ варьируется в пределах 5...8 мм;



Рис. 1. Соединение стального крепежного элемента (КЭ) 1, состоящего из плоской копьобразной лопатки и цилиндрического стержня, и части детали 2 из ПКМ

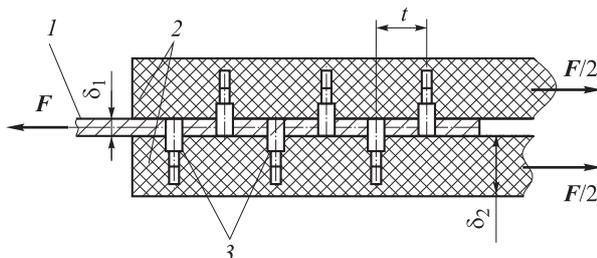


Рис. 2. Схема исследования на срез КЭ: 1 — стальная пластина; 2 — деталь из ПКМ; 3 — КЭ

- глубина внедрения стального КЭ в ПКМ — 18...25 мм.

Анализ формулы (1) показывает, что увеличение ширины лопатки a приводит к существенному росту F_{\max} , а увеличение глубины внедрения КЭ l_3 не оказывает существенного воздействия на рост F_{\max} .

Срез КЭ в соединении сталь-композит под действием силы F , растягивающей металлокомпозитное соединение (рис. 2). На основании статистической обработки результатов эксперимента [3] получен безразмерный коэффициент, отражающий влияние геометрии расположения КЭ на прочность рассматриваемого соединения (см. таблицу), связанную с началом разрушения (первый разрушенный КЭ соединения соответствует силе F_p).

Значения коэффициента K_p

Группа образцов (расположение плоскости лопаток КЭ к прикладываемой нагрузке)	Среднее значение F_p , кН	Значение коэффициента K_p
Под углом 90°	12,1	1,00
Под углом 0°	13,9	1,15
Под углами (поочередно) либо +45°, либо -45°	13,7	1,14
Под углом 45°, параллельно друг другу	16,9	1,4

Разделение образцов на группы (см. таблицу) проводилось в зависимости от ориентации лопатки КЭ в теле ПКМ по отношению к прикладываемой нагрузке.

Значения K_p были получены для конкретного соединения деталей 2 из ПКМ со стальной деталью 1, показанном на рис. 3.

Поскольку во время испытаний наблюдался срез первого (слева) КЭ у свободного конца стального листа в начале разрушения (рис. 4), при расчете данного соединения предлагается выполнять стандартный инженерный расчет на срез, вводя коэффициент K_p , а также учитывать возможное разрушение соединения по площадке, перпендикулярной силе F .

Теоретические расчеты и экспериментальные исследования показывают, что КЭ, расположенные вдоль действия силы F , нагружены неодинаково [7]. Поэтому далее для уточнения теоретических расчетов и построения более корректной математической модели предлагается учитывать действие внутренних сил в КЭ путем решения статически неопределимой задачи (см. рис. 2) методом сил с введением в ко-

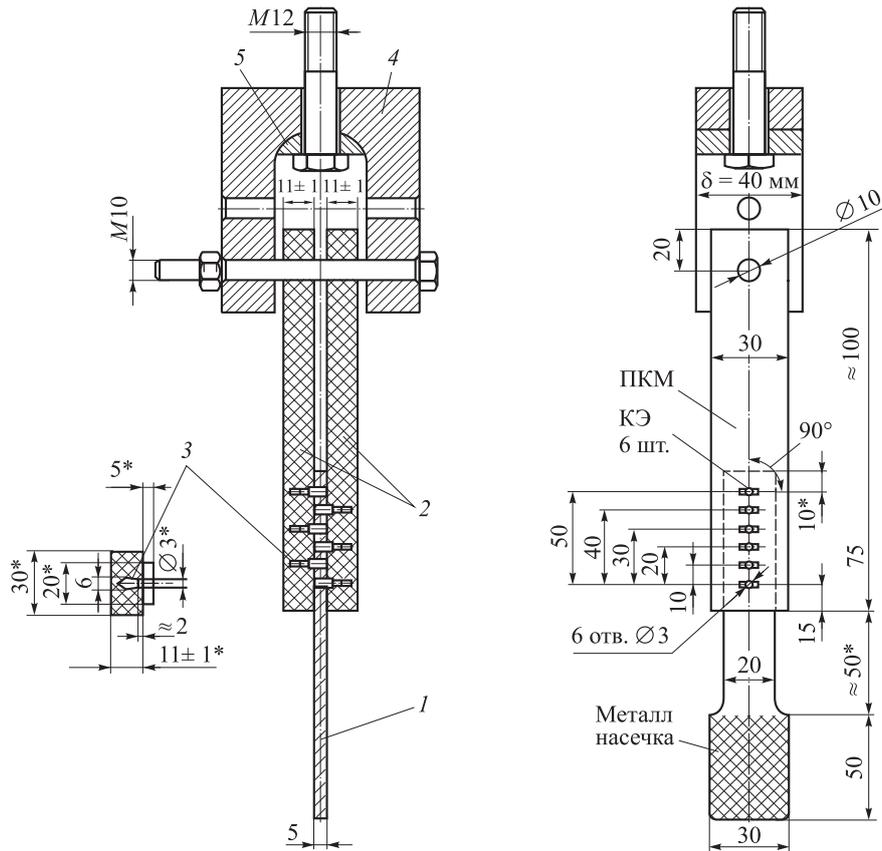


Рис. 3. Приспособление и образец для исследования срезающей силы в металл-композитном соединении: 1 — стальная пластина; 2 — пластины из ПКМ; 3 — КЭ; 4 — корпус приспособления; 5 — центрирующий элемент

эффиценты системы канонических уравнений коэффициента податливости.

Согласно [8] проектировочный расчет соединения сталь-композит состоит в выборе параметров соединения, удовлетворяющих следующим условиям прочности: на срез КЭ; на смятие КЭ и соединяемых им деталей; на срез детали до ее края или до следующего ряда КЭ; на разрушение деталей по ослабленному сечению от ее растяжения или сжатия, а также разрушение адгезионного соединения листов ПКМ со стальным листом при осевом нагружении.

Условие прочности на срез КЭ. Наиболее вероятное разрушение рассматриваемого соединения — это срез КЭ:

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{ср}}}{A} \leq (\tau_{\text{adm}})_{\text{ср}}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{ср}}$ — перерезывающая сила, действующая в КЭ, которую в дальнейшем будем учитывать с поправочными коэффициентами K_p и K — коэффициентом перенапряжения КЭ в рассматриваемом ряду (чаще всего в первом от конца стального листа КЭ), N ; A — площадь поверхности среза КЭ, $A = n\pi d^2/4$; мм^2 ; n — число КЭ; d — диаметр срезаемой части КЭ, мм ;

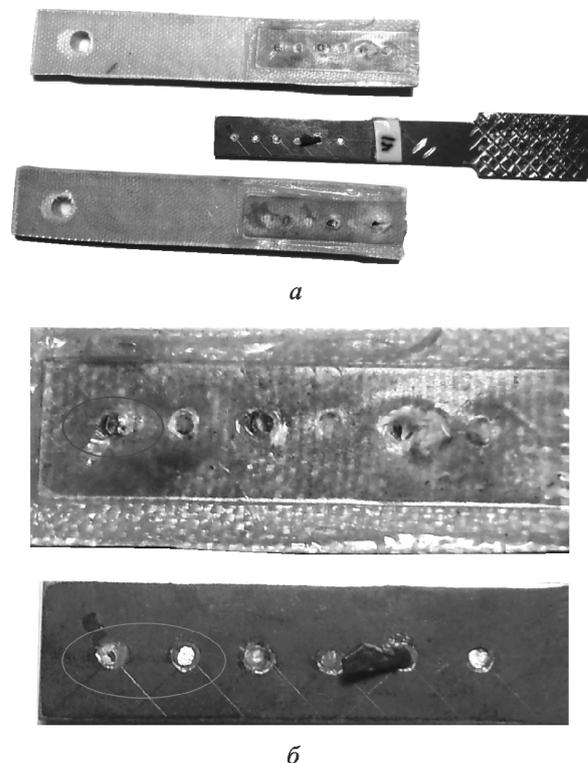


Рис. 4. Образец металл-композитного соединения после разрушения (а) и вид разрушения — срез с вырывом КЭ (б)

$(\tau_{adm})_{cp}$ — допускаемое напряжение материала КЭ на срез, МПа.

Условие прочности на смятие материала стального листа

$$\sigma_{1cm} = \frac{N_1}{\delta_1 d} \leq (\sigma_{adm})_{1cm}. \quad (3)$$

Здесь N_1 — продольная сила в листе стали, Н; δ_1 — толщина стальной детали, мм; $(\sigma_{adm})_{1cm}$ — допускаемое напряжение смятия стальной детали.

Условие прочности на смятие ПКМ является довольно сложной характеристикой. В настоящее время не существует единого мнения даже о способе ее экспериментального определения [9]. Для проектировочного расчета в первом приближении можно воспользоваться эмпирической зависимостью, полученной в работе [9] для квазиизотропного стеклопластика (при расположении слоев ПКМ в нескольких направлениях значения механических характеристик будут находиться между значениями для продольной и поперечной деформаций, а ориентация слоев ПКМ в четырех направлениях $0/90^\circ/\pm 45^\circ$ позволяет считать полученный материал изотропным):

$$\sigma_{2cm} = 325 - 25 \frac{d}{\delta_2} \leq (\sigma_{adm})_{2cm}, \quad (4)$$

где σ_{2cm} — напряжение смятия детали из ПКМ, МПа; δ_2 — толщина детали из ПКМ, мм (см. рис. 2); d — диаметр КЭ, мм; $(\sigma_{adm})_{2cm}$ — допускаемое напряжение смятия детали из ПКМ, МПа (см. рис. 2).

Условие прочности на срез от КЭ до края детали (или до следующего ряда КЭ). В дискретных соединениях обычно рассматривают прочность на срез от КЭ до края детали (или до следующего ряда КЭ). При расчете клеештифтовых соединений на срез это условие можно не учитывать, если отношение расстояния между рядами КЭ (или до края детали) t' и диаметра КЭ d подчиняется ограничению

$$t' / d \geq 2,8 \dots 6. \quad (5)$$

Разрушение деталей по ослабленному сечению. Ослабленным сечением является сечение в месте расположения КЭ. Условие прочности имеет вид

$$\sigma_{pi} = \frac{N_i}{A_i} = \frac{N_i}{\delta_i (b_i - n_i d_i)} \leq (\sigma_{adm})_{pi}. \quad (6)$$

Здесь N_i — продольная внутренняя сила растяжения (сжатия), Н; A_i — площадь соединяемой детали в опасном сечении, мм²; b_i , δ_i —

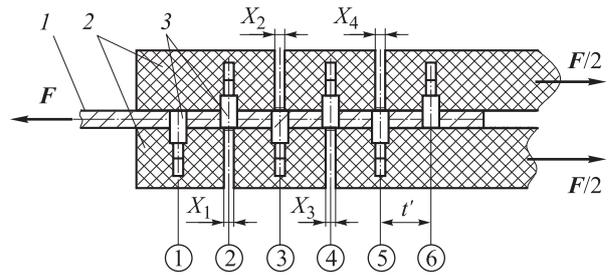


Рис. 5. Основная система метода сил для соединения сталь-композит:

- 1 — стальная пластина; 2 — листы из ПКМ;
- 3 — крепежные элементы (КЭ);
- ①–⑥ — порядковый номер КЭ

ширина и толщина соединяемых деталей, мм; n — число КЭ в одном поперечном ряду; $(\sigma_{adm})_{pi}$ — допускаемое напряжение при растяжении (сжатии) материала деталей, МПа; i — номер исследуемой детали.

Уточнение условия прочности на срез КЭ. Основопологающим при проектировании металло-композитного соединения (см. рис. 3) является расчет КЭ на срез на основе выражения (2), в котором необходимо учитывать как расположение лопатки относительно оси, совпадающей с линией действия растягивающих сил F с помощью коэффициента K_p , так и податливость КЭ, которую обозначим аналогично [7] C_n , где n — номер КЭ в продольном ряду.

Приняв коэффициент перенапряжения $K = Q/F$ (Q — расчетная перерезывающая сила в КЭ), воспользуемся методом сил для определения Q и вывода уточненной формулы расчета КЭ на срез.

Основная система метода сил для заданной системы (см. рис. 2) с учетом конструкции образца для исследований (см. рис. 3) показана на рис. 5.

Система канонических уравнений метода сил для основной системы, представленной на рис. 5, имеет вид

$$\begin{cases} \delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 + \delta_{13}X_3 + \delta_{14}X_4 + \Delta_{1F} = 0; \\ \delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 + \delta_{23}X_3 + \delta_{24}X_4 + \Delta_{2F} = 0; \\ \delta_{31}X_1 + \delta_{32}X_2 + \delta_{33}X_3 + \delta_{34}X_4 + \Delta_{3F} = 0; \\ \delta_{41}X_1 + \delta_{42}X_2 + \delta_{43}X_3 + \delta_{44}X_4 + \Delta_{4F} = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Эпюры внутренних продольных сил $N_1 - N_4$ и N_F от единичных сил $X_1 - X_4$ и внешней нагрузки F показаны на рис. 6.

Далее внутренние поперечные силы и изгибающие моменты будут учитываться податливостью.

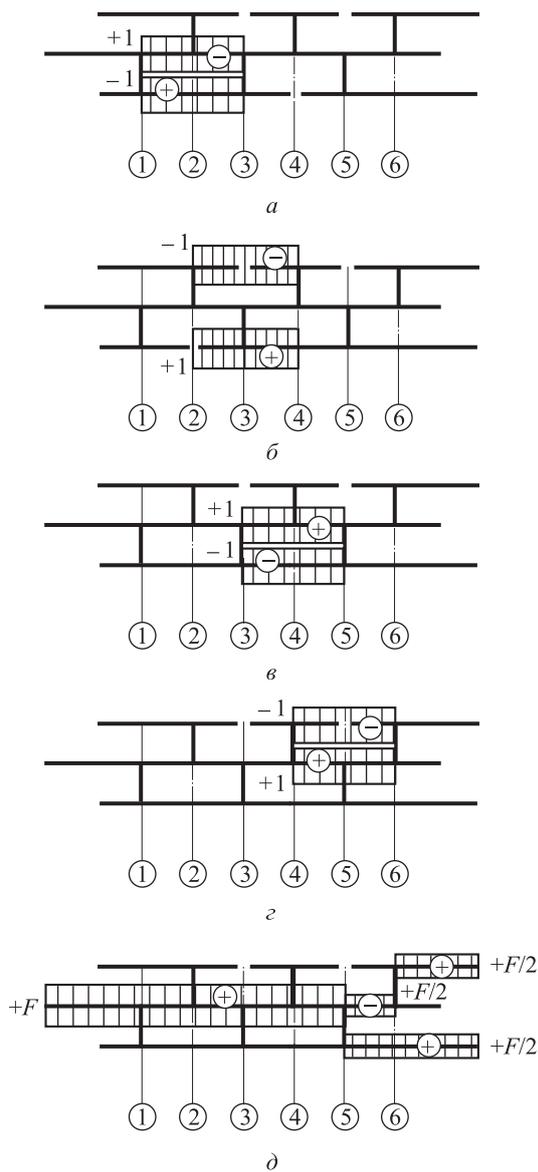


Рис. 6. Эпюры $N_1 - N_4$ (а-в) и N_F (д) от единичных сил $X_1 - X_4$ и нагрузки F в основной системе

Согласно [7] коэффициенты системы канонических уравнений описываются следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \delta_{11} &= 2(\Pi_1 + \Pi_2) + C_1 + C_2; & \delta_{12} &= \delta_{21} = \Pi_1; \\ \delta_{13} &= \delta_{31} = -C_3; & \delta_{14} &= \delta_{41} = 0; & \Delta_{1F} &= 2F\Pi_1; \\ \delta_{22} &= 2(\Pi_1 + \Pi_2) + C_2 + C_4; & \delta_{23} &= \delta_{32} = \Pi_1; \\ \delta_{24} &= \delta_{42} = -C_4; & \Delta_{2F} &= 2F\Pi_1; \\ \delta_{33} &= 2(\Pi_1 + \Pi_2) + C_3 + C_5; \\ \delta_{34} &= \delta_{43} = \Pi_1; & \Delta_{3F} &= F(2\Pi_1 + 1) + C_5; \\ \delta_{44} &= 2(\Pi_1 + \Pi_2) + C_4 + C_6; \\ \Delta_{4F} &= (1,5\Pi_1 + C_6)F. \end{aligned}$$

Здесь Π_1 — податливость детали 1, $\Pi_1 = t/(E_1 A_1)$; Π_2 — податливость детали 2, $\Pi_2 = t/(E_2 A_2)$; E_1, E_2 — модуль Юнга материала деталей 1 и 2 соответственно, МПа; C_n — податливость n -й связи (КЭ), мм/Н, $n = 1, 2, \dots, 6$.

Поскольку все связи представляют собой одинаковые по материалу и геометрии КЭ, будем считать, что $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = C_6 = C$.

Из работы [9]

$$C = C_{\Pi} / A_{\text{КЭ}},$$

где C_{Π} — коэффициент податливости КЭ (зависит от формы КЭ), мм³; $A_{\text{КЭ}}$ — площадь поперечного сечения цилиндрической части КЭ, $A_{\text{КЭ}} = \pi d^2 / 4$, мм².

Решение системы уравнений (7) на ЭВМ не представляет затруднений (например, способом Гаусса с использованием процедуры Халецкого). Полученные корни позволяют определить перерезывающие силы для всех КЭ:

$$\begin{aligned} Q_1 &= X_1; & Q_2 &= X_2; & Q_3 &= X_1 - X_3; & Q_4 &= X_2 - X_4; \\ Q_5 &= X_3 - 0,5F; & Q_6 &= X_4 - 0,5F. \end{aligned}$$

Для максимального $Q_i = Q_{\text{max}}$ находим коэффициент $K = F / Q_{\text{max}}$.

Окончательно, условие прочности на срез КЭ (2) имеет вид

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{K Q_{\text{ср}}}{K_{\text{р}} A} \leq (\tau_{\text{adm}})_{\text{ср}}. \quad (8)$$

Разрушение адгезионного соединения листов ПКМ со стальным листом при осевом нагружении. Прочность адгезионного соединения склеенных листов ПКМ со стальным листом при осевом нагружении в первом приближении можно определить по формуле

$$\tau_{\text{к}} = F_{\text{к}} / A_{\text{к}} \leq \tau_{\text{к адм}}. \quad (9)$$

Здесь $\tau_{\text{к}}$ — касательные напряжения в слое клея, МПа; $F_{\text{к}}$ — сдвигающая листы сила, входящая в $F_{\text{р}}$; $A_{\text{к}}$ — площадь основания, $A_{\text{к}} = (bl - n\pi d^2 / 4)$, где l — длина склеенных частей деталей 1 и 2, мм²; $\tau_{\text{к адм}}$ — допускаемое напряжение клея на срез, МПа.

Тогда простейшей математической моделью для расчета на прочность соединения, показанного на рис. 2, может служить система (10), состоящая из алгебраических выражений (8), (3), (4), (6), (1), (9) с некоторыми ограничениями: число КЭ в верхнем ряду равно числу КЭ в нижнем и общее число КЭ n — четное; отношение $t'/d \geq 2,8 \dots 6$ (см. (5)); ширина лопатки КЭ варьируется в пределах 5...8 мм, а глубина

внедрения стального КЭ в ПКМ составляет 18...25 мм:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{cp} = \frac{KQ_{cp}}{K_p A} \leq (\tau_{adm})_{cp}; \\ \sigma_{1cm} = \frac{N_1}{\delta_1 d} \leq (\sigma_{adm})_{1cm}; \\ \sigma_{2cm} = 325 - 25 \frac{d}{\delta_2} \leq (\sigma_{adm})_{2cm}; \\ \sigma_{pi} = \frac{N_i}{\delta_i (b_i - n_i d_i)} \leq (\sigma_{adm})_{pi}; \\ F_{max} = -923,245 + 344,43a + 58,25l_3 - 6,69al_3; \\ \tau_k = \frac{F_k}{A_k} \leq \tau_{kadm}. \end{array} \right. \quad (10)$$

Для нечетного n коэффициенты системы канонических уравнений (7) незначительно отличаются.

Экспериментальные исследования показали, что срез первого КЭ или вырыв первого КЭ происходят практически при одинаковом усилии

$$F_p = (0,8...1,2) F_{max}.$$

Таким образом, основным ориентиром расчета на прочность данного соединения можно считать срез первого КЭ с небольшим отрывом деталей 1 и 2 друг от друга (начало разрушения клеевого слоя).

Сравним результаты расчета на прочность для соединения, показанного на рис. 3, с результатами эксперимента (см. таблицу). Исходные данные [10]:

- для стальных деталей 1 и 3 (см. рис. 3):
предел прочности $\sigma_{u1,3} = 390$ МПа;
 $E_{1,3} = 2 \cdot 10^5$ МПа; $\tau_{u1,3} = 230$ МПа;
 $(\sigma_u)_{1cm} = (\sigma_u)_{3cm} = 390$ МПа;
- для деталей из ПКМ на основе стеклоткани и эпоксидной смолы ЭД-6
 $\sigma_{u2} = 110$ МПа; $E_2 = 10^3$ МПа;
- для эпоксидного клея
 $\tau_{uk} = 10$ МПа.

На основании выражения (2) определим силу, необходимую для среза шести КЭ:

$$Q_{cp} = \tau_{u3} A = \tau_{u3} n \frac{\pi d^2}{4} = 230 \cdot 6 \cdot \frac{3,14 \cdot 3^2}{4} = 9750 \text{ Н.}$$

На один КЭ в среднем приходится

$$Q = \frac{Q_{cp}}{6} = \frac{9750}{6} = 1625 \text{ Н.}$$

Определим сминающие силы для материала листа 1 (см. рис. 3), КЭ из (3), и для детали из ПКМ 2 с учетом (4):

$$N_1 = (\sigma_{u1,3})_{cm} \delta_1 d = 390 \cdot 5 \cdot 3 = 5850 \text{ Н;}$$

$$\sigma_{2cm} = 325 - 25 \frac{d}{\delta_2} = 325 - 25 \frac{3}{10} = 332,5 \text{ МПа;}$$

$$N_2 = \sigma_{2cm} \delta_2 d = 332,5 \cdot 10 \cdot 3 = 9975 \text{ Н.}$$

Поскольку $t'/d = 10/3 = 3,33$, условие прочности на срез от детали до края (или до следующего ряда) можно не учитывать.

Определим силу, при которой произойдет разрыв соединяемых листов:

$$N_1 = \delta_1 (b_1 - m_1 d_1) \sigma_{u1} = 5 \cdot (10 - 1 \cdot 3) \cdot 390 = 33150 \text{ Н;}$$

$$N_2 = \delta_2 (b_2 - m_2 d_2) \sigma_{u2} = 10 \cdot (30 - 1 \cdot 3) \cdot 110 = 29700 \text{ Н.}$$

На основании изложенного выше за расчетный случай принимаем срез КЭ с отрывом клеевого слоя между деталями 1 и 2 (см. рис. 3).

Найдем коэффициент перенапряжения K и отсюда определим наиболее нагруженный перерезывающей силой КЭ. Система уравнений (7) с найденными коэффициентами $\delta_{11} - \Delta_{4F}$ при условии, что коэффициент податливости $C_{II} \approx 0,3 \text{ мм}^3/\text{Н}$ получен для пирамидального КЭ, наиболее близкого по форме к рассматриваемому [9], имеет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} 22X_1 + 0,1X_2 - 4,24X_3 + 0,2F = 0; \\ 0,1X_1 + 22X_2 + 0,1X_3 - 4,24X_4 + 0,2F = 0; \\ -4,24X_1 + 0,1X_2 + 22X_3 + 0,1X_4 + 4,44F = 0; \\ -4,24X_2 + 0,1X_3 + 22X_4 + 4,39F = 0. \end{array} \right.$$

Решая ее на ЭВМ способом Гаусса с использованием процедуры Халецкого получаем:

$$X_1 = 0,05F; X_2 = 0,05F; X_3 = 0,21F; X_4 = 0,21F.$$

Тогда перерезывающие силы в КЭ:

$$\begin{aligned} Q_1 &= X_1 = 0,05F; & Q_2 &= X_2 = 0,05F; \\ Q_3 &= X_1 - X_3 = 0,16F; & Q_4 &= X_2 - X_4 = 0,16F; \\ Q_5 &= (X_3 - 0,5)F = 0,29F; \\ Q_6 &= (X_4 - 0,5)F = 0,29F. \end{aligned}$$

Отсюда $K_{max} = 0,29$ и $F = Q/K = 1625/0,29 = 5603 \text{ Н}$, т. е. шестой КЭ перегружен с коэффициентом $K_{max} = 0,29$ и разрушается при общей нагрузке на детали 1 и 2 $F = 5603 \text{ Н}$.

Так как разрушающаяся нагрузка F_p включает в себя и адгезионную составляющую F_k , из (10) найдем силу среза клеевого слоя:

$$F_k = \tau_{uk} A_k = \tau_{uk} \left(bl - n \frac{\pi d^2}{4} \right),$$

$$F_k = 10^7 \cdot 0,5 \left(0,02 \cdot 0,075 - 0,25 \cdot 6 \cdot 3,14 \cdot 0,003^2 \right) = 7290 \text{ Н.}$$

Тогда

$$F_p = F + F_k = 5\,603 + 7\,290 = 12\,893 \text{ Н.}$$

Разрушение соединения (см. рис. 3) согласно данным, приведенным в таблице (для группы № 1) наступает при $F_p = 12\,100 \text{ Н}$, что вполне приемлемо для проектировочных расчетов первого приближения.

Выводы

1. Для расчета на прочность изучаемого соединения сталь-композит введены поправочные коэффициенты: K_p — коэффициент, учитывающий расположение плоскости лопатки

КЭ по отношению к приложенной нагрузке, и K — коэффициент перенапряжения КЭ в рассматриваемом ряду.

2. На основе принципа независимости действия сил предложена математическая модель, удовлетворяющая всем условиям прочности, позволяющая выполнить достаточно простой проектировочный расчет данного соединения.

3. Проведена проверка предложенной модели путем сравнения результатов эксперимента и расчетных значений, которая подтвердила эффективность применения методики для проектировочных расчетов первого приближения.

Литература

- [1] Астахов М.В., Таганцев Т.В. Композиционные материалы в сельхозмашиностроении. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*, 2004, № 9, с. 42–44.
- [2] Черевашенко А.С. Конструктивно-технологические решения соединений металл-композит, работающих на отрыв. *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*, 2013, № 3(75), с. 14–20.
- [3] Сорокина И.И., Астахов М.В. Перспективы применения полимерных композитных материалов с добавлением нанокристаллических порошков оксида алюминия в конструировании и ремонте сельскохозяйственной техники. *Технология металлов*, 2012, № 12, с. 18–20.
- [4] Астахов М.В., Таганцев Т.В. Экспериментальное исследование прочности соединений сталь-композит. *Труды МГТУ им. Н.Э. Баумана. Математическое моделирование сложных технических систем*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, № 593, с. 125–130.
- [5] Сорокина И.И., Астахов М.В. Исследование влияния формы крепежного элемента на прочность соединения металл-композит. *Наука и образование МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2012, № 2. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/308514.html> (дата обращения 5 ноября 2013).
- [6] Астахов М.В., Сорокина И.И., Хотеев П.И. Проектирование и экспериментальное исследование соединения сталь-композит. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. Спец. вып. Перспективные конструкционные материалы и технологии*, 2011, с. 220–226.
- [7] Степин П.А. К расчету на срез соединений с прерывными связями. *Вестник инженеров и техников*, 1951, № 4, с. 175–179.
- [8] Василевский Е.Т., Двейрин А.З., Карпов Я.С., Кривенда С.П. Система экспериментального обеспечения расчета на прочность механических соединений деталей из композитов. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*, 2010, № 47, с. 42–52.
- [9] Карпов Я.С., Кривенда С.П., Рябков В.И. *Проектирование и конструирование соединений деталей из конструкционных материалов*. Харьков, Харьк. авиац. ин-т, 1997. 201 с.
- [10] Любин Дж., ред. *Справочник по композиционным материалам*. В 2 кн. Москва, Машиностроение, 1988. Кн. 1 — 448 с., кн. 2 — 584 с.

References

- [1] Astakhov M.V., Tagantsev T.V. Kompozitsionnye materialy v sel'khozmashinostroenii [Composite materials in agricultural]. *Traktory i sel'skokhoziaistvennyye mashiny* [Steel in translation]. 2004, no. 9, pp. 42–44.

- [2] Cherevashchenko A.S. Konstruktivno-tehnologicheskie resheniia soedinenii metall-kompozit, robotaiushchikh na otryv [Design and technological solutions of compounds of metal composite working on takeoff]. *Voprosy proektirovaniia i proizvodstva konstruktssii letatel'nykh apparatov* [Questions of design and production of aircraft structures]. 2013, no. 3(75), pp. 14–20.
- [3] Sorokina I.I., Astakhov M.V. Perspektivy primeneniia polimernykh kompozitnykh materialov s dobavleniem nanokristallicheskikh poroshkov oksida aliuminiia v konstruirovani i remonte sel'skokhoziaistvennoi tekhniki [Prospects of application of polymer composite materials with the addition of nanocrystalline aluminum oxide powders in the construction and repair of agricultural machinery]. *Tekhnologiia metallov* [Technology of metals]. 2012, no. 12, pp. 18–20.
- [4] Astakhov M.V., Tagantsev T.V. Eksperimental'noe issledovanie prochnosti soedinenii stal'-kompozit [Experimental study of the strength of connections steel-composite]. *Trudy MGTU «Matematicheskoe modelirovanie slozhnykh tekhnicheskikh sistem»* [Proceedings of the MGTU «Mathematical modeling of complex technical systems»]. 2006, no. 593, pp. 125–130.
- [5] Sorokina I.I., Astakhov M.V. Issledovanie vliianiia formy krepzhnogo elementa na prochnost' soedineniia metall-kompozit [Research of the influence of fastener's form on the strength of metal-composite joint]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU]. 2012, no. 2. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/308514.html> (accessed 5 November 2013).
- [6] Astakhov M.V., Sorokina I.I., Khoteev P.I. Proektirovanie i eksperimental'noe issledovanie soedineniia stal'-kompozit [Designing and Experimental Study of Steel-Composite Compound]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Mechanical Engineering]. *Spetsial'nyi vypusk Perspektivnye konstruksionnye materialy i tekhnologii* [Promising structural materials and technologies]. 2011, pp. 220–226.
- [7] Stepin P.A. K raschetu na srez soedinenii s preryvnymi sviaziami [On the calculation of the shear connections with discontinuous connections]. *Vestnik inzhenerov i tekhnikov* [Bulletin of engineers and technicians]. 1951, no. 4, pp. 175–179.
- [8] Vasilevskii E.T., Dveirin A.Z., Karpov Ia.S., Krivenda S.P. Sistema eksperimental'nogo obespecheniia rascheta na prochnost' mekhanicheskikh soedinenii detalei iz kompozitov [Experimental software system based on the strength of mechanical joints of composites]. *Otkrytye informatsionnye i komp'iuternye integrirovannye tekhnologii* [Public information and computer integrated technologies]. 2010, no. 47, pp. 42–52.
- [9] Karpov Ia.S., Krivenda S.P., Riabkov V.I. *Proektirovanie i konstruirovaniie soedinenii detalei iz kompozitsionnykh materialov* [Design and construction of parts made of composite compounds of the materials]. Kharkov, Khar'kovskii aviatsionnyi institute publ., 1997. 201 p.
- [10] *Spravochnik po kompozitsionnym materialam* [Handbook for composite materials]. Ed. Liubin Dzh., in 2 book. Moscow, Mashinostroenie publ., 1988. Book 1 – 448 p., book 2 – 584 p.

Статья поступила в редакцию 30.06.2014

Информация об авторах

АСТАХОВ Михаил Владимирович (Калуга) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Прикладная механика». Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана (248000, Калуга, Российская Федерация, Баженова ул., д. 2, e-mail: mvastahov@gmail.com).

СОРОКИНА Ирина Игоревна (Калуга) — старший преподаватель кафедры «Прикладная механика». Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана (248000, Калуга, Российская Федерация, Баженова ул., д. 2, e-mail: Sorokina-I@yandex.ru).

Information about the authors

ASTAKHOV Mikhail Vladimirovich (Kaluga) — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of «Applied Mechanics» Department. Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch of BMSTU, Bazhenova str., 2, 248000, Kaluga, Russian Federation, e-mail: mvastahov@gmail.com).

SOROKINA Irina Igorevna (Kaluga) — Senior Lecturer of «Applied Mechanics» Department. Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch of BMSTU, Bazhenova str., 2, 248000, Kaluga, Russian Federation, e-mail: Sorokina-I@yandex.ru).