

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В КЛЕЕВОМ СЛОЕ СОЕДИНЕНИЯ ПОЛКИ С ЗАПЛЕЧИКОМ КОМПОЗИТНОГО ЛОНЖЕРОНА

Одной из возможных форм разрушения лонжеронов из полимерных композиционных материалов является разрушение соединения полок со стенкой под действием касательных напряжений, возникающих при поперечном изгибе балки. Согласно упрощенной расчетной схеме балки, применяемой в работах [1, 2], касательные напряжения в клеевом слое определяются формулой

$$\tau_{xy} = \frac{Q_y}{H_{\text{эф}} b_n}, \quad (1)$$

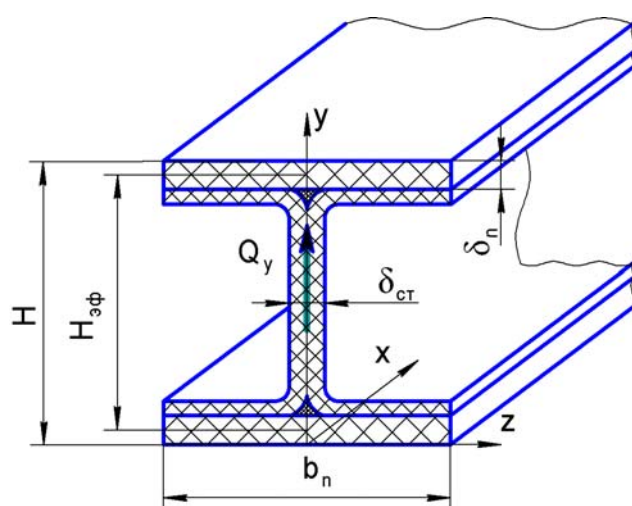


Рисунок 1 – Сечение композитного лонжерона

где Q_y – поперечная сила;
 $H_{\text{эф}}$ – эффективная высота балки (рис. 1);
 b_n – ширина полки.

Тогда из условия прочности соединения полки с заплечиком стенки ширина полки лонжерона должна удовлетворять неравенству

$$b_n \geq \frac{Q_y}{H_{\text{эф}} [\tau]},$$

где $[\tau]$ – допустимые касательные напряжения в клеевом слое.

Следует, однако, отметить, что формула (1) была получена при допущении о равномерности распределения касательных напряжений по ширине соединения. В то же время известно, что распределение касательных напряжений при поперечном изгибе балки может отличаться от равномерного в местах резкого изменения ее ширины [3]. В связи с этим актуальным является определение касательных напряжений в соединении полки с заплечиком в трехмерной постановке с использованием метода конечных элементов (МКЭ), что позволит оценить возможность применения формулы (1) при определении потребной ширины соединения.

Расчет касательных напряжений в соединении полки с заплечиком МКЭ проводился в среде конечно-элементного анализа SolidWorks Simulation 2009. Для проведения анализа использовалась трехмерная модель участка лонжерона двутаврового сечения длиной 1000 мм.

Параметры исследуемого лонжерона: $b_B = b_H = b_n = 100$ мм; $\delta_B = \delta_H = \delta_n = 15$ мм; $\delta_{CT} = 4$ мм; $R = 2$ мм; $l = 1$ м; $H = 300$ мм (рис. 2). Физико-механические характеристики материалов полок и стенки в местных системах координат (рис. 3) представлены в табл. 1.

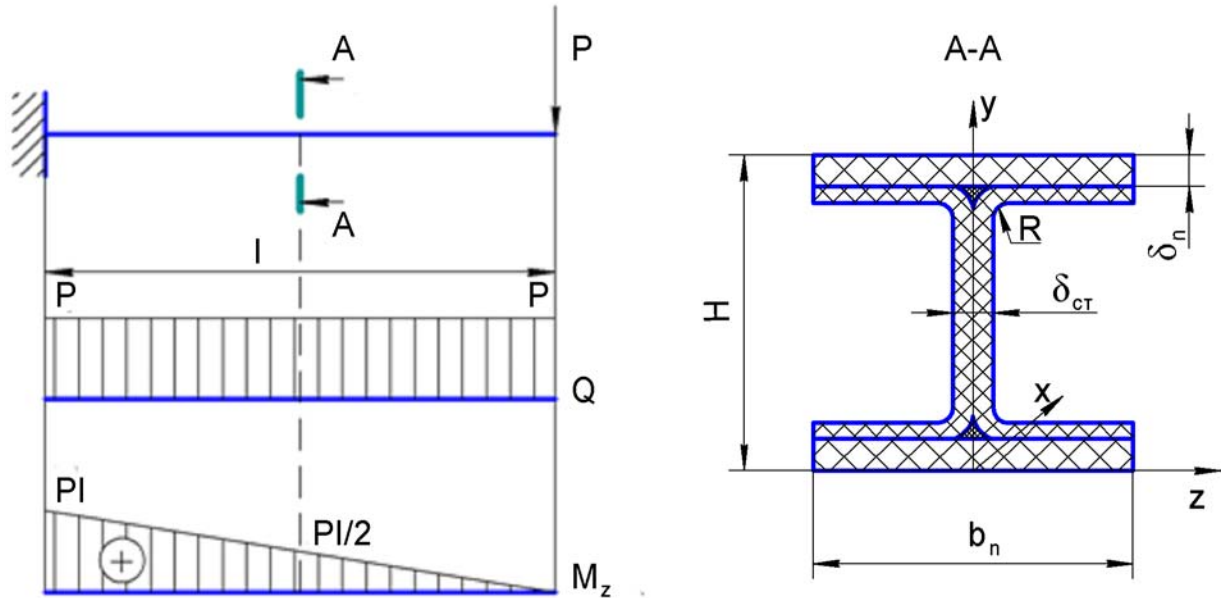


Рисунок 2 – Схема исследуемого лонжерона

Ввиду симметрии лонжерона относительно плоскости x - y моделировалась только одна его половина с наложением условий симметрии на соответствующие грани модели.

Исследуемый участок лонжерона был жестко закреплен по одному из торцов, а к другому прикладывалась распределенная сила, величиной 20 кН, (см. рис. 2).

Для исключения влияния краевых эффектов, длина участка лонжерона была выбрана достаточной для их затухания в среднем сечении, в котором проводился анализ касательных напряжений.

Для моделирования использовались 10-узловые тетраэдральные конечные элементы высокого порядка с квадратичной

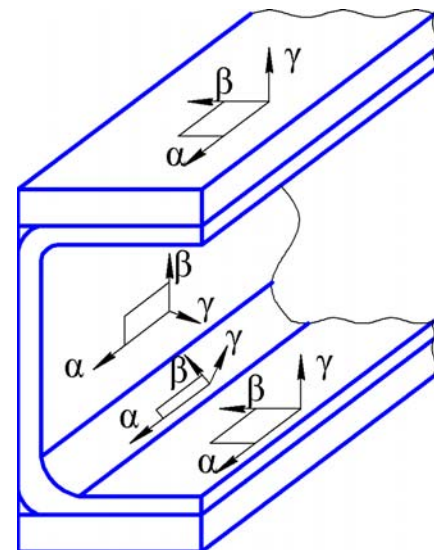


Рисунок 3 – Направление осей местной системы координат для полок и стенки с заплечиками

аппроксимацией перемещений (сетка высокого качества в SolidWorks Simulation). Такие конечные элементы обеспечивают более высокую точность моделирования, особенно в зонах с быстрым изменением компонентов НДС, по сравнению с элементами низкого порядка с линейной аппроксимацией перемещений. На рис. 4 показана исследуемая модель участка лонжерона, разбитая на конечные элементы.

Таблица 1 – ФМХ материалов полок и стенки

Материал	Свойства материала								
	E_{α} , ГПа	E_{β} , ГПа	E_{γ} , ГПа	$G_{\alpha\beta}$, ГПа	$G_{\alpha\gamma}$, ГПа	$G_{\beta\gamma}$, ГПа	$\mu_{\alpha\beta}$	$\mu_{\alpha\gamma}$	$\mu_{\beta\gamma}$
Полка	100	10	10	6	6	6	0,35	0,35	0,2
Стенка	20	20	10	26,1	6	6	0,663	0,2	0,2

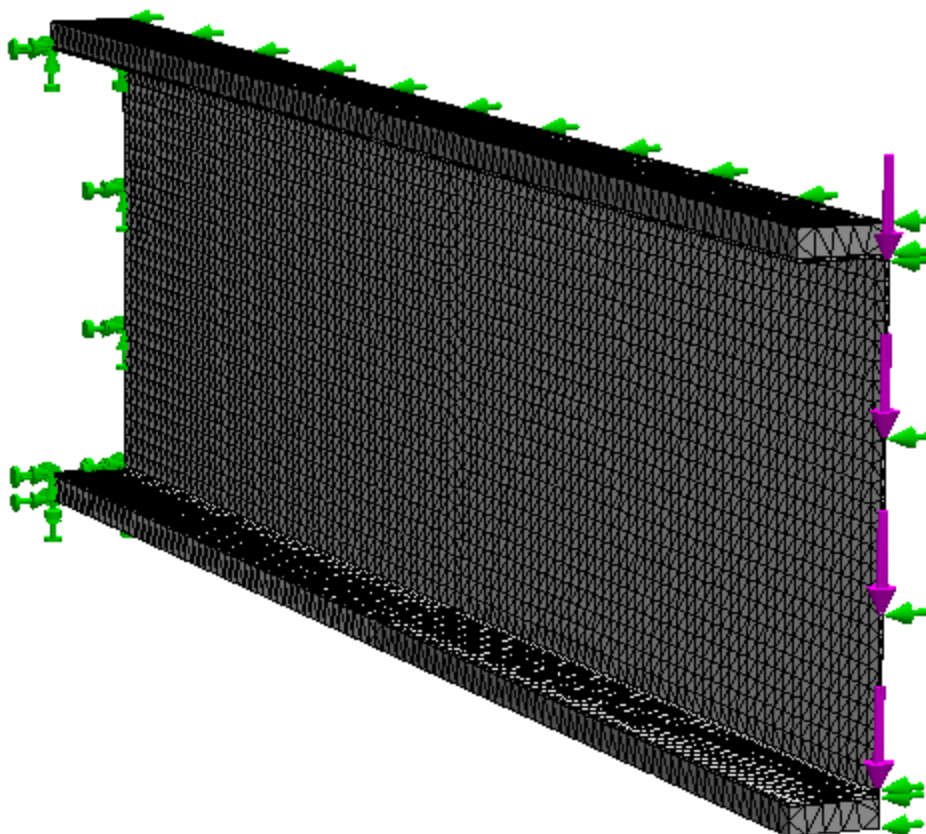


Рисунок 4 – Модель участка лонжерона, разбитая на конечные элементы

На рис. 5 изображено распределение касательных напряжений τ_{xy} по ширине полки в среднем сечении лонжерона. Как видно из полученного графика, распределение касательных напряжений τ_{xy} по ширине клеевого соединения полки с заплечиком является неравномерным и резко возрастает в районе перехода стенки к заплечику.

Поскольку расчет на прочность клеевого соединения полки с заплечиком необходимо проводить по максимальным значениям касательных напряжений $\tau_{xy\max}$, при проектировании лонжерона рекомендуется проводить поверочный расчет с помощью МКЭ.

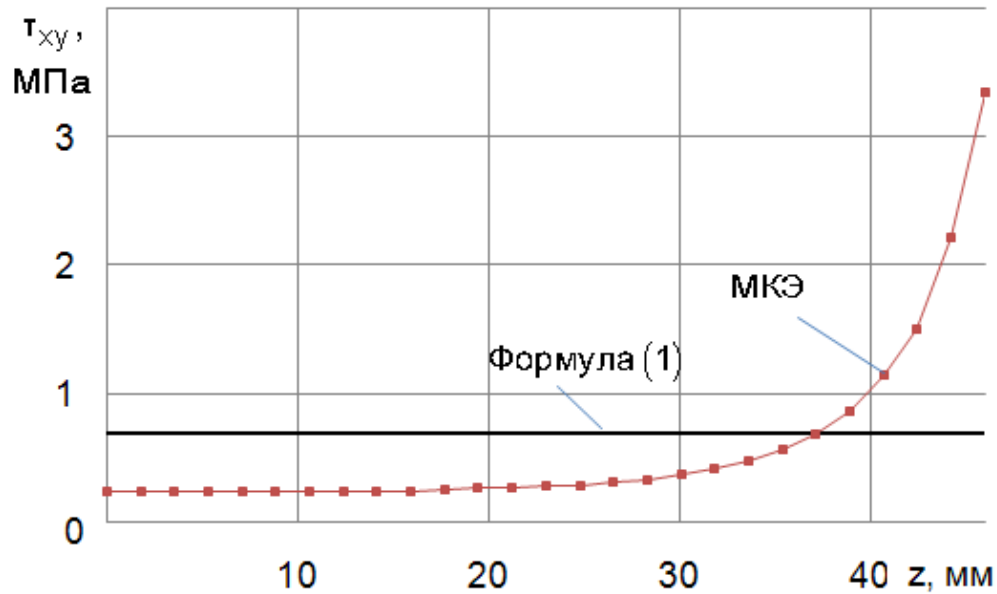


Рисунок 5 – Распределение касательных напряжений по ширине полки лонжерона

Для исследования концентрации напряжений τ_{xy} в месте перехода стенки к заплечу в зависимости от разных значений радиуса скругления R (см. рис. 3), а также разных способов заполнения «треугольника» (пенопласт, эпоксидное связующее или углежгут) проведены исследования с помощью МКЭ, результаты которых представлены на рис. 6 и в табл. 2. Общий вид распределения напряжений τ_{xy} показан на рис. 7.

Таблица 2 – Сравнение максимальных напряжений при разных радиусах скругления и заполнителях

Заполнитель	$\tau_{xy\max}$, МПа				
	$R = 0$ мм	$R = 2$ мм	$R = 4$ мм	$R = 6$ мм	$R = 8$ мм
Пенопласт	6,2973	3,76	3,6245	3,7418	3,5757
Смола	6,2973	3,3912	3,1987	2,708	2,5596
Жгут	6,2973	3,2562	2,8359	2,544	2,3112
Формула (1)	0,7017				

Как видно из табл. 2 и рис. 6, радиус скругления перехода стенки к заплечу значительно влияет на концентрацию касательных напряжений и при увеличении его $\tau_{xy\max}$ снижается.

При отсутствии скругления перехода стенки к заплечу (рис. 7, а), что на практике практически никогда не реализуется, максимальные напряжения $\tau_{xy\max}$ намного больше, чем при наличии скругления (рис. 7, б), что связано с большой концентрацией касательных напряжений.

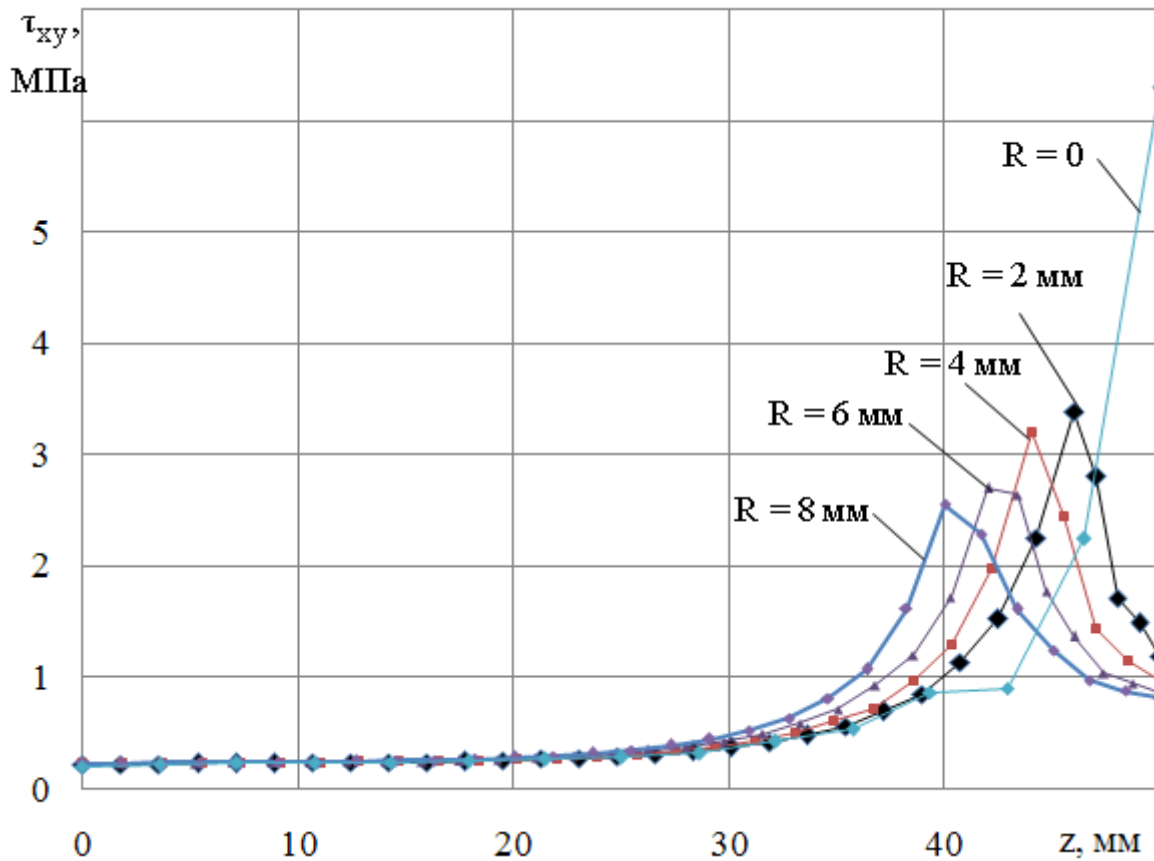


Рисунок 6 – Распределение касательных напряжений по ширине клеевого соединения с разными значениями радиуса скругления R

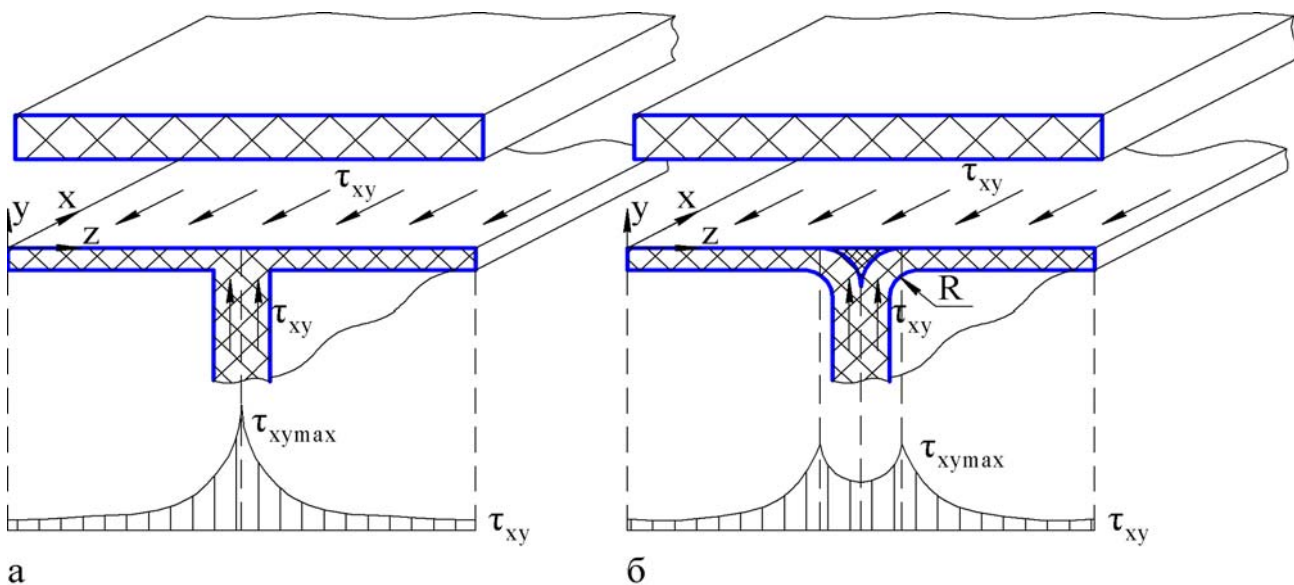


Рисунок 7 – Общий вид распределения касательных напряжений в соединении полки с заплечиками

Для более подробного анализа максимальных напряжений были построены их зависимости от ширины полки, полученные по формуле (1) и с помощью МКЭ (рис. 8).

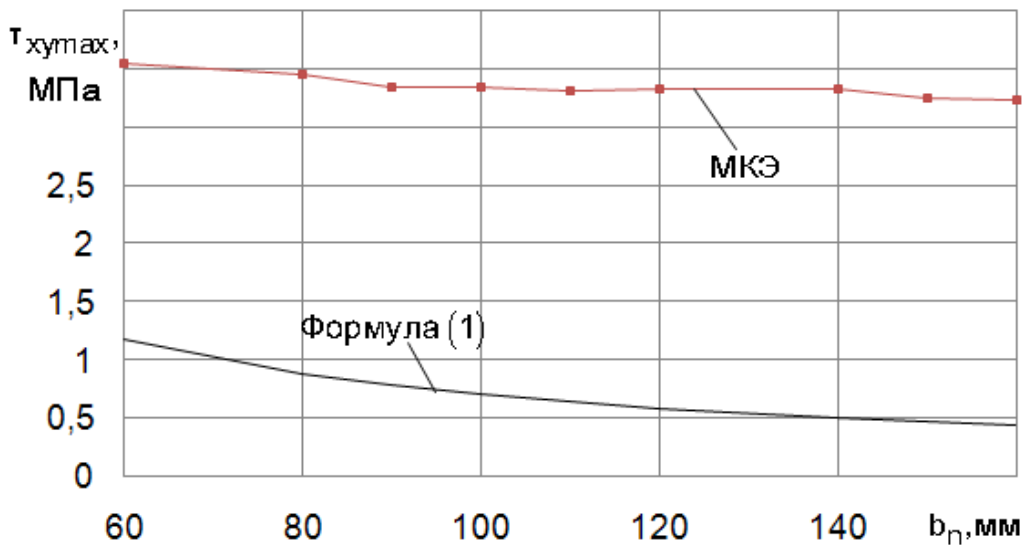


Рисунок 8 – Максимальные касательные напряжения при различных значениях ширины полки

По графикам рис. 8 видно, что максимальные касательные напряжения $\tau_{xy max}$ мало зависят от ширины полки в отличие от напряжений, определяемых по балочной теории (см. формулу (1)) (изменение напряжений не больше 8...9 % при изменении ширины полки в 2 – 3 раза). Поэтому, если условие прочности клея не выполняется, то увеличение ширины полки малоэффективно и необходимо применять другие конструктивные решения уменьшения концентрации касательных напряжений в районе «треугольника» перехода стенки к заплечику.

На рис. 9 показано несколько таких КТР снижения максимума τ_{xy} , основанных на разделении потоков касательных напряжений.

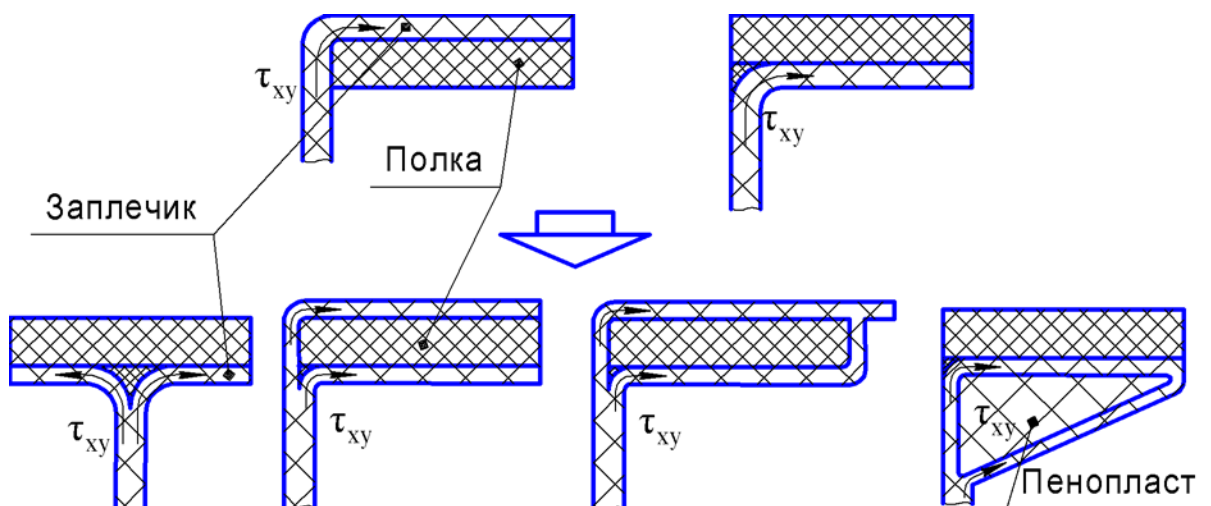


Рисунок 9 – КТР снижения концентрации напряжений в клеевом слое

Таким образом, проведенные численные исследования с помощью МКЭ и анализ полученных результатов позволяют сделать следующие выводы:

а) распределение касательных напряжений в соединении полки с заплечиком распределяются неравномерно по ширине соединения с максимальным значением вблизи стенки. При этом максимальное значение касательных напряжений для рассматриваемого лонжерона в 4 – 7 раз превышает значения, полученные с использованием балочной теории. В связи с этим при проектировании композитных лонжеронов рекомендуется проводить дополнительный расчет МКЭ для проверки прочности клеевого соединения полки с заплечиком;

б) максимальные напряжения в клеевом слое, полученные с помощью МКЭ, мало зависят от ширины полки в отличие от значений, полученных с использованием балочной теории. Таким образом, увеличение ширины соединения не является эффективным способом обеспечения прочности соединения полки с заплечиком. В связи с этим предложено несколько КТР снижения касательных напряжений для выполнения условия прочности клея;

в) проанализировано влияние радиусов скругления перехода стенки к заплечу и материалов заполнителя «треугольника», образованного переходом стенки в заплечики. Исходя из данных исследований можно дать рекомендации о том, что для уменьшения концентрации напряжений в клеевом слое необходимо соблюдать плавный переход от стенки к заплечу, т.е. увеличивать радиус скругления R . Показано также, что заполнение «треугольника» более жестким материалом, в рассматриваемом случае углеугутом, дает меньшие значения касательных напряжений в исследуемом соединении.

Список использованных источников

1 Карпов, Я.С. Проектирование и конструктивно-технологические решения балок и лонжеронов из композиционных материалов: учеб. пособие [Тест] / Я.С. Карпов, Ф.М. Гагауз, И.В. Лялюхина. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2010. – 124 с.

2 Карпов, Я.С. Методика проектирования лонжеронного крыла из композиционных материалов [Тест] // Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр. – Х.: Гос. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 1998. – Вып. 6. – С. 195 – 204.

3 Тимошенко, С.П. Механика материалов [Тест] / С.П. Тимошенко. – М.: Машиностроение, 1976. – 669 с.

Поступила в редакцию 01.03.2013.

*Рецензент: канд. техн. наук, проф. В.В. Кириченко,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*