

---

# Моделирование ступенчатого нахлесточного клеевого соединения стержня из ПКМ методом КЭ

В.С. Жернаков<sup>1</sup>, П.В. Соловьев<sup>1</sup>, С.Н. Никитин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Уфимский университет науки и технологии, Уфа

<sup>2</sup> АО «Институт технологии и организации производства» (АО НИИТ) Уфа.

Работы проводили в рамках научного исследования влияния термоциклических нагрузок на прочность клеевого ступенчатого соединения элементов конструкций из ПКМ. Рассмотрены результаты моделирования методом конечных элементов (МКЭ) ступенчатого нахлесточного клеевого соединения балки из полимерного композиционного материала (ПКМ) до и после теплосмен. Показано, что напряженное состояние распределено неравномерно вдоль клеевого шва. Ввиду наибольшей изгибной деформации разрушение клеевого соединения начинается с внешних слоев.

## Modeling a stepped lap adhesive bonding of a PCM rod using the FE method

V.S. Zhernakov<sup>1</sup>, P.V. Solovyov<sup>1</sup>, S.N. Nikitin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ufa University of Science and Technology" Ufa, Russia,

<sup>2</sup> JSC "Institute of Technology and Organization of Production" (JSC NIIT), Ufa, Russia.

The work was carried out within the framework of scientific work on the study of the influence of thermocyclic loads on the strength of the adhesive step connection of structural elements made of PCM. The results of modeling by the finite element method (FEM) of a stepped overlapping adhesive joint of a beam made of polymer composite material (PCM) before and after heat transfer are considered. It is shown that the stress state is distributed unevenly along the adhesive seam. In view of the greatest bending deformation, the destruction of the adhesive joint begins with the outer layers.

---

### 1. Введение

Клеевые соединения широко применяются в современном машиностроении. Одним из факторов, влияющих на прочность клеевого соединения – работа в условиях теплосмен. При работе в условиях теплосмен (термоциклирования) из-за разности коэффициента теплового расширения матрицы и армирующей составляющей происходит процесс накопления повреждений и в результате разупрочнение клеевого соединения [1]. Таким образом, одной из актуальных задач является определение упругих и прочностных характеристик изделия из ПКМ в условиях теплосмен. Работа по определению напряженно-деформированного состояния ступенчатого нахлесточного клеевого соединения стержня из ПКМ методом КЭ является этапом научной работы по изучению влияния термоциклических нагрузок на прочность клеевого ступенчатого соединения элементов конструкций из ПКМ.

МКЭ нашел широкое применение в практике проектирования клеевых соединений. Этим методом определяют возникающие максимальные напряжения. Целью расчета является определение напряженно-

деформированного состояния клеевого соединения, также визуализация картины напряжений с учетом снижения прочности после термоциклических нагрузок. Задачей расчета является определение опасных элементов конструкции изделия с клеевыми соединениями и проведение прогнозирования снижения прочностных характеристик по результатам моделирования [1].

### 2. Ключевая идея

Способом, описанным в [2–4], ранее изготавливали образцы ступенчатого нахлесточного клеевого соединения из стелопластика на основе стеклоткани Т10-14 и связующего ВСТ-1210 (производства ВИАМ). Проведены испытания образцов на теплосмены в диапазоне температур 50...200°С. Общее количество теплосмен (термоциклов) – 700. В ходе всего периода испытаний производились замеры модуля упругости образцов на растяжение при нормальной температуре. До и после теплосмен проводили прочностные испытания образцов. С целью анализа напряженно-деформированного состояния конструкции ступенчатого нахлесточного клеевого соединения балки проведено моделирование МКЭ.

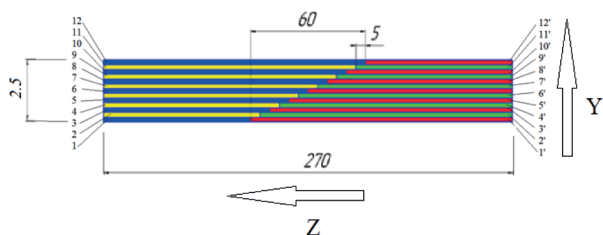


Рис. 1. Схема ступенчатого нахлесточного клеевого соединения пластин из ПКМ

Конечно-элементная модель (КЭМ) с учетом количества слоев и направления их выкладки формировалась с использованием специализированной программы Pre-Post, интегрированной в пакет Ansys Workbench. Модель создавалась последовательной укладкой всех слоев с направлением укладки нити основы –  $0^\circ$  по отношению к действующей силе. Геометрия модели образца соответствовала параметрам его реальной конструкции (рис. 1) [2; 3]. Ввиду малости толщины клеевого слоя, 0,005... 0,008 мм, его свойства отдельно не учитывались.

Шаг сетки 0,5 мм. Количество элементов в модели – 116 472, количество узлов в модели – 843 456. Произвели моделирование упругих, прочностных характеристик ступенчатого нахлесточного клеевого соединения ПКМ на основе стеклоткани Т10-14 и связующего ВСТ-1210 при комнатной температуре до и после теплосмен. Внешний вид клеевого стыка пакета слоев до приложения нагрузки представлен на рис. 2. Модель ступенчатого нахлесточного клеевого соединения состоит из 12 слоев. Длина клеевого шва составляет 60 мм, длина одной ступени в каждом слое – 5 мм. Растягивающая нагрузка прикладывается вдоль образца – вдоль оси z.

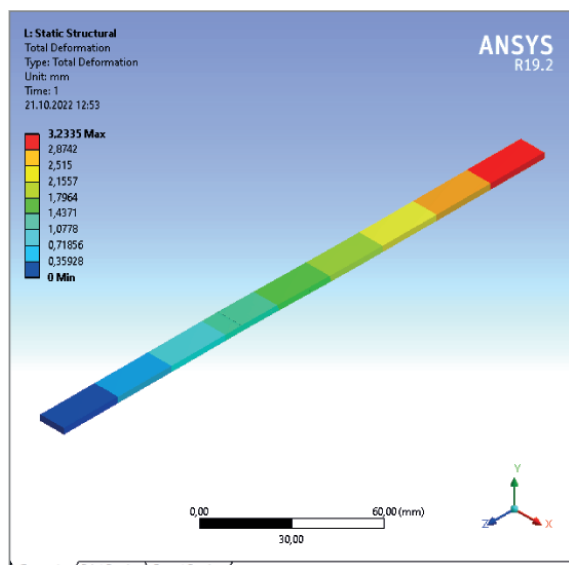


Рис. 2. Картина перемещения образца при разрушающей нагрузке

Таблица. Исходные характеристики ПКМ, граничные условия

Размеры клеевого соединения	
Толщина ПКМ, мм	2,5
Ширина клеевого соединения, мм	11
Общая длина клеевого соединения, мм	60
Длина клеевого соединения слоя, мм	5
Число слоев, мм	12
Структура укладки слоев в образце (по направлению нити основы)	0
Механические характеристики матрицы ВСТ-1210	
Плотность $\rho_B$ , г/см <sup>3</sup>	1,21
прочность на растяжение $\bar{\sigma}_M^+$ , МПа	70
модуль упругости $E_M$ , МПа	$3,0 \times 10^3$
коэффициент Пуассона $\nu_M$	0,4
коэффициент термического расширения $\alpha_M$	$35 \times 10^{-3}$ град <sup>-1</sup>
предельное удлинение при растяжении $\bar{\epsilon}_M^+$	2,5
Механические характеристики слоя стеклопластика	
коэффициент объемного содержания волокон $\psi_B$	0,6
плотность $\rho_B$ , г/см <sup>3</sup>	1,5
прочность на растяжение вдоль нити основы направления армирования $\bar{\sigma}_1^+$ , МПа	618
прочность на растяжение поперек направления армирования $\bar{\sigma}_2^+$ , МПа	309
модуль упругости вдоль армирования $E_1$ , МПа	$33,4 \times 10^3$
модуль упругости поперек армирования $E_2$ , МПа	$14,7 \times 10^3$
модуль сдвига $G_{12}$ , МПа	$5 \times 10^3$
коэффициент Пуассона $\nu_{12}$ (нагружение в направлении армирования)	0,29
Коэффициенты линейного расширения КМ (вдоль и поперек волокон)	$5,5 \times 10^{-3}$ $12 \times 10^{-6}$
Граничные условия	
Напряжение разрушения в сечении (при растягивающая нагрузка 13,2 кН) действующее на образец клеевого МПа соединения в модели МПа	480
Нумерация слоев в математической модели идет снизу вверх вдоль оси y	–
Жесткая заделка (fixed support) без трения по наружной поверхности образца	–

Картина деформационных перемещений (рис. 3) и напряжения получена при действии растягивающей силы в 12 кН. Определены суммарные деформационные перемещения. Деформация растяжения вдоль оси z составила 3,24 мм, деформация изгиба вдоль оси y составила 0,17 мм. Получены и анализируются картины распределения эквивалентных напряжений в композиционном материале послойно. Деформация, представленная на рис. 3, соответствует напряжению

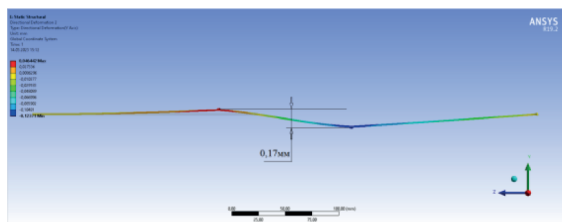


Рис. 3. Поперечная деформация образца (вдоль оси  $y$ ) под действием растягивающих сил 12 кН

растяжения 480 МПа (разрушения). Продольная деформация образца (рис. 3,а) вдоль оси  $z$  – 2,91 мм поперечная деформация (рис. 3,б) вдоль оси  $y$  – 0,17 мм. Для визуального эффекта деформация увеличена в 100 раз. Расчет конструкции ступенчатого нахлесточного клевого соединения на данном этапе выполнен без учета температурного воздействия.

В клеювом слое реализуется неоднородное напряженное состояние. Напряжения по толщине пакета слоев и напряжения отдельно в клеювой ступени слоя распределяются неравномерно (рис. 4.). В каждой ступени (длиной 5 мм) касательное напряжение распределено также неравномерно, изменяется от минимального до максимального.

Касательные напряжения в слоях имеют максимальные значения на стыках. На контактную поверхность между волокном и матрицей действует одновременно касательные и нормальные напряжения. Максимальные касательные напряжения находятся вблизи конца нахлестки и имеют тот же порядок, что и нормальные напряжения (по оси  $y$ ).

Как показано на модели (см. рис. 3), нагрузка приложена с эксцентриситетом и связанный с ним момент вызывает изгиб образца. В связи с этим наибольшие напряжения изгиба возникают на поверхности образца, что ведет к разрушению внешнего слоя (рис. 5,а).

Максимальное нормальное напряжение (изгиба) при разрушающей нагрузке в слое №1-1 достигает 383 МПа. При этом в срединной части пакета (слой

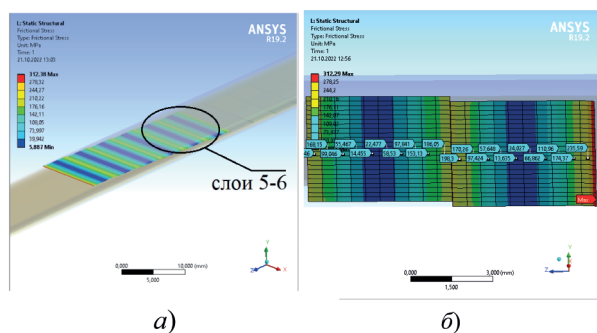
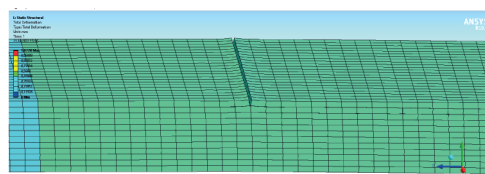
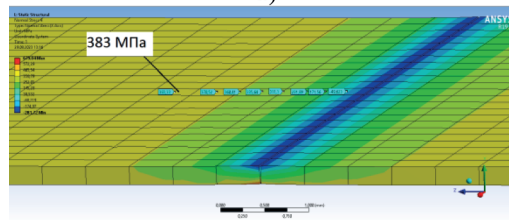


Рис. 4. Распределение касательных напряжений: а – вдоль всего клеювого соединения; б – вдоль стыка слоев 5–6



а)



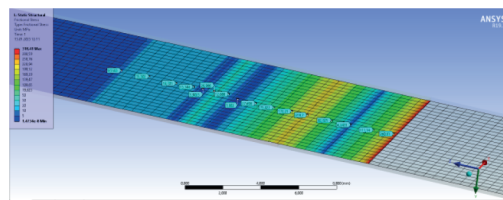
б)

Рис. 5. Деформация слоя № 1-1 при разрушении от растягивающей силы 13,2 кН (а). Нормальные напряжения в слое № 1 (по оси  $z$ ) – 383 МПа (б)

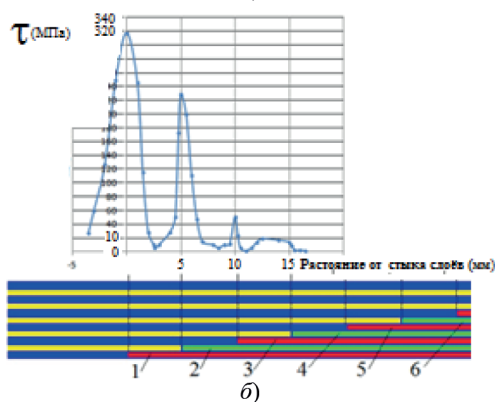
№ 6) клеювого соединения нормальное максимальное напряжение – 225 МПа.

Распределение касательных напряжений вдоль клеювого слоя неравномерно. (рис. 6.) Как видно из расчета, максимальное значение касательного напряжения возникает на стыке внешних слоев № 1-1. Пики максимумов напряжений возникают в местах стыков второго и далее других слоев. При этом пики максимумов касательных напряжений уже не имеют таких значений, как первые слои.

Аналогичная картина распределения касательных напряжений вдоль слоя № 6. С разницей положения максимума касательного напряжения и меньшей



а)



б)

Рис. 6. Распределение касательных напряжений вдоль слоев №1-1 при разрушающей нагрузке до термоциклирования

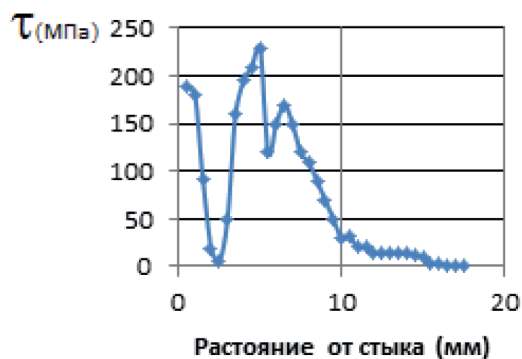


Рис. 7. Распределение касательных напряжений вдоль слоя № 1

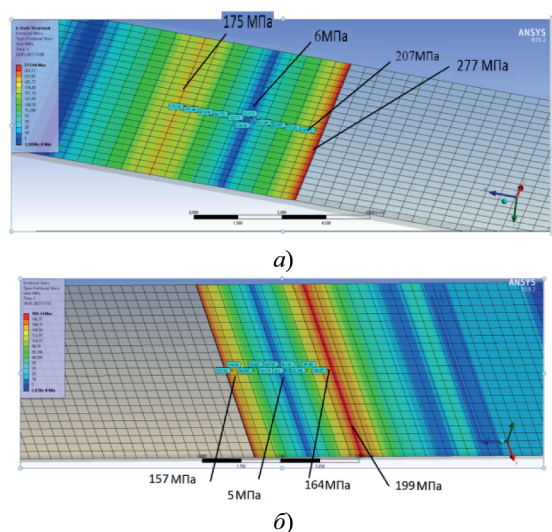


Рис. 8. Модуль упругости образца  $E = 32,0$  ГПа,  $\sigma_2^+ = 400$  МПа, напряжение в образце при разрушении растягивающей силы 11 000 Н.  
 $a - \tau_{\max} = 277$  МПа в слое № 1,  $b - \tau_{\max} = 199$  МПа в слое № 6

величины, приходится на стык соседнего слоя (рис. 7). Причина снижения максимума разности в том, что действующая нагрузка на образце передается внутренним слоям через наружные слои, т.е. наружные слои более нагружены.

Моделирование с характеристиками после теплосмен ожидаемо показало снижение значений касательных напряжений вдоль слоя.

### 3. Заключение

Распределение касательных и нормальных напряжений в ступенчатом нахлесточном клеевом

соединении неравномерно как по глубине пакета слоев, так и вдоль слоя. Максимальная неравномерность распределения касательных напряжений в наружном слое составляет до 55 раз, во внутренних слоях – до 45 раз.

Проведенное моделирование позволяет визуализировать места снижения прочности клеевых соединений в конструкции из ПКМ по итогам термоциклирования, выявить зоны концентрации напряжений в слоях, в местах состыковок слоев. Также позволяет прогнозировать в первом приближении усилие разрушения при проектировании изделий, работающих в условиях теплосмен.

Для дальнейшего увеличения точности моделирования необходимо снизить шаг сетки и отдельно учитывать свойства клевого слоя с учетом разрушения и последующего перераспределения напряжений.

### 4. Список использованных источников

- [1]. Петрова А.П., Малышева Г.В. Клеи, клеевые связующие и клеевые препреги: учебное пособие / под общей редакцией Каблова Е.Н. М.: ВИАМ, 2017. 472 с.
- [2]. Прочность клевого соединения при термоциклических нагрузках / В.С. Жернаков, А.Н. Ермоленко, В.Л. Юрьев, С.Н. Никитин // Международная научно-техническая конференция по авиационным двигателям ICAM 2020 : сборник тезисов. М.: ЦИАМ им. П.И. Баранова, 2020. С. 546–548.
- [3]. Результаты исследований образцов клеевых соединений, прошедших термоциклические испытания / В.С. Жернаков, А.Н. Ермоленко, И.Г. Каримов, С.Н. Никитин // Российская научно-техническая конференция «Мавлютовские чтения», Уфа, 23 Марта 2021 г. Тезисы доклада. Уфа, 2021.
- [4]. Способ изготовления рабочего колеса центробежного компрессора из композиционного материала : патент RU 2 652 269 C2 / Никитин С.Н., Ахметов А.М., Юрьев В.Л., Грибановский В.А., Жернаков В.С.; патентообладатель АО НИИТ. Заявка № 2016107247, 29.02.2016 ; опубл. 25.04.2018. Бюл. 12. 16 с.