

Проектирование узлов механических композитно-металлических соединений

Ларионова А.А.*, Дудченко А.А.***, Сергеев В.Н.***

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

*e-mail: a.larionova@inbox.ru

**e-mail: a_dudchenko@mail.ru

***e-mail: k603sergeev@mai.ru

Аннотация

Рассматривается методика аналитического решения задачи по определению параметров в переходной зоне стыка крыла для передачи нагрузки от композита к металлу. Разработанная методика позволяет определить рациональную длину переходной зоны стыка, которая зависит от величины нагрузок, диаметра болтов, материала металла и композита. Вначале определяется длина зоны включения. Затем в зависимости от диаметра болта или заклепки определяется необходимое количество рядов крепежа. Аналитический расчет проверен методом МКЭ. Показано хорошее совпадение результатов расчета.

Ключевые слова: механические соединения; аналитический расчет; металлические материалы; композиционные материалы; болты; заклёпки; иголки; метод конечных элементов

Введение

В настоящее время по-прежнему остается очень важным решение задачи, связанной с передачей усилий в месте стыка при переходе нагрузки от композитной панели к металлическому узлу. В таких очень нагруженных местах передача усилий осуществляется механическим способом с помощью болтовых и заклепочных соединений. Для рациональной конструкции соединения необходимо определить оптимальную длину переходной зоны, число рядов соединения, диаметр болтов или заклепок, расстояние между ними, подбор переходного металлического материала. При этом считается, что структура, свойства, геометрические характеристики и усилия в обшивке композитного кессона крыла известны.

Механические соединения имеют существенный недостаток, связанный со сверлением отверстий под болты и заклепки, что приводит к перерыванию волокон, концентрации напряжений в месте постановки болтов и ослаблению прочности и жесткости конструкции в этом месте. Однако, благодаря хорошим прочностным и жесткостным характеристикам при малом весе, композиционный материал (КМ) применяется в несущих элементах конструкций авиационной и космической техники. Существуют два основных вида соединений композитных элементов конструкций между собой и с другими материалами: адгезионные (клеевые), болтовые (в том числе и заклепочные) и игольчатые соединения. Игольчатые соединения используются для соединения композитных многослойных элементов, например, стрингеров с обшивкой и панелей к поясам лонжеронов. Рассмотрим более подробно болтовые и заклепочные соединения, которые применяются в местах передачи больших усилий. Большинство работ посвящено соединениям

металлических элементов, в которых не рассматриваются вопросы проектирования параметров соединения, особенно металло-композитных соединений, например работы [1, 2, 3].

Рассмотрим соединение металла и композита. Две пластины, расположенные параллельно, соединяются болтами или заклепками. Прочность таких соединений обеспечивается совместной работой всех элементов под воздействием внешних сил. Не будем учитывать начальные технологические напряжения. Приведем на рис.1 схему нагружения и разрушений механических соединений композитных элементов.

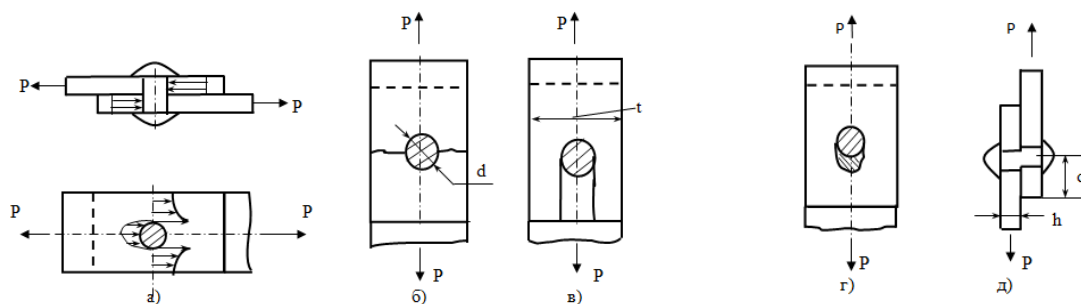


Рис.1.Схема нагружения и разрушений механических соединений композитных элементов.

На рис.1.а - показана схема передачи усилий, рис.1.б - разрыв по ослабленному сечению, рис.1.в - срез композита, рис.1.г - смятие композита, рис.1.д - срез крепежа. Характеристики прочности по всем перечисленным видам разрушения в основном определяются экспериментально. Для того, чтобы обеспечить разрушение по одной из форм, производится изменение расстояние образца t и расстояние от кромки образца до центра отверстия c . На прочность соединения влияют не только параметры соединения (рис.1), но и структура композита. Здесь это влияние не рассматривается.

1.Методика аналитического расчета.

1.1. Проектирование болтовых соединений в композитных конструкциях.

Главные преимущества болтовых соединений заключаются в их технологичности, дешевизне, а также слабой чувствительности к температурным и атмосферным воздействиям. Особенности образования болтовых соединений при передаче усилий от композитных панелей к металлическому узлу обусловлены спецификой материала. Параметры, определяющие несущую способность болтовых и заклепочных соединений в этом случае, зависят от:

- свойства материала (анизотропной жесткости и прочности структуры, механических свойств соединительных элементов, коэффициентов трения в соединении);
- строения структуры (ориентации и последовательности укладки слоев, толщины слоя, степени группировки слоев);
- параметров крепежа (вида крепежных элементов, типоразмеров, материала крепежа, характера посадки и пр.);
- конструктивных параметров и нагружения (параметров геометрии, видов соединения: болтового или заклепочного, с затяжкой или без, одно- или двухсрезного и т.д.).

Высоконагруженные конструкционные композиты, как правило, имеют сложную структуру, состоящую из большого числа тонких однонаправленных слоев, соответственным образом ориентированных по отношению друг к другу и к основным направлениям внешней нагрузки, за счет чего достигается требуемая степень жесткостных и прочностных свойств материала. На практике

обычно используются ортотропные структуры, которые симметричны относительно срединной плоскости композитной панели.

Реальные болтовые соединения обычно содержат от нескольких десятков болтов, размещенных в один или несколько рядов. В предположении о достаточной удаленности болтов друг от друга максимальная нагрузка такого соединения с удовлетворительной точностью определяется величиной прочности единичного отверстия, испытывающего контактное нагружение через болт.

Основные размеры, определяющие геометрию композитного образца - ширину t , расстояние от края c и толщину структуры h показаны на рис.1.

Недостаточная величина краевого расстояния и расстояния между болтами приводит к возникновению нежелательных типов разрушения, а именно: сдвигового и разрывного. Разрушение раскалыванием является следствием малого краевого расстояния и недостаточной доли поперечного упрочнения в структуре.

Влияние толщины материала является особенно существенным в соединениях без затяжки болтов и нагруженных через стержень, при этом наибольшая прочность соединения достигается при значениях h/d не ниже 1 и резко убывает при дальнейшем уменьшении этого параметра. Прочность болтовых соединений с затяжкой слабо чувствительна к изменению толщины композита.

Необходимо свести к минимуму зазор между болтом и отверстием и учитывать влияние затяжки болта. Наивысшая степень прочности наблюдается обычно при сильной затяжке болта, без затяжки – наименьшая. Прочность заклепочного соединения базируется между этими значениями.

Для волокнистых материалов уменьшение диаметра соединительного элемента уменьшает или устраняет эффект перерезания волокон, что может в некоторых случаях сохранять первоначальную прочность материала. Очень тонкие соединительные элементы представляют собой иголки с диаметром не более 1 мм и их применение рассмотрены в работе [4].

1.2. Расчет длины зоны включения в работу элементов конструкции при передаче нагрузок в месте их соединения.

Расчет рациональной длины зоны включения в работу элементов при передаче усилий от композитной панели к металлическому узлу построен на основе методики, изложенной в работе [5].

Рассмотрим задачу о растяжении симметричного по толщине трехслойного образца, в котором средний слой 2 композитный, а два наружных 1 и 3 – металлические и усилия передаются от композитного слоя к металлическому (рис.2).

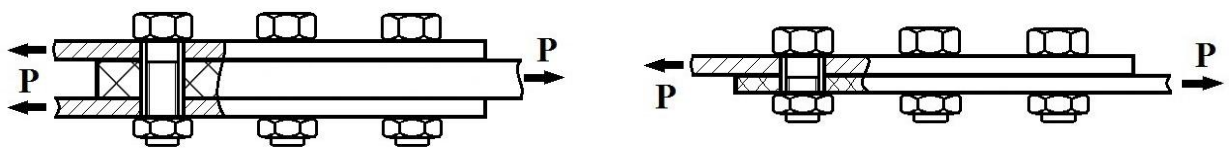


Рис.2. Типы соединений

По ширине образца напряжения считаются постоянными, причем толщины слоев $h_1 = h_3$. Запишем условия равновесия вдоль продольной оси ox и поперечной оси oz , то есть по длине и ширине образца соответственно (координата y направлена по высоте):

$$2(\sigma_{xm}h_{1m} + \sigma_{xk}h_{2k}) = P, 2(\sigma_{zm}h_{1m} + \sigma_{zk}h_{2k}) = 0 \quad (1)$$

Здесь P – усилие растяжения. Цифры в индексах соответствуют слоям. Ввиду симметрии пакета напряжения в слоях 1 и 3 одинаковые. Во всех слоях из условия совместности деформации ε_x и ε_z в направлении осей ox и oz будут постоянными по толщине. Выражая напряжения в (1) через деформации и определяя их, найдем искомые напряжения. Пренебрегая коэффициентом Пуассона в виду его малого влияния, напряжения в слоях примут вид:

$$\sigma_{xm} = \frac{0,5PE_{1m}}{E_{1m}h_{1m} + E_{2k}h_{2k}}; \quad \sigma_{xk} = \frac{0,5PE_{2k}}{E_{1m}h_{1m} + E_{2k}h_{2k}}. \quad (2)$$

Несмотря на то, что формулы (2) являются приближенными, они хорошо описывают напряженное состояние в слоях на некотором расстоянии от края. На краю образца, где композитный слой нагружен растягивающими напряжениями σ_{x2} , происходит включение в работу наружных слоев. Определим длину зоны включения в работу, считая, что напряжения и деформации по ширине образца вдоль координаты oz постоянны. Переменные напряжения в краевой зоне слоев будем обозначать $\tilde{\sigma}_{xi}, \tilde{\sigma}_{yi}$ и $\tilde{\tau}_i$. Между ними должны выполняться условия равновесия:

$$\frac{\partial \tilde{\sigma}_{xm}}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{\tau}_k}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial \tilde{\tau}_m}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{\sigma}_{yk}}{\partial y} = 0. \quad (3)$$

Уравнения (3) определяют дополнительное нагруженное состояние, возникающее на краю образца.

Ввиду того, что основное напряженное состояние, определяемое равенством (2), уравнивает внешнюю нагрузку, дополнительное напряженное состояние должно быть самоуравновешенным:

$$\tilde{\sigma}_{xm} h_m - \tilde{\sigma}_{xk} h_{2k} = 0. \quad (4)$$

Окончательно суммарные нормальные напряжения, действующие в продольных слоях, с учетом (4) принимают вид:

$$\sigma_{xm} = \frac{PE_{1m}}{2(E_{1m}h_{1m} + E_{2k}h_{2k})} + \tilde{\sigma}_{xk} \frac{h_{2k}}{h_{1m}};$$

$$\sigma_{xk} = \frac{PE_{2k}}{2(E_{1m}h_{1m} + E_{2k}h_{2k})} - \tilde{\sigma}_{xk}.$$

Выражая из (3) напряжения $\tau_i(x)$ и $\sigma_{yi}(x)$ через напряжение σ_{xi} , определяя функции интегрирования из удовлетворения условий контакта по толщине и используя вариационный принцип, получаем дифференциальное уравнение совместности деформаций для определения неизвестного напряжения $\tilde{\sigma}_{x2}(x)$, через которое выражены все остальные напряжения в виде:

$$\tilde{\sigma}_{xk}^{IV} - 2a^2 \tilde{\sigma}_{xk}'' + b^4 \tilde{\sigma}_{xk} = 0,$$

где
$$a^2 = \left(\frac{1}{3} \frac{(h_{2k})^3}{G_{2k}} + \frac{1}{3G_{1m}} \cdot h_{1m} \cdot (h_{2k})^2 \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\mu_{yx}}{E_{x2}} + \frac{\mu_{xy}}{E_{y2}} \right) \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot (h_{2k})^2 + h_{1m} \cdot (h_{2k})^2 \right) +$$

$$+ \frac{1}{6} \left(\frac{\mu}{E_{xm}} + \frac{\mu}{E_{ym}} \right) \cdot h_{1m} \cdot (h_{2k})^2,$$

$$b^4 = \frac{2 \cdot (h_{2k})^2 \cdot \left(\frac{1}{E_{xk} \cdot h_{2k}} + \frac{1}{E_{xm} \cdot h_{1m}} \right)}{B}, \quad (5)$$

$$B = \frac{1}{2 \cdot E_{yk}} \left(\frac{1}{5} \cdot (h_{2k})^5 - \frac{2}{3} \cdot (h_{2k})^4 \cdot (h_{1m} + h_{2k}) + (h_{2k})^3 \cdot (h_{1m} + h_{2k})^2 + \frac{1}{10 \cdot E_{ym}} \cdot (h_{1m})^3 \cdot (h_{2k})^2 \right),$$

E_{xm} - модуль упругости металлической конструкции (x - направление координаты),
 E_{xk} - модуль упругости композитной конструкции, G_1 - модуль сдвига в металле, G_2 - модуль сдвига в композите, μ – коэффициент Пуассона в металле, в композите μ_{xy} - коэффициент Пуассона, который характеризует сдвиг в плоскости xy , возникающий при растяжении образца вдоль оси x , μ_{yx} - коэффициент Пуассона, который характеризует сдвиг в плоскости xy , возникающий при растяжении образца вдоль оси y .

Анализ коэффициентов уравнения показывает, что $b^2 > a^2$, и длина зоны включения в работу равна $l_0 = \frac{2\pi}{k_2}$, (6)

где $k_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{b^2 - a^2}{2}}$. (7)

2. Проектирование параметров соединений.

Исследование влияния диаметра отверстия на прочность композита при смятии показывают, что она монотонно уменьшается с увеличением отношения d/h .

Прочность на смятие определяется по формуле:

$$\sigma_{см} = \frac{P}{dh},$$

где P – растягивающая сила, $\sigma_{см}$ – предельное значение напряжения смятия материала.

Прочность соединения при срезе определяется в основном межслойным сдвигом или сдвигом в плоскости армирования композита:

$$\tau_{cp} = \frac{P}{2ch}, \quad (8)$$

где c – расстояние от центра отверстия до края соединения (рис.1), h – толщина слоя.

При проектировании многорядных нахлесточных соединений необходимо знать распределение усилий в силовых точках, которое зависит от числа рядов точечных связей, шага между рядами, соотношения жесткостей соединяемых элементов и податливости связей. Увеличение податливости связи (уменьшение диаметра крепежа) приводит к более равномерному распределению усилий по рядам, причем податливость соединяемых элементов должна быть одинаковой.

Основными проектировочными параметрами при заданной толщине h соединяемых элементов будут: диаметр заклепки или болта d , шаг между ними t , минимальное расстояние от края образца до центра отверстия под крепеж c , количество рядов i и расстояние между ними t_c . Приближенные конструктивные параметры соединения определяются из условия его равнопрочности на все виды разрушения, но это не дает найти необходимое количество рядов.

2.1. Расчеты для стальных (30ХГСА) и титановых (BT16) болтов.

Примем следующие характеристики для композита, титана, стали и геометрические параметры. Исходные данные: композит – углепластик с заданной укладкой волокон ($0^\circ, +45^\circ, -45^\circ, 0^\circ, 0^\circ, -45^\circ, +45^\circ, 0^\circ$) и свойствами структуры

материала: модуль вдоль оси x - $E_x = 18000 \text{ кгс/мм}^2$, модуль вдоль оси y - $E_y = 900 \text{ кгс/мм}^2$, модуль сдвига - $G = 650 \text{ кгс/мм}^2$, больший коэффициент Пуассона $\mu_{yx} = 0,3$;

сталь: модуль упругости - $E_C = 20000 \text{ кгс/мм}^2$, модуль сдвига - $G_C = 7200 \text{ кгс/мм}^2$, коэффициент Пуассона - $\mu_C = 0,3$;

титан: модуль упругости - $E_T = 11200 \text{ ГПа}$, модуль сдвига - $G_T = 41 \text{ ГПа}$, коэффициент Пуассона - $\mu_T = 0,32$;

$\varepsilon_x = 0,004$ - предельная деформация структуры, учитывающая отсутствие растрескивания слоев композита, $b = 20 \text{ мм}$ - расстояние между болтами в ряду.

Найдем нагрузку в панели N_x , зная предельное значение деформации ε_x

$$N_x = E_x \varepsilon_x b = 360 \text{ кгс/мм.}$$

Используя исходные данные, определяем зоны включения в работу при толщине композита $h = 5 \text{ мм}$ и $h = 10 \text{ мм}$.

Для стальных болтов, используя формулы(5), (6), (7) определяем длину зоны включения в работу в случае односрезных болтов:

- при толщине композита $h = 5 \text{ мм}$ зона включения в работу $l_0 = 105 \text{ мм}$;
- при толщине композита $h = 10 \text{ мм}$ зона включения в работу $l_0 = 212 \text{ мм}$.

Для титановых болтов аналогичные расчеты дают результат:

- при толщине композита $h = 5 \text{ мм}$ зона включения в работу $l_0 = 119 \text{ мм}$,
- при толщине композита $h = 10 \text{ мм}$ зона включения в работу $l_0 = 233 \text{ мм}$.

Определив длину зоны включения в работу, находим, какое количество рядов болтов необходимо при данной длине и какую толщину металла необходимо взять,

чтобы конструкция была равнопрочной и не разрушилась. Найдем необходимую толщину металла.

1. Определим силу, которая действует на болт при его срезе от композитной панели вдоль зоны соединения по формуле

$$P_x = E_x \varepsilon_x h b = 7200 \text{ кгс.}$$

2. Определим погонное усилие в панели N_x на единицу ширины

$$N_x = P_x / b = 360 \text{ кгс/мм.}$$

3. Определяем напряжение в композите

$$\sigma = E_x \cdot \varepsilon_x = 72 \text{ кгс/мм}^2.$$

4. Определяем напряжение в металле при заданной деформации ε_x

Для стали $\sigma_c = E_c \varepsilon_x = 80 \text{ кгс/мм}^2$.

5. Определяем необходимую толщину металла, учитывая, что погонное усилие в композите и металле одинаковы, т.е. $h_c = N_x / \sigma_c = 4,5 \text{ мм}$, что обеспечивает одинаковую податливость материалов в соединении.

Выберем наиболее эффективный диаметр болтов соединения, сравнивая работу болтов с диаметрами 4, 5 и 6 мм. При этом рассмотрим односрезные и двухсрезные болты. Односрезный стык – в случае двухслойного пакета и двухсрезный для симметричного трехслойного соединения.

Проведем расчет односрезного соединения для болта с диаметром $d = 4 \text{ мм}$. Для этого диаметра предельное значение $P_{\text{раз}} = 834 \text{ кгс}$ и площадь сечения болта

$$S_{\text{сеч}} = 12,6 \text{ мм}^2 [6].$$

Для этого сечения предельный сдвиг равен $\tau_{\text{пред}} = \frac{P_{\text{разр}}}{S_{\text{сеч}}} = 67 \text{ кгс/мм}^2$.

Определим количество рядов болтов, которое необходимо, чтобы воспринимать максимальное усилие $N_x = 7200 \text{ кгс}$ при выполнении условия равенства касательных напряжений в каждом болту ряда

$$m = \frac{N_x}{P} = \frac{7200}{834} = 8,6 \approx 9.$$

Получаем, что при $d = 4 \text{ мм}$ на длине $l_0 = 105 \text{ мм}$ необходимо поставить 9 рядов. Расстояние между болтами вычисляется по следующей формуле:

$$t_c = \frac{(l_0 - 2c)}{m}.$$

Отступ от края зависит от прочности на срез композитного материала, где c берется из формулы (8). Принимая $c = 8 \text{ мм}$, расстояние между рядами равно $t_c = 9,88 \text{ мм}$. Для двухсрезных болтов расчет аналогичен.

В таблице 1 приведены полученные результаты расчетов.

Таблица 1. Результаты расчета болтовых соединений.

Диаметр болта	Односрезный/ двухсрезный болт	Длина зоны включения в работу	Количество рядов
$d = 4\text{мм}$	Односрезный болт	$l = 105\text{мм}$ при $h = 5\text{мм}$ $l = 212\text{мм}$ при $h = 10\text{ мм}$	9 17
	Двухсрезный болт	$l = 105\text{мм}$ при $h = 5\text{мм}$ $l = 212\text{мм}$ при $h = 10\text{ мм}$	5 9
$d = 5\text{мм}$	Односрезный болт	$l = 105\text{мм}$ при $h = 5\text{мм}$ $l = 212\text{мм}$ при $h = 10\text{ мм}$	6 11
	Двухсрезный болт	$l = 105\text{мм}$ при $h = 5\text{мм}$ $l = 212\text{мм}$ при $h = 10\text{мм}$	3 6
$d = 6\text{мм}$	Односрезный болт	$l = 105\text{мм}$ при $h = 5\text{мм}$ $l = 212\text{мм}$ при $h = 10\text{ мм}$	4 8
	Двухсрезный болт	$l = 105\text{мм}$ при $h = 5\text{мм}$ $l = 212\text{мм}$ при $h = 10\text{ мм}$	2 4

Из расчетов видно, что наиболее эффективно применять двухсрезные болты, если количество рядов составляет порядка 3-6 рядов. Для проверки аналитических расчетов был проведен расчет МКЭ и сравним результаты, которые приведены в разделе 3.

2.2. Расчет и проектирование заклепочного соединения.

Примем следующие характеристики для композита, алюминия и геометрические параметры для расчета. Исходные данные: композит – углепластик с заданной укладкой волокон ($0^\circ, +45^\circ, -45^\circ, 0^\circ, 0^\circ, -45^\circ, +45^\circ, 0^\circ$) и свойствами структуры материала: модуль вдоль оси x - $E_x = 18000\text{кгс/мм}^2$, модуль вдоль оси y - $E_y = 900\text{кгс/мм}^2$, модуль сдвига - $G = 650\text{кгс/мм}^2$, больший коэффициент Пуассона $\mu_{yx} = 0,3$;

алюминий: модуль упругости - $E_C = 26000 \text{ кгс/мм}^2$, модуль сдвига - $G_C = 7200 \text{ кгс/мм}^2$, коэффициент Пуассона - $\mu_C = 0,33$;

Максимальное усилие, которые могут воспринимать заклепки:

$$N_x = 1120 \text{ кгс/мм.}$$

Длина зоны включения в работу $l_0 = 157 \text{ мм}$ при толщине композита $h = 2 \text{ мм}$

Проведем расчеты для заклепок различных диаметров по выше приведенной методике, результаты расчета приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты расчета заклепочных соединений.

Диаметр заклепки	Односрезная/двухсрезная заклепка	Длина зоны включения в работу	Количество рядов
$d = 3,5 \text{ мм}$	Односрезная	$l = 157 \text{ мм}$ при $h = 2 \text{ мм}$	10
	Двухсрезная	$l = 157 \text{ мм}$ при $h = 2 \text{ мм}$	5
$d = 4 \text{ мм}$	Односрезная	$l = 157 \text{ мм}$ при $h = 2 \text{ мм}$	8
	Двухсрезная	$l = 157 \text{ мм}$ при $h = 2 \text{ мм}$	4

3. Проверка методом МКЭ результатов, полученных аналитическим расчетом.

3.1. Расчет болтовых соединений.

Расчет механических соединений производился с использованием программы FEMAP [7].

1. Рассмотрим трехслойное сечение, скрепляемое двухсрезным стальным болтом из 30ХГСА, диаметром $d = 4 \text{ мм}$ при толщине композита $h = 5 \text{ мм}$. Аналитический расчет показал, что напряжение в болте $\tau_{cp} = 67 \text{ кгс/мм}^2$, расчет МКЭ показал $\tau_{cp} = 75 \text{ кгс/мм}^2$ (рис.3). Погрешность расчета составила 8%. Но главное, напряжение среза в болтах по длине соединения одинаково.

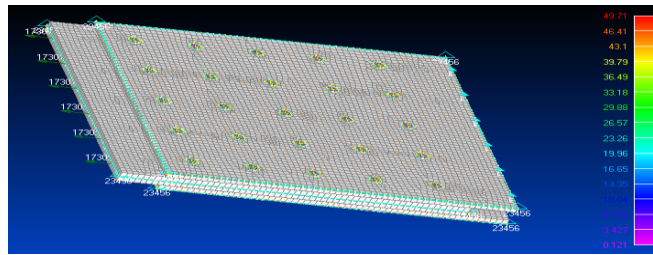


Рис. 3. Стальные двухсрезовые болты из 30ХГСА $d = 4$ мм.

2. Рассмотрим трехслойное сечение, скрепляемое двухсрезовым стальным болтом из 30ХГСА, диаметром $d = 5$ мм при толщине композита $h = 5$ мм. Аналитический расчет показал, что напряжение в болте $\tau_{cp} = 65$ кгс/мм², расчет МКЭ показал $\tau_{cp} = 72$ кгс/мм² (рис.4). Погрешность расчета составила 8%.

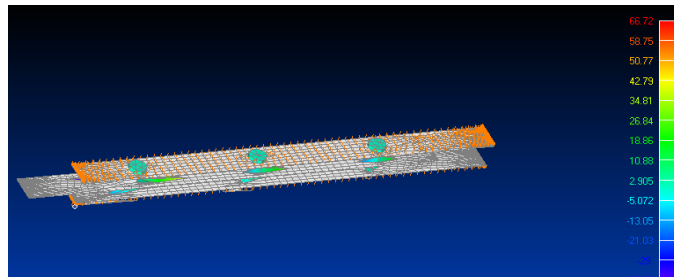


Рис.4. Стальные двухсрезовые болты $d = 5$ мм.

3. Рассмотрим трехслойное сечение, скрепляемое двухсрезовым стальным болтом диаметром $d = 6$ мм при толщине композита $h = 5$ мм. Аналитический расчет показал, что в болте $\tau_{cp} = 69$ кгс/мм², расчет МКЭ показал $\tau_{cp} = 78$ кгс/мм² (рис.5). Погрешность расчета составила 8%.

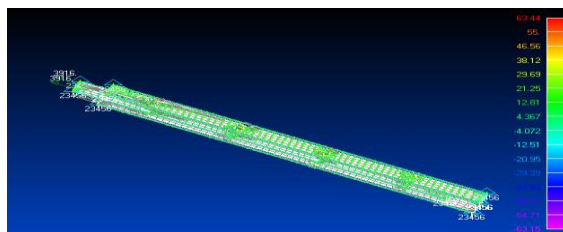


Рис.5. Стальные двухсрезовые болты $d = 6$ мм.

4. Рассмотрим трехслойное сечение, скрепленное двухсрезным титановым болтом диаметром $d = 6\text{ мм}$ при толщине композита $h = 10\text{ мм}$. Аналитический расчет показал, что в болте $\tau_{\text{ср}} = 62,5\text{ кгс/мм}^2$, расчет МКЭ показал $\tau_{\text{ср}} = 66\text{ кгс/мм}^2$ (рис.6).

Погрешность расчета составила 8%.

3.2. Расчет заклепочных соединений.

Алюминиевая двухсрезная заклепка из материала Д16П диаметром $d = 3,5\text{ мм}$ при толщине композита $h = 2\text{ мм}$.

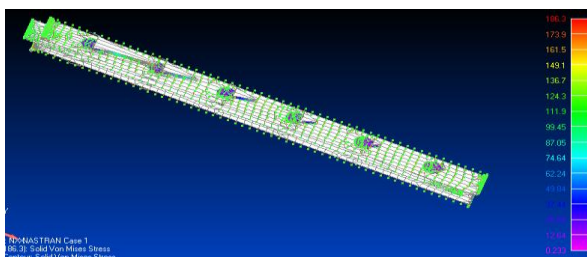


Рис.6 Титановые двухсрезные болты $d = 6\text{ мм}$.

Аналитический расчет показал, в заклепке $\tau_{\text{ср}} = 11,9\text{ кгс/мм}^2$, расчет МКЭ показал $\tau_{\text{ср}} = 14,8\text{ кгс/мм}^2$ (рис. 7).

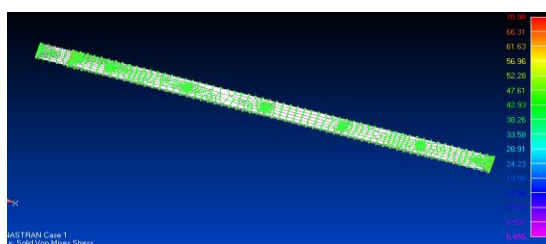


Рис.7. Двухсрезные заклепки $d = 3,5\text{ мм}$.

Для алюминиевой двухсрезной заклепки Д16П диаметром $d = 4,0$ мм при толщине композита $h = 2$ мм аналитический расчет показал, что в заклепке $\tau_{cp} = 12,8$ кгс/мм², расчет МКЭ показал $\tau_{cp} = 15$ кгс/мм² (рис. 8).

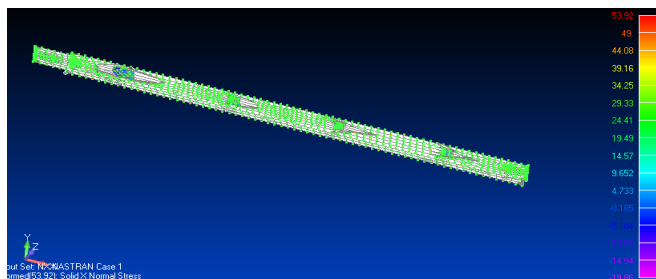


Рис.8. Двухсрезные заклепки $d = 4$ мм .

Заключение

В процессе выполнения работы были получены следующие результаты:

1. Проведенные расчеты по полученным формулам, показали эффективную точность расчета механического соединения деталей. Полученные формулы позволяют определить зону включения в работу для болтовых и заклепочных соединений.

2. Зона включения в работу зависит от толщины соединения деталей и свойств материала.

3. Полученные соотношения позволяют определить количество рядов соединительных элементов, диаметр болтов и шаг между болтами.

4. Произведено сравнение аналитических результатов расчета с результатами МКЭ и показано хорошее совпадение результатов.

Библиографический список.

1. Ендогур А.И., Кравцов В.А., Солошенко В.Н. Принципы рационального проектирования авиационных конструкций с применением композиционных материалов // Труды МАИ, 2014, №72:
<http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=47572>
2. Ежов А.Д. Определение контактного термического сопротивления пары: композиционный материал С-Si-C и титановый сплав // Труды МАИ, 2015, №82:
<http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=58728>
3. Макаров А.Ф., Громов В.Ф., Дунаев В.В., Еремин М.В., Макаров П.А. Работоспособность на сдвиг предварительно напряженных болтовых соединений // Вестник Московского авиационного института. 2012. Т.19. №3. С. 15-18.
4. Дудченко А.А., Резниченко В.И. Расчет и экспериментальная проверка прочности игольчатых соединений деталей из композиционных материалов. - М.: ВИМИ, № 1-2, 1997. С. 68-78.
5. Васильев В.В., Дудченко А.А., Елпатьевский А.Н. Об особенностях деформирования ортотропного стеклопластика при растяжении // Механика полимеров. 1970. № 1. С. 144-147.
6. Лещин А.В., Попов Ю.И. Конструирование узлов планера самолета. - М.: МАИ, 1992. - 104 с.
7. Шимкович Д.Г. FEMAP& NASTRAN. Инженерный анализ методом конечных элементов – М.: ДМК Пресс, 2008. – 704 с.